

Contributions à une approche patrimoniale de la voie ferrée de tramway

Xavier Morize

▶ **To cite this version:**

Xavier Morize. Contributions à une approche patrimoniale de la voie ferrée de tramway. Infrastructures de transport. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC1018 . tel-03291396

HAL Id: tel-03291396
https://pastel.hal.science/tel-03291396

Submitted on 19 Jul 2021

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.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

ECOLE DOCTORALE VILLE, TRANSPORTS ET TERRITOIRES

Spécialité : Transport

Xavier MORIZE

CONTRIBUTIONS A UNE APPROCHE PATRIMONIALE POUR LA VOIE FERREE DE TRAMWAY

Thèse dirigée par Fabien LEURENT

Soutenue publiquement le 9 juin 2020 devant le jury composé de :

M. Patrice AKNIN	Directeur de recherche à l'IRT SystemX	Président du Jury
M. Jean-Pascal FOUCAULT	Enseignant-chercheur contractuel à l'UTC	Examinateur
Mme. Natacha GONDRAN	Professeur aux Mines de Saint-Etienne (HDR)	Rapporteur
Mme. Katia LAFFRECHINE	Maître de conférences à l'Université Gustave Eiffel	Examinateur
M. Fabien LEURENT	Professeur à l'Ecole des Ponts ParisTech (HDR)	Directeur de thèse
Mme. Aurélie MERCIER	Maître de conférences à l'Université Lumière Lyon 2	Examinateur
M. Gilles PARMENTIER	Directeur Systèmes urbains à ARTELIA	Invité
M. Laurent PEYRAS	Directeur adjoint de recherche à l'IRSTEA (HDR)	Rapporteur

Cette thèse a été préparée au Laboratoire Ville Mobilité Transport, unité mixte de recherche (UMR-T 9403) entre l'Ecole des Ponts ParisTech, l'IFSTTAR et l'UPEM

La présente thèse a bénéficié d'une convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE) de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) avec ARTELIA, l'Ecole des Ponts ParisTech et le Laboratoire Ville Mobilité Transport (LVMT).







RESUME

Le tramway en tant qu'équipement de transport est marqué par une intensité capitalistique importante. A l'approche de 2020, pour plusieurs métropoles françaises les systèmes construits depuis la décennie 1980 arrivent au terme d'un premier cycle de vie. Aussi, le tramway en tant que patrimoine invite au bilan technique et économique de ses infrastructures.

Le contexte des infrastructures de tramway est assimilable à celui d'un parc d'ouvrages fonctionnellement homogènes qui présente des compositions différentes en nature et en assemblage, dans des situations contextuelles souvent particulières. Les infrastructures ne sont pas immuables : le stock se dégrade inévitablement sous l'effet du vieillissement alors que les parades d'entretien sont limitées et le renouvellement est coûteux et contraignant. La gestion des infrastructures est fondée sur des inspections visuelles et le jugement expert pour la planification des actes d'entretien et de renouvellement. En pratique, le processus décisionnel est encore balbutiant : l'expertise est disparate et peu formalisée ; les retours d'expérience sont limités ; l'appareil statistique est insuffisant ; la gestion des renouvellements ne fait pas l'objet d'une méthodologie systématique.

La thèse contribue au développement d'une gestion patrimoniale pour la voie ferrée de tramway, en apportant une formalisation du problème gestionnaire spécifique ainsi que des éléments de méthode pour les principaux aspects d'une approche patrimoniale. A cette fin, elle mobilise des outils de diverses disciplines : analyse systémique, approche technique, approche gestionnaire, analyse statistique, évaluation socio-économique.

Par une analyse systémique, nous caractérisons le « système de la voie ferrée de tramway » en tant que patrimoine, ainsi que ses conditions d'évolution. Nous présentons de manière structurée la composition du système technique dans sa complexité. Nous posons un diagnostic global du problème posé par son vieillissement. Il en résulte un repérage des facteurs importants qui sont en cause et des leviers d'action en nombre limité.

Nous développons ensuite une méthode technique de diagnostic d'état de la voie ferrée, en identifiant les facteurs importants et en les traduisant sous la forme d'une famille de critères techniques. L'inspection sur le terrain de ces différents critères, permet d'alimenter un outil de diagnostic : un système d'information géographique dont l'objectif est de standardiser et d'améliorer l'archivage dans le temps et dans l'espace des données sur l'état physique des installations. La réitération du diagnostic permet de prévoir les besoins de renouvellement, section par section. Nous appliquons une modélisation statistique de l'âge au renouvellement sur un site français : les lignes de tramway de l'agglomération grenobloise. Cette application renseigne sur les âges fatidiques et constitue un retour d'expérience original.

L'outil de prévision ainsi développé permet d'estimer les besoins de renouvellement ainsi que les enveloppes budgétaires nécessaires à long terme. Nous situons les coûts associés dans une évaluation socio-économique

des coûts et les avantages pour des tactiques gestionnaires différenciés. Cette dernière contribution méthodologique fournit des indications claires concernant tant l'influence de la géométrie sur les coûts de possession, que l'impact du chantier sur les coûts du renouvellement d'un système intégré dans un environnement urbain.

Les résultats obtenus permettent d'alimenter les réflexions tant pour la conception de nouvelle ligne que pour le choix du mode opératoire de travaux.

Mots clés : gestion patrimoniale, analyse systémique, infrastructure, renouvellement, analyse coût-avantage, transport urbain, voie ferrée,

ABSTRACT

In France, after the most of the tram systems were dismantled between 1950 and 1960, a new generation emerged, starting in 1985 (Nantes), and subsequently rolled out in many cities (Grenoble, Paris, Rouen, Strasbourg, Orléans, Montpellier, Lyon, etc.). Today, although other tramline projects are under consideration, the implementation of new tramlines is in decline. In parallel, the oldest segments of tramlines are reaching the end of their life span and infrastructure owners are now thinking about renewing their networks and in particular the track infrastructures. Indeed, because the tram mode is highly urban, if a line is located in a transport corridor, operators face considerable costs to keep transport running. While tramlines are in principle very long lasting and low maintenance, track renewal has its downsides: it is costly and tricky to carry out in urban conditions.

This makes tramline renewal an important topic of asset management for the equipped cities, their transit agencies and network operators. It is good practice to anticipate the needs for renewal all along the tram network, by monitoring the actual physical state of rail wear and identifying the sections for which medium-term maintenance actions (i.e. overlays/grinding) is no longer appropriate and must give way to long-term maintenance (i.e. renewal).

The context of tramline infrastructure can be likened to functionally homogeneous structures with different compositions in nature and assembly, often dependant on contextual situations. Infrastructures are not immutable: the stock inevitably deteriorates as a result of ageing, while maintenance is limited and renewal is costly and restrictive. Infrastructure management is based on visual inspections and expert judgment in planning maintenance and renewal decisions. In practice, the decision-making process is still in its infancy: expertise is disparate and not very formalized; feedback is limited; statistical practice is insufficient; and renewal management is not subject to a systematic methodology.

The thesis contributes to the development of asset management for tramlines, by formulizing the main technical and managerial issues for a long-term approach. To this end, it mobilizes tools from various disciplines: systemic analysis, technical approach, managerial approach, statistical analysis and socio-economic evaluation. Through a systemic analysis, we characterize the system and its conditions of evolution. We present in a structured way the composition of the technical system in its complexity. We make a global diagnosis of the problem posed by its ageing. The result is an identification of the important factors of the physico-chemical mechanisms caused by ageing of the track, the associated risks and mitigation techniques.

We then developed a method for the diagnosis of tram track condition, identifying main factors and translating them into a family of technical criterias. The field inspection of these criterias provides input for our geographic information system whose objective is to standardize and improve the data inventory in time and space on the physical condition of track elements. The reiteration of the diagnosis makes it possible to forecast renewal needs, section by section. We also contribute to the anticipation of tramline

renewal needs by providing analytical methods based on empirical data from two trams lines in the French city of Grenoble. It brings about, first, an analysis of the technical lifetimes of track elements and, second, a method to forecast renewal needs and integrate them in a long-term schedule of budget expenditure. We situate the associated costs in a cost-benefit analysis for different kinds of renewal tactics. This last methodological contribution provides clear indications concerning both the influence of geometry on ownership costs and the impact of the work procedure on renewal cost in an urban environment.

The final results provide food for thought both for the design of a new tramline and for the choice of the renewal tactic.

Key words: asset management, systemic analysis, infrastructure, renewal, cost-benefit analysis, urban track, tramline,

REMERCIEMENTS

Cette thèse a bénéficié d'un cadre de travail unique. A la fois membre d'un laboratoire et ingénieur dans un bureau d'études, j'ai eu la chance de pouvoir cheminer entre deux univers passionnants : celui de la recherche et celui de l'ingénierie. J'y ai côtoyé des personnes admirables qui m'ont accompagné et soutenu à des degrés divers et variés. Je souhaite ici leur adresser ma plus sincère gratitude.

Merci avant tout à Fabien Leurent pour avoir accepté de diriger ces travaux et pour la qualité de ses enseignements scientifiques. Assis à sa table ronde, j'ai appris énormément sur la nature chaotique du monde et aussi à écrire une thèse, ou plutôt à réécrire, refaire ou reprendre des choses quasi, presque, ou bientôt terminées.

Merci aux membres du jury. Merci à Natacha Gondran et Laurent Peyras d'avoir accordé du temps à la lecture de mes travaux et à la rédaction d'un pré-rapport de soutenance ainsi qu'à Patrice Aknin, Jean-Pascal Foucault, Katia Laffrechine et Aurélie Mercier d'avoir bien voulu intégrer ce jury. C'est un honneur pour moi d'avoir pu échanger avec des scientifiques de votre excellence.

Un grand merci à Artelia pour m'avoir fait bénéficier d'un excellent environnement. L'inépuisable expertise métier des équipes de Gilles Parmentier et de Frédéric Ghoulmié a été le point de départ de mes réflexions. Et c'est leur soutien, tout aussi inépuisable, qui m'a permis de les mener à terme. Un merci tout particulier à Yoann, Amélie, Elie, Luc, Pierre et Maxime pour avoir égayé mes journées.

Merci à mes deux comparses de bureau, Luc et Jaâfar, pour les rires partagés et le joyeux bordel qui y régnait. Je remercie également Biao et Louis pour m'avoir montré qu'un autre bureau était possible.

Merci à la team des coureurs du LVMT : Alexis, Anne et Laurent surtout, c'était vraiment chouette ; les autres, fallait courir plus vite.

Merci à la team Thé de m'avoir invité quelque fois en Guest mais pas que non plus : Aude, Maylis, Delphine, Julie P, Josette… et aussi merci à la team Passerelle, Teddy et Kei surtout, pour toutes nos pauses coordonnées.

Merci à Marianne et Mariane. Merci aux soirées LVMTiennes. Merci à cette ambiance à la fois cool, studieuse et bienveillante.

Merci au MRS et à toute l'équipe du secrétariat Sandrine et Sandrine, Sophie, Virginie : le cœur du LVMT. Merci à toutes les autres grandes figures de mon labo que je n'ai pas eu le temps de citer : Bachar, Liu, Manu, Julie C, Laurent P, Emre, Mallory, Nicolas, Gonçal, Paolo, Christophe, Laetitia, Florent, Caroline, Sandrine W et Leslie.

Merci aux 3 Grâces.

Merci à la team Pétanque, j'ai hâte de reprendre…et j'en profite pour remercier spécialement Benoît du très beau jeu qu'il a montré à la saison dernière.

Merci tout particulier à mes cobayes du quotidien Bisous, Chinois et Alice. Vous m'avez apporté une énergie et un soutien incroyable au cours de ces cinq années de thèse.

Merci à tous les membres du Bataillon : restez comme vous êtes.

Merci aux weekends de l'ambiance. Merci à la déconfiture. Merci à l'UTC.

Merci à pizza wawa et à mes amis les plus importants, les plus beaux et les plus intelligents. Ils se reconnaitront.

Merci à ma famille. Merci à mes parents et à mes sœurs pour votre soutien inconditionnel. Merci spécial à ma grande sœur Ingrid pour ses encouragements illimités et pour avoir été avec son mari les bienfaiteurs éclairés de ma fin de thèse en offrant des conditions de rédaction qu'aucun thésard n'aurait pu rêver.

Une pensée à mes neveux Léandre et Marceau qui n'auront donc aucune excuse pour ne pas travailler à la maison.

Enfin, une pensée à mes aïeux et particulièrement à Mamie Françoise.

TABLE DES MATIERES

RESUME ____ V

ABSTRACT ____ VII

REMERCIEMENTS ____ IX

INTRODUCTION GENERALE ____ 1

Chapitre 1 **Le tramway, un système technique complexe 7**

1.1. L'infrastructure de tramway 8

1.1.1. La voie ferrée 8

1.1.2. Les appareils de voie 16

1.1.3. Les ouvrages ponctuels de génie civil 18

1.2. Les matériels roulants et véhicules d'intervention 18

1.2.1. Agencement du tramway Citadis d'Alstom 19

1.2.2. Les bogies 20

1.2.3. Les équipements techniques de confort 20

1.2.4. Les équipements techniques de traction 20

1.2.5. Les équipements techniques de freinage 22

1.2.6. Les équipements techniques « auxiliaires » 23

1.2.7. Les véhicules de service ou d'intervention 23

1.3. Le réseau électrique de traction 24

1.3.1. Les sous-stations de redressement 25

1.3.2. La ligne aérienne de contact 26

1.3.3. L'Alimentation par le sol 28

1.3.4. Le retour de courant de traction et les courants vagabonds 29

1.4. La signalisation tramway 30

1.4.1. La signalisation de manœuvre 30

1.4.2. La signalisation de limitation de vitesse 31

1.4.3. Système de commande en mode dégradé 31

1.4.4. Systèmes de détection des matériels roulants : les circuits de voie 31

1.5. Les systèmes centraux d'information et de télécommunications 32

1.6. Les stations 33

1.6.1. Les équipements de confort 34

1.6.2. Les équipements de protection et de balisage 34

1.6.3. Les équipements d'information et d'exploitation 34

1.7. Les bâtiments d'exploitation-maintenance 34

1.7.1. Les dépôts de tramway 35

1.7.2. Les autres types de locaux techniques (système tramway) 37

Chapitre 2 **Le vieillissement du système : différents phénomènes et différentes approches par sous-systèmes 40**

2.1. Les revêtements de plateforme : type de désordre et causes des dégradations 41

2.1.1. Agressivité du milieu environnant et des défauts à l'origine des désordres 42
2.1.2. La modélisation des dégradations 46
2.2. Les rails : mécanismes d'usure et leur modélisation 47
2.2.1. Des mécanismes liés au frottement de la roule sur le rail à l'origine des dégradations 49
2.2.2. La modélisation des dégradations du rail 54
2.3. Les matériels roulants : des défaillances par composant et leur suivi statistique 67
2.3.1. Description des défaillances 68
2.3.2. Modélisation des défaillances 72

Chapitre 3 **Modélisation fonctionnelle et qualitative des désordres de la voie ferrée de tramway 78**
3.1. Principes et méthodes de l'analyse qualitative de système technique 79
3.1.1. Quelques bases théoriques de la modélisation systémique 79
3.1.2. Différentes méthodes pour analyser le fonctionnement des systèmes 84
3.1.3. Différentes méthodes pour analyser les dysfonctionnements des systèmes 87
3.2. Analyse fonctionnelle de la voie ferrée 93
3.2.1. Analyse fonctionnelle externe 93
3.2.2. Analyse fonctionnelle interne 102
3.3. Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) 105
3.3.1. Structuration des informations issues de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) 106
3.3.2. La recherche des modes de défaillance 107
3.3.3. L'Analyse des causes et des effets des modes de défaillance 108

Chapitre 4 **La maintenance en théorie 112**
4.1. Les grandes stratégies de maintenance 113
4.1.1. La maintenance corrective 114
4.1.2. La maintenance préventive 115
4.2. Caractérisation des tâches de maintenance 116
4.2.1. Classification opérationnelle selon le niveau de complexité 116
4.2.2. Classification technique selon le niveau de restauration du bien 117
4.2.3. Classification des opérations de surveillance selon le niveau d'efficacité 118
4.3. Les modèles de maintenance 119
4.3.1. Les modèles de maintenance à unité simple 119
4.3.2. La problématique des systèmes multi-composants 122
4.3.3. Relativité historique des modèles de maintenance 124

Chapitre 5 **La maintenance en pratique 126**
5.1. Contexte du renouvellement des voies ferrées en France 127
5.1.1. Caractéristique du parc de voie ferrée de tramway 127
5.1.2. La gestion des infrastructures de tramways 133
5.2. Stratégie de maintenance des voies ferrées de tramway 137
5.2.1. Les actes de surveillance 138
5.2.2. Les actes de maintenance : fréquence, consistance et seuils de déclenchement 141

5.3. Contribution méthodologique pour systématiser les inspections de la voie ferrée.....146
5.3.1. Présentation de la solution logicielle LAMIA.....146
5.3.2. Découpage de la voie ferrée en tronçon homogène.....147
5.3.3. Inventaire des symptômes de dégradation d'une voie ferrée.....148
5.3.4. Adaptation de la méthode VSC pour la hiérarchisation et la priorisation des interventions a court-terme.....152

Chapitre 6 **Analyse de l'âge au renouvellement d'une voie ferrée de tramway.... 158**
6.1. Principes et définitions.....159
6.1.1. L'analyse de durée de vie.....159
6.1.2. Caractéristiques principales des actes de renouvellement de la ligne A du tramway de Grenoble 162
6.1.3. Caractérisation des variables.....164
6.2. Analyse statistique des actes de renouvellements.....165
6.2.1. Généralité.....165
6.2.2. Analyse de l'âge au renouvellement.....165
6.2.3. Estimation non paramétrique des courbes de survie.....167
6.2.4. Estimation paramétrique des courbes de survie.....170
6.3. Prévision des renouvellements.....173
6.3.1. Modélisation et approximation d'une loi de renouvellement.....173
6.3.2. Résultats de prévision sur le réseau de Grenoble.....176

Chapitre 7 **Vers une approche socio-économique du renouvellement..... 180**
7.1. L'estimation dans l'ingénierie des infrastructures.....181
7.1.1. Les méthodes d'estimation des coûts.....182
7.1.2. Les facteurs de complexité des coûts des infrastructures.....183
7.1.3. Le processus traditionnel d'estimation des coûts de projets d'infrastructure : le pilotage d'un processus progressif.....184
7.1.4. De la difficulté d'une estimation réaliste : les principaux enseignements.....187
7.1.5. Les particularités inhérentes à l'estimation d'un projet de renouvellement.....192
7.2. L'évaluation monétarisée et ses indicateurs.....193
7.2.1. La Valeur Actualisée Nette (VAN).....194
7.2.2. La Valeur Actualisée Nette Socio-Economique (VAN-SE).....194
7.2.3. Le Taux de Rendement Interne (TRI).....196
7.2.4. L'Indice de Rentabilité (IR).....196
7.2.5. Le Taux de rentabilité Immédiate (TI).....197
7.2.6. Choix du taux d'actualisation.....197
7.3. Méthodologie d'évaluation économique du renouvellement de la voie ferrée de tramway 200
7.3.1. Les coûts et avantages à l'état transitoire : les impacts économiques et environnementaux lors du renouvellement.....201
7.3.2. Les coûts et avantages à l'état courant : les impacts économiques et environnementaux.....212
7.4. Estimation des coûts de possession.....214
7.4.1. Influence des rayons de courbure sur le coût de possession.....214

7.4.2. Influence du mode opératoire de travaux sur le coût de renouvellement.....217
CONCLUSION GENERALE _____ 223
BIBLIOGRAPHIE _____ 228
LISTE DES TABLEAUX _____ 237
LISTE DES FIGURES _____ 240
ANNEXES _____ 245

INTRODUCTION GENERALE

De toute évidence, la gestion des infrastructures est un sujet récurrent qui a déjà donné lieu à bien des discussions depuis l'existence des premiers réseaux de route et d'eau potable. Parmi les nombreuses attitudes prises face à ce problème, on peut distinguer deux extrêmes : d'un côté, il y a ceux qui estiment que puisque l'état des infrastructures résulte de la bonne qualité de conception, puis de fabrication et de mise en œuvre, on ne peut rien faire sans avoir auparavant changé les infrastructures. D'un autre côté, il y a ceux qui croient que les problèmes de vieillissement des infrastructures ne sont dus qu'à des défauts d'entretien et qu'il est plus ou moins aisé de remédier à condition de payer, juste à temps, le prix correspondant. Dans cette thèse, nous cherchons à montrer qu'il existe une approche réaliste entre ces deux extrêmes, approche appelée gestion patrimoniale. Elle repose sur deux principes de base : le premier est que, pour entreprendre une action efficace pour lutter contre le vieillissement des infrastructures, il faut d'abord avoir réalisé un diagnostic global prenant en compte à la fois les facteurs techniques et économiques propres à chacune des phases du cycle de vie de l'infrastructure. Le second principe est que ce diagnostic permet de définir une stratégie d'action à long terme, et qu'il existe des techniques pour aider à mettre en œuvre cette stratégie. Le terme « patrimoniale » se réfère surtout à la nécessité de prendre en compte le long terme dans le diagnostic, puis dans la définition des stratégies. Le mot « gestion » se réfère à l'importance des actes de gestion effectués au cours de la durée de vie des infrastructures par un grand nombre d'acteurs (concepteurs, industriels, entreprises de travaux publics, mainteneurs) au premier rang desquels se trouve le gestionnaire d'infrastructures.

Il faut souligner que si l'approche est transdisciplinaire faisant appel aussi bien à différentes sciences techniques qu'à l'économie mais aussi à l'environnement (la durabilité n'est-elle pas en soi un enjeu environnemental ?) ; elle est d'abord le fruit d'un retour d'expérience propre à chaque système technique. Nous concevons cette thèse comme une étape dans la diffusion d'une approche élaborée à partir des retours d'expérience de la voie ferrée de tramway et pour une meilleure prise en compte du long terme dans la gestion de celle-ci.

Réintroduit en France à la fin des années 1980 après plusieurs années de débats et d'études nécessaires à la réhabilitation d'un mode de transport jugé peu efficace aux yeux de la société de l'époque, les infrastructures de tramway sont relativement récentes dans l'environnement urbain. Comparativement aux autres patrimoines d'infrastructures, on peut même dire que la voie ferrée de tramway se situe au stade de l'adolescence. Le tronçon moyen de voie ferrée en France avoisine en effet les 12 années d'exploitation. Si certaines lignes de tramway sont plus anciennes et que des premiers renouvellements d'ampleur ont déjà eu lieu, il n'existe que peu d'ouvrages cherchant à formaliser les retours d'expérience disponibles, c'est-à-dire à se mettre à l'écoute des signaux provenant des installations et à capter tout accident, incident, anomalie pour en retirer le maximum d'enseignements. Précisons néanmoins que ce type de démarche existe déjà mais pour la sécurité ferroviaire et ce dans le cadre défini par le décret 2003-425 relatif à la

Sécurité des Transports Publics Guidés. Toutefois, la jeunesse du parc d'infrastructures de tramway et les lacunes des retours d'expérience disponibles ne sauraient justifier à elles seules l'objet de cette recherche mais elles ont été fondamentales en tant qu'éléments du contexte dans l'orientation de notre démarche scientifique.

Ne pas disposer de beaucoup d'éléments sur un système technique ou alors n'en disposer que de manière disparate, impose d'adopter une démarche de compréhension d'abord globale de son fonctionnement et d'en questionner les enjeux fondamentaux. La fonction de transport est évidente et ses effets externes sont très bien documentés, notamment par l'approche économique. Elle répond à une demande de déplacement à l'intérieur d'un corridor au long duquel le tramway devient un outil d'aménagement du territoire, en liant les différents pôles d'attractivité avec la population.

Les conséquences d'une défaillance d'un patrimoine tramway, intégré dans un environnement urbain dense, dépassent largement le périmètre immédiat des infrastructures. L'approche économique explique qu'un mauvais fonctionnement du transport entraine des coûts sociaux et économiques comme par exemple, une diminution de la productivité et de la compétitivité des pôles desservis car le temps perdu n'est consacré ni aux loisirs ni à la production. Ce type d'effets est d'ailleurs bien souvent oublié par les gestionnaires d'infrastructures car peu visible et difficile en pratique à quantifier. Les pires conséquences d'une gestion de patrimoine inadéquate se manifestent quand elles peuvent mettre en péril des vies humaines. Ce type d'évènements redoutés reste très rare et étroitement surveillé par les différents acteurs depuis la conception du système jusqu'à son exploitation et sa maintenance. Ceci dans le respect de la règlementation relative à la sécurité des transports publics guidés pour la protection des usagers et des tiers, et la règlementation du travail pour la protection des travailleurs. Lorsque cela ne met pas en danger des vies humaines, l'enjeu fondamental de la gestion d'un tel système est son maintien en condition opérationnelle pour répondre à la demande. La signalisation ferroviaire des tramways, quand elle est nécessaire, s'appuie sur des technologies conçues à un niveau de sécurité intrinsèque comparable à celui des industries aéronautiques, spatiale ou militaire. L'apport en alimentation électrique est assuré par des sous-stations électriques robustes pouvant durer jusqu'à 40 ans, à condition que les sollicitations restent dans les plages d'usage prévues et d'un niveau de maintenance adéquat. Des logiques de surdimensionnement et de redondance dans un environnement contrôlé permettent à ce sous-système d'atteindre d'excellents critères de fiabilité et de disponibilité. Les matériels roulants soumis à un environnement extérieur moins bien contrôlé doivent faire l'objet d'un niveau d'efforts de maintenance bien supérieur. La carrosserie extérieure est soumise à l'humidité, aux intempéries, aux vandalismes et aux chocs. Le contrôle des bogies et des équipements électroniques de puissance occupe aisément une bonne partie des effectifs de la maintenance et suit des plans de maintenance préventive systématique kilométrés. Les systèmes informatiques et embarqués, notamment la radio, la billettique ou encore les informations voyageurs peuvent également tomber en panne ou être frappés d'obsolescence. Dès lors, la maintenance qui peut conduire à l'immobilisation d'un véhicule doit prévoir un nombre suffisant de véhicules en réserve pour subvenir à ce type d'évènement, et assurer la capacité d'exploitation requise. Pour les équipements industriels, il existe donc, au niveau opérationnel de la maintenance, des moyens techniques permettant d'obtenir de bons niveaux de disponibilité et de fiabilité. Les effets à long terme du vieillissement de ces équipements peuvent être contenus, et s'ils sont suffisamment anticipés, le remplacement de ces équipements peut s'opérer sans trop de contraintes exportées vers l'exploitation. Paradoxalement, les équipements d'infrastructures qui nécessitent moins d'actes de maintenance effectués

quotidiennement (autres que des actions de surveillance et de nettoyage), sont tout aussi sensibles aux effets à long terme du vieillissement, mais les parades techniques disponibles pour lutter contre sont limitées. Sous l'effet du vieillissement, des phénomènes physico-chimiques – principalement l'usure et la corrosion – dégradent la qualité des infrastructures. Dans les cas critiques, l'infrastructure ne permet plus la circulation des véhicules. Or entreprendre, même préventivement, une action efficace d'amélioration des infrastructures, conduit la plupart du temps à de fortes contraintes sur l'exploitation. Cet élément de contexte met aussi, et surtout, en lumière le fait suivant : comparativement aux autres modes de transport tels que le routier ou l'aérien, les systèmes de transport guidé sont largement dépendants d'infrastructures physiques. Aussi évident que cela puisse paraitre, cette affirmation concentre pourtant l'essentiel des enjeux qui se posent pour les gestionnaires d'infrastructures en matière de gestion patrimoniale. Par infrastructures, on désigne la voie ferrée, les installations de lignes aériennes et les divers ouvrages ponctuels de franchissement. Pour nos travaux, nous nous sommes limités à la voie ferrée de tramway. Ce ciblage du périmètre technique nous intéresse particulièrement car d'une part, le renouvellement de la voie ferrée est un enjeu plus coûteux et le plus contraignant et d'autre part, un périmètre technique plus important n'aurait pas apporté davantage de réflexion de nature scientifique. Ce ciblage permet d'aborder toute la complexité technique et de maîtriser intellectuellement la plupart des aspects opérationnels relatifs au vieillissement d'une infrastructure de voie ferrée de tramway.

***

La thèse questionne les problèmes que pose la gestion à long terme des infrastructures, puis les méthodes utilisables pour les résoudre. La première difficulté concerne la caractérisation du patrimoine et ses conditions d'évolution. La voie ferrée de tramway s'est construite sur un mode incrémental (c.-à-d. évoluant à la marge, à chaque projet) et les spécificités propres à la complexité urbaine dans laquelle ce mode s'insère ont abouti à une grande diversité de ses composants et une sophistication de leurs assemblages locaux. Nous sommes en présence d'un système technique complexe ; ce qui suggère d'aborder le problème du vieillissement non seulement d'un angle technique mais aussi systémique. L'hypothèse centrale de cette thèse est que le vieillissement des éléments d'un système est un phénomène autre que celui de chacun des éléments pris séparément. La justification méthodologique de ce choix est faite de manière plus détaillée au chapitre 3.

La seconde difficulté découle de la prise en compte du long terme. Le vieillissement qui affecte spontanément le système, implique souvent le long voire le très long terme, car il dépend de cycles de renouvellement dont le rythme peut être très long. Or, quand il est visible, le vieillissement implique souvent des échéances à court et moyen terme. D'un point de vue gestionnaire, cela suggère d'assurer une cohérence entre la vision à court, moyen et long terme. La Figure 68 illustre à ce propos l'articulation des différentes échelles de temps dans la programmation des renouvellements.

La troisième difficulté relève de l'interdépendance entre le système et son environnement extérieur, notamment urbain. Cette question est abordée au chapitre 7. On peut ici mettre succinctement en évidence quelques interdépendances entre le renouvellement de la voie ferrée, le système de transport, les usagers, les riverains et les automobilistes. La qualité de la voie ferrée influence le confort (bruits et vibrations subis par les usagers) qui diminue sous l'effet du vieillissement. Le renouvellement permet d'en restituer la qualité intrinsèque mais paradoxalement, l'intervention peut être contradictoire avec les

exigences de disponibilité du système de transport. Il est toutefois possible d'intervenir de nuit et de poursuivre l'exploitation de jour. Dans ce cas, les usagers peuvent continuer à profiter du service mais l'intervention durera plus longtemps et les riverains subiront davantage les nuisances du chantier. Il serait fastidieux de prolonger davantage cette énumération d'interdépendances. Mais il faut bien noter que c'est là un caractère extrêmement important pour la mise en œuvre d'une approche patrimoniale à une échelle urbaine ; et donc mieux intégrée. Si l'on veut éviter les conséquences imprévues de certaines interventions, il est indispensable d'identifier autant que faire se peut, les principaux effets directs et indirects résultant de ces interdépendances.

***

Partant du constat que le vieillissement de la voie ferrée de tramway est un sujet récent, nous poursuivons un objectif de compréhension du fonctionnement technique de la voie ferrée et de ses interactions avec les éléments extérieurs. Nous cherchons à disposer d'un modèle d'analyse systémique afin de nous saisir des phénomènes à l'œuvre sous l'effet du vieillissement et de toutes les formes de dégradations et de signaux qui apparaissent sur une voie ferrée vieillissante. Pour parvenir à cet objectif, nous réalisons un état de l'art des connaissances techniques et scientifiques disponibles et nous mettons en œuvre des méthodes issues de l'ingénierie des systèmes pour réaliser une Analyse Fonctionnelle (AF) du système et une Analyse des Modes de défaillance et de leurs Effets (AMDE). Le modèle obtenu permet de formaliser le retour d'expérience sur le vieillissement de ce système et d'en identifier les principales causes et conséquences. Les trois premiers chapitres de cette thèse répondent à cet objectif et apportent des contributions méthodologiques à l'analyse systémique des systèmes de type infrastructure dont nous cherchons à analyser de manière exhaustive tous les effets à long terme du vieillissement. Cette première partie préfigure du principe fondamental de diagnostic dans le cadre d'une approche patrimoniale.

La seconde partie de la thèse, du quatrième au sixième chapitre, a pour but de compléter le diagnostic global du vieillissement de la voie ferrée par une analyse des actes de gestion patrimoniale et l'identification des principaux verrous opérationnels d'une approche patrimoniale de la voie ferrée. Le premier verrou concerne la difficulté de définition des critères d'état technique de la voie ferrée et au suivi régulier de ces indicateurs. L'objectif de la deuxième partie est donc de construire une méthode de diagnostic de la voie ferrée de tramway à partir des résultats issus de la première partie. Le deuxième verrou relève de l'utilisation des données disponibles auprès des gestionnaires d'infrastructure en ayant pour objectif de proposer un outil pour établir une stratégie d'action à long terme sur le patrimoine. Pour cela nous effectuons une analyse statistique des données de durée de vie des rails de tramway sur un réseau en France. Cette analyse a donné lieu à un article – non publié à date – qui rend compte de la méthode et de la première analyse statistique des durées de vie d'une voie verrée de tramway.

La troisième et dernière partie de la thèse développe une approche socio-économique du renouvellement d'une voie ferrée de tramway. La méthode proposée s'appuie sur une analyse socio-économique et propose des méthodes de calcul des différents coûts et avantages associés à un acte de renouvellement. Elle répond ainsi au deuxième principe fondamental d'une approche patrimoniale en identifiant les facteurs économiques qui doivent être pris en compte dans une stratégie à long terme.

***

Cette thèse se consacre principalement aux aspects du génie civil de la voie ferrée de tramway. Un accent est mis sur l'aspect technique et opérationnel. Aussi, certains chapitres contiennent des exemples concrets sur le thème étudié pouvant faciliter la compréhension et le développement d'une approche patrimoniale sur d'autres types d'infrastructures.

Le premier chapitre donne un bref aperçu d'un système de transport guidé urbain communément appelé « tramway ». A partir d'un corpus bibliographique composé de références techniques et des connaissances acquises dans un bureau d'études d'infrastructures, est présentée une description technique et fonctionnelle du système, de ses composants et de ses principales interfaces.

Le second chapitre, consacré à la plateforme de voie ferrée de tramway, présente les principaux phénomènes à l'origine des dégradations. Il illustre les différentes manières d'approcher le vieillissement en présentant les grandes familles de méthodes de modélisation disponibles dans la littérature scientifique. Ce chapitre contient en outre, une analyse théorique concise du phénomène étudié, des courbes, des graphiques, et dans beaucoup de cas, des exemples de formules mathématiques, facilitant ainsi notre travail de compréhension des facteurs de dégradation.

Le troisième chapitre est dédié à la construction d'un modèle qualitatif et fonctionnel de la voie ferrée de tramway en vue d'en analyser les causes et les conséquences de ses dysfonctionnements consécutifs au vieillissement. Ce chapitre aborde les différentes méthodes de modélisation fonctionnelle ainsi qu'une application à la voie ferrée. Les résultats sont présentés et permettent d'identifier un panel de symptômes, les facteurs de dégradation et les risques qui y sont associés.

Le quatrième chapitre est dévolu aux aspects théoriques de la maintenance. Les différentes rubriques de cette dernière sont présentées notamment les notions élémentaires des actes de maintenance préventifs et correctifs. A partir d'un état de l'art académique, nous présentons une classification des modèles de maintenance par niveau d'intervention et de surveillance.

Le cinquième chapitre fait écho au quatrième en s'adonnant aux aspects pratiques de la maintenance de la voie. Dans un premier temps, le chapitre traite du contexte dans lequel le renouvellement est devenu une problématique récente avec l'illustration des cas du réseau de Grenoble et d'Orléans. Puis, les différentes rubriques de la maintenance sont présentées, notamment la surveillance, l'entretien courant et les renouvellements. Le deuxième temps est dédié à la présentation d'une contribution méthodologique majeure pour l'inspection systématisée de la voie ferrée de tramway. Cette solution a été testée pour la première fois sur le réseau de Grenoble.

Le sixième chapitre traite d'une analyse statistique des âges de renouvellement sur un site français à des fins de prévisions budgétaires long terme. Il présente une description statistique des actes de renouvellement à l'aide d'une estimation non paramétrique et paramétrique des courbes de survie. Le chapitre propose enfin une extrapolation de cette nouvelle connaissance statistique pour prédire le nombre de renouvellements sur le réseau étudié de l'agglomération grenobloise.

Le septième chapitre est dédié au développement d'une approche socio-économique du renouvellement de la voie ferrée de tramway. Après une analyse critique des différentes méthodes d'estimation et d'évaluation des coûts, nous caractérisons les coûts et les avantages associés au renouvellement et les

moyens de les mesurer. Le chapitre présente ensuite une application pour les coûts financiers à partir des résultats obtenus à l'issue du sixième chapitre. Il ouvre enfin à la discussion sur les intérêts économiques à prendre en compte dans le choix d'une tactique de renouvellement, avec ou sans interruption de l'exploitation.



Chapitre 1

LE TRAMWAY, UN SYSTEME TECHNIQUE COMPLEXE

Au retour du tramway en France, il y a l'Etat mais si celui-ci l'a impulsé à la fin des années 70, il ne contraint pas (Mazoyer, 2018) ; si bien que le tramway s'est développé sans autorité technique centrale qui aurait pu standardiser cet objet alors inclassable à l'époque : ni autobus conforme à l'ingénierie routière, ni métro ou train conforme à l'ingénierie ferroviaire (Le Tourneur, 2018). Le terme de « metrobus » utilisé à Rouen pour désigner son tramway en est une parfaite illustration. A l'époque, la France avait démonté la plupart de ces tramways, les dernières études remontaient à l'entre-deux guerres, l'expertise était elle aussi à reconstruire. Au terme de quarante années de tramway en France, ligne après ligne, le tramway à la grande différence de son grand frère le train, s'est ouvert à la complexité urbaine. Une complexité qui s'exprime aujourd'hui par la diversité de ses composants et par la sophistication de leurs assemblages locaux. Il n'est en effet pas rare d'observer plusieurs dizaines de poses de voie ferrée différentes sur la même ligne de tramway, des équipements et technologies diverses et intégrées à la voirie : bienvenu dans l'ingénierie du transport guidé urbain !

Ce chapitre a pour objectif de décrire les principaux aspects techniques de ce système par l'organisation d'un corpus tiré de diverses sources : principalement la littérature grise, agrémentée de ma propre expertise acquise au sein de l'entreprise ARTELIA Ville & Transport qui a cofinancé ces travaux. A partir de ces connaissances, nous mettons en œuvre deux approches complémentaires : l'approche structurelle et l'approche fonctionnelle. Nous poursuivons l'objectif de les ordonner et surtout d'introduire les aspects indispensables à la lecture des chapitres suivants.

L'approche structurelle se développe composant par composant. Pour chacun d'entre eux, elle consiste à analyser les principales caractéristiques techniques telles que la nature des matériaux, les formes éventuelles d'assemblages ainsi que les interactions physiques de contact avec les autres composants du système ou le milieu environnant. Les données d'entrée nécessaires à cette analyse sont fournies par la littérature technique. La contribution de ce chapitre se situe alors au niveau de la sélection des sources et de la composition du corpus. Le résultat de l'approche structurelle est une décomposition technique du système modélisé à différentes échelles : le sous-système, le composant et le matériau.

La voie ferrée, objet principal de cette thèse, n'est pas uniquement constituée d'éléments pouvant être considérés séparément, elle fait partie du sous-système « Infrastructures », en interaction avec d'autres sous-systèmes. Ce premier chapitre présente successivement les différents sous-systèmes qui composent l'environnement technique de la voie ferrée.

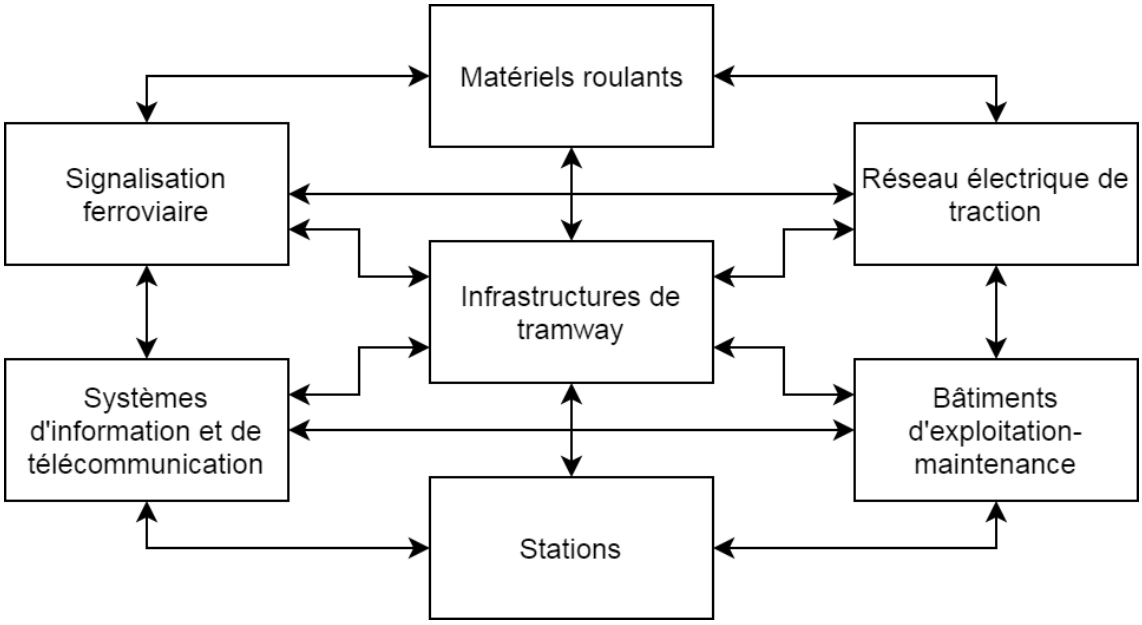


Figure 1 : Les sous-systèmes techniques du transport par mode tramway

1.1. L'INFRASTRUCTURE DE TRAMWAY

Les infrastructures de tramway ne désignent pas uniquement la voie ferrée sur laquelle les matériels roulants circulent mais aussi les appareils de voie qui permettent les changements d'itinéraires et les ouvrages de génie civil qui permettent le franchissement d'obstacles divers.

1.1.1. LA VOIE FERREE

Du point de vue fonctionnel, la voie ferrée assure, en interface avec le matériel roulant, les fonctions principales de roulement et de guidage (continuité mécanique). Il s'agit là de la raison d'être de la voie ferrée, du fait du faible coefficient de frottement du contact fer/fer. La voie ferrée doit également remplir des fonctions secondaires du système de transport ou des contraintes induites par le milieu environnant :

- la circulation piétonne en traversée piétonne,
- la circulation routière en carrefour, en voie partagée ou en voie banalisée,
- l'écoulement, la collecte et l'évacuation des eaux de ruissellement,
- le transport des courants faibles (c.-à-d. le câblage) pour le fonctionnement de l'éclairage et des systèmes d'aide à l'exploitation et d'information voyageur,
- et le retour du courant de traction.

Du point de vue structurel, la voie ferrée est composée en section courante :

- de l'armement de voie ferrée (rail, attaches, traverses en pose discontinue, appareils de voie …),
- des revêtements de surface de la voie ferrée,
- de la structure d'assise sous l'armement de la voie ferrée, composée de :
    - la couche de calage (si pose de voie ballastée alors la couche de ballast)

    - la « sous-couche » (couche de fondation, et si pose ballastée couche sous ballast) ;
    - la « couche de forme rapportée » ou « couche de forme normale ».
- du sol support en place,
- et de l'assainissement et du drainage de la plateforme.

Les paramètres principaux qui caractérisent une voie ferrée sont :

- le type de rail utilisé (poids, longueur, section),
- le type de pose de voies (continue ou discontinue),
- la longueur des rails en voie (barres normales éclissées ou longs rails soudés),
- l'écartement des rails, et les tolérances admises,
- le tracé en plan (rayons de courbure et dévers),
- le profil en long (pentes et rampes),
- le support des rails (ballast, longrines, béton, etc.),
- la charge admise par mètre courant ou à l'essieu,
- la vitesse des circulations,
- et le type de revêtement de plateforme (matériaux modulaires, béton, enrobés, revêtements végétalisés, asphalte, etc.)

1.1.1.a *Les rails*

Il existe deux formes de profil de rail utilisées pour le mode tramway : le rail Vignole et le rail à gorge.

Traditionnellement utilisé sur les voies de chemin de fer, le rail Vignole peut être utilisé sur les sections de voie tramway ne nécessitant pas d'être traversées par d'autres circulations. En principe, sa géométrie ne lui permet pas d'être « noyé » dans le béton de la plateforme[1]. Cependant, elle rend son usinage plus simple et par conséquent son coût au mètre linéaire est moindre.



Figure 2 : Schéma en coupe d'un profil de rail Vignole (CERTU & LROP, 2004)

Le rail à gorge est le rail privilégié du mode tramway. En effet, sa géométrie permet de le noyer dans la plateforme, ce qui rend la voie traversable par les piétons, les voitures et autres modes routiers. Son coût au mètre linéaire est cependant plus élevé que le rail Vignole.

[1] A noter qu'il existe à l'étude des solutions afin de pouvoir noyer le rail Vignole dans le béton de la plateforme. Celles-ci ont par exemple recours à l'emploi de résines en polyuréthane.

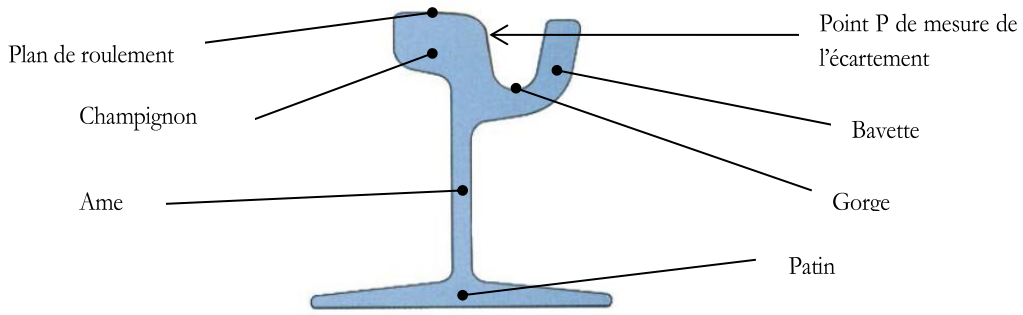


Figure 3 : Schéma en coupe d'un profil de rail à gorge (CERTU & LROP, 2004)

Pour les deux formes de profil de rails utilisés en tramway, il existe différentes variantes de type. C'est ce dernier qui caractérise les dimensions du profil de rail. Pour le rail à gorge, on distingue deux grandes familles : les rails hauts types RI 60, RI 59 ou NP4 de hauteur 180mm et les rails bas types 35G, 35GP et 41GP de hauteur 152mm.

En France, l'emploi des rails bas type 35G s'est généralisé depuis leur mise au point en 1980 (CERTU & LROP, 2004). Les types de rails à gorge spécifient la largeur et la profondeur de la gorge ainsi que la hauteur, la largeur du patin et l'épaisseur de l'âme. Le tableau ci-dessous présente une grille de lecture pour la comparaison des deux types de rails à gorge parmi les plus répandus sur les réseaux français.

Tableau 1 : Comparaison des deux types de rails à gorge les plus couramment utilisés en France (Muller, 2011)

	Rail 35G	Rail 41GP
Masse linéique (en kg.m^{-1})	54,78	55,34
Hauteur (en mm)	152,50	152,50
Largeur de la gorge (en mm)	36	41
Profondeur de la gorge (en mm)	40	45,9

Les rails sont en acier et leur composition chimique est donnée par la nuance de l'acier. Par exemple, un acier de nuance R200, courant sur les réseaux français, caractérise un acier employé pour le rail dont la dureté Brinell minimale (HBW) est de 200 selon la norme NF EN-13674. Plus la nuance est élevée, plus le rail est résistant à l'usure. D'un autre côté, une nuance plus élevée rend aussi plus difficile voire impossible les rechargements éventuels du flan de guidage et de la bavette. Le rechargement est une technique spécifique au tramway qui permet de recréer le profil nominal du rail ou d'en créer un nouveau, mieux adapté au contact rail-roue.

1.1.1.b *Les types de pose de voie ferrée*

Le type de voie est une disposition constructive qui s'adapte à son environnement : le sol support (le nombre de couches, épaisseurs, matériaux) mais aussi les conditions urbaines (p.ex. pose de voie anti-vibratile) et aux choix paysagers de son insertion (p.ex. voie végétalisée). Le choix du type de voie ferrée auquel on associe un type de revêtement de plateforme est fondamental sur la tenue de ce dernier et sur le coût de la maintenance ultérieure (CERTU & LROP, 2004). Nous n'entrerons pas dans les spécificités

des exemples mis entre parenthèses et pour simplifier, nous réduirons la pose de voie à l'existence de deux grandes familles : les poses de voie en appui continu et en appui discontinu.

Les poses continues peuvent être classiques (posées directement sur le corps de voirie), sur coussin élastique ou noyées. Les poses discontinues se font sur traverses ou sur selles. La voie sur ballast, la voie posée sur traverses béton ancrées dans du béton, la voie ancrée sur selles et la voie ancrée avec rail en appui continu font parties des technologies de voies de tramway les plus couramment utilisées (CERTU & LROP, 2009).

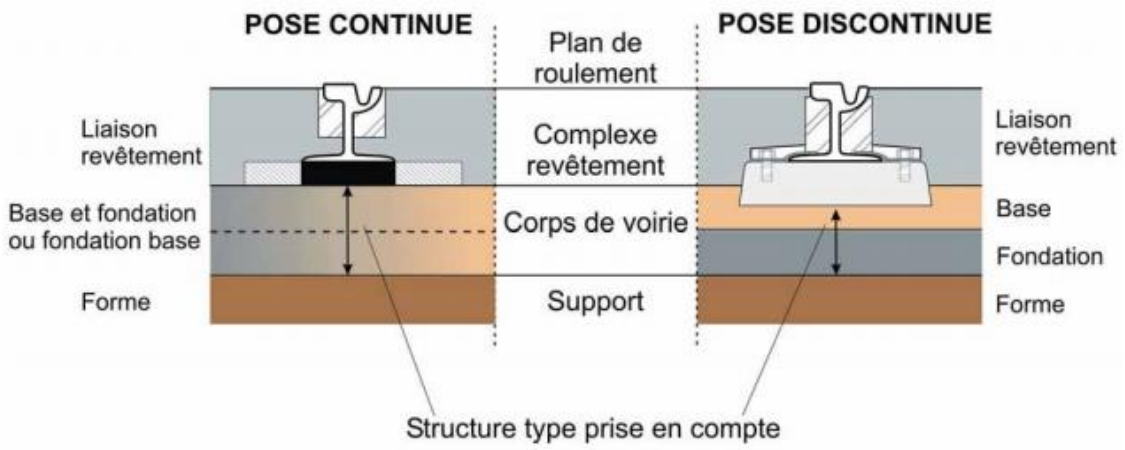


Figure 4 : Comparaison des structures en pose voie continue et discontinue (Cimbéton, 2004)

1.1.1.c *La plateforme de voie ferrée de tramway*

La plateforme a pour fonction principale de recevoir les rails, de réduire les efforts verticaux sur le sol support à des limites acceptables mais aussi de reprendre les efforts dynamiques latéraux générés par le passage des rames et de participer à la dispersion des vibrations (CERTU & LROP, 2004). En France, il existe une grande diversité des structures de plate-forme tramway. Le dimensionnement de la structure est fonction des charges roulantes appliquées, des contraintes géotechniques du sol d'assise et du type de pose de voie.

Une structure type largement appliquée à Grenoble, Strasbourg, Montpellier ou encore Lyon, consiste à creuser une tranchée d'un mètre de profondeur sur six mètres de largeur (Muller, 2011). Le fond est constitué de matériaux de déblais/remblais ou sol en place pour constituer la Partie Supérieur des Terrassement (PST). Pour parfaire les propriétés mécaniques de la plate-forme support de la voie, on y ajoute une couche de forme constituée de matériaux damés, traités ou rapportés suivant les performances de portance de la PST. On coule ensuite une couche de fondation en béton maigre dosé à 200 kg/m^3 ratissé sur une épaisseur de 30 cm environ formant le lit de la plate-forme (couche de fondation sur le schéma ci-dessous). L'épaisseur du béton de forme est variable en fonction des charges roulantes.

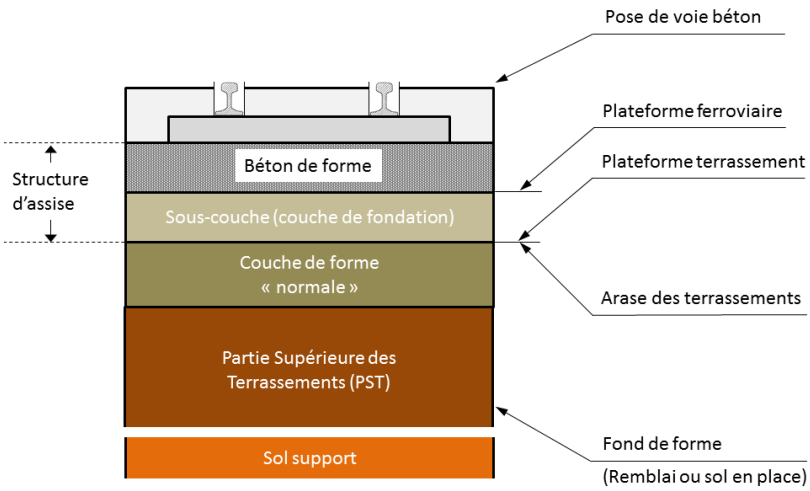


Figure 5 : Structure type de voie ferrée non-ballastée (structure rigide) avec couche de forme normale (Source : ARTELIA Ville & Transport)

1.1.1.d *Les revêtements de plateforme*

Les revêtements de plateforme constituent la partie visible du génie civil. Les revêtements ont pour fonctions principales d'assurer l'étanchéité de la plateforme, de supporter le trafic routier en carrefour, mais aussi de parfaire l'intégration architecturale et paysagère du tramway dans son environnement.

On distingue deux grandes familles de revêtement selon leur procédé constructif. Lorsque le revêtement est composé d'un assemblage de matériaux préfabriqués, on dit que le matériau de revêtement est modulaire (p.ex. pavés ou dalles). Tandis que lorsqu'il est constitué d'un matériau homogène et uniforme, on dit que le revêtement est non-modulaire (p.ex. enrobés, béton, revêtements végétalisés, matériaux stabilisés, l'asphalte, platelages en bois, etc.). Structurellement, les revêtements sont disposés en surface de la plateforme (en interface avec le béton de voie) et limités de part et d'autre par le Gabarit Limite d'Obstacle[2] (GLO). En fait, les revêtements doivent matérialiser le GLO pour des raisons de sécurité vis-à-vis des circulations routières et piétonnes.

[2] Le Gabarit Limite d'Obstacle désigne l'espace de circulation du tramway qui doit être libre de tout obstacle.

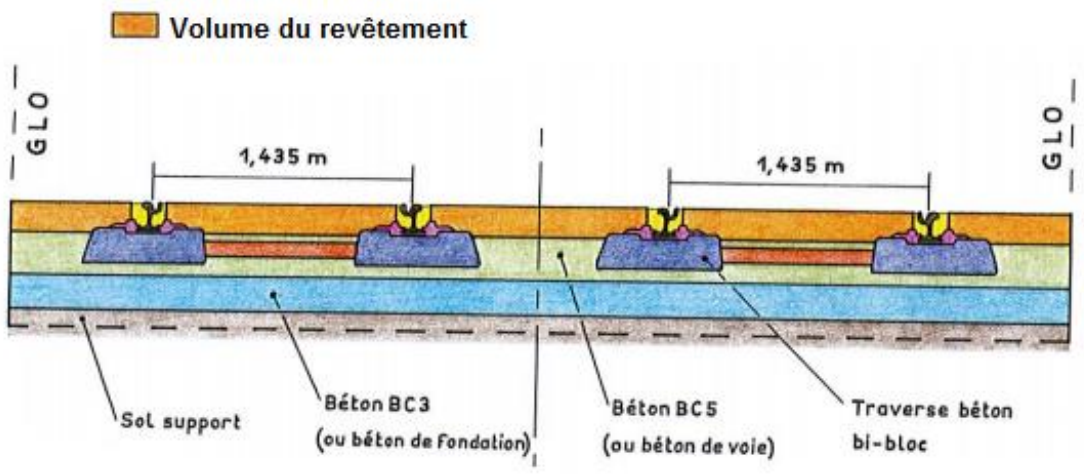


Figure 6 : Structure type de voie ferrée non-ballastée avec rail à gorge (CERTU & LROP, 2009)

1.1.1.e *Le système de drainage*

L'évacuation des eaux de ruissellement recueillies dans la gorge des rails se fait habituellement via des ouvertures réalisées dans le fond de la gorge du rail. Ces eaux transitent alors par ces ouvertures vers des caniveaux transversaux ou des boîtes de drainage espacées de 50 mètres environ, connectées entres-elles et raccordées au réseau d'assainissement.

Le drainage est fondamental pour préserver l'infrastructure des eaux d'infiltration. Pourtant il est encore trop souvent mis en cause dans les constats de désordres, soit en raison d'un mauvais dimensionnement, soit en raison d'un entretien insuffisant (CERTU, 2004). Même si l'eau d'infiltration n'est pas à l'origine des désordres, la présence de ces défauts facilite l'infiltration des eaux de ruissellement, qui accélèrent à leur tour la vitesse et l'amplitude du processus de dégradation.

Le drainage assure la récupération des eaux superficielles en surface (les eaux de ruissellement de la plateforme et les eaux drainées par la gorge du rail) et des eaux d'infiltration (traçant leur chemin dans la porosité des structures mais aussi au niveau des interfaces et autres fissurations) ainsi que leur évacuation vers le réseau d'assainissement ou le milieu naturel le cas échéant. Son rôle essentiel dans l'assainissement des voies le rend indispensable à la lutte contre les courants vagabonds et la pérennité des structures de génie civil.

1.1.1.f *L'armement de la voie (traverses, systèmes d'attache, joints d'étanchéité, chambre d'éclissage)*

L'armement de la voie est toujours associé au choix du type de pose de voie ; le choix d'une pose de voie avec traverses ou selles signifient une pose de voie sur appui discontinu.

Les traverses

Les traverses ont pour fonction d'assurer l'écartement des rails, de répartir la charge des rails suivant l'axe Z et d'assurer la stabilité de la voie suivant les axes X et Y (Chapas, 2012). Les traverses sont posées perpendiculairement à l'axe de la voie. L'espacement entre deux traverses consécutives est appelé le « travelage ». Le CERTU recommande un travelage de 0,75 m en alignement droit et de 0,60 m en courbe

de rayon inférieur à 80 m. En France, l'écartement entre les deux rails des réseaux de tramway modernes[3] est de 1 435 mm.

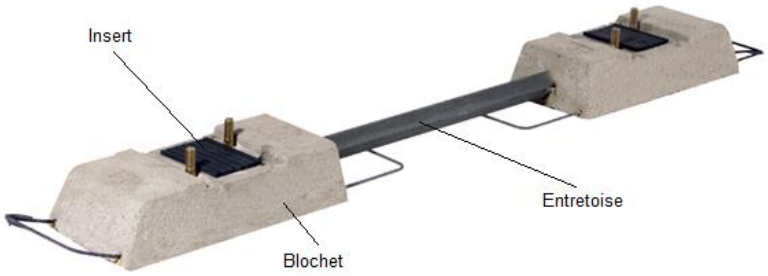


Figure 7: Exemple de traverse béton bi-bloc STRAM 120 STRADAL

Les selles

Les selles désignent l'assemblage d'une semelle en acier en interface avec le corps de voirie par l'intermédiaire d'une membrane en élastomère. Elles participent à la transmission des efforts, l'isolation électrique et la réduction des vibrations au passage d'un tramway.

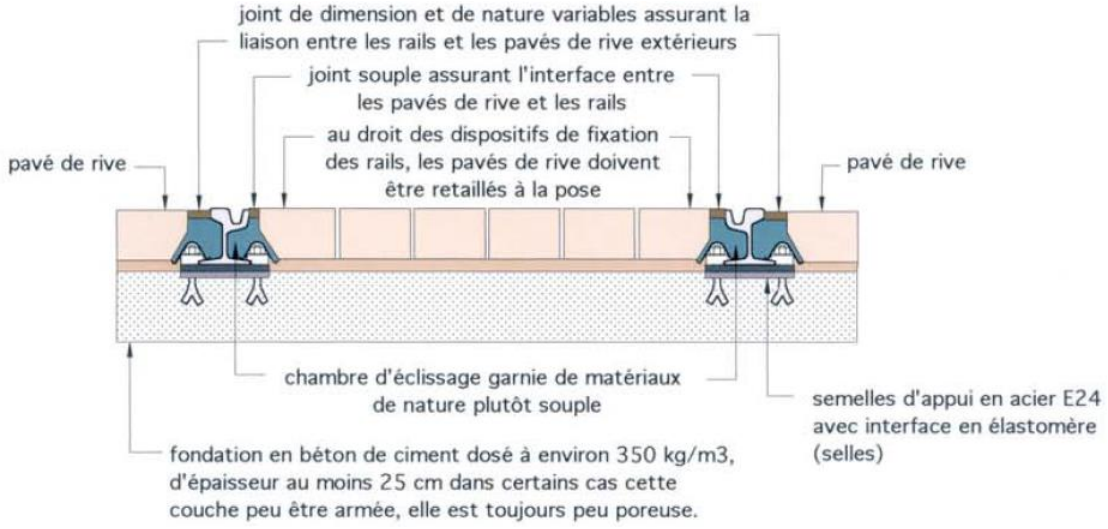


Figure 8 : Principe de pose sur selles (appuis discontinus) (CERTU & LROP, 2004)

[3] Les tramways plus anciens comme ceux des réseaux de St-Etienne et de Lille-Roubaix-Tourcoing empruntent une voie ferrée dont l'écartement entre les deux fils de rails est de 1000mm. (Muller, 2007)



Figure 9 : Exemple de pose sur selles avant scellement (Source : ARTELIA Ville & Transport)

Systèmes d'attache (pose discontinue)

Le rail est maintenu aux traverses par un système d'attache. Les attaches de rails ont pour fonction :

- d'assurer la fixation du rail sur les traverses ou la dalle en béton. Elles permettent la transmission des efforts appliqués au rail, à la structure d'assise de la plateforme de la voie ferrée via les traverses ;
- et d'isoler le rail par rapport aux courants vagabonds.



Figure 10 : Exemple d'attache – Type Vossloh (à gauche) – Type Nabla (à droite)

Notons que les systèmes vissés facilitent les interventions ultérieures sur le rail.

Continuité du rail par soudures ou éclissage

La continuité du rail généralement livré en barre de dix-huit mètres est assurée par des soudures de rails réalisées par procédé aluminothermique. En France, cette technique est employée sous l'appellation Long Rail Soudés (LRS) et équipe par ailleurs les lignes à grandes vitesses. Ce procédé est une alternative bien plus performante aux barres normales éclissées qui assurent la continuité mécanique du rail par une éclisse fixée de part et d'autre des deux sections de rails.

L'habillage des chambres d'éclissage

Afin de lutter contre les courants vagabonds, le rail doit être isolé électriquement. Pour cela on habille le rail sur tout le linéaire de voie et d'appareils de voie avec des chambres d'éclissages profilées, remplies par un matériau de remplissage. L'ensemble créé représente l'habillage des chambres d'éclissage. En raison des différentes limites d'élasticité entre les matériaux qui constituent le rail et le revêtement, les chambres d'éclissage jouent un rôle d'isolateur mécanique entre le rail et son milieu environnant. Les fonctions associées aux chambres d'éclissage sont alors de garantir l'isolement électrique du rail et d'en absorber les

mouvements mécaniques. Il existe différents types d'habillage de chambre d'éclissage en fonction notamment du trafic circulant sur le site propre et des caractéristiques du revêtement utilisé (perméable / imperméable). Selon les cas, il peut intégrer des joints de rail, le système d'attache, les capots de protection des attaches, les assainissements transversaux, etc.

Les joints de rail-revêtement

La mise en place d'un joint entre le rail et le revêtement de la plateforme participe à l'isolation électrique et mécanique du rail. Il contribue ainsi à limiter les infiltrations d'eau aux abords du rail (isolation électrique) et amortit les sollicitations mécaniques du rail sur le revêtement.

1.1.2. LES APPAREILS DE VOIE

Les appareils de voie occupent une place particulière pour la voie ferrée de tramway et dans les chemins de fer en général : ils sont nécessaires à la création du réseau, à la ramification et à la jonction des voies. Les performances et les vitesses de circulation sont fortement influencées par le nombre et la forme des appareils de voie. La construction d'un appareil de voie est beaucoup plus compliquée que celle d'un châssis de voie.

Le branchement simple

L'appareil de voie de type branche simple permet la déviation d'une voie par rapport à une autre voie (voie déviée). Si on regarde de la pointe d'aiguille en direction de la pointe du cœur de croisement, on peut faire la distinction entre le branchement simple à gauche et le branchement simple à droite.

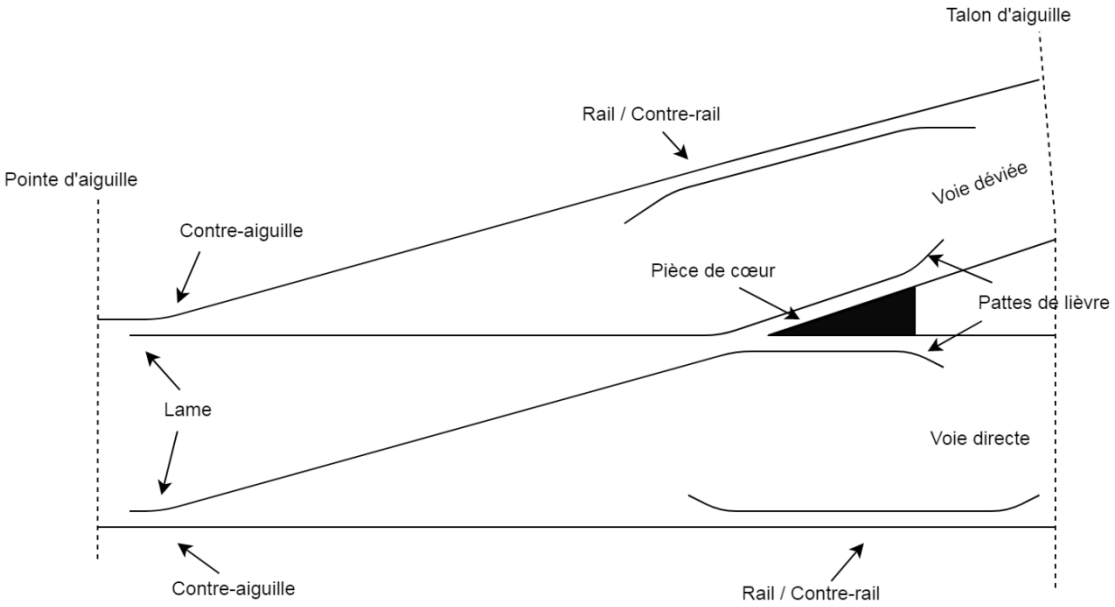


Figure 11 : Branchement simple à gauche

La communication simple

Un appareil de voie de type communication simple permet le transit d'un matériel roulant d'une voie d'exploitation à une autre dans un sens de circulation. C'est une combinaison de 2 branchements simples

La communication croisée

Un appareil de voie de type communication croisée permet le transit d'un matériel roulant d'une voie à une autre et réciproquement, dans les deux sens de circulation. C'est une combinaison de 4 branchements simples et une traversée oblique.

Les appareils de dilatation

Un appareil de dilatation est un dispositif permettant le libre déplacement longitudinal des rails mais en interdisant tout déplacement latéral. Ils sont généralement utilisés à l'extrémité de Long rail soudé (LRS) où sur les voies implantées sur ouvrages d'art.

La traversée oblique

Un appareil de voie de type traversée oblique permet le croisement de deux voies ferrées.

Le débranchement

Combinaison de deux branchements simples et d'une traversée oblique, permet la séparation d'une voie d'exploitation en deux voies d'exploitation.

La combinaison de branchement

Une combinaison de branchement désigne des configurations de branchements et de communications. Il existe une grande variété de configurations possibles.

Le peigne

Utilisé dans les centres de maintenance pour l'accès aux voies de remisage ou d'ateliers, les appareils sont imbriqués les uns dans les autres pour limiter leur encombrement, ils ne peuvent être franchis qu'à très faible vitesse.

Les taquets d'arrêt

La fonction du taquet d'arrêt est de stopper une rame en dérive se déplaçant au pas. Sous l'effet du passage de la première roue, le taquet se lève et bloque alors la roue suivante. En fonction du revêtement, les taquets d'arrêts sont équipés d'un système de drainage afin d'éviter les grippages. Les taquets sont dits « dérailleurs » lorsqu'ils sont prévus pour provoquer le déraillement sur le côté de la voie.

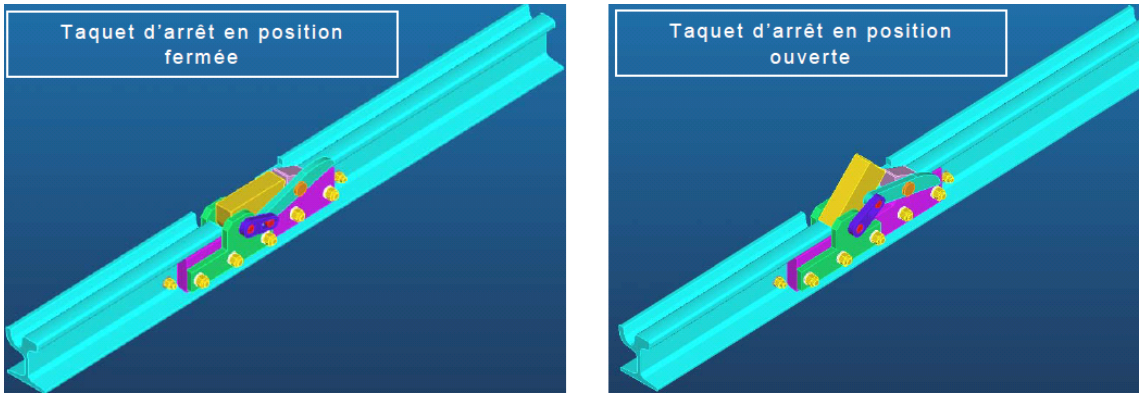


Figure 12: Principe des taquets d'arrêts - position fermée - position ouverte

1.1.3. LES OUVRAGES PONCTUELS DE GENIE CIVIL

1.1.3.a *Les ouvrages d'art*

Les ouvrages d'art désignent des constructions permettant le franchissement d'un obstacle. En milieu urbain, les obstacles sont principalement d'autres voies routières, ferroviaires ou fluviales dont le franchissement par le site propre peut s'opérer par-dessus (ouvrages d'art type pont) ou par en-dessous (ouvrages d'art type tunnel).

Les ouvrages d'art sont en béton armé pouvant être précontraint. Leur conception relève des prescriptions Eurocodes qui intègrent des critères de justification de la fiabilité vis-à-vis de la sécurité structurale, l'aptitude au service, la robustesse, la durabilité et l'usage raisonné des ressources. La référence aux Eurocodes est obligatoire pour les marchés publics en France depuis 2010.

1.1.3.b *Les ouvrages géotechniques*

Les ouvrages géotechniques englobent ici l'ensemble des aménagements de la subsurface terrestre (le sol) permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol en place (p.ex. la plate-forme de voies ferrées nécessitant un terrassement, construite en déblais ou en remblais) ou environnant (les murs de soutènement).

1.2. LES MATERIELS ROULANTS ET VEHICULES D'INTERVENTION

La nature du contact de roulement est fondamentale pour le choix du type de matériel roulant. Cette caractéristique contribue grandement aux performances du véhicule et en particulier son adhérence aux rails qui peut devenir un facteur déterminant pour le franchissement de fortes pentes à partir de +6%. Le contact fer/fer est le moins énergivore car il présente une résistance au roulement la plus faible tandis que le contact fer/pneu offre une performance d'adhérence accrue utile en cas de fortes pentes.

Le tramway sur rail (contact fer/fer) est de loin le plus courant en France. La nuance d'acier utilisé pour la roue est inférieure à celle du rail. L'effet recherché est une meilleure adhérence afin d'éviter le glissement des roues ce qui engendre aussi une usure plus marquée des roues par rapport au rail car il est plus simple de reprofiler ou remplacer les bandages des roues plutôt que les rails. Pour le tramway sur pneu, l'usure des roues est d'autant plus marquée du fait de ces performances d'adhérence.

Le marché français des tramways est dominé par Alstom, leader incontesté avec plus de 7 véhicules sur 10 en exploitation. Parmi les modèles en circulation, on retrouve la gamme TFS (Tramway Français Standard) qui a équipé les premiers réseaux de tramways modernes dont Nantes et Grenoble, puis la gamme Citadis qui le remplaçât et équipe désormais la plupart des réseaux en France.

Tableau 2 : Parc des tramways en France (Source : AFAC, MAJ du 16/06/2015)

Constructeur	Quantité de véhicule en service	Part de marché
ABB	26	1,86%
Adtranz (Bombardier depuis 2001)	50	3,58%
Alstom	1078	77,11%
Bombardier	91	6,51%
Breda	24	1,72%
CAF/CFD	31	2,22%
Lohr industrie	71	5,08%
Siemens	27	1,93%
Total	**1398**	**100,00%**

Pour la suite, ce descriptif se concentrera sur les principes de conception des modèles Alstom. La plupart des informations sont issues des articles des techniques de l'ingénieur (Muller, 2007) (Muller, 2012).

1.2.1. AGENCEMENT DU TRAMWAY CITADIS D'ALSTOM

La gamme Citadis est basé sur le principe d'un tramway modulable en fonction des objectifs de capacité et accessible grâce à un plancher bas intégral. Les Citadis se distinguent par le nombre et le type de caisse et de bogies qui les composent. La caisse désigne l'élément de carrosserie (chaudron) habillé, aménagé et équipé de tous les équipements électriques, électroniques, mécaniques et pneumatique. Un Citadis se compose généralement :

- de deux modules d'extrémité (ME) avec cabine de conduite intégrée permettant au véhicule de circuler dans les deux sens, sans nécessiter de boucle de retournement,
- de nacelles d'intercirculation (NI), (optionnel)
- de nacelles de compartiment voyageurs (CV) qui s'attèlent à leurs extrémités à deux modules (ME) ou nacelles (NI). (optionnel)
- de bogies moteurs et de bogies porteurs (essieux).

Tableau 3 : Eléments de différenciation des tramways de la gamme Citadis d'Alstom

	Caractéristiques des caisses	Caractéristiques des bogies
Citadis 202	3 caisses type ME-CV-ME	2 bogies moteurs
Citadis 302	5 caisses type ME-CV-NI-CV-ME	2 bogies moteurs et 1 bogie porteur
Citadis 402	7 caisses type ME-CV-NI-CV-NI-CV-ME	2 bogies moteurs et 2 bogies porteurs

Citadis 403	7 caisses type ME-CV-NI-CV-NI-CV-ME	3 bogies moteurs et 2 bogies porteurs

1.2.2. LES BOGIES

Selon la définition de l'UIC (Union Internationale des chemins de fer), la dénomination « bogie » désigne un ensemble de quatre roues indépendantes ou reliées par un essieu.

Le bogie ARPEGE d'Alstom est au cœur de la technologie « plancher bas ». Il porte les roues, les freins à disque, les patins de freinage électromagnétique, les sablières, les graisseurs ainsi que les moteurs asynchrones pour les bogies de traction.

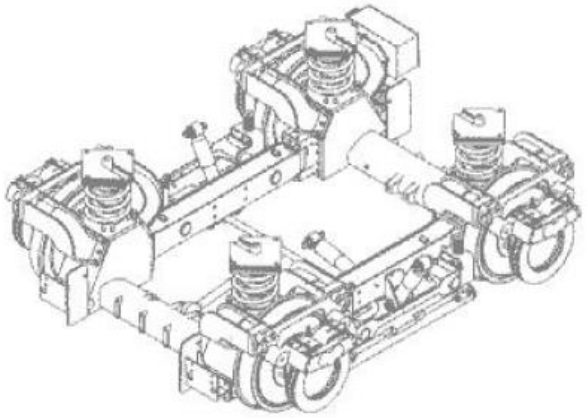


Figure 13: Boggie ARPEGE (Source : Alstom)

1.2.3. LES EQUIPEMENTS TECHNIQUES DE CONFORT

1.2.3.a *Le renouvellement d'air*

Le renouvellement de l'air ambiant est assuré en maintenant une légère surpression à l'intérieur des rames par de l'air aspiré de l'extérieur de sorte qu'à l'ouverture des portes, l'air se renouvelle périodiquement (25 fois par heure au minimum).

1.2.3.b *Chauffage*

Sur le même principe que le renouvellement d'air, l'air aspiré à l'extérieur peut être dirigé dans des conduits vers des résistances chauffantes, avant d'être diffusé à l'intérieur de la rame.

1.2.3.c *Climatisation*

Dans certaines villes où les conditions climatiques le nécessitent, les tramways peuvent être équipés d'un système d'air conditionné. A noter que la cabine de conduite dispose d'une climatisation indépendante pour le bien-être du conducteur.

1.2.4. LES EQUIPEMENTS TECHNIQUES DE TRACTION

La chaine de courant de traction d'un tramway comprend :

- un organe de prise de courant. A titre d'exemple, la rame 302 de la gamme Citadis en figure ci-dessous, est équipée d'un système classique LAC / Pantographe,

- un parafoudre,
- un disjoncteur principal (DJ),
- un convertisseur statique faisant office de transformateur à courant continu ; alimenté sous la tension de ligne (750V), il restitue des tensions diverses pour l'alimentation des auxiliaires,
- un onduleur, qui permet de produire à partir du courant continu (750Vcc) des tensions alternatives triphasées pour l'alimentation des moteurs de traction asynchrones,
- des moteurs de traction,
- des balais de retour du courant

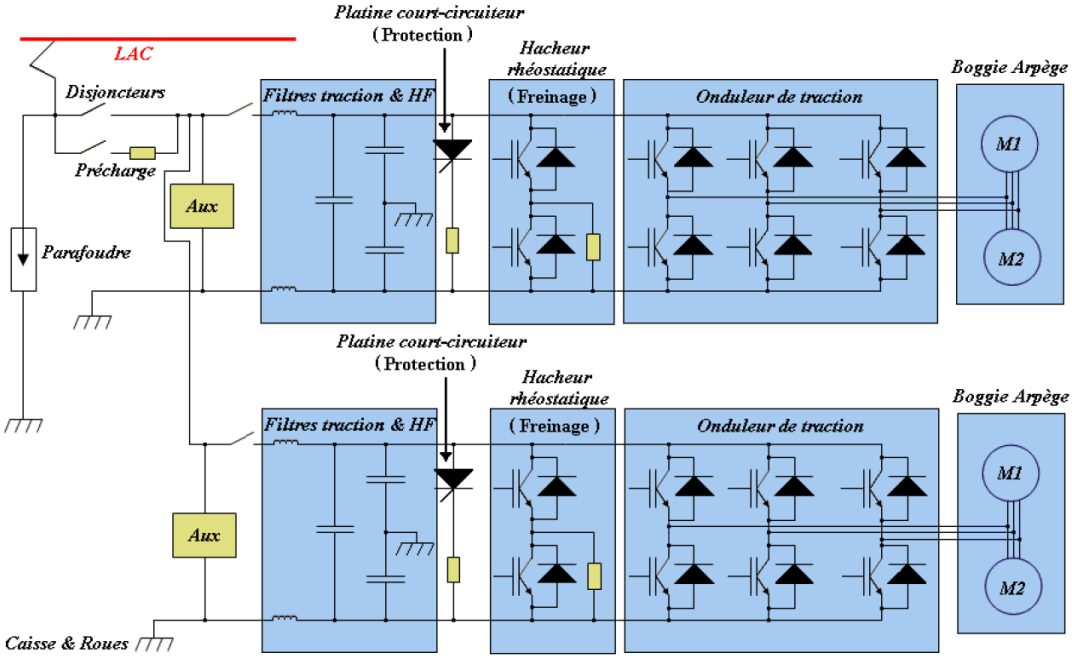


Figure 14 : Schéma électrique simplifié d'un tramway Citadis 302 (Morin, 2006)

1.2.4.a *L'organe de prise de courant*

Le matériel roulant capte l'énergie de traction 750Vcc par un système pantographe / LAC. Dans le cas d'utilisation d'une technologie alternative (p.ex. APS d'Alstom ou Primove de Bombardier), le captage de l'énergie s'opère sous le matériel roulant par contact ou induction, avec des équipements placés au niveau et en dessous de la voie ferrée.

Le pantographe est fixé sur le toit du matériel roulant au moyen d'isolateurs (pour éviter la mise au potentiel du chaudron[4]). L'appareil est articulé et maintenu par un ressort qui assure le contact avec la ligne aérienne de contact. Le pantographe est surmonté d'un archet pourvu de bandes de carbone (graphite) pour garantir un bon contact, sans générer de parasites.

[4] Le chaudron désigne l'élément de carrosserie à l'état nu, sans habillage, ni aménagement, ni équipement. Il est généralement constitué de matériaux métalliques conducteurs type acier.

L'archet est la pièce d'usure du pantographe. Les mainteneurs doivent contrôler périodiquement l'état des bandes de graphite, notamment pour éviter tout risque d'arrachage de LAC.

1.2.4.b *Les moteurs asynchrones*

Le moteur asynchrone est aujourd'hui le moteur de traction par excellence depuis l'avènement de l'électronique de puissance. Il s'agit plus particulièrement d'un moteur électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor (le rotor désigne la pièce cylindrique en rotation à l'intérieur du stator). Le moteur asynchrone ne nécessite pratiquement aucun entretien et sa longévité n'est limitée que par l'usure des deux roulements du rotor.

1.2.5. LES EQUIPEMENTS TECHNIQUES DE FREINAGE

Les tramways modernes disposent d'un frein de service électrique et de freins mécaniques et à friction. Le conducteur ne dispose pas d'une commande pour chaque type de frein mais d'un seul et unique manipulateur. En fonction des décélérations demandées et des conditions d'adhérence, ce sont des microprocesseurs qui vont déterminer la conjugaison des différents types de freins.

1.2.5.a *Frein électrique modérable*

Il s'agit du frein utilisé en situation normale d'exploitation (frein normal de service FNS). Le niveau de décélération est modulable en fonction de la position du manipulateur de conduite. Dans ce mode de freinage, les moteurs asynchrones se comportent comme des générateurs et débitent le courant généré soit :

- sur un banc de résistances embarqué (rhéostat) : c'est le freinage rhéostatique,
- soit, sur la ligne aérienne de contact : c'est le freinage par récupération.

1.2.5.b *Frein mécanique modérable*

A vitesse basse, le frein électrique n'étant plus suffisant pour assurer le bon niveau de décélération, on a recours au frein mécanique modérable. Il s'agit d'un frein à disque calé, soit sur un essieu, soit sur une roue en cas de roues indépendantes. En situation de freinage, le disque est enserré plus ou moins fort par un étrier comprenant des mâchoires. L'électronique embarquée assure la complémentarité des freins électriques et mécaniques.

A noter que, pour des raisons de sécurité, la position au repos des ressorts (p.ex. en cas de rame immobilisé, pannes, etc.) maintient l'effort maximum sur les disques de freins (frein d'immobilisation) ce qui permet d'éviter tout risque de dérive du train.

1.2.5.c *Frein par patins électromagnétiques*

Il s'agit d'un mode de freinage assuré par des patins, suspendus au cadre du bogie (moteur et éventuellement porteur) à quelques millimètres au-dessus du rail. Chaque patin comprend des spires (ou bobine) qui, excitées par le courant 24V ou 72V de la batterie de bord, transforment le patin en un puissant électro-aimant qui est attiré par le rail en acier avec une force verticale de l'ordre de 60kN (entre 5 et 6t). Cette force se développe indépendamment des conditions d'adhérence du moment. Cet équipement est obligatoire et le frein n'est pas modérable. Il est utilisé en freinage d'urgence (FU).

1.2.5.d *Les systèmes anti-enrayage et anti-patinage*

A l'instar du système d'anti-blocage des roues (le système ABS) utilisé en automobile, un dispositif du même genre équipe les tramways. Les premiers systèmes anti-patinage ont d'ailleurs été inventés pour des applications ferroviaires. Ce dispositif mesure le mouvement de rotation d'une roue d'un bogie porteur et d'un bogie moteur. Si le système détecte un différentiel, cela signifie l'apparition d'un éventuel enrayage de la roue motrice. Dès lors, le système électronique embarqué relâche légèrement et brièvement l'effort de freinage mécanique. Ce même dispositif intervient également en situation de démarrage en cas de patinage des roues lorsque les conditions d'adhérence sont dégradées. Le dispositif active alors les sablières, qui éjectent du sable spécial sous les bandages des roues motrices. Le réservoir de ces sablières est rempli régulièrement.

1.2.6. LES EQUIPEMENTS TECHNIQUES « AUXILIAIRES »

Dans le jargon des constructeurs, le terme « Auxiliaires » désigne les équipements électriques embarqués qui ne participent pas à la traction du véhicule.

On trouve dans cette catégorie :

- la signalisation lumineuse, disposée à l'extérieur de la rame : phares frontaux, feux de gabarit, feux stop, feux de détresse et feux de brouillard,
- les graisseurs de boudin qui sont des pompes permettant de projeter à fréquence constante des jets de graisses sur les boudins des roues de manière à atténuer les bruits de crissement, la résistance à l'avancement ainsi que l'usure sur la face intérieure du champignon du rail. Ces installations sont interfacées avec le SAE (Système d'Aide à l'Exploitation) qui, grâce à la localisation des rames, déclenche les pompes à l'approche d'une courbe.
- l'éclairage intérieur, qui ne doit pas être inférieur à 200 Lux en cas de situation dégradée,
- la sonorisation,
- les validateurs,
- les équipements de confort,
- et les équipements spéciaux de la cabine de conduite (commandes, voyants lumineux, boutons, radiotéléphone, etc.).

1.2.7. LES VEHICULES DE SERVICE OU D'INTERVENTION

Les véhicules de service ou d'intervention doivent être compatible avec les caractéristiques de la voie ferrée (gabarit, tracé, profil de rail).

Ces véhicules sont utilisés pour :

- remorquer une rame en avarie,
- réaliser une opération de maintenance sur les lignes aériennes de contact (équipé d'une nacelle),



Figure 15 : Un véhicule ré-enrailleur, Renault RVI (à gauche) ; un véhicule rail-route, Mercedes Unimog (à droite).

1.3. LE RESEAU ELECTRIQUE DE TRACTION

Les réseaux de tramway modernes sont alimentés en courant continu avec une tension d'alimentation de 750Vcc contre 600Vcc pour les lignes anciennes mises en service avant 1970 (Muller, 2012). Cette caractéristique est propre aux réseaux de transport collectif urbain. Ce choix est d'abord historique, du fait de l'apparition plus tardive des premières machines à courant alternatif mais se justifie également techniquement. Les niveaux de fréquence des transports urbains étant plus soutenus et impliquant une quantité plus importante de véhicules par kilomètre de ligne que pour les chemins de fer, il devient plus avantageux de recourir à des équipements de tractions plus simples et légers (sans transformateurs) et des équipements fixes plus complexes (Morin, 2006).

Généralement, le système de distribution et d'alimentation de l'énergie de traction est constitué :

- de plusieurs sous-stations de redressement (SSR) d'une puissance de 800 à 1000kW, composées notamment d'un ou deux transformateurs-redresseurs principaux pour l'énergie de traction et d'un transformateur auxiliaire pour les équipements courants faibles,
- de dispositifs de distribution de l'énergie de traction (disjoncteurs, sectionneurs, dispositifs de secours et de sécurité, etc.),
- de dispositifs de contrôle-commande, assurant notamment l'interface avec le Poste de Commande de l'Energie (PCE),
- de dispositifs de protections contre les risques d'électrocution, d'électrisation et d'incendie,
- d'une technologie d'alimentation des matériels roulants et ses équipements structurels associés (p.ex. poteaux des lignes aériennes de contact ou profilés conducteurs dans le cas de l'Alimentation Par le Sol).

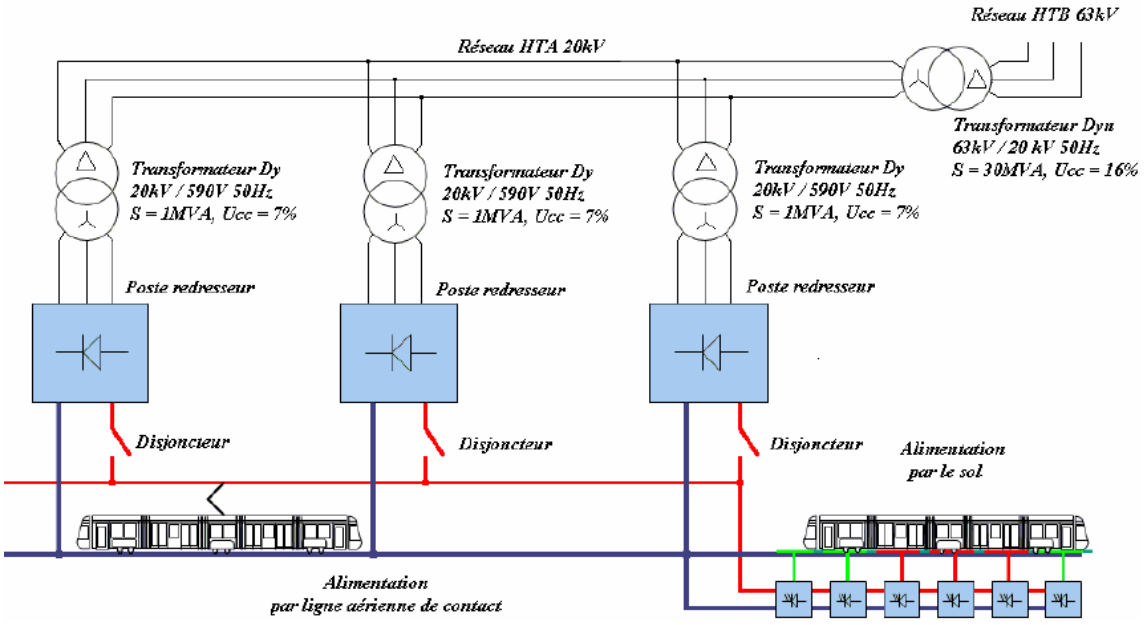


Figure 16 : Illustration d'un réseau électrique de tramway équipé d'une Ligne Aérienne de Contact (LAC) et d'une Alimentation par le Sol (Morin, 2006).

1.3.1. LES SOUS-STATIONS DE REDRESSEMENT

Une sous-station de redressement a pour fonction de transformer la tension d'alimentation du réseau HT (Haute Tension) 20kVca (courant alternatif) en tension 750Vcc (courant continu). Les SSR sont espacées de 2 à 2,5km en moyenne selon les contraintes de site (emplacements disponibles pour les SSR) et d'exploitation. La demande en énergie de traction est tributaire de la quantité maximale envisagée de matériels roulants en circulation, du mode d'exploitation (unité simple ou unité multiple) et du profil du tracé de voie. Par ailleurs le dimensionnement des SSR (quantité, puissance et espacement) doit prendre en compte le fonctionnement en situation dégradée : disjonction volontaire ou involontaire d'une SSR.

Lorsqu'il y a un risque pour que la tension minimale acceptable ne soit pas atteinte (généralement 500Vcc) sur certaines sections de ligne, des moyens de maintien de la tension peuvent être installés : des Feeders. Ce sont des câbles conducteurs installés le long des voies qui permettent de limiter les pertes de tension en ligne.

Une sous-station de redressement typique se compose de (Muller, 2012) :

- 1 cellule arrivée HT, alimentée en dérivation,
- 1 cellule de comptage, propriété du distributeur d'électricité,
- 1 cellule de protection du transformateur de puissance,
- 1 transformateur principal de puissance 1000kV A sous 20kVca/585Vca,
- 1 groupe redresseur 900kW pour 750Vcc/1200A,
- 1 groupe onduleur pour le courant de récupération lors du freinage,

- 2 disjoncteurs ultra-rapides (DUR) à courant continu reliés à 4 départs 750Vcc (contracteurs électromagnétique), 2 pour la ligne aérienne, 2 pour le feeder relié aux rails pour assurer le retour du courant,
- 1 transformateur 20kVca/380Vca pour l'alimentation des auxiliaires,
- 1 source de 220V secourue pour l'alimentation des équipements dans les stations,
- 1 source de 48V secourue pour l'alimentation des auxiliaires de commande et de contrôle

Dans le cas d'utilisation d'une technologie classique – la ligne aérienne de contact – chaque SSR alimente deux sections de LAC, séparées électriquement par un isolateur de section (IS) ponté par un contacteur électromagnétique. De ce fait, il est possible d'isoler du réseau une SSR pour une intervention de maintenance par exemple.

1.3.1.a *Les dispositifs de contrôle-commande*

Les fonctions de contrôle-commande de la SSR sont assurées localement par un automate programmable. Ce dernier relié au commutateur réseau assure l'interface avec le Poste de Commande de l'Energie (PCE) via un réseau multiservice pour les fonctions de supervision et d'administration des équipements de la SSR.

L'armoire contrôle - commande doit assurer :

- La remontée d'alarmes vers le système de supervision et administration,
- Le paramétrage et la configuration des équipements locaux par le système d'administration de réseaux,
- Le dialogue des équipements actifs locaux avec la plate-forme centrale d'administration de réseaux.

1.3.1.b *Le réseau MANT*

Le réseau MANT est un réseau électrique contribuant à la couverture des risques d'électrocution des personnes. Il est composé d'interconnexions permanentes des émergences et de liaisons non permanentes au rail de retour traction (par des intervalles de décharge). Le réseau MANT s'adresse à plusieurs éléments du sous-système « Energie », il s'agit des éléments LAC, de l'éclairage public, de la SLT et des stations (boucles de terre) qu'il permet de sécuriser en cas de mise en potentiel de ces équipements par disjonction du courant de traction via les intervalles de décharge.

En cas de rupture d'un élément du système de ligne aérienne de contact et du contact d'un de ces éléments avec une émergence reliée à la MANT, ce système réalise un court-circuit « franc » entre le (+) positif (de la LAC) et le (-) négatif (du rail) de sorte à provoquer le déclenchement des protections des SSR alimentant la section électrique concernée. L'alimentation électrique ainsi rompue évite tout danger d'électrisation au contact des éléments reliés à la MANT.

1.3.2. LA LIGNE AERIENNE DE CONTACT

Une ligne aérienne de contact est, selon l'IEC (International Electronical Commission – ref. 811-33-02), une ligne électrique destinée à alimenter des véhicules en énergie électrique par l'intermédiaire d'organes

de prise de courant et constituée par des conducteurs placés au-dessus (ou à côté) de la limite supérieure du gabarit des véhicules.

Cette définition souligne les éléments suivants :

- « des conducteurs », qui désignent le fil de contact en cuivre sur lequel s'appuie l'organise de prise de courant,
- « l'organe de prise de courant », qui permet l'interface avec le matériel roulant, réalisée au niveau du contact entre le pantographe et le fil de contact,
- « au-dessus de la limite supérieure du gabarit des véhicules » qui marque l'importance de la hauteur de LAC par rapport au plan de roulement (niveau supérieur des rails) vis-à-vis de la compatibilité avec les gabarits routiers et le gabarit tramway. Une hauteur minimale de 6,00m est exigée par la règlementation du STRMTG (Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés) – sauf cas dérogatoire.

Ainsi, un système LAC type est généralement constitué :

- de fils de contact en cuivre de section de 102 à 150mm² suivant la valeur maximale de l'intensité de courant sur la ligne,
- de pinces de suspension[5] qui sont accrochées, d'une part, aux fils de contact par l'intermédiaire de talons situés sur la partie supérieure des câbles et, d'autre part à des câbles (en acier galvanisé, en parafil ou en kevlar) perpendiculaires aux lignes aériennes de contact,
- de poteaux et/ou autres supports (p.ex. il est courant d'avoir recours à des crochets en façade de bâtiment) pour l'ancrage des câbles perpendiculaires (suivant les techniques de pose, on lui associera également le haubanage du système de suspension),
- de dispositifs anti-cheminement/antichute,
- d'appareils tendeurs équipés de contrepoids[6] pour la régularisation de la tension mécanique de la LAC,
- de dispositifs de sectionnement mécanique (et continuité électrique) entre deux cantons de tir[7] de LAC,
- de dispositifs de sectionnement électrique (et séparation physique) entre deux sections de LAC soit par l'intermédiaire d'un isolateur de section (IS), soit par un sectionnement à lame d'air. Dans les deux cas, le sectionnement peut être ponté par un contacteur électromagnétique afin de pouvoir réaliser des services partiels ou provisoires en cas d'incident sur une portion de la ligne,

[5] A noter que contact entre les pinces de suspension et le fil de contact n'est pas direct. En effet, la suspension est adoucie par un delta dont la longueur est fonction des vitesses pratiques et de l'importance des portées (distance entre 2 supports de LAC) de manière à amortir les oscillations (c.-à-d. les chocs répétés du fil de contact sur le pantographe). L'amorti contribue à limiter l'usure du pantographe.

[6] La présence de contrepoids permet régulariser les variations de longueur du fil de contact due à la température ambiante, et augmentée par les appels de courant.

[7] Un canton de tir désigne la distance de fil de contact entre deux ancrages consécutifs.

- et d'équipements spéciaux en des points particuliers (p.ex. au droit des ouvrages d'art ou droit des passages de convois exceptionnels).

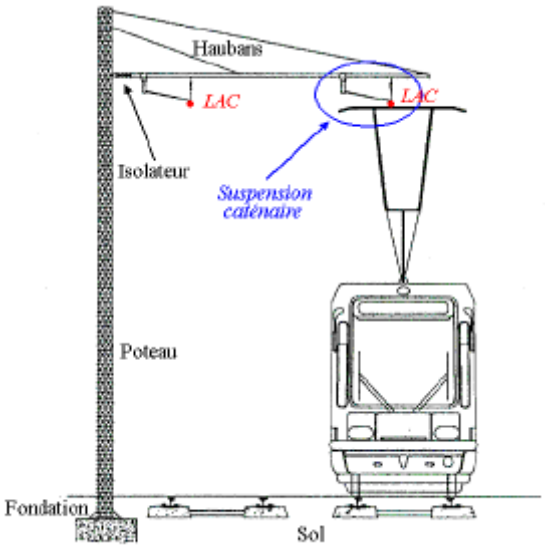


Figure 17: Support latéral d'une ligne aérienne de contact (Morin, 2006).

1.3.3. L'ALIMENTATION PAR LE SOL

En réponse à l'aspect inesthétique des lignes aériennes de contact (An, 2013), en particulier dans les lieux à caractère historique ou architectural, il est possible d'avoir recours à des technologies alternatives pour alimenter « par le sol » les véhicules en circulation. Plusieurs systèmes existent, on peut citer notamment :

- le système Primove de Bombardier,
- le système APS d'Alstom (ALISS) ou d'Innorail (racheté en 2003 par Alstom)
- le système STREAD d'Ansaldo.

La description qui va suivre concerne exclusivement le système APS d'Innorail tel qu'utilisé par Alstom sur le réseau de Bordeaux, exemple reconnu en France.

Le principe de base de ce procédé repose sur un ensemble de sections de profilés conducteurs et isolés électriquement. Ces sections se placent dans l'axe de la voie et sont intégrées à la plate-forme de roulement. La prise de courant de traction s'opère par l'intermédiaire de deux patins frotteurs placés de part et d'autre du tramway. Afin d'éviter tout risque d'électrisation, la mise sous tension des profilés ne s'effectue qu'au fur et à mesure de l'avancement du tramway. La détection du tramway (qui permet la commutation des profilés) est réalisée par l'intermédiaire de boucle d'induction (spécificité du système APS d'Innorail par rapport au système APS ALISS d'Alstom).

En cas d'impossibilité de mettre sous tension un ou plusieurs profilés, les tramways sont équipés d'une batterie d'accumulateurs électrochimiques leur permettant d'assurer une autonomie suffisante pour garantir la résilience du service. D'un point de vue structurel, l'alimentation des profilés est assurée par des feeders et des coffrets de commande encastrés dans la chaussée.

L'alimentation par le sol est dans sa configuration actuelle une technologie compliquée et couteuse en investissement et en maintenance (Muller, 2012). Son emploi se limite aux zones à caractère architectural exceptionnel ou lorsque le trajet sans LAC est trop long pour être parcouru en autonomie avec le type de batterie embarquée actuellement disponible.

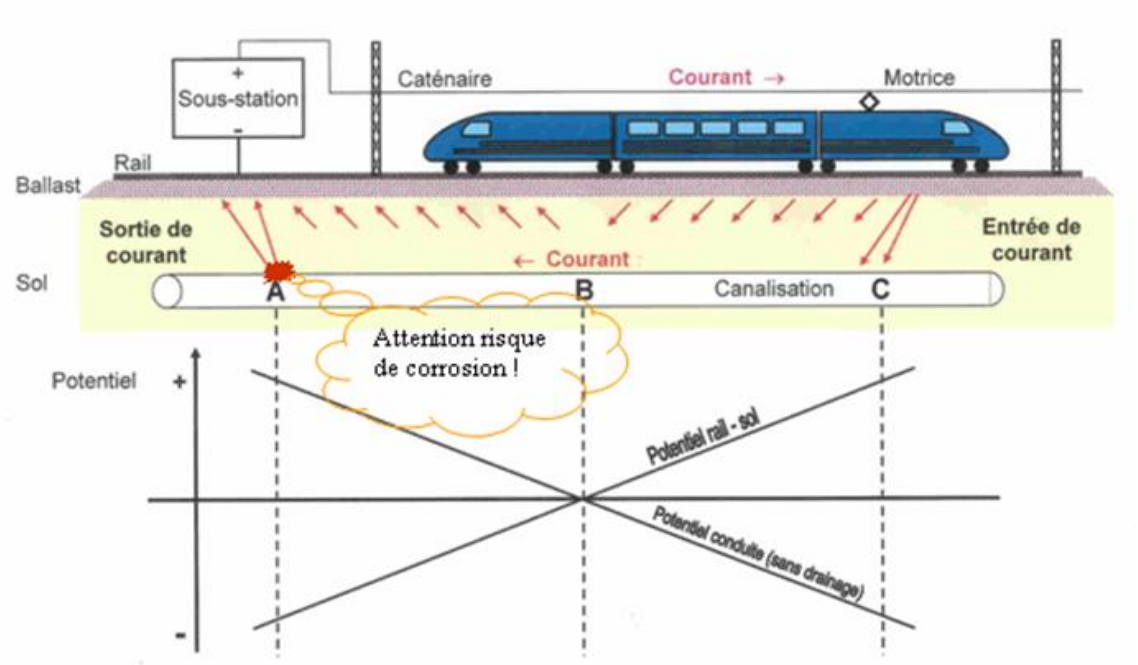
1.3.4. LE RETOUR DE COURANT DE TRACTION ET LES COURANTS VAGABONDS

Bien que les rails assurent la fonction première de roulement et de guidage du matériel roulant, ils assurent aussi le retour du courant de traction vers les SSR. Mais le sol représente aussi involontairement un chemin de retour. En effet, du fait de la résistance des rails (ou éventuellement du troisième rail, l'APS n'étant pas épargné par le phénomène), une partie du courant de retour s'échappe des rails pour trouver un chemin de moindre résistivité électrique vers la SSR la plus proche.

Ces courants parasites peuvent dégrader les réseaux sensibles environnants (p.ex. canalisations, cuves…). Le risque est particulièrement important lorsqu'il s'agit des stations-services sujettes aux risques de corrosion des cuves de carburant. Ils peuvent aussi dégrader la plateforme, les rails, les attaches et même le béton ou le revêtement par corrosion.

Pour prévenir les risques de courants vagabonds, trois types d'actions existent :

- des actions préventives qui se caractérisent par le maintien de la résistance rail-sol la plus élevée possible, la protection et l'isolement des rails ainsi que la protection des canalisations,
- des actions de contrôle qui se caractérisent par des mesures de courants vagabonds avant et après la mise en service du tram-train,
- et des actions correctives en cas de nécessité, notamment la mise en œuvre d'un câble de liaison ferroviaire après une casse de rail.



1.4. LA SIGNALISATION TRAMWAY

Les tramways et les voies de chemin de fer sont historiquement différents, notamment en raison du mode d'exploitation. Pour le mode ferroviaire, la règlementation du Réseau Ferré National (RFN) impose l'utilisation d'une signalisation qui lui est propre afin de permettre la circulation des trains ferroviaires sous le régime du cantonnement[8]. Pour les tramways, il est d'usage d'être sous le régime de la conduite à vue. La conduite à vue est assimilable à la marche à vue dans le contexte ferroviaire. La marche à vue est un principe d'exploitation ferroviaire imposant au conducteur de pouvoir immobiliser son véhicule à tout moment en présence d'un obstacle présent sur sa trajectoire.

Le principe de conduite à vue est donc particulièrement adapté à un environnement urbain où le partage de la voirie entre piétons, cyclistes et modes motorisés implique une vigilance particulièrement réactive du conducteur. Ainsi, le cadre d'utilisation de la signalisation ferroviaire pour le tramway est limitée aux zones de manœuvre et autres zones inaccessibles aux autres usagers (p. ex. site propre intégral protégé par des barrières anti-intrusion). On peut souligner la présence de signalisation dite « d'aide à l'exploitation » sur certaines sections de ligne le nécessitant (p.ex. risque de manque de visibilité en cas de brouillard) mais celle-ci n'est pas conçue en sécurité intrinsèque et requiert toujours une grande vigilance de la part du conducteur.

1.4.1. LA SIGNALISATION DE MANŒUVRE

La signalisation ferroviaire de manœuvre permet la circulation en sécurité des tramways dans les zones de manœuvre où il existe un risque de collision entre deux tramways ou un risque de mouvement inopportun d'une aiguille. En voie courante, la ligne n'est pas équipée en continu de systèmes permettant de détecter la présence d'une rame sur des zones définies (p.ex. circuits de voie). Ce type de signalisation remplit les fonctions suivantes :

- permettre la télécommande d'itinéraires,
- autoriser ou interdire la manœuvre des aiguilles et l'exécution des mouvements,
- détecter la présence de tramways,
- commander et contrôler la position des aiguilles motorisées,
- assurer les enclenchements, et les destructions d'itinéraires parcourus,
- autoriser les mouvements,
- permettre aux conducteurs de contrôler que l'itinéraire autorisé est conforme à la télécommande,
- superviser l'état des différentes zones signalisées en temps réel depuis le PCC.

[8] Cantonnement : système permettant de garantir l'espacement des circulations des véhicules afin d'empêcher toute collision (Source : NF EN 50129). Sur voie double, l'espacement concerne la circulation des véhicules qui se succèdent sur une même voie.

Il est à noter que la protection des conflits avec les véhicules de type routier en carrefour est assurée par la Signalisation Lumineuse de Trafic (SLT), autorisant ou non le conducteur à franchir ou non la voie routière.

1.4.2. LA SIGNALISATION DE LIMITATION DE VITESSE

L'objectif de cette signalisation est d'indiquer au conducteur la vitesse maximale à ne pas dépasser dans une zone donnée. Ces limitations de vitesse ont pour but :

- de garantir la sécurité du matériel roulant, des voyageurs et de l'environnement extérieur (piétons, cyclistes, automobilistes),
- d'assurer le confort des voyageurs dans les courbes.

1.4.3. SYSTEME DE COMMANDE EN MODE DEGRADE

En cas de défaillance des systèmes de contrôle-commande de la signalisation de manœuvre, les exigences de sécurité imposent des solutions de secours pour la commande des itinéraires en mode dégradé. Par ordre de préférence, ces dispositifs peuvent être commandés via :

- le conducteur : en cabine, il dispose d'une interface lui permettant de commander un itinéraire. Ces commandes sont transmises par un équipement embarqué permettant d'envoyer des messages vers des équipements fixes (boucles de commandes), installés sur la voie,
- des boîtiers de secours : ceux-ci sont installés à proximité des signaux d'itinéraire. Ils permettent de commander ou détruire un itinéraire et de consulter son état (commandé, mémorisé, enclenché, autorisé ou détruit). Ils sont accessibles à partir d'une clé spécifique de déverrouillage,
- un levier amovible (sabre) présent à bord de la rame et à utiliser qu'en dernier recours.

1.4.4. SYSTEMES DE DETECTION DES MATERIELS ROULANTS : LES CIRCUITS DE VOIE

Parmi l'ensemble des équipements de signalisation, les circuits de voie sont les organes les plus critiques de point de vue de la sécurité. Ils sont utilisés pour protéger des points sensibles sur la voie tels que les aiguillages, passages à niveau (surtout vrai pour le RFN) ou pour palier à un manque de visibilité. Ces dispositifs permettent la détection d'un matériel roulant sur un canton : c'est-à-dire une portion de la voie. Les circuits de voie s'appuient sur la conductivité des rails de roulement par lesquels circulent :

- le courant de traction,
- et le courant de circuit de voie.

Les rails de roulement sont isolés par des joints isolants, mais auxquels ont place des liaisons inductives (transformateur à point milieu (Morin, 2006)), pour maintenir le retour du courant de traction. Les deux fils de rails doivent être isolés entre eux. Lorsqu'un matériel roulant se déplace sur le canton, il crée un court-circuit et le circuit de voie détecte la présence du matériel roulant. Il existe une très grande variété de circuit de voie en fonction du type de voie ferrée, de la nature du courant de traction, des gabarits fréquentiels propres à chaque pays et les niveaux harmoniques du réseau électrique du tramway concerné.

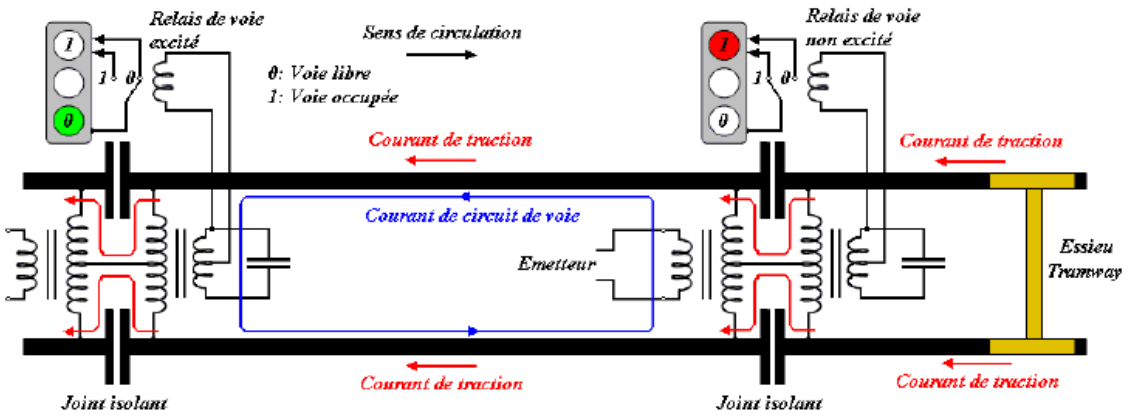


Figure 18: Circuit de voie à joints isolants, canton libre (Morin, 2006)

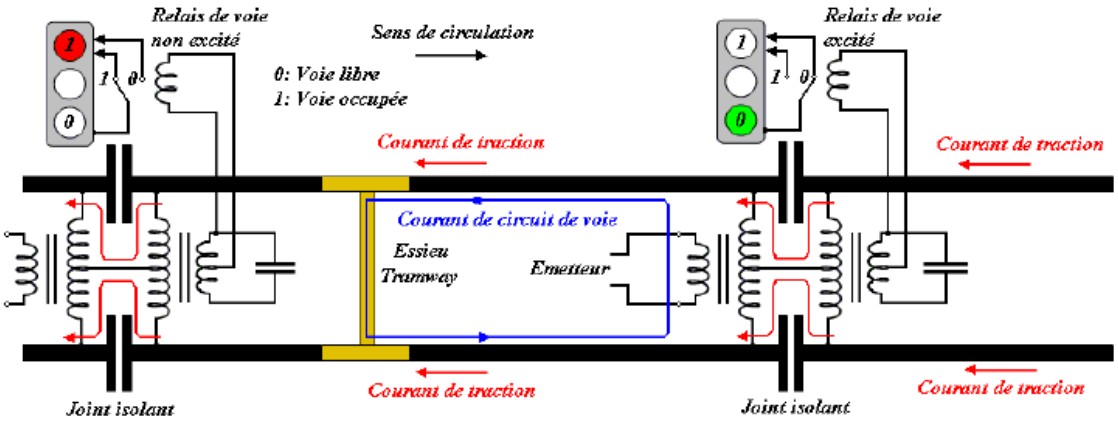


Figure 19: Circuit de voie à joints isolants, canton occupé (Morin, 2006)

1.5. LES SYSTEMES CENTRAUX D'INFORMATION ET DE TELECOMMUNICATIONS

Afin de permettre une exploitation plus efficace et plus sûre, ainsi que d'assurer le confort et la sécurité des voyageurs, les réseaux de transports urbains s'appuient sur des systèmes d'information et de télécommunication. On peut déjà en citer quelques-uns :

- le système d'aide à l'exploitation (SAE), qui, grâce à la géolocalisation des tramways en temps réel, permet la supervision et la régulation des rames depuis le PCC, l'assistance des conducteurs et la production de données de circulation en temps réel pour l'information des voyageurs,
- le réseau multi-service (RMS), réseau de communication filaire optique permettant l'acheminement de données à haut débit tout le long de la ligne de tramway,
- la vidéo-protection, qui met en jeu des caméras de supervision en station et sur les points singuliers de la ligne,

- la sonorisation, pour la diffusion d'annonces sonores en station,
- la billettique, pour l'achat des titres de transport en station ou pôles d'échange et pour la validation à bord des rames
- le réseau de télécommunication TETRA, système critique de l'infrastructure de télécommunication permettant tous les échanges de données temps réel entre les rames et le sol, système très imbriqué avec le SAE.

Enfin, d'autres systèmes moins structurants sont également présents sur les réseaux. Ce sont par exemple, la téléphonie/interphonie, la gestion technique centralisée des équipements ou encore les équipements d'informations des voyageurs (afficheurs) en station et pôle d'échange. Les différents systèmes fonctionnels ci-dessus se décomposent avec des équipements centraux, qui hébergent également des applicatifs logiciels et des équipements de terrain au sol ou embarqués dans les rames, le tout communiquant via la radio et le RMS.

1.6. LES STATIONS

Habituellement, les stations de tramways ne disposent ni d'agent de vente ou d'accueil en permanence sur place, ni de contrôle d'accès. Le dimensionnement des stations varie en fonction des caractéristiques du matériel roulant (longueur, hauteur de plancher), du tracé géométrique de voie (alignement droit, courbe), des contraintes de site (l'implantation) et de la règlementation[9] en vigueur concernant l'accessibilité des PMR (Personnes à Mobilité Réduite). Le positionnement du mobilier urbain du quai est régit par la règlementation. Elle impose notamment d'assurer des distances minimales pour les circulations, représentées par le schéma ci-dessous.

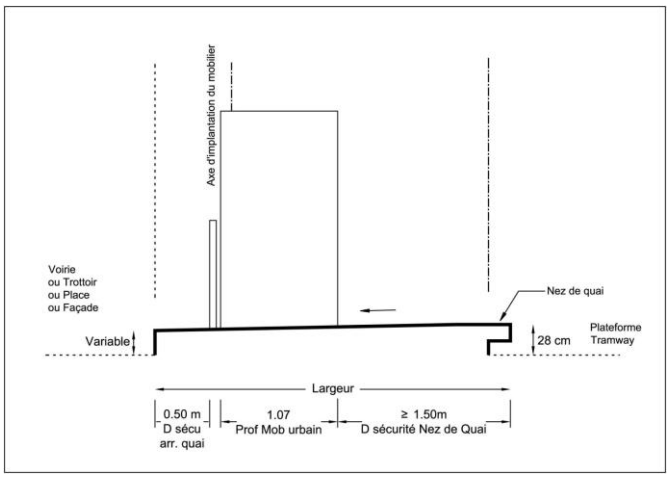


Figure 20 : Configuration transversale des mobiliers sur un quai latéral classique (Source : ARTELIA Ville & Transport)

[9] La règlementation en vigueur renvoie à l'arrêté du 15 janvier 2007 relatif à l'accessibilité de la voirie aux personnes handicapées (décret n°2006-1658 du 21 décembre 2006) ainsi qu'à l'arrêté du 13 juillet 2009 relatif à la mise en accessibilité des véhicules de transport public guidé urbain aux personnes handicapées et à mobilité réduite.

On peut classer le mobilier urbain suivant trois catégories d'équipements : les équipements de confort, les équipements de protection, de balisage ou d'accessibilité et les équipements d'information et d'exploitation.

1.6.1. LES EQUIPEMENTS DE CONFORT

Parmi les équipements de cette catégorie, on distingue :

- les abris voyageurs et coupe-vent,
- les bancs,
- les poubelles,
- les abris ou accroches pour vélo,
- les horloges (éventuellement intégrées aux équipements d'information)

1.6.2. LES EQUIPEMENTS DE PROTECTION ET DE BALISAGE

Dans cette catégorie, on classe les équipements ou les aménagements de quai destiné à la protection des usagers :

- les bandes podotactiles en nez de quai,
- les potelets, clous, garde-corps et grilles d'arbres,
- les équipements d'éclairage (luminaire, lampe, autres dispositifs).

1.6.3. LES EQUIPEMENTS D'INFORMATION ET D'EXPLOITATION

Les équipements d'information contribuent au confort des voyageurs. Les équipements d'exploitation peuvent en revanche revêtir des finalités de différentes natures : technique, publicitaire ou encore commerciale. Dans cette catégorie, on distingue les équipements suivants :

- les armoires électriques pour l'alimentation basse tension,
- les appareils de vidéo-protection,
- la sonorisation,
- les bornes d'appel d'urgence,
- les bornes d'information dynamique,
- l'information statique et la signalétique de proximité,
- les supports d'affichage publicitaire (statique ou dynamique),
- les distributeurs de titre de transport et/ou validateur.

1.7. LES BATIMENTS D'EXPLOITATION-MAINTENANCE

Les bâtiments d'exploitation-maintenance encercle à la fois dans une même famille les dépôts de tramway et de bus ainsi que les locaux techniques éventuels (en particulier pour le tramway). Le dimensionnement

des dépôts dépend de la taille de la flotte, de sa composition et des exigences fonctionnelles propres au projet ainsi que le foncier disponible. A sa réintroduction dans les grandes villes françaises, des dépôts de bus ont parfois été adaptés en dépôt de tramway.

1.7.1. LES DEPOTS DE TRAMWAY

Les dépôts de tramway sont de grands bâtiments industriels permettant d'entretenir et de remiser des tramways. Ils sont généralement situés à proximité du réseau de tramway de manière à limiter les kilomètres haut-le-pied[10](HLP) parcourus, c'est-à-dire n'assurant pas de transport commercial. De préférence, on cherchera à implanter le dépôt proche des zones d'affluence du matin (généralement les zones résidentielles) pour minimiser ces kilomètres non-productifs.

1.7.1.a *Fonctions principales et secondaires d'un dépôt de maintenance*

Le projet TRAMSTORE21 auquel s'est associé le Grand Dijon pour la réalisation de son centre de maintenance tram-bus, a réalisé une liste de fonctions principales et secondaires à prendre en compte lors de la conception fonctionnelle d'un projet de dépôt. TRAMSTORE21 est une plateforme d'échanges d'expériences autour de la construction de dépôts de tramways éco-performants. Il est soutenu par le programme INTERREG IV B de l'Union européenne. Le tableau ci-dessous présente de façon synthétique les différents espaces fonctionnels d'un dépôt type.

Tableau 4 : Les fonctions d'un dépôt de tramway (TRAMSTORE21, 2013)

Fonction	Description
Voies	Les voies d'accès sont utilisées afin de garantir le bon déroulement des opérations sur le site et en relation avec le réseau. Le but est de disposer d'au moins deux accès au dépôt, afin d'éviter les blocages et d'augmenter la flexibilité.
Zone de remisage	La zone de remisage est utilisée pour ranger les trams lorsqu'ils ne sont pas en service ni en maintenance. Elle peut être ouverte ou fermée. Comme la zone de remisage est une fonction clé du dépôt, elle doit être conçue en premier lieu. Le but est d'obtenir la plus grande capacité possible associée au flux optimal des véhicules. Les points critiques sont les mouvements des véhicules entre la zone de remisage et le réseau ainsi qu'entre la zone de remisage et le hall de maintenance.
Hall de maintenance	Le hall de maintenance doit être conçu après que la capacité de la zone de remisage (longueur des voies) a été définie. Plusieurs voies sont nécessaires en vue de la maintenance des véhicules. Leur nombre dépend du nombre de types de véhicules et des niveaux de maintenance. Les voies seront dotées de sièges, fosses et plates-formes. Un tour en fosse doit être installé sur une de ces voies.
Atelier de lavage	Cette installation est utilisée pour nettoyer l'extérieur des trams. Elle peut se trouver à l'intérieur ou à l'extérieur du dépôt et est souvent située sur le chemin menant au hall de maintenance.
Zone de nettoyage de l'intérieur des trams	Cette installation est destinée au nettoyage de l'intérieur des trams. Elle se situe généralement à côté du stand de lavage de l'extérieur des trams.
Stand de sablage	Le stand de sablage est utilisé pour remplir les réservoirs de sable des trams. Il est souvent situé à proximité de l'entrée, à côté du stand de lavage. Les camions de livraison doivent pouvoir accéder aux silos de sable.

[10] Haut-le-pied est le terme utilisé en ferroviaire pour désigner un tramway qui circule à vide sans marquer d'arrêt pour prendre des voyageurs, pour retourner au dépôt par exemple. On parle aussi du concept de kilomètres morts pour désigner ces trajets non-productifs (TRAMSTORE21, 2013).

Fonction	Description
Atelier sale	Cette zone est destinée à la maintenance des bogies et des autres équipements qui ont été retirés des véhicules. Une table tournante peut être ajoutée afin de faciliter le déplacement des bogies. Les camions doivent pouvoir accéder à cette zone.
Atelier d'électronique	Un atelier spécifiquement destiné aux composants électroniques est nécessaire afin de vérifier et de réparer l'équipement embarqué.
Salles pour installations techniques	Des salles seront nécessaires pour le matériel technique tel que les pompes, chauffe-eaux, les systèmes de chauffage, les sous-stations, etc.
Magasin	Cette zone est destinée au stockage des pièces détachées et des consommables. Elle doit être accessible par les chariots élévateurs ou les camions et peut être équipée de rayonnages. Plusieurs magasins peuvent être prévus pour des raisons de sécurité, en vue du stockage des produits dangereux.
Salle de contrôle	Le flux des véhicules est géré depuis une salle de contrôle disposant d'une vue globale sur le dépôt et les voies.
Bureaux	Des bureaux sont nécessaires pour le personnel de gestion (informatique, services administratifs, ressources humaines). Une solution de bureau paysager peut être prévue.
Réception	La réception se trouvera à l'entrée afin d'accueillir les visiteurs et le personnel.
Salle des conducteurs	La salle des conducteurs se trouvera à proximité de la zone de remisage afin de permettre un accès rapide aux véhicules.
Salle des superviseurs	La salle des superviseurs doit être contiguës à la salle des conducteurs afin d'améliorer la communication. Elle permet aux responsables d'organiser les activités de maintenance et de se réunir avec leur personnel.
Vestiaires	Des vestiaires séparés pour les hommes et les femmes, avec douches et casiers, doivent être prévus.
Toilettes	Des toilettes doivent être prévues à divers endroits dans l'ensemble du bâtiment.
Infirmerie	Une infirmerie, conçue pour être aisément accessible, permet de traiter les blessures mineures et de réaliser des visites médicales.
Cafétéria	Une cafétéria pour le personnel du dépôt et les conducteurs peut être utile. Elle doit être équipée de matériel permettant de réchauffer des aliments ainsi que de distributeurs automatiques. Une terrasse peut aussi être utile.
Atelier de carrosserie et de peinture	Un espace est nécessaire pour les réparations de carrosserie des véhicules et les travaux de peinture. Ces travaux peuvent être confiés au constructeur des véhicules.
Salle de repos	Un local calme peut être prévu, afin de permettre au personnel du dépôt et aux conducteurs de faire une pause rapide mais réparatrice.
Salle de conférence	Une salle de conférence est utile pour organiser des séances d'information ou des formations.
Stockage des déchets	Des systèmes spécifiques de stockage des déchets doivent être prévus dans les dépôts.
Parking	Des possibilités de stationnement pour les voitures, les motos et les vélos doivent être prévues sur le site. Comme le personnel du dépôt et les conducteurs commencent et terminent leur travail à des moments peu pratiques de la journée, ils se déplacent souvent en voiture.

1.7.1.b *Les équipements techniques d'un dépôt de tramway type*

Les ateliers destinés à la fois à la maintenance et au remisage des rames disposent habituellement des équipements suivants :

- de voies ferrées et de ses équipements associés,
- d'appareils de voie,
- d'une machine à laver,
- d'un tour en fosse pour le reprofilage des roues,
- d'un pont roulant avec dispositif de monte-marche (rappelons que la technologie « plancher bas intégral » a conduit les constructeurs à positionner en hauteur la majeure partie des organes techniques),
- silos de sable pour les dispositifs anti-patinages des rames et d'un système de remplissage,
- chariots élévateurs,
- outillages spéciaux pour la maintenance,
- équipements techniques du bâtiment : chauffage, eau-chaude sanitaire, toilettes, installations électriques, climatisation, douches,…
- mobiliers divers et autres équipements secondaires.

1.7.1.c *Les dépôts hybrides bus/tram*

Les réseaux urbains de tramway sont toujours accompagnés d'un réseau de bus, dont la structure est généralement revue lors de l'introduction du tramway. Le dépôt pour le remisage et la maintenance peut aussi être conçu pour les deux types de véhicule. C'est notamment le cas du dépôt du Grand Dijon où les ateliers pour les bus et les tramways ont été conçus afin de pouvoir être utilisées pour la maintenance de ces deux types de véhicules : cabine de peinture, réparation de la carrosserie, sellerie, maintenance de l'équipement embarqué, etc.

1.7.2. LES AUTRES TYPES DE LOCAUX TECHNIQUES (SYSTEME TRAMWAY)

A la différence du mode routier, le mode ferroviaire – en particulier son infrastructure – a recours à une plus importante quantité d'équipements techniques. Cela se traduit par un nombre plus important de locaux techniques nécessaires pour abriter les ensembles techniques suivants :

- les sous-stations de redressement (SSR) qui assurent la transformation du courant électrique à destination de l'infrastructure tramway (courant de traction et courant d'alimentation des équipements auxiliaires),
- les locaux de signalisation qui abritent les équipements de pilotage des zones de signalisation,
- les locaux d'exploitation qui accueillent les conducteurs de tramway (parfois de bus aussi) au niveau des terminus ou des pôles d'échanges le cas échéant.

1.7.2.a *Les sous-stations de redressement (SSR)*

L'ensemble désigné comme SSR se compose des équipements suivants :

- un bâtiment, avec accès voirie et zones de manutention extérieures,
- des clôtures et dispositifs anti-intrusion et de surveillance,
- les équipements du système de distribution électrique tels que décrit au §1.3.

Les bâtiments SSR sont traditionnellement parallélépipédiques, d'une surface avoisinant une centaine de mètres carrés permettant la séparation d'un local principal (abritant les cellules HT, les transformateurs-redresseurs, le tableau traction, les armoires de distribution électrique BT et l'armoire de contrôle commande) et d'un local secondaire pour les concessionnaires. Ce local secondaire permet aux concessionnaires l'installation des équipements de drainage des courants vagabonds afin d'améliorer la protection de leurs installations. Les fonctions principales de ce bâtiment sont :

- d'assurer la protection des SSR contre les intempéries, les intrusions (humaines ou animales) et les incendies,
- de permettre aux concessionnaires de se prémunir contre les risques liés aux courants vagabonds.

1.7.2.b *Les locaux de signalisation*

Les locaux de signalisation abritent les équipements permettant le pilotage et la supervision des zones de signalisation. Ceux-ci sont donc généralement implantés proche des zones de manœuvre : les dépôts et les terminus. Ils se composent d'armoires automates et automates de sécurité et d'armoires de distribution d'énergie électrique.

1.7.2.c *Les locaux d'exploitation (éventuellement applicable pour les bus)*

Les locaux d'exploitation sont des bâtiments situés près des terminus ou des pôles d'échange. Ils offrent un espace de repos pour les agents d'exploitation de la ligne.

Les caractéristiques fonctionnelles types de ce genre de locaux sont :

- un accès sécurisé,
- un dispositif de vidéo-surveillance,
- un espace d'accueil équipé de tables, chaises, fontaine à eau, distributeurs, prises électriques, etc.
- des bureaux éventuellement,
- des équipements techniques pour le chauffage, l'éclairage et éventuellement la climatisation,
- des toilettes homme et femme,
- …

CONCLUSION DE CHAPITRE

Nous avons présenté les familles d'équipements les plus représentatives d'un système de transport guidé urbain de type tramway. La construction sur un mode incrémental et les spécificités propres à la complexité urbaine dans laquelle ce mode s'insère aboutissent à une grande diversité de ses composants et une sophistication de leurs assemblages locaux.

L'importance de la voie ferrée dans la constitution du système de transport est mise en évidence. Elle s'exprime par les multiples interfaces avec les autres sous-systèmes et par une intégration d'équipements divers sous chaussée afin de répondre aux différents enjeux posés par le contexte urbain.

***

L'organisation d'un corpus technique permettant de poser le contexte industriel de cette recherche est fondamentale dans la poursuite de nos objectifs visant à construire une vision du système technique. Les sous-systèmes, les composants et les matériaux sont spécifiés au juste niveau. Cela permet d'aborder dans un premier temps, les principaux mécanismes de dégradation (chapitre 2) puis la construction d'un modèle fonctionnel centré sur la voie ferrée tenant compte de la contribution de chacun de ses éléments à la performance du système de transport (chapitre 3).

Chapitre 2

LE VIEILLISSEMENT DU SYSTEME : DIFFERENTS PHENOMENES ET DIFFERENTES APPROCHES PAR SOUS-SYSTEMES

En France, après un démantèlement de la plupart des réseaux de tramway entre 1950 et 1960, une nouvelle génération est arrivée à partir de 1985 (Nantes) et s'est étendue dans de nombreuses agglomérations (Grenoble, Saint-Denis, Rouen, Strasbourg, Orléans, Montpellier, Lyon, etc.). Aujourd'hui, bien que d'autres projets de tramways soient à l'étude, le déploiement de ce type d'équipements en France est en perte de vitesse. Parallèlement, sur le plan technique, les premiers équipements sont arrivés au terme leur cycle de vie. Ce contexte rend alors possible d'étudier leur durée de vie afin de capitaliser sur les causes à l'origine d'une situation dégradée ou non d'un équipement en termes de durabilité et de fiabilité. Pour la voie ferrée de tramway, la dépose des équipements est principalement liée à l'apparition de désordres et de défaillances et plus rarement pour des raisons d'obsolescence. Les phénomènes d'usure constituent une cause omniprésente de ces apparitions qui peuvent être stimulées et amplifiées par des défauts dont la cause est une faute apparue lors de la phase de conception, de fabrication, d'utilisation, de maintenance ou encore de mise en œuvre.

Les désordres qui désignent l'effet par lequel une dégradation se manifeste peuvent être précoces, progressifs, soudains, etc. Ils sont la conséquence d'un défaut résultant d'une combinaison de facteurs propres à chacune des phases du cycle de vie des équipements :

- la bonne qualité de conception, puis de fabrication et de mise en œuvre,
- le niveau des efforts de maintenance déployé par les gestionnaires,
- les sollicitations extérieures provoquées par leur environnement.

La littérature existante aussi bien en France qu'à l'étranger, situe les principaux enjeux liés à l'usure des tramways au niveau de la dégradation des rails, des revêtements et des matériels roulants. Les recherches concernant le rail se focalisent sur l'étude des mécanismes physiques de l'usure en vue de modéliser l'évolution des dégradations alors que pour le matériel roulant, elles adoptent le plus souvent des approches statistiques en vue de modéliser la fiabilité. Pour les revêtements, la littérature est davantage technique et se concentre surtout à la formalisation des retours d'expériences dans une démarche d'apprentissage par l'erreur et le partage des bonnes pratiques.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser les principaux phénomènes à l'œuvre sous l'effet du vieillissement en s'appuyant sur la littérature existante, tant académique que technique. Les principaux

désordres sont présentés en identifiant les causes, les effets et les enjeux. Les grandes familles de modèles de dégradation et de fiabilité sont décrites en questionnant leur champ d'application et en identifiant leurs paramètres. Ce chapitre contribue à la formalisation des retours d'expérience dont nous nous servirons par la suite pour établir les liens de causalité et identifier les conséquences qu'ils peuvent engendrer sur les performances du système, la sécurité, les coûts du cycle de vie ou encore la qualité de service.

2.1. LES REVETEMENTS DE PLATEFORME : TYPE DE DESORDRE ET CAUSES DES DEGRADATIONS

Si les revêtements de plateforme doivent satisfaire à des contraintes telles que l'étanchéité ou la résistance au trafic, le choix du type de revêtement est avant tout conditionné par un parti pris esthétique. Dès lors, l'apparition d'un désordre sur le revêtement tend à ternir directement l'image du service public. En rappel de la présentation du système technique faite au chapitre 1, il existe une grande variété de types de revêtements et autant de matériaux dont les désordres sont spécifiques tant du point de vue de leur typologie que de leur vitesse d'apparition et des conditions locales dans lesquels ils se trouvent.

Une très grande partie de la littérature est technique issue du CEREMA (ex-CERTU) et de la connaissance experte formalisée dans des rapports d'audit de voie ferrée. Le tableau ci-dessous présente les principaux désordres qui peuvent être constatés pour les principaux types de revêtements rencontrés : modulaire, non-modulaire et végétalisé.

Tableau 5 : Classification des désordres de revêtement par type de revêtement

N°	Type de revêtement	Désordres
1	Modulaire (pavés ou dalles)	Fissuration dans les joints
2		Dégarnissage des joints
3		Désafleurement entre pavés et/ou entre dalles
4		Affaissement des pavés et/ou des dalles de rives le long des rails
5		Orniérage plus ou moins avancé
6		Disparition de pavés et/ou de dalles
7		Dégradation des dispositifs d'assainissement
8		Rupture des dispositifs d'assainissement
9	Non-modulaire (enrobé, asphalte voire béton)	Déformation (affaissements, flaches, orniérages)
10		Fissuration (longitudinales, transversales ou faïençage)
11		Arrachement (nids de poule, pelades, plumages)
12		Remontée (ressuage)
13	Végétalisé	Dessèchement
14		Apparition d'herbes folles
15		Disparition du végétal
16		Mauvaise tonte
17		Obstruction du système de drainage

La généralisation de ces désordres sur le revêtement peut conduire à des situations à risque du point de vue de la sécurité, des courants vagabonds, de l'image du service mais aussi contribuer à la diminution des performances mécaniques de la plateforme et à l'accroissement des coûts du cycle de vie.

- **Enjeu Sécurité** : la dégradation des revêtements, en particulier lorsqu'elle engendre des désaffleurements ou des disparitions de pavés ou de dalles, peut représenter un risque pour la sécurité des deux roues, mais aussi celle des piétons pouvant trébucher sur la voie.
- **Enjeu Image** : le revêtement est la partie la plus visible de l'infrastructure dont la vocation est aussi de parfaire l'insertion urbaine du tramway dans son environnement. A ce titre, l'apparition d'un désordre peut se traduire en une dégradation de l'image du service.
- **Enjeu Courants vagabonds** : L'usure des joints rails/revêtements facilite l'infiltration d'eau le long des rails et nuit à l'isolation électrique du rail par rapport au milieu environnant. Il en résulte des courants vagabonds de plus forte intensité pouvant nuire à l'intégrité des installations conductrices souterraines. Le danger est particulièrement important selon la criticité des installations (p.ex. station-service, cuve à fuel, etc…).

  La perte de l'isolation peut également être causée par une mauvaise tonte des revêtements engazonnés. Une tonte régulière avec une hauteur de coupe au niveau du plan de roulement permet d'éviter cet écueil.
- **Enjeu Performance mécanique** : l'usure du revêtement s'accompagne systématiquement d'une perte d'étanchéité qui permet alors aux eaux de ruissellement, de lavage ou en provenance d'autres sources, de s'infiltrer dans les corps de voirie. Même si l'eau n'est pas directement à l'origine des dégradations, son infiltration accélère et démultiplie les conséquences dommageables des défauts d'origine.
- **Enjeu Coût du cycle de vie** : A l'instar de la route, la dégradation du revêtement est irréversible et doit conduire à des actions de maintenance dont le coût augmente en fonction de la gravité des désordres. Dès lors, il convient de s'interroger sur la stratégie de maintenance qui diminuerait le coût du cycle de vie de la plateforme en fonction du revêtement choisi.

2.1.1. AGRESSIVITE DU MILIEU ENVIRONNANT ET DES DEFAUTS A L'ORIGINE DES DESORDRES

2.1.1.a *Les matériaux modulaires*

Pour mieux comprendre les causes d'apparition des désordres sur les revêtements en matériaux modulaires, le CERTU a réalisé une enquête entre 2000 et 2002 sur des sites sélectionnés pour l'intérêt des pathologies qu'ils présentaient. La taille de l'échantillon représente quatre sites à Nantes, deux à Saint-Etienne, quatre à Grenoble, quatre sur la ligne Saint-Denis/Bobigny et enfin quatre à Strasbourg. Tous ces sites proviennent des réseaux des premières villes françaises à avoir réintroduit le tramway et bénéficiant d'un retour d'expérience suffisant.

Le premier constat porte sur l'incidence de plusieurs dispositions constructives (c'-.à-.d. la conception des voies) qui peuvent être mal adaptées au type de revêtement ou simplement constituées des zones de faiblesses inhérentes à la conception ou du matériau. C'est le cas par exemple au niveau des blochets en

saillie par rapport au profil du béton de la couche de base (provoquant des variations d'épaisseur du lit de pose) ou au niveau des dispositifs d'attaches des rails recouverts de leur capot de protection (rendant difficile une pose satisfaisante des pavés). En fait, il apparait que la plupart des zones d'interfaces constituent des points plus particulièrement sensibles à l'usure : transition de revêtement, limite de revêtement, joint, dispositif d'armement du rail, dispositif de drainage, blocage des rives de pavage, etc.



Figure 21 : Affaissement de pavés à Grenoble (Source : ARTELIA, 2019)

La qualité intrinsèque des matériaux utilisés n'est donc pas mise en cause dans les désordres observés par le CERTU, et les performances relatives à la compression, à la traction par fendage, à la flexion, à l'usure, au gel et à la glissance sont généralement suffisantes et bien adaptées à l'usure.

C'est un fait, l'ensemble plate-forme + revêtement présente des zones de faiblesse et cela indépendamment des principes de conception adoptés. L'enjeu pour les acteurs d'un projet est de bien les intégrer d'une part pour les traiter avec soin en phase d'étude puis de réalisation ; d'autre part de vérifier les domaines d'application des dispositions constructives envisagées.

En effet et c'est le deuxième constat : toutes les conceptions n'ont pas les mêmes capacités à répondre aux agressions de l'environnement extérieur, en particulier lorsqu'il s'agit du trafic et des caractéristiques de la voie : site propre, site partagé, carrefour, voie banalisée, traversée piétonne ou encore voie en courbe. Ainsi, il apparait souvent que les sites « chevauchables » sont souvent plus vite dégradés et les désordres y sont plus graves, car les sollicitations extérieures y sont plus importantes (trafic routier[11]) ou les caractéristiques des forces en présence ont été modifiées (les efforts horizontaux engendrés par la circulation automobile[12]).

[11] Le CERTU fixe les limites d'emploi des matériaux modulaires à 150 PL/j pour les pavés et à 50 PL/j pour les dalles.

[12] Dans la majorité des cas observés, l'appareillage des pavés ne participe pas à la lutte contre les efforts engendrés par la circulation automobile, c'est notamment le cas de pavés mosaïques posés en panneaux. A ce propos, le CERTU recommande plutôt les appareillages en chevrons ou à joints rompus.

On constate enfin que le niveau d'effort déployé en maintenance peut, bien qu'elle ne soit pas directement à l'origine des défauts, être un facteur accélérant l'usure du revêtement et plus généralement de la plateforme. A l'image de l'adage bien connu « mieux vaut prévenir que guérir », la recherche de durabilité dans les solutions de revêtement ne peut pas se faire sans un minimum d'effort des gestionnaires et des mainteneurs pour mettre en œuvre des principes de surveillance et d'entretien adéquats. Le CERTU préconise à cet effet de veiller à l'entretien des joints le long des rails ou au niveau des points sensibles, au curage et à l'entretien du système de drainage ou encore l'entretien ponctuel du revêtement pour en assurer une imperméabilité suffisante. Nous ne pouvons que constater que ces problèmes sont récurrents sur l'ensemble des réseaux rencontrés.



Figure 22 : Cas de désaffleurement provoqué par dilatation du revêtement (URBAN TRACK, 2010) (Tramway T1 – France – Crédit photo RATP)

2.1.1.b *Les matériaux non-modulaires*

En France, si la valeur esthétique des matériaux modulaires est reconnue, leurs caractéristiques techniques présentent des limites d'application, en particulier au niveau des zones dites « chevauchables ». D'autres raisons notamment constructives ou économiques ont conduit à la mise en œuvre de matériaux alternatifs. Le tableau ci-après résume les principaux avantages et inconvénients des revêtements les plus courants.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des principaux revêtements rencontrés sur les réseaux français (CERTU, 2009)

Type de revêtement	Avantages	Inconvénients	Points d'attention spécifiques
Revêtement végétalisé (gazon)	- Parti pris esthétique - Affaiblissement du niveau de bruit (~de 3 à 5 dB(A)) - Facilité de renouvellement ou d'intervention sur les armements du rail - Coût d'investissement modéré	- Coût d'entretien élevé - Durabilité - Nécessite l'acquisition de matériels spécialisés pour la maintenance, le secours et le dépannage de rames en avarie - Incompatible avec la circulation piétonne ou routière	- L'arrosage doit être adapté aux conditions climatiques - Fiabilité et qualité du système d'arrosage - La coupe du gazon doit être réalisée au niveau du plan de roulement (courants vagabonds) - 25 à 35 tontes par an (CERTU) - Qualité du substrat (au regard des fréquences d'arrosage et de la portance de la plateforme) - Apports en produits phytosanitaires - Planimétrie - Protection vis-à-vis de la circulation piétonne ou routière
Revêtement sable stabilisé	- Parti pris esthétique - Marche confortable pour les piétons	- Nettoyage manuel - Coût d'entretien - Sensibilité aux eaux de ruissellement (au	- Nettoyage sans eau - Protection vis-à-vis de la circulation piétonne ou routière - Planimétrie

Type de revêtement	Avantages	Inconvénients	Points d'attention spécifiques
	- Facilité de renouvellement ou d'intervention sur les armements du rail - Coût d'investissement faible - Compatible avec un revêtement végétalisé	regard de la déclivité) - Incompatible avec la circulation même ponctuelle de véhicules légers ou lourds	- Attention aux remontées de gros sables
Revêtement pavé (pierre)	- Parti pris esthétique - Compatible avec la circulation piétonne et routière - Limite de trafic relativement intéressante par rapport aux dalles bétons	- Limite de trafic par rapport à d'autres types de revêtement (enrobé, béton)	- Attention à l'homogénéité des caractéristiques physiques et mécaniques (homogénéité de la pierre de taille) - Attention à l'état des joints et des bordures de rive - Attention à l'appareillage des pavés - Compatibilité des pavés avec d'autres modèles
Revêtement dalles (béton)	- Parti pris esthétique - Compatible avec la circulation piétonne et routière	- Limite de trafic par rapport à d'autres types de revêtement (pierre, enrobé, béton)	- Compatibilité des dalles avec d'autres modèles - Attention à l'appareillage des dalles - Attention à l'état des joints et des bordures de rive
Sans revêtement	- Facilité de renouvellement ou d'intervention sur les armements du rail	- Parti pris esthétique - Incompatible avec la circulation piétonne et routière	-
Revêtement enrobé	- Facilité de mise en œuvre - Facilité de dépose - Remise en circulation rapide après intervention - Compatibilité avec la circulation piétonne et routière - Avec une pose de voie adaptée (p.ex. sur enrobé sur béton), la plateforme peut supporter tout type de trafic	- Grande variété de produits aux coûts et aux propriétés intrinsèques différentes (résistance à l'eau, gel-dégel, domaine d'emploi, temps de prise, etc.)	- Attention à l'état des joints et des bordures
Revêtement ballast	- Facilité de mise en œuvre - Facilité de dépose - Facilité de renouvellement ou d'intervention sur les armements du rail	- Incompatible avec la circulation piétonne et routière	-

Les revêtements non-modulaires sont des structures spécifiques ayant un comportement mécanique différent des structures de chaussées routières. Cette différence de comportement est notamment liée aux rails, au système d'attache, aux capots de protection, aux traverses, etc. Il n'existe donc pas de scénario d'entretien comme pour les chaussées routières et les stratégies d'entretien sont basées sur la prévention et des visites régulières (CERTU & LROP, 2009).

A l'instar des revêtements modulaires, la dégradation de ce type de revêtement est causée par les mêmes circonstances : des dispositions constructives mal adaptées aux contraintes locales, à la présence de zones

de faiblesse au niveau des interfaces, l'agressivité de l'environnement extérieur (trafic, conditions climatiques) et bien sûr l'efficacité de la maintenance.



Figure 23 : Cas de ressuage et de départs de matériaux en limite d'interface rail/enrobé (URBAN TRACK, 2010)

2.1.1.c *Les revêtements végétalisés*

Lorsque la voie ferrée est uniquement sujette à la circulation ferroviaire, il est possible d'envisager de la végétaliser. Cela consiste à couvrir le béton de voie avec un substrat sur lequel on dépose le revêtement végétalisé. Gazon, sédums et autres vivaces dites non succulentes sont les plus courants. Le choix de ce revêtement est généralement motivé par un parti pris esthétique dès lors que son entretien est plus coûteux et que son cycle de vie est inférieur. En effet, la durée de vie de l'ensemble (substrat + végétalisation) peut être estimée à plus de 10 ans (CERTU & LROP, 2009) et l'entretien du revêtement nécessite arrosage, tonte, désherbage et approvisionnement en produits phytosanitaires. Toutefois, le renouvellement de l'ensemble est plus aisé et permet d'intervenir sur le béton de fondation et les attaches de rail avec une plus grande facilité.

Par ailleurs, la voie végétalisée n'est pas compatible avec la circulation routière et piétonne et doit nécessiter l'acquisition de matériel spécialisé pour les interventions de maintenance, le dépannage d'une rame en avarie ou le secours, ce qui engendre un surcoût.

Les désordres susceptibles d'apparaître sur les revêtements végétalisés résultent majoritairement de l'entretien du revêtement lui-même, d'une défaillance en provenance du système de drainage ou du système d'arrosage. En effet, un mauvais entretien provoque l'apparition d'herbes folles, une mauvaise tonte pouvant provoquer l'obstruction du système de drainage et faciliter la circulation des courants vagabonds. Une défaillance de la fonction de drainage peut provoquer la disparition du végétal car l'eau stagnante peut s'enrichir en oxyde de fer qui est néfaste pour les plantes. L'eau stagnante peut aussi s'infiltrer dans les sous-couches et provoquer une usure en chaîne de celles-ci.

2.1.2. LA MODELISATION DES DEGRADATIONS

Bien que les structures de chaussées de tramway soient relativement comparables aux chaussées usuelles, celles-ci se distinguent par un comportement mécanique différent. Cette différence de comportement est liée à la présence de nombreuses discontinuités comme les rails, l'armement des rails ou les interfaces avec d'autres types de revêtement.

Ces discontinuités sont aussi très difficiles à modéliser parce qu'elles sont le résultat d'un processus de conception contextualisé localement. Elles peuvent être d'origine interne (choix architecturaux, choix budgétaire, etc.) ou d'origine externe (contraintes de site, règlementation, etc.). Ces spécifications sont propres à chaque ligne de tramway ce qui explique l'absence de normalisation au sens technique et limite la modélisation du comportement à l'usure. Il n'existe donc pas de scénario d'entretien typique comme pour les chaussées classiques. La stratégie est alors fondée essentiellement sur la prévention et des visites régulières (CERTU & LROP, 2009).

La littérature sur cet élément du sous-système Voie ferrée est majoritairement d'ordre technique (publications du CEREMA, URBAN TRACK et LCPC) et se focalise sur :

- l'étude de la dégradation des revêtements de plateforme sur les tramways les plus anciens (retour d'expérience). Ce type de littérature présente une caractérisation des différentes pathologies constatées et peut s'accompagner de recommandations pratiques pour les professionnels (règles de conception, durée de vie type),
- les essais en laboratoire ou expérimentations de nouveaux types de revêtements,
- les rapports d'audits réalisés par des bureaux d'études privés pour le compte des gestionnaires d'infrastructures.

2.2. LES RAILS : MECANISMES D'USURE ET LEUR MODELISATION

Sous l'effet du trafic, les rails de tramway se dégradent de manière inéluctable. Les désordres susceptibles d'apparaitre sont spécifiques à chaque phénomène d'usure :

- **l'usure abrasive** qui se caractérise par le départ de matière depuis la surface des deux corps en frottement,
- **l'usure ondulatoire** qui se caractérise par l'apparition à la surface du rail de bosses et de creux de profondeur (amplitude) et de distance entre deux bosses (longueur d'onde) variables,
- **l'usure par fatigue du contact de roulement** qui se caractérise par l'apparition de microfissures (amorçage) puis de propagation de fissures plus importantes jusqu'à la rupture ou le départ de matériau (écaillage).



Figure 24 : Cas d'usure abrasive d'un rail à gorge (URBAN TRACK, 2010) (Crédit photo : STIB, Bruxelles)



Figure 25 : Cas de fissuration par fatigue en configuration dite « squat » vue de dessus et en coupe (Trollé, 2014)

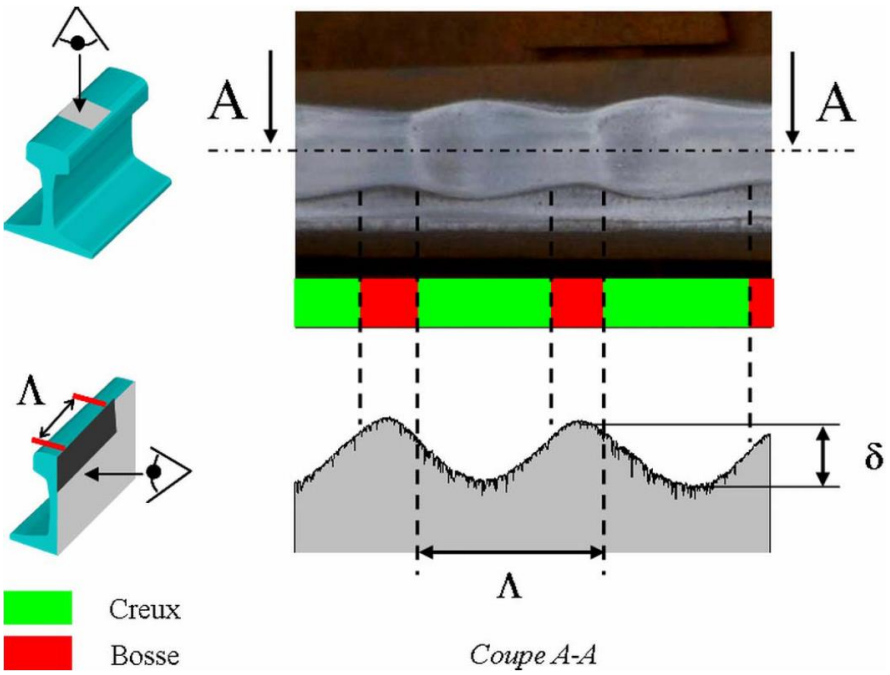


Figure 26 : Paramètres géométriques caractéristiques de l'usure ondulatoire (Saulot, 2005)

Pour les rails de tramway, l'usure abrasive et l'usure ondulatoire constituent les principaux mécanismes à l'origine de la dégradation des rails. Il convient aussi de préciser que l'usure ondulatoire est de nature essentiellement abrasive mais, couplé à la dynamique du véhicule et de la voie, le phénomène est rendu ondulatoire. L'usure des rails revêt différents enjeux qui peuvent être classifiés de la façon suivante :

- **Enjeu Sécurité** : dans les situations les plus critiques, la dégradation peut générer des situations dangereuses pouvant conduire à des déraillements. Toutefois, rappelons que ce type de situation est systématiquement couvert par des mesures de maintenance et de sécurité qui préconisent notamment une surveillance périodique de l'état de la voie et la vigilance du conducteur du matériel roulant.
- **Enjeu Bruit :** l'usure ondulatoire du rail est génératrice de vibrations et d'émissions sonores pouvant aller jusqu'a + 15 dB(A) (Oostermeijer, 2008) par rapport à la situation initiale. Des solutions existent en conception mais aussi en exploitation-maintenance pour réduire l'ampleur du phénomène. Elles seront décrites dans le chapitre 3.
- **Enjeu Qualité de service :** l'usure des rails (tout mécanisme confondu) est génératrice de secousses pouvant diminuer le confort de roulement. Dans certain cas, si les secousses, les bruits ou les vibrations provoquées par le passage d'un véhicule sont trop importantes, il arrive que la vitesse d'exploitation sur les tronçons dégradés soit réduite.
- **Enjeu Coûts du cycle de vie :** si les mécanismes d'usure du rail sont inévitables, ils peuvent néanmoins être ralentis par des traitements préventifs (anti-crissement, anti-usure, meulage) ou des mesures correctives (rechargement, remplacement du rail,…) qui sont détaillées dans le chapitre 5. Il existe ainsi différentes stratégies de maintenance correspondant à des objectifs ciblés en termes de niveau de performance mais aussi de coûts du cycle de vie.

2.2.1. DES MECANISMES LIES AU FROTTEMENT DE LA ROULE SUR LE RAIL A L'ORIGINE DES DEGRADATIONS

2.2.1.a *L'usure abrasive*

L'usure du rail est une conséquence du frottement se produisant au niveau de la zone de contact rail/roue. Certains spécialistes se sont accordés sur l'origine essentiellement abrasive[13] des usures observées des roues et des rails (Mai, 2011). Elle se traduit par un déplacement de matière produite par des particules dures ou des protubérances dures pouvant se trouver soit entre les deux surfaces du rail et de la roue, soit encastrées dans l'une des deux surfaces. Les désordres se manifestent par des polissages, des griffures ou des arrachements de copeaux. Ils sont accentués par le sablage des rails par le matériel roulant sur les zones de freinage.



Figure 27 : Usure ondulatoire du rail (Mai, 2011)

Les paramètres influant sur l'usure abrasive sont : la dureté des matériaux, la géométrie du contact, la charge à l'essieu et bien sûr le trafic. Ce phénomène est plutôt bien maîtrisé lorsqu'il apparait être la composante principale de la dégradation du rail. La difficulté pour le modélisateur se manifeste lorsqu'il est combiné à d'autres phénomènes tels que l'usure ondulatoire et la fatigue du contact roulant.

[13] En tribologie, les autres types d'usure sont : l'usure adhésive, l'usure érosive, l'usure par fatigue et l'usure corrosive.

2.2.1.b *L'usure ondulatoire*

L'usure ondulatoire (UO) des rails est un phénomène qui touche aussi bien les trains que les trams, les métros ou tous autres types de transports ferroviaires (Collette, 2007). Elle demeure l'un des phénomènes les plus mal connus pouvant détériorer les profils des roues et des rails dans le domaine ferroviaire (Mai, 2011). Cette usure se manifeste sous forme d'ondulations étendues sur les surfaces des profils dans la direction du roulement. Elle constitue ainsi des sources d'excitation de vibrations inconfortables (bruit) et des sources de fatigue.

Bien que les travaux existants ne modélisent qu'imparfaitement le processus de formation de ce phénomène, la modélisation proposée par (Carson, Johnson et Gray, 1971) reste la plus communément admise. Elle suggère la combinaison de deux mécanismes : un mécanisme de fixation de longueur d'onde et un mécanisme d'endommagement.

- le Mécanisme de Fixation de la Longueur d'onde (MFL) : on suppose que la surface d'un rail (neuf ou usé) présente une certaine rugosité. Combinée à des glissements et tractions variables dans le temps, la rugosité du rail engendre des fluctuations locales des charges dynamiques, des glissements et de la taille de la zone de contact. Etant donné que les véhicules sont tous presque identiques et passent sur la voie à la même vitesse, les longueurs d'ondes auxquelles ces charges dynamiques varient sont les mêmes d'un véhicule à l'autre, formant le mécanisme de fixation de la longueur d'onde (Colette, 2007). Après des millions de passages, une forme ondulatoire de la surface du rail se sera établie.
- le Mécanisme d'Endommagement (ME): l'endommagement est le résultat à long terme de la modification du profil de rail. Les deux principaux mécanismes d'endommagement sont l'usure abrasive et l'écoulement plastique de la tête du rail (déformations plastiques).

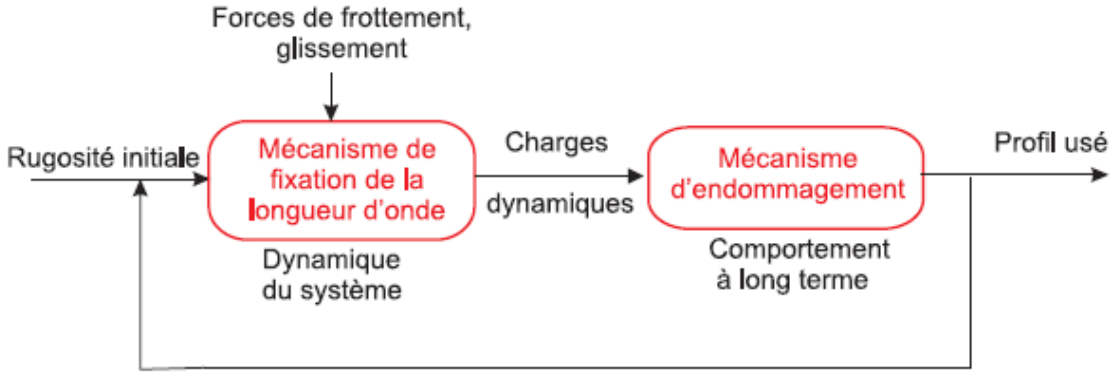


Figure 28 : Composantes générales du mécanisme de formation de l'usure ondulatoire (Collette, 2007)

En s'appuyant sur cette modélisation du mécanisme de formation de l'usure ondulatoire, plusieurs études ont proposé des classifications. Les travaux citent régulièrement la classification du TCRP (1998), Grassie et Kalousek (1993), Grassie (2005, 2009).

De nombreux auteurs caractérisent ainsi l'usure ondulatoire selon une approche fréquentielle qui permet d'identifier le type d'usure ondulatoire à partir des longueurs d'onde. En effet, si l'on connait la vitesse du

train (m/s), il est alors possible de déduire la fréquence associée au mécanisme de fixation de la longueur d'onde avec la relation suivante :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

avec λ la longueur d'onde et f la fréquence.

Tableau 7 : Troisième classification des usures ondulatoires (Grassie, 2009)

Catégorie	Mécanisme de fixation de la longueur d'onde	Gamme de fréquences associée (Hz)	Mécanisme d'endommagement	Zones concernées
Pinned-pinned	Résonance PP (Pinned-pinned)	400-1200	Usure	Voie rectiligne et rail haut en courbe
Rutting	Mode de torsion de l'essieu	250-400	Usure	Rail bas en courbe
Other P2 resonance	Mode de résonance P2	50-100	Usure	Voie rectiligne et rail haut en courbe
Heavy haul	Mode de résonance P2	50-100	Ecoulement plastique formant les creux	Voie rectiligne et en courbe
Light rail	Mode de résonance P2	50-100	Déformation plastique en flexion formant les creux	Voie rectiligne et en courbe
Trackform specific	Spécifique	--	Usure	Voie rectiligne et en courbe

Les mécanismes de fixation de la longueur d'onde traduisent les aspects phénoménologiques suivants :

- Résonance P2 : elle est associée à la résonance ou le rebondissement des masses non-suspendues du train sur la raideur de la voie, c'est-à-dire l'essieu, les roues, les disques de frein et les boîtes de transmission.
- Résonance PP : elle est associée à une résonance du rail qui se comporte comme une corde pincée au niveau des traverses.
- Modes de torsion de l'essieu : ce mécanisme est associé aux vibrations de torsion des essieux. Par exemple dans les courbes de faible rayon, la différence de longueur parcourue par les roues entre les fils haut et bas excite un des modes de torsion. Il peut aussi s'agir des voies rectilignes lorsqu'elles présentent des zones d'accélération et de freinage. Les modes de torsion de l'essieu sont illustrés sur la figure suivante.

La littérature scientifique montre que l'usure ondulatoire est un phénomène encore mal maitrisé. Elle résulte d'un jeu d'interaction dynamique entre le système voie et le système véhicule pour des conditions d'exploitation données et d'un comportement à long terme conduisant à l'usure du profil de rail. La recherche d'une meilleure classification des types d'usure ondulatoire est toujours une question de recherche.

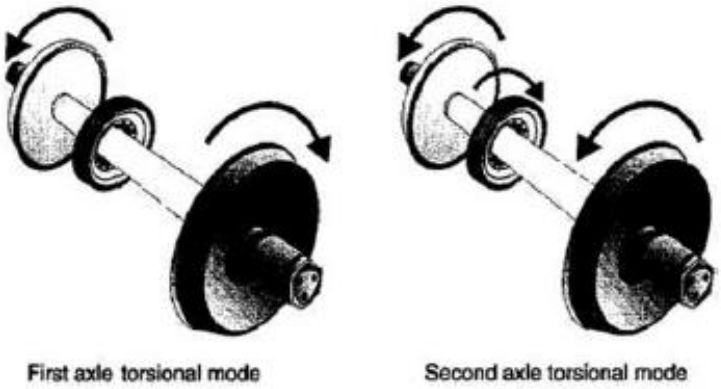


Figure 29 : Les deux modes de torsion de l'essieu (Jenks, 1998)

Les observations montrent qu'un très grand nombre de facteurs influe sur la tendance à l'usure ondulatoire du rail et sur la manifestation concrète du phénomène. Des rails identiques venant de fabricants différents peuvent développer une usure ondulatoire dont la longueur d'onde diffère (CERTU, 2009). Les amplitudes de longueurs d'ondes peuvent également atteindre des valeurs variables comprises entre 50 et 100 μm (Oostermeijer, 2008). En plus d'être générateur de vibrations et d'émissions sonores pour les riverains, ce phénomène est aussi un facteur d'usure ayant un impact significatif sur les coûts de maintenance et sur le risque d'apparition du phénomène de fatigue du contact roulant. En particulier, soulignons qu'un meulage trop tardif permet à l'acier du rail en creux de se durcir sous l'effet du passage des roues et diminue drastiquement l'efficacité du meulage à long-terme. Dans le cas des tramways, l'usure ondulatoire est surtout marquée dans les courbes et les zones d'accélération et de freinage.

Tableau 8 : Taux d'usure constaté des rails par MTRC Hong Kong selon différents rayons de courbure en 1992 (TCRP, 2012)

Rayon de courbure	Taux d'usure
< 400 mètres	0,025 mm/semaine
400 à 1000 mètres	0,01 mm/semaine
> 1000 mètres	0,001 mm/semaine

2.2.1.c *Fatigue du Contact Roulant*

On entend par fatigue ou l'endommagement par fatigue, la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces et des structures mécaniques constituées avec ces matériaux (Bathias, 1997).

La fatigue du contact roulant est un problème surtout observé sur les voies à grande vitesse, les voies mixtes et les voies de fret (Mai, 2011). Toutefois, la probabilité pour que cela se produise sur une voie ferrée de tramway est suffisamment vraisemblable pour que le risque de rupture du rail soit pris en compte

dans toutes les démarches[14] de démonstration de la sécurité d'un système de transport dit léger[15]. Le phénomène de fatigue se déroule suivant trois étapes : l'amorçage, la propagation des fissures et la rupture de la pièce.

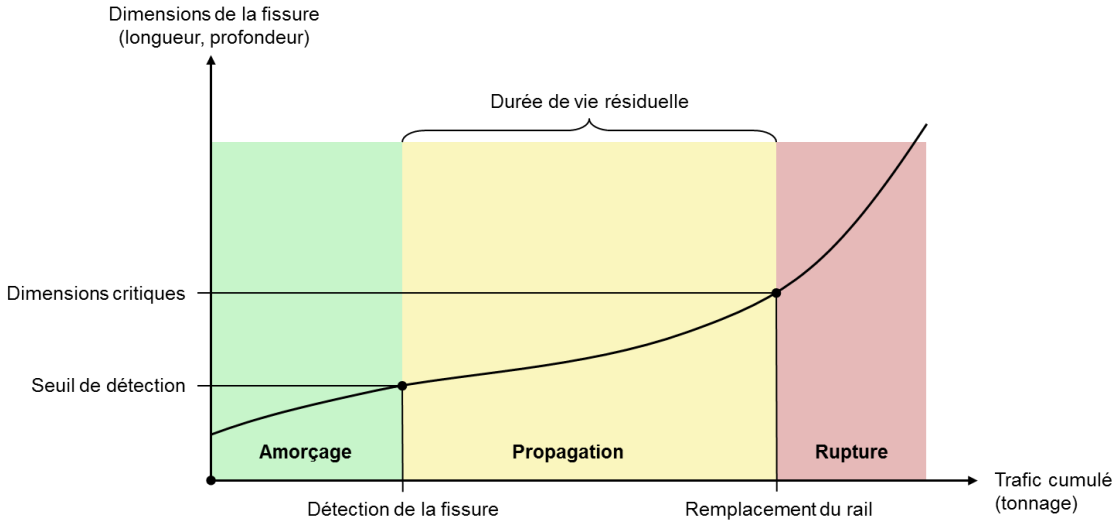


Figure 30 : Temporalité de l'usure par fatigue et des actions gestionnaires, adapté de (Trollé, 2014)

La phase d'amorçage: des microfissures apparaissent à la surface du rail suite à des déformations plastiques[16] très localisées. Les microfissures se développent avec une inclinaison d'environ 15° (Mai, 2011) dans la direction de roulement. La vitesse de développement diminue au fur et à mesure que les microfissures pénètrent la tête du rail.

La phase de propagation : le développement des microfissures se poursuit selon le même plan incliné puis forme des fissures principales qui peuvent éventuellement mener à une rupture catastrophique (Abbouchi, 2008).

La phase de rupture : les fissures principales se propagent de manière stable, puis divergent dans différentes directions. Les fissures vers le haut causeront des départs de matériau sous la forme de copeaux. Les fissures vers le bas se propageront avec une inclinaison d'environ 70° jusqu'à la rupture du rail (Mai, 2011)

Tout comme pour l'usure ondulatoire, il existe différents types de désordres liés à ce phénomène. Les plus courants sont les « Head-checks » et les « Squats » :

[14] Processus encadré par le STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés) dans le but de démontrer la sécurité du système de transport dans son environnement. La démarche prend la forme de documents règlementaires : Dossier de Définition de Sécurité (DDS), Dossier Préliminaire de Sécurité (DPS) et Dossier de Sécurité (DS) qui collectent les preuves de sécurité et les mesures visant à diminuer, supprimer ou pallier aux risques identifiés.

[15] Par opposition, on parle de ferroviaire lourd (heavy rail, heavy haul) lorsqu'il s'agit du Réseau Ferré National (RFN), du fret ou des modes plus capacitifs que le tramway tels que le métro et le RER.

[16] Les sites préférentiels pour l'amorçage sont le plus souvent situés en surface, dans des zones de fortes contraintes comme les entailles, les rayures, les pics de corrosion, etc. L'origine de ces irrégularités peut être due à la fabrication du rail, sa mise en œuvre ou des agents extérieurs.

- **Les Head-checks :** ce type de désordre est généralement observé sur la file haute des voies en courbe. Il se présente sous la forme de fissures parallèles entre-elles avec une inclinaison d'environ 45°. Ce désordre se manifeste sur la face active du rail en interaction avec le boudin de roue. L'espacement des fissures (densité) est très variable. Les fissures se propagent ensuite en profondeur et entrainent l'écaillage et/ou la rupture du rail.

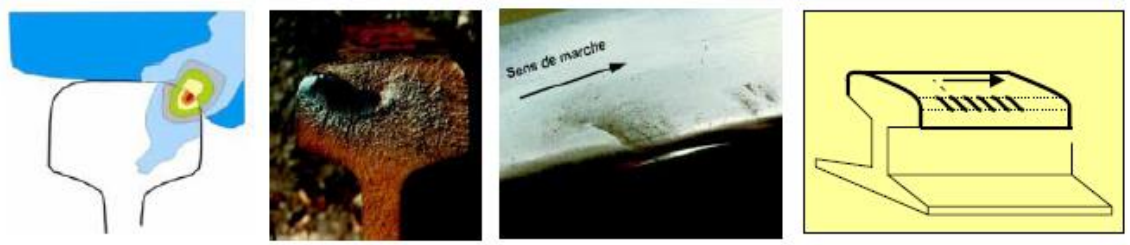


Figure 31 : Head-checks (Mai, 2011)

- **Les Squats :** ce type de désordre est fréquemment observé sur les soudures électriques ou aluminothermiques et dans les zones d'usure ondulatoire. Les squats se manifestent sur la table de roulement par un élargissement et un affaissement localisé de la bande de contact rail/roue. Ils sont accompagnés d'une tâche sombre et de fissures en forme d'arc ou en « V ». Les fissures de propagent d'abord avec une faible inclinaison par rapport au plan de roulement puis, lorsqu'elles atteignent entre 3 et 5 mm de profondeur, bifurquent vers le bas jusqu'à la rupture du rail.



Figure 32 : Squats (Mai, 2011)

L'usure par fatigue est phénomène encore mal maîtrisé. La modélisation de ce phénomène cherche :

- d'une part la détermination du nombre de cycles de chargement avant la rupture du rail (dans un objectif de sécurité),
- d'autre part la localisation d'apparition des microfissures (dans un objectif de traitement préventif).

2.2.2. LA MODELISATION DES DEGRADATIONS DU RAIL

Depuis le développement des toutes premières lignes de chemins de fer, la dégradation des rails n'a cessé de constituer une préoccupation constante. Par ordre cumulatif d'approfondissement de la modélisation des dégradations du rail, les 4 approches suivantes sont les plus courantes :

Les approches systèmes, qui regroupent les modèles d'ordre conceptuel, qualitatif et fonctionnel permettant de formaliser les connaissances propres aux phénomènes de dégradation sous la forme de diagramme « cause – effet – conséquence ». Les outils utilisés sont destinés à la sûreté de fonctionnement : analyse fonctionnelle et méthode AMDEC principalement (Analyse des Modes de défaillance et de leurs Effets et Criticité). En application particulière, ils n'approfondiront pas les mécanismes physico-chimiques à l'œuvre mais se révèleront efficaces pour la compréhension du système, la mise en perspective des dégradations et la formalisation. Cette approche est présentée plus en détail au chapitre 3 avec un cas d'application à la voie ferrée de tramway.

Les approches statistiques, qui regroupent les modèles obtenus en traitant des bases de données, organisées selon la compréhension systémique, par des méthodes statistiques ou probabilistes. Ces modèles peuvent être de nature descriptive ou prédictive lorsque le résultat donne des valeurs à un instant donné dans le futur. Une application est présentée au chapitre 6 sur le réseau du tramway de Grenoble.

Les approches mécanico-empiriques, qui regroupent les modèles interprétant les phénomènes d'usure par des lois mécaniques dont les paramètres sont estimés à partir de l'expérience du terrain, c'est-à-dire aux observations sur site effectuées dans des conditions réelles d'utilisation.

Les approches déterministes, qui regroupent enfin les modèles formalisant précisément les phénomènes d'usure par des lois physico-chimiques. A la différence des approches mécanico-empiriques, les modèles déterministes sont dépendants de coefficients expérimentaux.

Approche	Systémique	Statistique	Mécanico-empirique	Déterministe
Besoin en données d'entrée	Très faible	Fort	Faible	Très fort
Temps de calibration et de traitement	Très faible	Long	Faible	Très long
Nombre de phénomènes pris en compte	Très fort	Fort	Moyen	Faible
Puissance explicative	Moyenne	Faible	Forte	Très forte
Projection future	Faible	Erronée	Possible	Possible

Figure 33 : Comparaison des différentes approches disponibles pour modéliser le vieillissement

2.2.2.a *L'approche déterministe*

Modélisation de l'usure abrasive

A l'origine de la dégradation des rails, l'usure est essentiellement d'origine abrasive. Le résultat est une perte de matière des deux corps en frottement. Dans les recherches menées dans le domaine ferroviaire au sens large, c'est-à-dire y compris le ferroviaire lourd, les travaux scientifiques ont donné lieu au développement de plusieurs lois d'usure parmi lesquelles, la loi d'Archard et la loi énergétique sont les plus couramment utilisées pour modéliser l'usure abrasive.

Ces deux lois se distinguent par l'approche par laquelle elles abordent le problème d'usure. Les modèles issus de la loi d'Archard (1953) considèrent que l'usure est proportionnelle au produit de la charge normale et de la distance parcourue tandis que ceux tirés de la loi énergétique considèrent que l'usure est proportionnelle à l'énergie surfacique dissipée par le glissement des deux corps en contact.

Quelle que soit l'approche utilisée, tous les modèles doivent s'associer à une modélisation de la géométrie du contact roulant pour être complets. Les théories de contact les plus courantes par ordre chronologique de formalisation sont celles d'Hertz (1881), de Carter (1926) puis de Kalker (1967 et +). Ces théories de contact sont fondamentales pour calculer l'usure des rails car les modèles d'usure sont dépendants de la géométrie de la surface en contact, du ratio des surfaces en adhérence et en glissement et des forces normales de pressions exercées ainsi que des forces tangentielles liées au déplacement du véhicule. La modélisation du contact de Herz est présentée dans les pages suivantes.

Le modèle classique d'Archard

Le modèle d'Archard est l'un des plus anciens modèles de dégradation et certainement la loi la plus utilisée pour estimer les taux d'usure liés au glissement (De Arizon, Verlinden, & Dehombreux, 2007). Le volume des matières usées est calculé par la formule suivante :

$$V_w = K \times \frac{N}{H} \times D \qquad (2)$$

où :

- V_w : le volume usé (m3)
- D : la distance de glissement (m)
- N : la force normale (N)
- H : la dureté du matériau (N/m^2)
- K : le coefficient d'Archard, sans dimension, correspond à la relative facilité d'arracher une particule par cisaillement

Dans le modèle d'Archard, le coefficient d'usure K joue un rôle crucial puisqu'il permet d'introduire les composantes non-linéaires dans la formule de fatigue. Ce coefficient recouvre nombre de propriétés dépendant, entre autres, du couple de matériaux en contact, des conditions de lubrification, de la vitesse de glissement, de la pression de contact ou encore de la température. Il est déterminé de manière expérimentale. D'autres modèles existant dans la littérature sont issus du modèle « classique » d'Archard. Certains sont plus adaptés au cas du tramway. A ce propos (De Arizon et al., 2007), on peut citer les modèles de Jendel (1999) et d'Emblom (2004).

Le modèle classique énergétique

Si la friction est considérée comme un phénomène dissipatif, alors la perte de matière provoquée peut être estimée selon une approche énergétique. Le ratio d'énergie dissipée (ou puissance dissipée) peut alors être exprimé selon les forces de contact et les vitesses relatives de glissement. L'énergie dissipée peut être calculée selon la formule suivante :

$$\dot{E} = F_l \times V_l + F_t \times V_t + M_\emptyset \times \omega \quad (3)$$

où :

- $F_l \; et \; F_t$: les forces longitudinale et transversale (N)
- $V_l \; et \; V_t$: les vitesses de glissements longitudinal et transversal au niveau du point de contact (m.s-1)
- $M_\emptyset$: le moment de rotation (de la force normale de contact) (N.m)
- ω : la vitesse angulaire de glissement (s-1)
- $\dot{E}$: l'énergie dissipée, ici exprimée en puissance (N.m.s-1)

Le volume des matières usées est déduit de l'énergie dissipée par la formule ci-dessous :

$$V = \frac{C_w}{\rho} \times \bar{E} \quad (4)$$

où :

- V, le volume usé (m3)
- C_w, le coefficient d'usure (kg/N.m)
- ρ, la densité du matériau
- $\bar{E}$, l'énergie dissipée, ici exprimée en quantité d'énergie (N.m)

L'approche énergéticienne de l'usure abrasive a donné le cadre pour l'établissement de plusieurs modèles. On peut citer le modèle de Zobory (1997) et le modèle de Pearce et Sheratt (1991).

Modélisation de l'usure ondulatoire

Les approches déterministes pour la modélisation de l'usure ondulatoire peuvent se classer en deux catégories (Collette, 2007):

- les méthodes linéaires développées dans le domaine fréquentiel,
- les méthodes non-linéaires développées dans le domaine temporel.

A l'instar des modèles d'usure abrasive précédents, les modèles de prédiction de l'usure ondulatoire se composent également de deux parties : (i) un modèle dynamique de l'interaction voie-véhicule afin de déterminer les efforts et les glissements dans la zone de contact roue-rail et (ii) un modèle d'usure abrasive pour le lent processus d'usure de la surface du rail.

Le domaine fréquentiel

La première théorie linéaire a été mise au point en 1987 par Frederick[17]. Elle a permis d'expliquer plusieurs phénomènes d'usure ondulatoire puis plusieurs chercheurs lui ont apporté des améliorations pour une

[17] C.O. Frederick. A rail corrugation theory. In *Contact Mechanics and Wear of Rail-wheel Systems*, pages 181-211, 1987.

meilleure prédiction des taux d'usure ondulatoire. Le lecteur pourra se référer à la revue bibliographique dressée dans la thèse de (Collette, 2007) pour connaitre la nature de ces améliorations successives.

La méthode est dite linéaire dans la mesure où elle nécessite la linéarisation d'éléments non-linéaires, la linéarité étant surtout fondamentale pour travailler dans le domaine fréquentiel. On cherche à forcer les hypothèses afin de les rendre linéaires : les profils des roues et des rails (non-linéarité géométrique), la loi de déformation en fonction de la charge (non-linéarité physique) et la loi de frottement (non-linéarité physique). Pour linéariser, cette méthode considère des petites variations Δq de chaque variable q autour d'une valeur q_0 de référence.

Les hypothèses de cette méthode sont les suivantes :

- Le contact rail-roue est considéré stationnaire : les contraintes au niveau du contact rail-roue sont considérés indépendantes du temps (p.ex. en ligne droite ou en courbe constante),
- La raideur de contact d'Hertz est jugée constante,
- Le profil longitudinal est périodique,

Ces hypothèses ont pour conséquence la limitation du domaine d'application du modèle à la phase d'initiation de l'usure ondulatoire.

Le domaine temporel

Le domaine fréquentiel diffère principalement du modèle temporel par la possibilité de ce dernier de prendre en compte les non-linéarités physiques. Les premiers modèles sont apparus vers la fin des années 1990. Le lecteur pourra se reporter à la thèse de (Collette, 2007) pour approfondir les évolutions successives de ces modèles. L'approche fréquentielle présente l'avantage d'être beaucoup plus rapide à être utilisée. En revanche, elle est moins précise que le domaine temporel. A l'inverse, ce dernier est plus lourd à mettre en œuvre mais permet une étude plus fine du modèle étudié. Les phénomènes de courte longueur d'onde sont mieux estimés.

***

Nous avons choisi d'illustrer l'approche déterministe de la modélisation de l'usure ondulatoire par l'approche linéaire puisqu'elle est la plus courante dans les logiciels de dynamique ferroviaire. Un exemple de modélisation dynamique du véhicule et de la voie avec une présentation des approximations linéaires issues du domaine fréquentiel est donné en annexe.

Modélisation de l'usure par fatigue

L'usure par fatigue est un phénomène extrêmement rare en tramway. A ce titre, les modèles de fatigue ne seront pas présentés car très rarement à l'origine du remplacement des rails. En d'autres termes, l'usure par fatigue impacte trop peu les interventions de maintenance survenant au cours de la durée de vie de la voie ferrée de tramway pour illustrer davantage les modèles physiques disponibles.

2.2.2.b *L'approche empirico-mécanique*

Les approches empirico-mécaniques sont basées sur des lois empiriques décrivant le comportement des infrastructures. Ces modèles sont issus d'observations in-situ ou expérimentales et du retour d'expérience. Ils se distinguent des approches déterministes qui cherchent à modéliser directement et séparément les phénomènes de dégradation qui eux, relèvent de la chimie ou de la physique des matériaux.

Le modèle de Sato (Sato, 1995)

Sous l'effet des passages de train (ou cycles de chargement), le ballast se tasse jusqu'à déniveler les traverses par rapport à la situation de référence. Il en résulte une évolution de la géométrie de la voie (les deux fils de rails sont supportés par les traverses) et des impacts directs sur la sécurité du transport, le confort de roulement, l'usure des rails, le bruit ainsi qu'indirectement sur les vitesses d'exploitation du système de transport.

Le modèle de Sato modélise le tassement du ballast par l'équation suivante :

$$y = \gamma(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \qquad (5)$$

où :

y : correspond au tassement du ballast

x : nombre de chargements ou tonnage cumulé

α, β, γ: sont des coefficients déterminés empiriquement qui dépendent de variables contextuelles et des caractéristiques des cycles de chargement.

Le premier terme de l'équation exprime le tassement rapide du ballast après sa mise en œuvre. Le second terme correspond au tassement du ballast dû aux déplacements latéraux des particules de ballast se trouvant sous les traverses.

Il est intéressant de constater que le premier terme est tributaire des conditions de la mise en œuvre initiale du ballast. A ce stade en effet, les vides à l'intérieur du ballast se comblent rapidement jusqu'à la fin du processus de consolidation $\gamma(1 - e^{-\alpha x})$. Le second terme exprime quant à lui un processus plus lent correspondant à l'usure de la géométrie de la voie ferrée sous l'effet du passage des trains.

Les coefficients α, β, γ sont des constantes de calibration de la loi de Sato d'évolution du tassement mais du fait de la nature empirique de la méthode avec laquelle ils ont été obtenus, leurs liens avec les paramètres physiques et mécaniques du ballast restent méconnus. Il existe d'autres modèles de ce type exprimant le tassement du ballast à l'échelle macroscopique et obtenu de façon expérimentale. Nous ne les détaillerons pas davantage car les sections ballastées pour le tramway sont relativement peu fréquentes. Toutefois, le tableau ci-après présente l'expression des différentes lois de tassement présentes dans la littérature.

τ_N correspond au tassement à N cycles, Q est la charge à l'essieu, σ est l'effort sous la traverse, k est la raideur de la sous-couche et α, β, γ sont des paramètres constants (leurs valeurs diffèrent selon les modèles).

Tableau 9 : Tableau récapitulatif de diverses expressions de la loi de tassement du ballast en fonction du nombre de cycles de chargement proposées dans la littérature scientifique (Quezada, 2014)

Auteur	Loi d'évolution du tassement du ballast
Sato	$\tau_N = \gamma(1 - e^{-\alpha N}) + \beta N$
Hecke	$\tau_N = \tau_0 + \alpha Q^3 N$
Hettler	$\tau_N = \alpha Q^{1,6}[1 + \beta \ln(N)]$
Shenton	$\tau_N = Q^5[\alpha N^{0,2} + \beta N]$
Thom & Oakley	$\tau_N = [\log N - 2{,}4]^2 \times [\sigma/160] \times [47/k]$

Bien que les dimensions entre les différentes expériences et les valeurs des paramètres qui pilotent les réponses en termes de déformation soient différentes, ces travaux expérimentaux permettent d'identifier 3 phases d'évolution du tassement. La première phase est caractérisée par un fort tassement dès les premiers cycles de chargement correspondant à une densification initiale du ballast. La seconde phase est de forme logarithmique sur quelques milliers de cycles. Finalement une dernière phase correspond à une stabilisation progressive du tassement.

Le modèle de l'université de Graz (TU Graz) – modélisation de la qualité de roulement (point de vue de l'usager)

Le modèle de l'université de Graz permet de prédire l'évolution de la qualité de roulement noté Q de la voie à un instant t dans le temps. Ce modèle se distingue des autres modèles en cherchant à modéliser les conséquences de l'état de dégradation de la voie. L'index de qualité Q exprime les perturbations ressenties dans le véhicule causées par les irrégularités de la voie (c.-à-d. les dégradations de la surface du rail ou de la géométrie de la voie). A noter que le modèle a été développé pour les voies de chemin de fer (voie ballastée).

L'évolution au cours du temps de la valeur de l'index de qualité suit la fonction exponentielle suivante :

$$Q(t) = Q_0 \times e^{bt} \quad (6)$$

Avec,

- Q_0 : correspondant à la valeur de l'index de qualité à l'instant t = 0,
- b : correspondant au taux de dégradation,

Cette expression mathématique souligne la dépendance entre les coûts de construction ou de renouvellement et les efforts de maintenance. En effet, la valeur Q_0 est conditionnée par les dépenses d'investissement ou de renouvellement (CAPEX), tandis que les valeurs de e^{bt} sont conditionnées par l'évolution de la dégradation de la voie en exploitation (Veit, 2007). La définition du taux de dégradation b est complexe car il est déterminé par une fonction qui inclut toutes les conditions limites telles que le volume de trafic, l'infrastructure, la superstructure (p.ex. qualité du ballast), les conditions climatiques, etc.

Par ailleurs, il est convenu que si les actions de maintenance accroissent la valeur de l'index de qualité, elles ne permettent pas de la restituer à sa valeur initiale Q_0. La perte de qualité comparée à la qualité initiale est par conséquent une question de niveau d'intervention (MAINLINE, 2013). Ce phénomène figure sur le graphique conceptuel ci-après :

- la courbe bleue représente les valeurs de l'index de qualité Q(t) depuis t = 0. Une fois passé le seuil MDZ-A = -15 (que nous expliciterons juste après), une intervention de maintenance doit être réalisée.
- la courbe verte est le résultat d'une intervention de maintenance adaptée sur le plan technique. La restauration est durable, l'index de qualité est amélioré et on maintient un bon comportement de la voie,
- à l'inverse, la courbe rouge montre une intervention de maintenance inadaptée. L'effet de la restauration est de courte durée sur l'index de qualité, voire pratiquement non maintenu sur une plus longue période (la courbe rouge tend à rejoindre la courbe bleue).

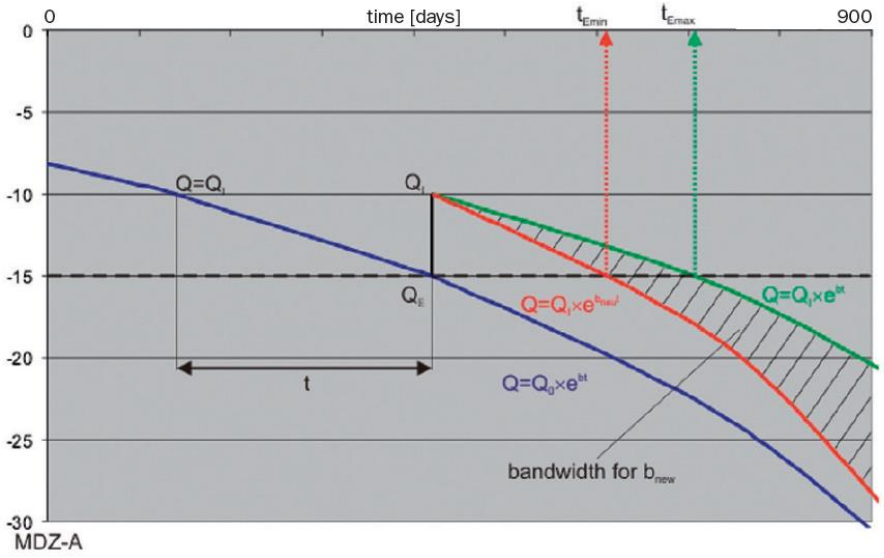


Figure 34: Evolution théorique de la qualité de roulement de la voie et interventions de maintenance (Veit, 2007)

L'évolution de ces différentes courbes théoriques, et en particulier son lien avec l'état de dégradation de la voie, se comprend facilement : les irrégularités du rail (conséquences des phénomènes de dégradation) provoquent l'excitation des forces dynamiques du système voie – véhicule (p.ex. l'usure ondulatoire du rail, mais il peut aussi s'agir de la géométrie de la voie en particulier dans le cas d'une voie ballastée). Dès lors, une opération de maintenance visant à réduire ces irrégularités contribue indirectement à l'amélioration de l'index de qualité et au confort des voyageurs. Ce genre de modèle permet de développer des stratégies de maintenance orientées vers une approche usager de la gestion patrimoniale puisque les seuils de maintenance sont déterminés par une valeur de confort et non par des limites de sécurité (sûreté de fonctionnement).

La valeur de confort peut être calculée à partir d'un index de qualité « MDZ » en Allemand. La MDZ est mesurée à l'aide d'un véhicule de mesure spécialisée (trains mesureurs).

L'index de qualité peut être calculé de la façon suivante (MAINLINE, 2013) :

$$MDZ = V^{0,65}\frac{1}{L}\sum_{0}^{L} Diff(\sqrt{v^2 + (h + \Delta^2 u)^2}) \quad (7)$$

Avec,

- MDZ: index de qualité
- V: vitesse [m/s]
- L: longueur du tronçon [m]
- v: défaut vertical de la voie [mm]
- h: défaut horizontal de la voie [mm]
- Δu: surélévation [mm]

Résultats

Il a été mesuré l'index de qualité de 3800 kilomètres de voie du réseau ferroviaire autrichien (OeBB) à l'aide d'un train mesureur. Ces données ont ensuite été complétées par des données d'exploitation, des informations sur le type et l'âge des composants de la voie, les interventions de maintenance réalisées, la position des gares et des appareillages de voie, la composition du sol, etc.

Le graphique ci-dessous montre le résultat de cette campagne de mesure ayant eu lieu entre 2000 et 2007 pour une section de rail spécifique. Il apparait pour ce cas que la fonction exponentielle modélise convenablement la réalité. Les lignes verticales représentent les interventions de bourrage du ballast.

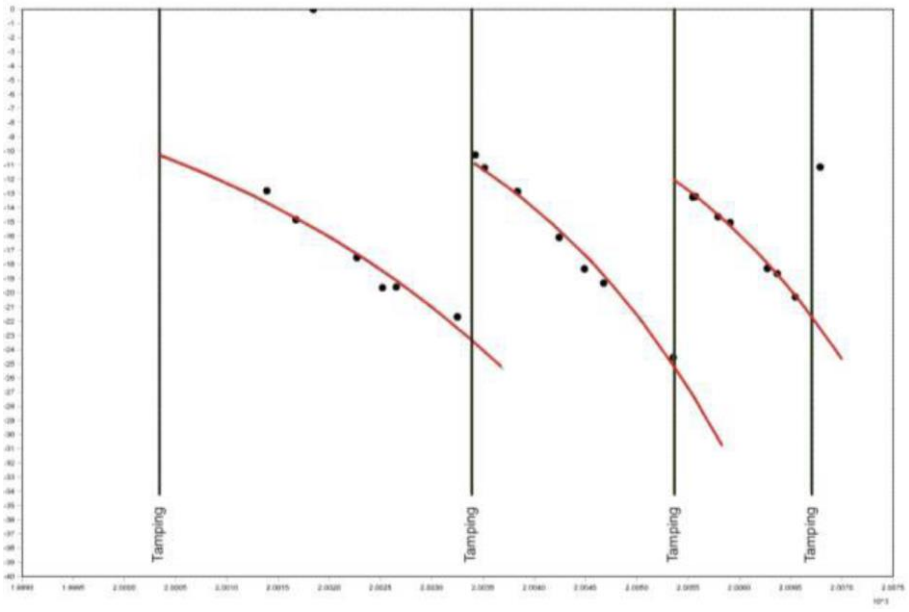


Figure 35: Expérience pratique - mesure de l'évolution de la qualité du rail et modélisation (MAINLINE, 2013)

Si le domaine d'application du modèle est avéré, il est alors possible de simuler différentes stratégies de maintenance en modifiant les seuils limites d'intervention ainsi que leurs effets attendus sur l'index de

qualité. Le graphique ci-dessous représente quantitativement le différentiel de l'index de qualité après une intervention de maintenance.

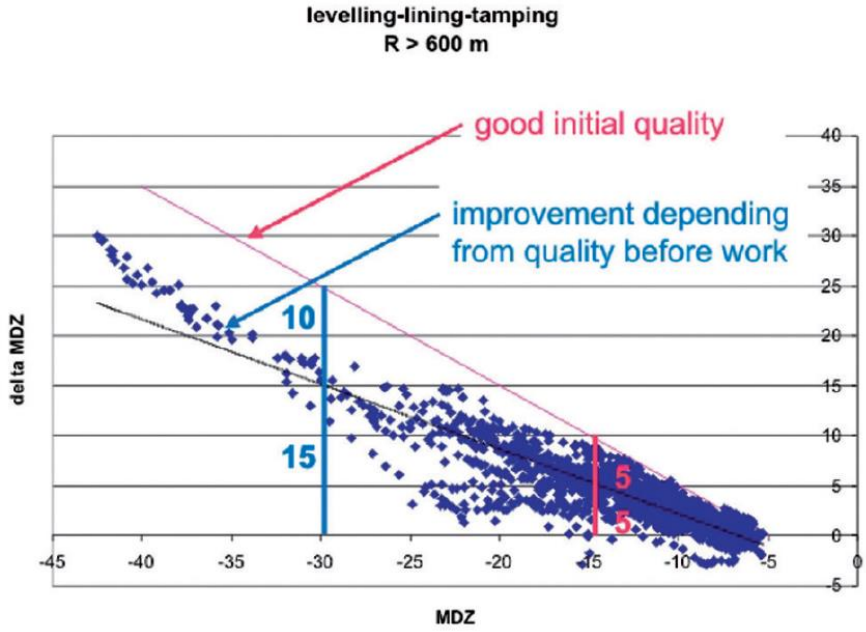


Figure 36: Revalorisation de l'index de qualité en fonction de la valeur de l'index au moment de l'opération de maintenance (Veit, 2007)

Une fois la calibration du modèle terminée, il est possible de visualiser le résultat de différentes stratégies de maintenance sur la durée de vie technique de la voie (Figure 37) ainsi que sur le coût du cycle de vie (Figure 38).

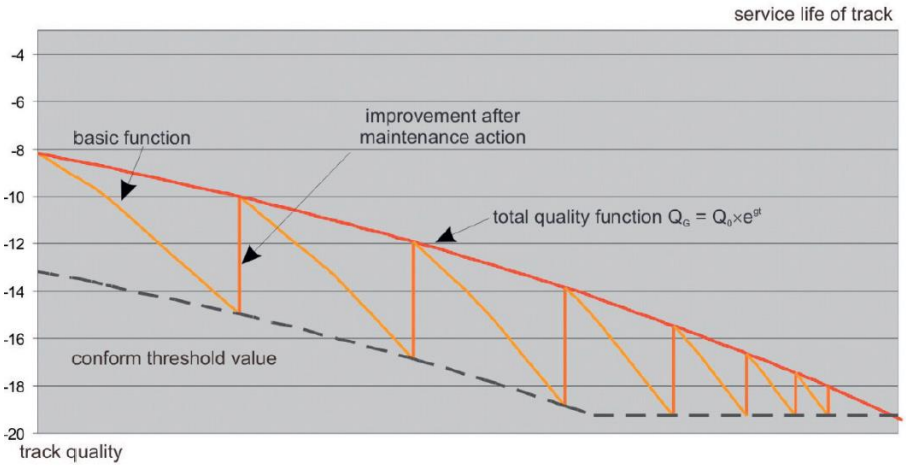


Figure 37 : Impact théorique d'une stratégie de maintenance préventive avec seuil d'intervention sur l'index de qualité (Veit, 2007)

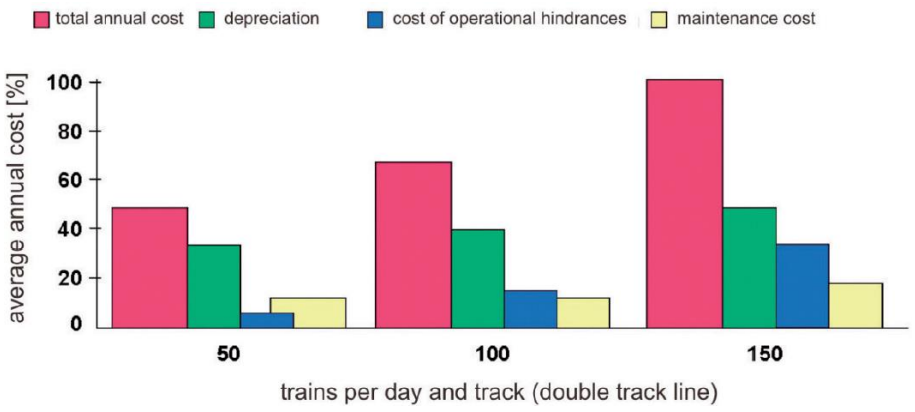


Figure 38: Coût total annualisé d'une stratégie de maintenance en fonction du trafic supporté (Veit, 2007)

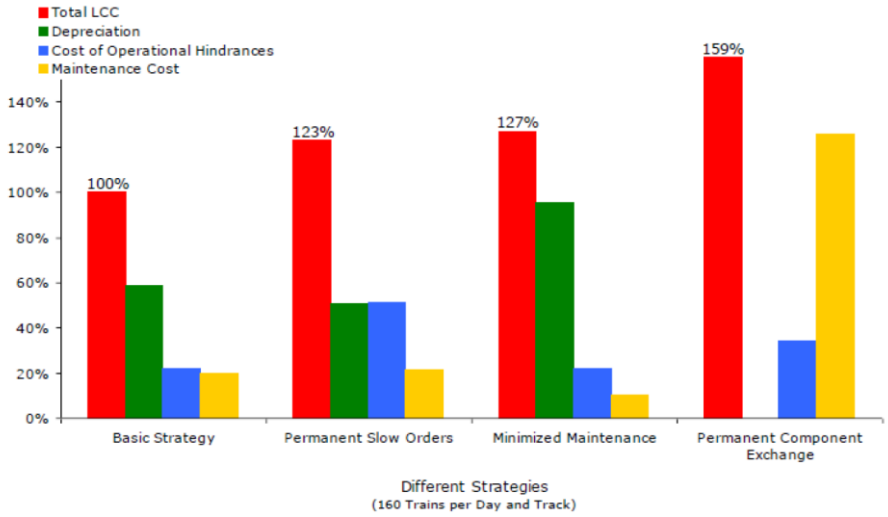


Figure 39: Effet de différentes politiques de maintenance sur le coût du cycle de vie (MAINLINE, 2013)

Applicabilité de ce type de modélisation dans le contexte du tramway :

Les modèles empirico-mécaniques que nous avons présentés illustrent deux sous-approches différentes. La première est expérimentale et la détermination des paramètres des lois de comportement est obtenue en laboratoire ; la seconde approche est empirique car les paramètres des lois sont obtenus par mesure in-situ des dégradations de la géométrie des voies. Ces caractéristiques rendent capables les modèles empirico-mécaniques de prendre en compte des phénomènes physico-chimiques et contextuels encore inconnus ou insuffisamment maîtrisés, en particulier lorsqu'ils se combinent. Toutefois, les lois de comportement qui en sont issues nécessitent soit des mesures expérimentales, soit des appareils de mesure à grands rendements : ceux qui limitent fortement l'application de ce type de modèle au contexte du tramway à moins d'instrumenter une voie. Ces lois de comportement sont basées sur la valeur d'un indicateur qu'il est possible de modéliser. Ces lois supposent alors que cet indicateur est représentatif. Or, la modélisation de l'état d'une infrastructure passe souvent par une batterie d'indicateurs, et par conséquent, autant de modèle sont nécessaires. Le modèle développé par l'université de Graz propose une approche intéressante puisque se situant du point de vue l'usager mais les paramètres de la loi sont adaptés à une voie ballastée ce qui est rarement le cas pour une voie ferrée de tramway. De manière générale, tous les modèles issus de l'approche mécano-empirique n'ont pas été adaptés au tramway qui

présente des caractéristiques très particulières (conception de la voie, géométrie du tracé, matériels roulants plus légers, vitesses d'exploitation moins élevées, interventions de maintenance possibles …)

2.2.2.c *L'approche statistique*

Modèle non paramétrique : estimateur de Kaplan-Meir (1958)

L'estimateur de Kaplan-Meier permet d'estimer la fonction de survie à partir de données empiriques. Le modèle est non-paramétrique. Il a été appliqué sur le réseau de tramway de Melbourne par des chercheurs du RMIT (Moridpour & Hesami, 2015; Yousefikia, Moridpour, Setunge, & Mazloumi, 2014).

Soit S(t) la probabilité qu'une mesure de maintenance ne dépasse pas une valeur seuil à l'instant t. Pour un échantillon N de mesures de maintenance, les durées observées jusqu'à chaque dépassement d'une valeur seuil sont :

$$t_1 < t_2 < \cdots < t_N \tag{8}$$

Dans le contexte de l'étude, il a été considéré 3 valeurs seuils, soit 3 fonctions de survie. Les valeurs sont les suivantes :

Tableau 10 : Seuils de maintenance utilisés pour l'exploitation des données de Melbourne

Niveau de seuil	Description du seuil
C	Lorsqu'une mesure de maintenance fait apparaitre un défaut de niveau C, aucune limitation de vitesse n'est requise. Une intervention de maintenance est désirable mais jugée non-requise. La fréquence des inspections périodiques (surveillance) ne doit pas excéder plus de 6 mois pour suivre l'évolution de la dégradation du rail. Après chaque inspection, une nouvelle mesure du défaut doit être opérée.
B – Confort	Lorsqu'une mesure de maintenance fait apparaitre un défaut de niveau B, aucune limitation de vitesse n'est requise. Une intervention de maintenance doit être programmée pour prévenir un *glissement* du défaut au niveau A. La fréquence des inspections périodiques (surveillance) ne doit pas excéder plus de 1 mois pour suivre l'évolution de la dégradation du rail. Après chaque inspection, une nouvelle mesure doit être opérée.
A – Sécurité	Lorsqu'une mesure de maintenance fait apparaitre un défaut de niveau A, le défaut ne peut pas être éliminé par une opération d'entretien et nécessite une forme de reconstruction. Une limitation de vitesse est requise jusqu'à élimination du défaut. Des mesures d'inspection sont requises selon la nature du défaut ou selon l'avis du responsable de la maintenance de la voie : c'est-à-dire suivant l'évaluation du risque.

Soit S(t), selon l'estimateur de Kaplan-Meir, un produit de la forme suivante :

$$S(t_i) = \frac{(n_i - d_i)}{n_i} \times S(t_{i-1}) = \frac{(n_1 - d_1)}{n_1} \times \frac{(n_2 - d_2)}{n_2} \times \ldots \times \frac{(n_i - d_i)}{n_i} \tag{9}$$

Avec :

- ni : le nombre de mesures en dessous de la valeur seuil,
- di : le nombre de mesures au-dessus de la valeur seuil,

Les données historiques utilisées ont été fournies par l'opérateur du réseau Yarra Trams de Décembre 2009 à Novembre 2013. Les données représentaient le mesurage de la géométrie de la voie. Les mesures sur les rails distinguaient les catégories suivantes :

- les voies en courbe,
- les communications croisées,
- les traversées obliques,
- les segments droits,

L'application de l'estimateur de Kaplan-Meir a permis de comparer les fonctions de survie des différentes catégories. L'article montre que les voies en courbe et les traversées obliques ont les probabilités de défaut de géométrie les plus grandes. Ce sont les zones les plus critiques. L'article ouvre des perspectives sur l'application du modèle semi-paramétrique de Cox (1970) sur les voies en courbe. Les covariables utilisées pour estimer la probabilité de défaillance sur une voie en courbe sont : le rayon de courbure, le type de pose de voie (béton ou ballast), le profil de rail (rail vignole ou rail à gorge), le revêtement de surface (béton ou asphalte) et les conditions de trafic.

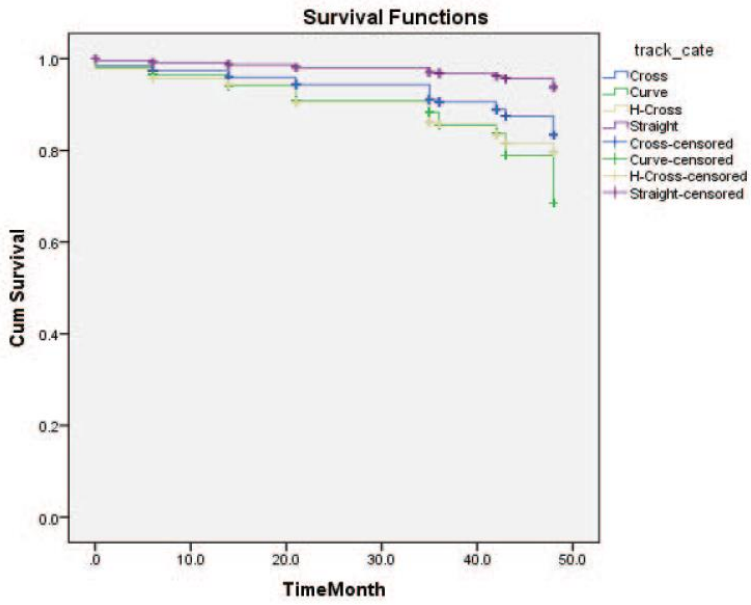


Figure 40: Fonctions de survie pour différentes portions du rail – Défaut de type « A »

Modèle semi-paramétrique

La régression de Cox, très populaire en analyse de survie, est plutôt rarement employée dans le domaine de la fiabilité. On lui préfère généralement les modélisations paramétriques qui sont présentées à la partie suivante pour la modélisation des taux de défaillance du matériel roulant.

$$\lambda(t|Z) = \lambda_0(t).\exp(\beta' Z)$$

2.3. LES MATERIELS ROULANTS : DES DEFAILLANCES PAR COMPOSANT ET LEUR SUIVI STATISTIQUE

Les travaux académiques sur la modélisation des dégradations à l'échelle d'un système multi-composants (tel que le tramway) s'inscrivent dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement. Ce domaine se définit comme la science des défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise (Villemeur, 1988). La plupart des travaux s'y rattachant et des outils qui en découlent s'appuient sur l'approche système et l'approche statistique. L'approche déterministe et l'approche empirico-mécanique sont de fait très peu adaptées aux systèmes multi-composants.

Les systèmes multi-composants sont composés d'un ensemble de matériels ou sous-systèmes constitués de matériaux de toute nature et interagissant entre eux de manière active. Il y a dans ces systèmes, des dépendances entre les matériels et la présence de plusieurs mécanismes de dégradation, généralement en compétition, qui concourent à la défaillance du système. L'hétérogénéité des matériaux d'une part, et la multiplicité des dépendances d'autre part, sont sources de complexité et tendent vers l'utilisation d'approches capables de prendre en compte ces caractéristiques.

A titre d'exemple explicatif, on comprend bien l'intérêt de ce type d'approche lorsqu'il s'agit d'évaluer l'état physique d'un circuit électrique alimentant plusieurs ampoules (le système multi-composant). En conséquence de la diversité des matériaux, le comportement des matériels à l'usage ne va pas suivre les mêmes lois de dégradation. Cela conduit à douter de la pertinence d'un modèle de dégradation dont le niveau de granularité serait fixé à l'échelle du matériau. D'autant plus que les dépendances entre les matériels ou la structure du système et les effets engendrés par des ampoules placées en parallèle ou en série sont nécessairement à prendre en compte pour définir l'état de dégradation d'un tel système et sa résilience (p.ex. dans le cas d'un système équipé de redondance).

Les approches de la Sûreté de fonctionnement permettent de prendre en compte ces caractéristiques. Elles se différencient des approches traditionnelles qui s'articulent autour de l'apparition des défauts physiques en se focalisant davantage sur leurs conséquences : l'apparition des défaillances. Toutefois, le comportement de dysfonctionnement d'un matériel est essentiellement lié à l'évolution des mécanismes de dégradation qui peuvent l'affecter. En réalité, un matériel se dégrade tout au long de son temps de mission, qu'il soit en fonctionnement en ou en attente, et selon les besoins du système. La défaillance est un phénomène qui fait suite à la progression de mécanismes de dégradation dont l'évolution peut aboutir à l'apparition d'un mode de défaillance (Zille, 2009). Les approches de la Sûreté de fonctionnement proposent des modèles de dégradation où le niveau de granularité est fixé non pas à l'échelle du matériau homogène (approche déterministe, empirico-mécanique) mais à l'échelle fonctionnelle : ce qui est accompli par le système. En sus de ces modèles de dégradation, ces approches proposent aussi d'autres outils afin de maîtriser toute la chaine causale « Défauts – Dysfonctionnements – Impacts ».

2.3.1. DESCRIPTION DES DEFAILLANCES

2.3.1.a *Les données préliminaires de maintenance*

La littérature académique en lien avec la dégradation du véhicule dans sa globalité, c'est-à-dire ne se focalisant pas sur un matériel ni un matériau en particulier (p.ex. les roues d'un tramway), adopte une approche fiabiliste.

La diversité des dysfonctionnements susceptibles d'arriver sur le matériel roulant est bien trop importante et si peu documentée dans la littérature qu'en faire une synthèse serait insuffisamment rigoureux pour en extraire un quelconque enseignement sur le comportement de défaillance des tramways. Toutefois, quelles sont les types de données préliminaires recueillies par les systèmes de maintenance et comment sont-elles exploitées par les universitaires au travers des modèles fiabilistes ?

(Felea & Csuzi, 2012) présentent les données de défaillance concernant les matériels avec le plus grand nombre de défaillances dans lesquels ils distinguent des composants ou des sous-systèmes du matériel roulant. Généralement, ces sous-ensembles concourent à une fonction technique spécifique. On identifie ainsi dans cette liste le nombre de défaillances associé aux câbles électriques, aux solénoïdes (couramment appelés « bobines »), aux validateurs de titre de transport, aux pompes hydrauliques, aux moteurs, aux pantographes, etc.

Tableau 11 : Liste des composants avec le plus grand nombre de défaillances pour les matériels roulants de type T4D (Felea & Csuzi, 2012)

Nr.crt.	Subsystem or component	YEAR						TOTAL
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1.	Electric cables	21	61	25	29	22	12	**170**
2.	Solenoids	32	49	52	46	41	22	**242**
3.	Validators	21	130	42	15	45	11	**264**
4.	Oil pumps	40	55	49	77	81	30	**332**
5.	Motor	25	126	55	70	51	38	**365**
6.	Caseing screws	35	89	64	102	77	3	**370**
7.	Pantographs	67	119	111	93	47	20	**457**
8.	Chassis/bogie	80	104	197	85	10	10	**486**
9.	Contactors/contacts	64	133	230	64	58	65	**614**
10.	Accelerator	127	88	246	105	94	40	**700**
11.	Lighting/signallings	54	225	47	271	263	24	**884**
12.	Doors	40	46	71	536	343	17	**1053**
13.	Breaking Systems	620	969	871	286	209	320	**3275**
14.	Others	795	812	1357	1198	1056	320	**5538**
15.	**TOTAL per year** [$\upsilon(T_A)$]	**2021**	**3006**	**3417**	**2977**	**2397**	**932**	**14750**

L'objectif est ensuite d'analyser les données de défaillance des différents sous-systèmes et de les comparer par type de matériel roulant. Sur le réseau d'Oradea (Roumanie), on dénombre 3 différents types de tramway :

- T4D et kT4D : constructeur TATRA
- ULF (Ultra Low Floor) : plancher bas intégral, constructeur SIEMENS

Les figures ci-après présentent ces données élémentaires pour les principaux systèmes en faute.

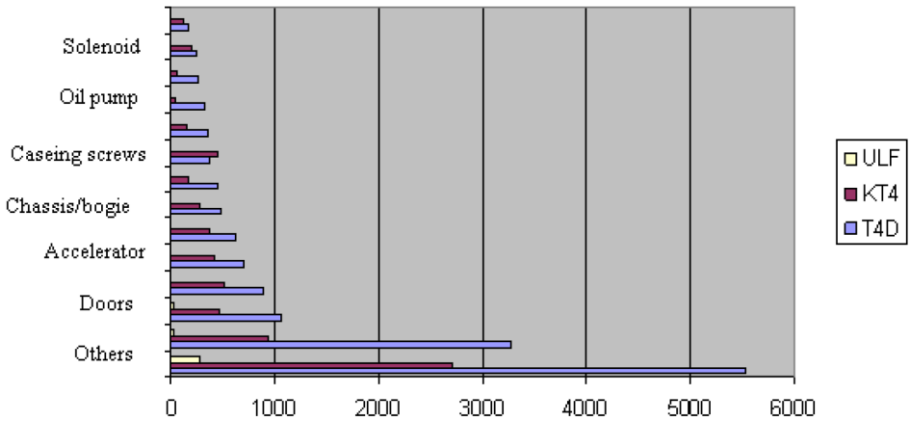


Figure 41 : Comparaison du nombre de défaillances sur la période d'observation sur les systèmes les plus critiques

Dans (Smolnik, Heinrich, Szybka, & Wi, 2013) et (Leung, Zuo, & Whitfield, 2001), on procède de façon analogue à la présentation sommaire des données préliminaires de maintenance. On retrouve encore le même type de sous-systèmes matériels, et pour chacun d'eux on peut lire le nombre de défaillances. Les données préliminaires sont datées de manière à pouvoir reconstituer l'historique des pannes au cours de l'année.

Tableau 12 : Exemple de données préliminaires de maintenance (Smolnik, Heinrich, Szybka, & Wi, 2013)

Analysis period: 01.01.2008-31.12.2009		**Tramcars:** 105Na, **no.:** 41-80,88,89,90,91-100,104-110, 121-160		
No.	Subassembly	Code abbreviations	Number of failures	Percentage
1.	Engine	105.1	41	3.2%
2.	Rheostatic starter	105.2	38	3.0%
3.	Current collector	105.3	6	0.5%
4.	Gear unit	105.4	7	0.6%
5.	Mechanical brake	105.5	141	11.1%
6.	Rail brake	105.6	122	9.6%
7.	Doors	105.7	416	32.8%
8.	Lighting	105.8	196	15.4%
9.	Ring	105.9	26	2.0%
10.	Others	105.10	277	21.8%
Total			1272	100.0%

Tableau 13 : Exemple de données préliminaires de maintenance (Leung, Zuo, & Whitfield, 2001)

System and Equipment	Number of Failures Observed			Number of Failures Estimated			Estimated Trend
	6-12/95	1-12/96	1-6/97	1-12/95	1-12/96	1-12/97	
Coupler	3	6	3	6	6	6	Same
Air Compressor	20	57	40	40	57	80	Up
Static Inverter	5	31	25	10	31	50	Up
Digitizer	5	22	49	10	22	98	Up
Car Control Unit	61	30	65	122	30	130	Up
Brake Control Unit	35	128	102	70	128	204	Up
Chopper	9	31	19	18	31	38	Up
Bogie	44	120	78	88	120	176	Up
Lighting	518	1276	857	1036	1276	1714	Up
Tachograph	16	35	8	32	35	16	Down
Passenger Doors	145	293	155	290	293	310	Up
Technograph	4	9	2	8	9	4	Down

2.3.1.b *Conséquences des défaillances*

Le nombre d'occurrences d'une défaillance ainsi que la nature de celle-ci ont des conséquences sur les performances d'un service. Les effets provoqués sur les finances du service ont conduit certains modèles à intégrer des indicateurs économiques dans l'analyse des défaillances.

Dans(Smolnik et al., 2013), les pertes engendrées par une défaillance de type *i* (sélection sur un échantillon de taille N de type de défaillance) apparaissant sur un véhicule de type *j* sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$W_{SUij} = 100 \frac{S_{Uij}}{\sum_{i=1}^{n} S_{Uij}} \tag{10}$$

Avec

- S_{Uij}, représente la valeur totale (la somme) des pertes supportées par l'organisation à la suite d'un seul incident de la défaillance de type i, se produisant dans un véhicule de type j,
- le dénominateur représente la valeur totale des pertes sur l'ensemble de l'échantillon N (type de défaillance) pour un véhicule de type j.
- le facteur 100 inclus dans la formule a pour simple but d'augmenter la variation du coefficient W_{SUij}

La nature des pertes induites par une défaillance est variée. A minima, il convient de s'intéresser aux coûts directs généralement composés des coûts salariaux, des coûts de matériaux et matériels de rechange et enfin l'outillage de maintenance. Toutefois, une défaillance engendre aussi des coûts indirects que l'on associe à l'interruption du service et le report modal éventuel qui en découle, les kilomètres non-produits et les malus contractuels associés, les heures supplémentaires du personnel directement imputables à l'apparition d'une défaillance, etc.

Dans (Smolnik et al., 2013), on propose de calculer la valeur de la somme de toutes les pertes S_{Uij} par la formule suivante :

$$S_{Uij} = \frac{W_P . K_{Pij} + W_E . K_{Eij} + W_Z . K_{Zij}}{W_P + W_E + W_Z} \quad (11)$$

Où :

- $K_{Pij}, K_{Eij}, K_{Zij}$ représentent les pertes associées à une défaillance de type i sur un véhicule de type j. Ces pertes prennent en compte la perturbation du service, les travaux de réparation (maintenance corrective) en station et la fourniture des ressources requises pour la réparation des dommages,
- W_{Pi}, W_{Ei}, W_{Zi} sont des coefficients permettant de comparer les coûts de différents types de pertes. Ils sont associés directement aux caractéristiques des défaillances.

Ce calcul dépend très fortement des données disponibles sur les défaillances. En outre, l'impact des défaillances doit surtout être mesuré en fonction de la fréquence de leur apparition. A cet effet, on propose l'indicateur suivant :

$$C_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} l_{ij}} \quad (12)$$

Avec

- l_{ij}, le nombre d'incidents impliquant les défaillances de type i sur les véhicules de type j, observés sur la période d'analyse,
- $\sum_{i=1}^{n} l_{ij}$, le nombre total d'incidents impliquant tous les types de défaillance sur les véhicules de type j, observés sur la période d'analyse.

On procède ensuite au calcul d'un indicateur unique permettant de relier la gravité d'une défaillance (le coût) et sa fréquence.

$$W_{ZUij} = W_{SUij} \times C_{ij} \quad (13)$$

Il convient de préciser que les unités choisies dépendent de la manière la plus appropriée pour représenter et comparer les coûts. En effet, ceux-ci peuvent par exemple représenter des heures ou des coûts monétaires. Enfin plus l'on sera précis dans l'analyse et la spécification des défaillances, plus leurs impacts pourront être calculés avec précision. Toutefois, la précision et l'exhaustivité du modèle sont fortement tributaires de la qualité et la disponibilité des données de maintenance.

2.3.2. MODELISATION DES DEFAILLANCES

2.3.2.a *Notion élémentaire de fiabilité*

Fonction de fiabilité

La fiabilité d'un dispositif au bout d'un temps *t* correspond à la probabilité pour que ce dispositif n'ait pas de défaillance entre 0 et l'instant *t*. Considérons T, la variable aléatoire qui caractérise l'instant de défaillance du dispositif et R(t) (de l'anglais Reliability), la fonction de fiabilité s'écrit :

$$R(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) \tag{14}$$

$$R(t) = Prob\ \ (qu'une\ entité\ E\ soit\ non\ défaillante\ sur\ la\ durée\ [0;t], \\ en\ supposant\ qu'elle\ n'est\ pas\ défaillante\ à\ l'instant t = 0) \tag{15}$$

F(t) est appelé la fonction de défaillance du dispositif (croissante). C'est la fonction de répartition de la variable aléatoire T.

A noter que la variable « temps » doit être considérée comme une unité d'usage. En effet, pour certains dispositifs, il est plus convenable de considérer une distance parcourue (kilométrage), un nombre de tours, un nombre de cycles (p.ex. batterie), un nombre de chargement (p.ex. béton), un nombre d'allumages (p.ex. bougie), etc.

Taux d'avarie instantané

L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant *t*, noté $\lambda(t)$, est la suivante :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{1}{\Delta t} \times \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \tag{16}$$

Physiquement le terme $\lambda(t)\Delta t$ mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant t.

Le taux de défaillance à l'instant t d'un dispositif est donc défini par :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{17}$$

La connaissance de ce paramètre suffit à déterminer sa fiabilité à partir de la formule suivante :

$$R(t) = \exp\left\{ -\int_0^t \lambda(s).\, ds \right\} \tag{18}$$

2.3.2.b *Les lois continues paramétriques*

Dans l'analyse des données de durée de vie, quelle que soit la discipline, les mêmes distributions statistiques interviennent fréquemment. Le tableau ci-après présente les fonctions de défaillance les plus fréquentes ainsi que leur fonction de densité associée et le taux d'avarie instantané.

Tableau 14 : Les principales lois paramétriques utilisées dans le domaine de la fiabilité

Loi	Fonction de défaillance *(Fonction de répartition)* $F(x) = 1 - R(x)$	Densité de probabilité $f(x) = F'(x) = -R'(x)$	Taux d'avarie instantané $\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}$
Exponentielle	$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$	$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$	$\lambda(x) = \lambda$
Weibull	$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}} & x \geq \gamma \\ 0 & x < \gamma \end{cases}$	$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}} & x \geq \gamma \\ 0 & x < \gamma \end{cases}$	$\lambda(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$
Uniforme	$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}$	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a < x \leq b \\ 0 & sinon \end{cases}$	$\lambda(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{1}{b-x} & a < x < b \end{cases}$
Normale	$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(u).du$	$f(x) = \frac{1}{\alpha\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\alpha^2}}$	$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}$
Normale standard	$\Phi(z) = \int_{-\infty}^{z} \emptyset(u).du = 0{,}5 + \int_{0}^{z} \emptyset(u$ $z = \frac{x-\mu}{\alpha}$	$\emptyset(z) = \frac{1}{2\pi}\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$	$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}$
Gamma	$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-k\Theta x}\sum_{i=0}^{k=1}\frac{(k\Theta x)^i}{i!} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$	$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta\Theta}{\Gamma(\beta)}(\beta\Theta x)^{\beta-1}e^{-\beta\Theta x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$	$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}$
LogNormale	$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\alpha}\right)\ x \geq 0$	$f(x) = \frac{1}{x\alpha\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\alpha^2}\right)$	$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}$

Ces lois sont dites paramétriques car elles intègrent des paramètres permettant de calibrer la courbe théorique à la réalité. Ces paramètres n'ont pas nécessairement de réalité physique. Pour vérifier que les données théoriques se calibrent bien avec les données observées, on utilise en statistique des tests d'hypothèse. A ce propos, le test statistique de Kolmogorov-Smirnov est régulièrement utilisé dans le domaine de la fiabilité.

Tableau 15 : Principales utilisations des lois continues paramétriques (Zwingelstein, 1996)

Modes élémentaires de défaillance	Loi exponentielle	Loi normale	Loi lognormale	Loi de Weibull
Déformation				X
Rupture	X			
Limite élastique	X			
Corrosion		X	X	X
Rouille				
Fluage		X		
Fatigue			X	X
Erosion				X
Usure				X

Quelques exemples de lois appliquées pour l'étude fiabiliste de matériel roulant ferroviaire :

Dans (Smolnik et al., 2013) :

$$R(t) = e^{-\frac{t^{1,2}}{8,0}}, F(t) = 1 - e^{-\frac{t^{1,2}}{8,0}}, f(t) = \frac{1,2}{8,0} t^{1,2-1} e^{-\frac{t^{1,2}}{8,0}}, \lambda(t) = \frac{1,2}{8,0} t^{1,2-1}$$

Dans (Carrese & Ottone, 2006), on retrouve une modélisation de « courbe de la baignoire ». Le taux de défaillance est critique à l'installation (période de rodage) puis se stabilise pour repartir à la hausse sous l'effet du vieillissement.

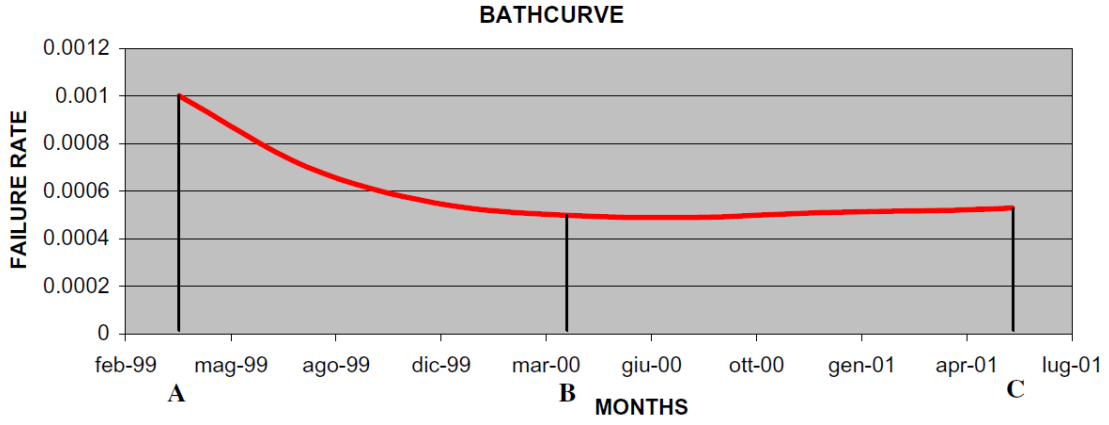


Figure 42 : Courbe de la baignoire (Carrese & Ottone, 2006)

Tableau 16 : Les différentes valeurs théoriques des différentes distributions statistiques des données de défaillance (Felea & Csuzi, 2012)

EDT Type	Distribution function		T_F (R)		T_{CM}(CM)		T_{PM}(PM)	
			Parameter values	D_{max}	Parameter values	D_{max}	Parameter values	D_{max}
T4D	Exponential		λ =0.037	0.097	μ_{CM} =0.067	0.152	μ_{PM} =0.134	0.43
	Weibull	η	23.897	0.075	1.578	0.102	2.885	0.114
		β	1.157		14.164		1.075	
	Normal	m	24.428	35.136	13.319	0.269	3.161	0.41
		σ	35.136		19.68		13.82	
KT4D	Exponential		λ =0.031	0.109	μ_{CM} =0.058	0.202	μ_{PM} =0.325	0.154
	Weibull	η	33.29	0.076	13.587	0.105	2.522	0.102
		β	1.194		1.332		1.223	
	Normal	m	32.045	0.184	13.473	0.304	2.628	0.335
		σ	35.393		24.281		5.573	
ULF	Exponential		λ =0.002	0.486	μ_{CM} =0.255	0.291	μ_{PM} =0.119	0.212
	Weibull	η	143.233	0.101	9.305	0.164	2.484	0.151
		β	0.964		1.431		1.052	
	Normal	m	163.702	0.422	8.455	0.212	2.628	0.335
		σ	810.104		8.065		5.573	

CONCLUSION DE CHAPITRE

Le vieillissement fiabiliste exprime la perte d'une fonction (défaillance). Cette approche tend vers une vision « tout ou rien » des effets des dégradations sur les équipements. L'approche est statistique et consiste à établir des lois de fiabilité sur base de la collection de temps de défaillance. Cette approche est particulièrement utilisée dans le cas d'équipements présentant de nombreux temps de pannes. Toutefois, elle est limitée lorsque les équipements présentent un niveau très élevé de fiabilité ou lorsque le nombre d'équipements étudiés n'est pas suffisant.

Le vieillissement physique représente un processus de dégradation progressif et continu des propriétés et des fonctions des composants. Elle recouvre deux approches. La première approche est basée sur la modélisation physique des processus de dégradation. Ces modèles impliquent une connaissance du phénomène de dégradation (de son évolution et du seuil critique) qui peut provenir de tests expérimentaux. La seconde approche est basée sur la surveillance d'un indicateur d'état (condition monitoring). Le principe de cette approche est de suivre l'évolution d'un ou plusieurs indicateurs de dégradation (taille de fissure, géométrie de la voie, tassement du ballast, etc.) au cours du temps. Sur base de cet indicateur, ce genre d'approche ajuste une loi de dégradation. La défaillance est alors associée au passage de cet indicateur au-delà d'un seuil fixé par expérience.

***

Des principaux sous-systèmes qui ont fait l'objet de recherches, on trouve essentiellement le matériel roulant et la voie ferrée. Pour la voie ferrée de tramway, les modèles physiques sont trop souvent circonscrits à la modélisation d'un seul mécanisme dans des conditions théoriques limitées à des cas simples (une voie rectiligne) et avec des paramètres issus du ferroviaire lourd. Or, les caractéristiques des transports guidés urbains en sont trop éloignées. Pour les mêmes raisons, les modèles mécano-empiriques, sortes d'hybridation d'une approche physique et statistique, sont également inapplicables en l'état avec le soucis qu'ils requièrent l'instrumentalisation d'une voie de tramway avec réécriture des variables pour les adapter à une voie encastrée. Restent alors à notre disposition les modèles fonctionnels qui sont décrits puis appliqués au chapitre 3 et les modèles statistiques dont nous présentons un cas d'application au chapitre 6.

Tableau 17 : Deux conceptions du vieillissement : l'approche physique vs l'approche fiabiliste

Approche	Fiabiliste	Physique
Type d'équipements visés	Plutôt les actifs	Plutôt les passifs
Mécanismes de dégradation	Nombreux	Souvent unique
Vitesse d'apparition du vieillissement	Rapide, parfois soudain	Lente, continue
Modélisation	Statistique, probabiliste	Physique si le mécanisme est connu et les connaissances sont suffisantes, ou statistique à partir des effets mesurables
Données principales	Défaillances = pertes de fonction	Effets mesurables
Indicateurs recherches	Taux, probabilité de défaillance, durabilité	Probabilité de défaillance, durée de vie résiduelle, variable influente
Fenêtre de décision	Courte	Grande

Chapitre 3

MODELISATION FONCTIONNELLE ET QUALITATIVE DES DESORDRES DE LA VOIE FERREE DE TRAMWAY

Les chapitres précédents présentent successivement les différents composants physiques d'une infrastructure de tramway et les principaux phénomènes d'usure pouvant s'y manifester. L'approche dite structurelle de ces chapitres est une démarche analytique ayant permis de recentrer progressivement l'objet d'étude sur la voie ferrée. La démarche analytique montre par réduction et compartimentage comment les sous-systèmes, composants et matériaux se dégradent sous l'effet du vieillissement. Cependant, elle est limitée dès lors que le vieillissement de l'ensemble des éléments est un phénomène autre que le vieillissement de chacun de ces éléments, pris séparément. On revient ici à la globalité par itération. Dès lors que les éléments du système technique sont conçus, fabriqués puis assemblés, l'agencement des différents composants engendre des interfaces qui sont le siège des principaux modes de défaillance. L'analyse des phénomènes de vieillissement d'un composant sans considération de ses interactions est une approche ne pouvant apporter une réponse opérationnelle satisfaisante.

L'objectif de ce chapitre est alors d'investiguer comment les différents composants de la voie ferrée fonctionnent et interagissent par une analyse fonctionnelle puis finalement se dégradent avec le temps sous l'effet du vieillissement par une analyse dysfonctionnelle. Nous proposons la construction d'une modélisation qualitative nous permettant d'englober tous les aspects techniques intervenant dans le processus de vieillissement des plateformes de tramway.

Notre approche est systémique et s'appuie sur la littérature scientifique mais aussi sur des audits techniques de voie ferrée de réseaux de tramway français qui nous ont permis de formaliser et synthétiser les retours d'expérience. L'étude des modèles du chapitre 2 nous permet d'être à l'aise avec les comportements de la voie ferrée de tramway par une compréhension des variables et des interfaces. La construction de notre modèle fonctionnel s'appuie sur des méthodes approuvées par une large communauté tant scientifique que technique.

Dans un premier temps, nous faisons une synthèse des méthodes de l'analyse qualitative des systèmes qui existent depuis longtemps, puis nous construisons un modèle fonctionnel et qualitatif de la voie ferrée de tramway afin d'en étudier ses mécanismes dysfonctionnels.

3.1. PRINCIPES ET METHODES DE L'ANALYSE QUALITATIVE DE SYSTEME TECHNIQUE

3.1.1. QUELQUES BASES THEORIQUES DE LA MODELISATION SYSTEMIQUE

La littérature de la pensée systémique est vaste et présente des concepts nombreux ainsi qu'un vocabulaire riche. Aussi, nous présentons ici uniquement quelques principes de base de la modélisation systémique ainsi que les concepts qui nous semble les plus importants dans le cadre de notre analyse, sans prétendre à l'exhaustivité.

L'approche systémique repose sur un certain nombre de concepts tels que ceux d'activité, structure, évolution, finalité et environnement qui se retrouvent implicitement ou explicitement dans la notion de système (Le Moigne, 1994). L'approche a vu le jour au début des années 50 aux États-Unis. Bien que d'autres théories[18] distinguent sur le plan conceptuel le *tout* de l'ensemble de ses parties, c'est l'œuvre du biologiste Ludwig Von Bertalanffy qui matérialise le dénominateur commun à ces différentes théories avec la Théorie Générale des Systèmes (Minati, 2003).

3.1.1.a *La notion de système, sous-systèmes et complexité*

De nombreuses définitions des systèmes ont été données par les chercheurs. La plupart d'entre elles définissent le système comme un ensemble d'éléments en interrelations. Ces interactions sont le plus souvent le fait de relations causales complexes. D'abord parce que ces interactions peuvent concerner un grand nombre d'éléments de nature différente mais surtout parce qu'elles impliquent aussi des relations de différentes natures (échange, transformation, régulation, etc.) et des boucles de rétroaction.

Ce qui est fondamental pour un système n'est pas l'élément ou la structuration statique des éléments, mais l'action (activité). Un système peut d'ailleurs être ouvert ou fermé à son environnement, ce qui ajoute de la complexité à la compréhension de l'action. Une action (cause) produit un effet (réaction) qui modifie l'environnement qui à son tour modifie la cause à l'origine de l'effet. Lorsque nous envisageons un système, nous déterminons un objet avec ses limites. Or, la complexité intervient par la variété des comportements possibles du système. Admettre que le système est ouvert, c'est reconnaitre des échanges (phénomènes de transaction) avec son environnement capables (phénomènes d'influence) ou non de modifier son évolution.

La caractérisation de l'action passe par la notion de processus. Un processus peut être défini comme l'ensemble ordonné des changements qui affectent la position dans le temps, dans l'espace, dans la forme ou dans la nature d'une famille d'éléments identifiés (Lesbats, 2012). On peut conceptualiser le comportement ou l'évolution d'un système par un processus. Si les facteurs de son évolution restent peu nombreux (nombre de composants, nombre d'activités réalisables, nombre d'interactions, etc.), nous admettons être en présence d'un système simple. En revanche, si le système présente un nombre élevé de facteurs, le système est complexe. Il ne prend alors plus seulement en compte des objets (par exemple technologiques) mais des comportements évolutifs que l'on peut modéliser par des processus.

[18] Théorie de l'information, théorie des jeux et des décisions, théorie de l'intelligence artificielle, la cybernétique, le structuralisme, etc.

J.-L. Le Moigne, qui a popularisé en France la théorie générale des systèmes, a proposé un modèle descriptif de représentation d'un système appelé modèle canonique OID (Opération – Information – Décision). Nous allons présenter succinctement les principaux éléments de ce modèle. Le choix de ce modèle se justifie par sa généralité et parce qu'il est adapté à la modélisation de tous systèmes de divers niveaux de complexité : du plus basique du type objet aux plus complexes tels que les systèmes sociaux.

Dans le modèle OID, J.-L. Le Moigne définit neuf niveaux de complexité correspondant à autant de systèmes différents. Le tableau ci-dessous synthétise pour chaque niveau de complexité les différents types de systèmes associés.

Tableau 18 : les neuf niveaux de complexité d'un système (Le Moigne, 1994)

Niveaux de complexité	Description
1	Le système est **identifiable**, il admet des limites.
2	Le système est **actif**, il peut être considéré comme une boîte noire.
3	Le système est **régulé**, il existe des règles dans la boîte noire.
4	Le système **s'informe** sur son propre comportement, il y a une production d'information afin d'assurer la régulation.
5	Le système **décide** de son comportement, il existe un sous-système de décision. Les décisions sont élaborées à partir des informations reçues.
6	Le système **mémorise** l'information dans un sous-système d'information, ce niveau correspond à la décomposition classique d'un système en trois sous-systèmes : le système opérant, le système d'information et le système de décision.
7	Le système **coordonne** ses décisions d'action : il y a une densification des processus entre les sous-systèmes afin de se coordonner (émergence d'un sous-système de décision-sélection).
8	Le système **imagine et conçoit** de nouvelles décisions possibles (émergence d'un sous-système d'intelligence-conception).
9	Le système **se finalise**, il décide de manière autonome : il est apte à engendrer lui-même ses projets (émergence d'un système de finalisation).

Ces niveaux de complexité peuvent correspondre aux systèmes les plus basiques du type objet comme à des systèmes plus évolués comme les machines, les systèmes biologiques ou encore les systèmes sociaux (par exemple l'entreprise). A partir du niveau 6, le système se compose d'un sous-système opérant, d'un sous-système d'information et d'un sous-système de décision. Cette décomposition en trois sous-systèmes est commode pour la conceptualisation de la plupart des systèmes existants.

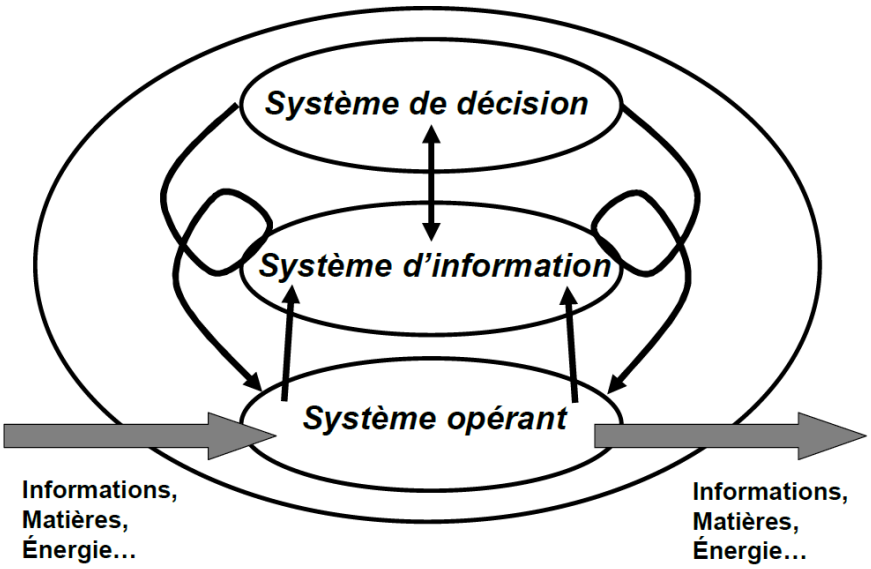


Figure 43 : Aboutissement de la forme canonique OID : le système mémorise (Allaire, 2012)

Dans le cas général, le système d'information mémorise les informations produites par le système opérant, et les met à disposition du système de décision. Puis la mise en œuvre de la décision provoque une modification des informations, ce qui est représenté par des boucles de rétroaction entre les systèmes d'information et de décision. Dans le cas par exemple d'une organisation telle qu'une entreprise (Ermine & Institut national des télécommunications (Evry), 2006), le système opérant est constitué par les acteurs qui transforment les flux appelés intrants, d'énergie, de matière ou d'information, en d'autres flux appelés extrants de même nature. Le système d'information est constitué par tout ce qui stocke, mémorise et met à disposition de l'information : documents, bases de données, écrits, images, etc. Ce système d'information informe alors les décisionnaires de l'entreprise qui peuvent ainsi agir sur le processus de production via le système opérant.

Cette synthèse issue de (Allaire, 2012) caractérisent les six propriétés fondamentales d'un système :

- **La finalité :** un système est composé d'un ensemble d'éléments en interrelation mutuelle, organisés en fonction d'un but. C'est ce but qui motive l'existence même du système.
- **La globalité (ou la totalité) :** un système n'est pas réductible à la somme de ses éléments.
- **L'organisation** qui définit l'agencement des différents éléments du système pour atteindre un ou plusieurs objectifs communs.
- **L'interaction (ou l'interrelation)** entre ses éléments qui ne se limite pas à l'étude des relations causales simples.
- **L'évolution** des comportements du système dans le temps, dans l'espace, dans la forme ou dans la nature des éléments du système.
- **La complexité** qui est le résultat de l'imbrication des concepts précédents et dont la prise de conscience par la communauté scientifique a permis l'émergence de la Systémique.

3.1.1.b *La méthode systémique*

La systémique fonde sa démarche méthodologique sur le concept de système et sur le concept associé de modèle (Legros, 2009). Le modèle est construit pour appréhender le système et le comportement de ce dernier constitue le socle de la méthode systémique.

Le processus de modélisation systémique utilise largement le langage graphique et va de l'élaboration de modèles qualitatifs, en forme de « cartes », à la construction de modèles dynamiques et quantifiés, opérables sur ordinateur et débouchant sur la simulation (Donnadieu, Durant, Neel, Nunez, & Saint Paul, 2003).

La première étape de la modélisation des systèmes (sur 3 étapes) consiste en une exploration du système pour d'une part le situer par rapport à son environnement et le délimiter et d'autre part dégager les grands traits qui lui sont propres. Dans un premier temps, cette exploration systémique dégage les principales interactions externes au système aboutissant à une modélisation de type boîte noire.



Figure 44 : le principe de la boîte noire

L'exploration systémique se poursuit avec l'analyse de l'architecture interne du système. L'essentiel des éléments qui « font » système et les types d'interactions entre ces éléments sont identifiés. L'exploration systémique doit permettre de regrouper des données, souvent éparses, relatives aux différents aspects du système. Elle peut identifier les principales variables d'état, de flux et des boucles de rétroaction.

La première et la plus répandue des méthodes d'exploration systémique est connue sous le nom de **triangulation systémique** (Cambien, 2008). Cette méthode propose d'analyser un système complexe sous trois angles complémentaires que l'on nommera par convention : structure, fonction et évolution. Chacun de ces angles correspond à un point de vue particulier du modélisateur. La définition du système est le résultat d'une triangulation itérative entre ces trois aspects en considérant le système ouvert[19] sur l'environnement :

- **L'angle structurel (ou ontologique ou organique)** perçoit le système comme un ensemble d'objets en relation. Le modélisateur cherche à décrire la structure du système. On retrouve là la démarche analytique avec une nuance de poids : l'accent est davantage mis sur les relations entre composants que les composants eux-mêmes, on s'intéresse à la structure plutôt qu'à l'élément (Donnadieu et al., 2003).
- **L'angle fonctionnel (ou phénoménologique)** est surtout sensible à la finalité ou aux finalités du système (Donnadieu et al., 2003). Le système est perçu comme faisant quelque chose et le modélisateur cherche à répondre aux questions : que fait le système dans son environnement ? A quoi sert-il ?
- **L'angle dynamique (ou génétique ou évolution ou diachronique)** vise à décrire l'évolution, l'histoire du système. Il est perçu comme se modifiant au cours du temps, en accord avec sa

[19] Le structuralisme considérait certes, déjà, les trois aspects d'un système mais lequel était délimité par des frontières stables, et par conséquent se limitait à la modélisation des systèmes fermés et supposait ainsi des capacités d'autorégulation.

finalité. La structure du système nécessite un ajustement permanent – une auto-organisation – pour que sa finalité s'adapte à son environnement.

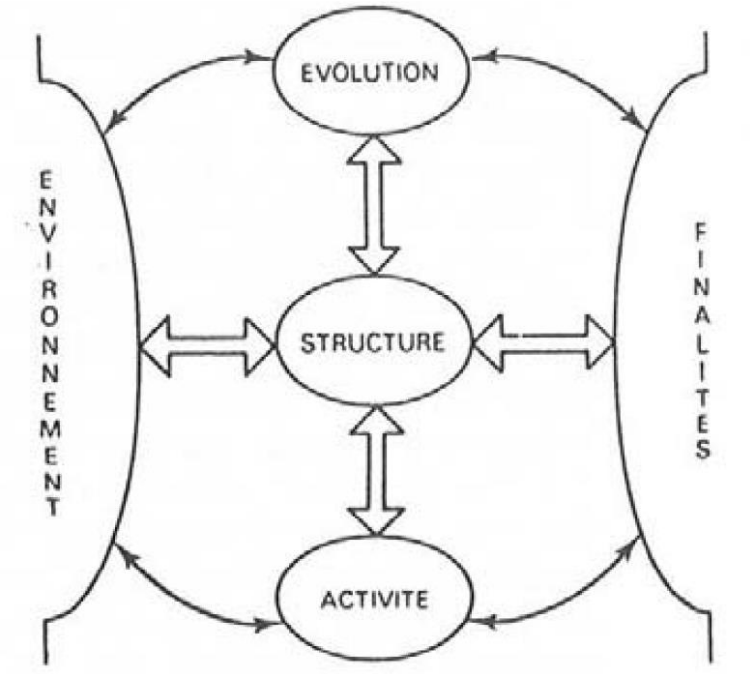


Figure 45 : le paradigme systémique (Le Moigne, 1994)

La seconde étape de la modélisation des systèmes consiste à modéliser qualitativement la structure et le fonctionnement du système dans son environnement. Cette étape se base largement sur une représentation du système sous forme de schéma dans lequel apparaissent les éléments formant le système. Au terme de cette étape, le modèle obtenu ne peut faire l'objet de simulation mais il offre une organisation ordonnée des connaissances acquises du système et les principaux processus sont identifiés. Les connaissances acquises et organisées peuvent permettre l'analyse de systèmes analogues (par exemple formalisation d'indicateurs, critères d'évaluation, grille de critères, etc.). Dans le domaine de l'ingénierie du risque, où le jugement d'expert occupe encore aujourd'hui une place importante, les méthodes de modélisation qualitative sont couramment utilisées. Nous en présentons quelques-unes dans la sous-partie suivante, au §3.1.2.

La troisième étape de la modélisation des systèmes exprime, lorsque cela est possible, sous forme mathématique (comme langage logique, formel, symbolique, déductif) les comportements du système. Il s'agit de la modélisation dynamique qui permet de rendre calculables des relations mathématiques entre les différents éléments du système et d'introduire la variable temporelle. Dans ce cas de figure, le modèle obtenu permet, à partir de données initiales, d'étudier différents scénarios à des fins de prospective. On explicite un calcul qui représente le fonctionnement du système en espérant qu'il le reflète pour le simuler.

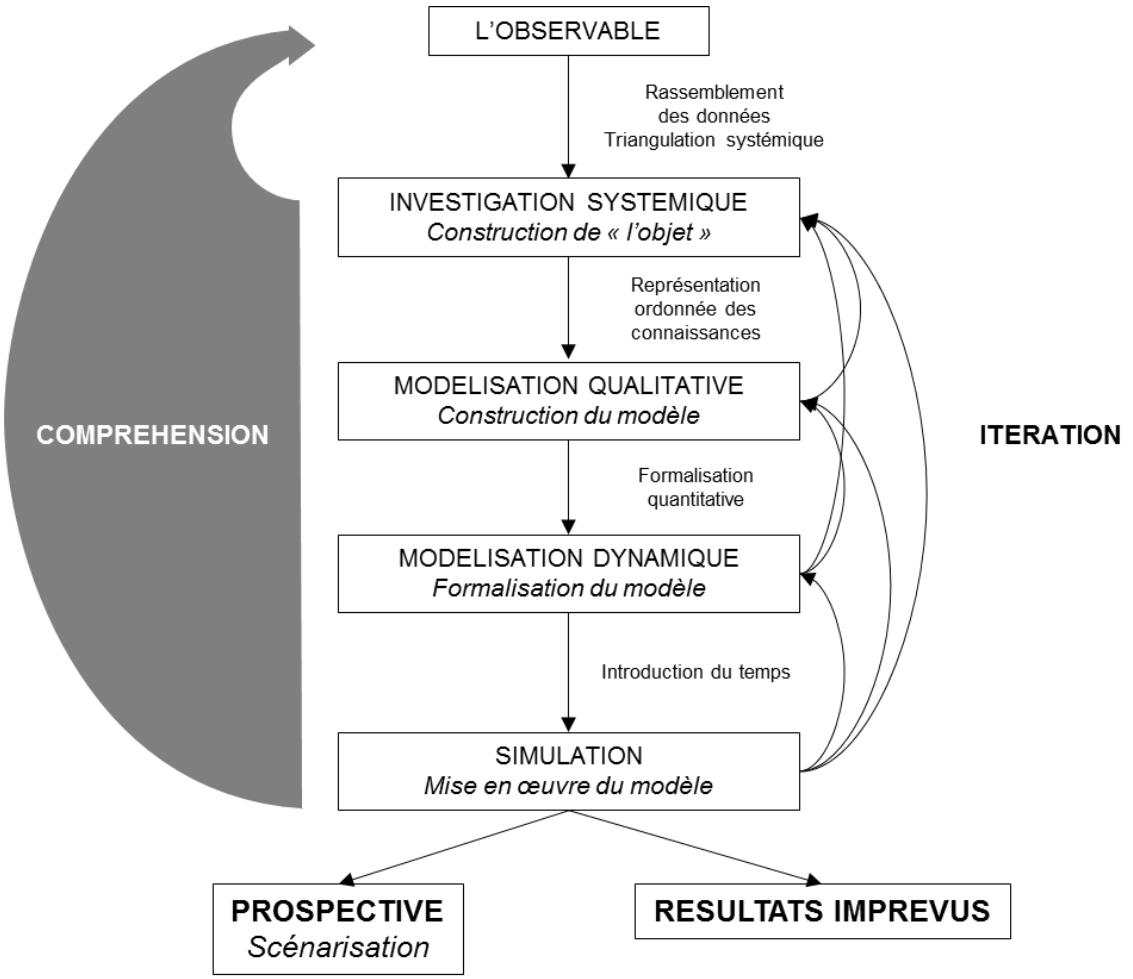


Figure 46 : Les étapes de la modélisation systémique d'après (Donnadieu & Karsky, 2002)

3.1.2. DIFFERENTES METHODES POUR ANALYSER LE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES

Les premières méthodes d'analyse fonctionnelle sont apparues à partir de la fin de la seconde guerre mondiale et se déduisent des techniques d'analyse de la valeur dédiées principalement aux produits nouveaux (Zwingelstein, 1996). Depuis, l'analyse fonctionnelle s'est étendue à d'autres domaines d'application comme celui des études de sécurité et de fiabilité, la qualité ou encore la logistique et l'informatique.

Ces méthodes d'analyse fonctionnelle consistent à définir les limites du système à modéliser, à en identifier les éléments importants ainsi que les interactions et les liaisons qui les intègrent en un tout organisé. Le recours à l'une de ces méthodes, par leur caractère systématique et exhaustif, offre une garantie formelle dans le recensement, l'ordonnancement, la caractérisation et la hiérarchisation des fonctions du système.

Cependant, si ces méthodes partagent toutes les concepts de base de l'Analyse des Systèmes, leur utilisation en tant qu'outil d'analyse systémique impose un niveau de formalisme pouvant restreindre leur champ d'application. Bien que simples, ces méthodes s'accompagnent d'une certaine lourdeur dans la réalisation car leur formalisme exige souvent un travail important et fastidieux. Une des principales difficultés réside dans le choix d'une méthode appropriée au système à modéliser et à l'utilisation souhaitée

des résultats lors des étapes ultérieures. Si en principe, les méthodes SADT et Merise peuvent s'appliquer à de nombreux systèmes, leur formalisme les a rendues bien plus attractives pour les systèmes à dominante informatique (logiciel, système d'information, etc.). Les techniques issues de l'analyse de la valeur offrent généralement une plus grande latitude. La méthode APTE est l'une des moins contraignantes et est utilisée principalement pour la décomposition en niveaux fonctionnels et matériels d'un système existant. Les méthodes Reliasep et FAST, issues elles aussi de l'analyse de la valeur, accordent en revanche une plus grande importance à la hiérarchisation en niveaux d'organisation et l'ordonnancement des fonctions d'un système. Elles sont utilisées lorsque l'on s'intéresse à la logique fonctionnelle du système. Il faudra de préférence s'appuyer sur un outil logiciel pour les mettre en œuvre.

Ce qu'il faut bien comprendre sur ces méthodes, c'est qu'elles constituent rarement une fin en soi, mais une étape dans un processus de conception, de reconception ou d'analyse d'un produit, d'un service ou d'une organisation.

Dans le domaine du génie civil et plus particulièrement de l'analyse des risques, on trouve plusieurs expérimentations de la méthode APTE dans les premières étapes des travaux suivants :

- le diagnostic et l'analyse des risques liés au vieillissement des barrages (Peyras, 2003),
- l'évaluation de la performance des digues (Serre, 2005),
- l'analyse des dysfonctionnements des ouvrages de protection contre les crues torrentielles (Ghariani, Curt, & Tacnet, 2014),
- la gestion patrimoniale des ouvrages d'infrastructures de la RATP (Hidalgo, 2015),
- l'évaluation des ouvrages de couverture d'infrastructures routières et ferroviaires (Fund, 2016),
- l'évaluation de la résilience de systèmes de transports guidés en milieu urbain (Gonzva, 2017).

Notons également que dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires, bien que l'Analyse Préliminaire des Dangers soit la méthode la plus répandue, les experts en sécurité peuvent avoir recours à la méthode APTE lorsque la conception envisagée s'éloigne des standards habituels.

Bien qu'au niveau international, les méthodes les plus reconnues soient les méthodes FAST et des variantes de Reliasep, celles-ci sont davantage utilisées pour les systèmes où la logique fonctionnelle implique d'intégrer un ordonnancement des fonctions. Or pour un système de génie civil, les critères de séquentialité d'événements chargeraient inutilement notre compréhension du système car les fonctions d'un tel système s'accomplissent majoritairement sur un mode passif et continu. Notons que la méthode APTE est particulièrement appréciée en France dans le cas des études de fiabilité et de sécurité.

C'est pourquoi nous avons retenu la méthode APTE comme démarche d'analyse fonctionnelle afin de procéder à une expression formalisée du système, en niveaux fonctionnels d'abord ; puis en niveaux matériels avec la mise en œuvre des Blocs-diagrammes fonctionnels.

3.1.2.a *La méthode APTE (Application des Techniques d'Entreprise)*

La méthode APTE consiste en un questionnement systématique permettant de rechercher :

- le besoin satisfait par le système, avec l'outil graphique « Bêtes à Cornes »,
- les éléments des milieux qui constituent l'environnement du système,
- les fonctions de base qui caractérisent les interactions entre le système et son environnement, avec l'outil graphique « Diagramme Pieuvre ».

Cette méthode s'accompagne également d'un exercice de contrôle de validité au niveau de l'expression formalisée du besoin et des fonctions. Nous présentons plus en détail les étapes de cette méthode au §3.2.1.

3.1.2.b *La méthode des Blocs-diagrammes Fonctionnels (BdF)*

La méthode des **Blocs-diagrammes Fonctionnels** (BdF) est mise en œuvre pour recenser les fonctions de conception (ce pour quoi le composant œuvre dans le système). Elle s'appuie sur des diagrammes pour modéliser les conditions de bon fonctionnement du système ou de réalisation d'une de ses fonctions. Chaque nœud représente un composant du système et chaque arc représente une dépendance de fonctionnement entre les composants. Cette méthode permet de mettre en évidence (Zwingelstein, 1996) :

- les interactions entre les composants et les milieux extérieurs,
- les interactions entre les composants eux-mêmes,
- la circulation des flux à travers ou à l'intérieur du produit, et les contacts (représentés par des droites entre les composants eux-mêmes et/ou les milieux extérieurs).

L'examen des BdF d'un système sert à repenser ses fonctions de service qui se caractérisent par des chemins reliant les composants.

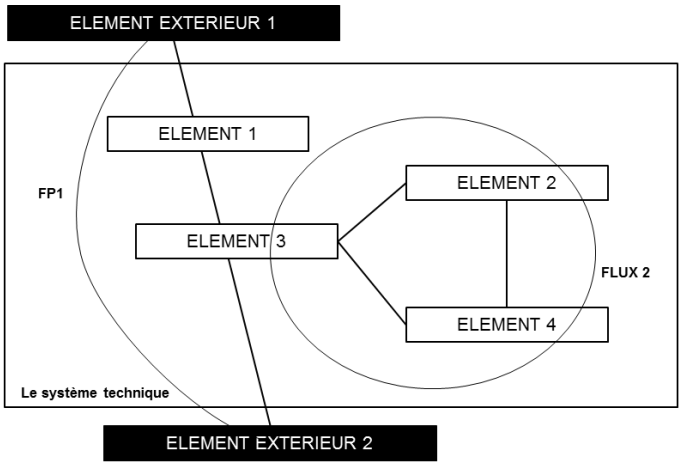


Figure 47 : Exemple de BdF appliqué à un système de quatre composants (d'après (Zwingelstein, 1996)

La construction des blocs-diagrammes fonctionnels permet de relier les fonctions externes issues de l'analyse du besoin aux choix de conception. Les flux d'origine extérieure allant vers un ou plusieurs éléments extérieurs contribuent à la réalisation des fonctions principales du système, tandis que les fonctions contraintes sont représentées par des flux reliant seulement un élément extérieur et les

composants du système. Les blocs-diagramme fonctionnels représentent aussi des flux bouclés entre les composants du système. Ces derniers, nommés chaînes fonctionnelles de conception, ne contribuent aucunement à la réalisation du besoin du système mais sont engendrés par les choix techniques liés aux impératifs de conception. Cette méthode s'applique soit pour concevoir un système qui n'existe pas encore, soit pour relire un système technique existant pour lequel il y a eu des choix de conception. Elle essaie de construire un modèle de connaissance dont l'orientation tend vers la compréhension du système.

La forme aboutie de cet outil méthodologique est celle du Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF). Il rassemble d'une part les fonctions principales du système et d'autre part les composants et leurs fonctions de conception. Il permet l'allotissement des fonctions de conception entre les différentes fonctions de service et l'identification des chaînes fonctionnelles de conception.

Tableau 19 : Exemple de Tableau d'Analyse Fonctionnelle

Composants du système	Fonctions de conception	FP1	FP2	FC1	FLUX 1	FLUX 2
ELEMENT 1	Contact : Avec élément ext 1 Avec élément 3 Flux : Transmet flux 1	 X X X				
ELEMENT 2	Contact : Avec élément 3 Avec élément 4 Flux Transmet flux 2					 X X X
ELEMENT 3	…					
ELEMENT 4	…					

3.1.3. DIFFERENTES METHODES POUR ANALYSER LES DYSFONCTIONNEMENTS DES SYSTEMES

Les méthodes pour analyser le dysfonctionnement d'un système sont nombreuses. Mais quel que soit le domaine d'application, ces méthodes ont toutes pour objectif unique d'identifier l'ensemble des chemins pouvant conduire à des situations redoutées, puis à en maîtriser les risques. On distingue deux grandes catégories de méthodes qui se différencient par les techniques de raisonnement (Zwingelstein, 1996) :

- les méthodes issues de l'analyse inductive ou descendante qui identifient les réseaux d'évènements conduisant à des situations redoutées,
- les méthodes issues de l'analyse déductive ou remontante qui, à partir d'un évènement redouté, identifient les évènements pouvant y conduire.

Le recours à l'une ou plusieurs de ces méthodes pour la maîtrise des risques varie selon le domaine d'application. Certaines d'entre elles visent à la quantification des risques et résultent d'une démarche de calcul dont le retour d'expérience nécessite d'être de qualité. D'autres en revanche résultent d'une démarche intellectuelle dont l'objectif est de formaliser une stratégie globale du risque pouvant conduire à des moyens de riposte gradués. Il s'agit alors de mettre en œuvre des actions ou des procédures au minimum requis, et lorsque cela le nécessite, de conduire des études plus détaillées par exemple de

quantification. Cette allocation des moyens et des objectifs en matière de risque est représentée sur la figure ci-dessous.

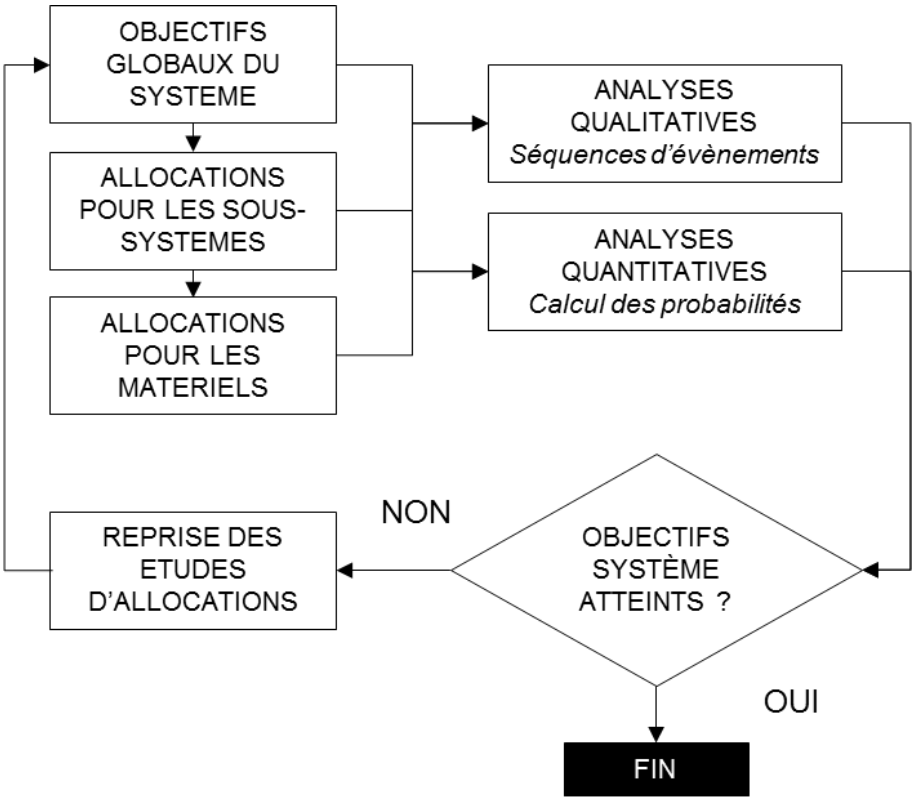


Figure 48 : Démarche d'allocation en maîtrise des risques (Zwingelstein, 1996)

Avant de se lancer dans l'analyse des risques, il faut au préalable connaître précisément le système et son environnement. Cette information est le résultat de la décomposition en niveaux fonctionnels et matériels du système et éventuellement du retour d'expérience. Selon les caractéristiques du retour d'expérience, l'analyse des risques pourra se baser sur des outils méthodologiques (APR, AMDEC, etc.), ou sur des outils issus de la théorie des graphes (Arbres des causes, Arbres d'évènements, etc.)

3.1.3.a *L'Analyse Préliminaire des Dangers*

L'analyse préliminaire des dangers est une méthode qualitative dont le raisonnement est déductif. Elle consiste à partir d'une liste d'événements redoutés prédéterminés (accidents potentiels), à identifier les situations dangereuses (dangers) raisonnablement prévisibles du système notamment par le retour d'expérience, puis à déterminer les causes possibles pouvant les transformer en accidents potentiels. Cette méthode est souvent utilisée lors de la phase d'identification des risques en matière de sécurité. On peut citer à titre d'exemple les dossiers de sécurité des systèmes de transports collectifs urbains, dont le cadre réglementaire (décret STPG) impose de constituer un dossier s'appuyant sur une analyse de ce type (cf. tableau ci-après).

Tableau 20 : Exemple de liste d'événements redoutés utilisés pour un transport collectif

Evènements redoutés	Sous-type	Catégorie de gravité	Type
Collision	Collision de deux matériels roulants par rattrapage	Catastrophique	Collectif
	Collision de deux matériels roulants par prise en écharpe		
	Collision de deux matériels roulants par sens de marche opposés		
	Collision d'un matériel roulant avec un véhicule routier (bus, véhicule particulier, camion, etc.)		
	Collision d'un matériel roulant avec un obstacle fixe		
Déraillement, renversement du matériel roulant	Déraillement par défaillance de guidage	Catastrophique	Collectif
	Déraillement par vitesse excessive		
Electrocution / Brûlure	Electrocution par le matériel roulant	Critique	Individuel
	Electrocution en station		
	Electrocution sur la ligne		
Chute	Chute de voyageurs dans une rame	Critique	Individuel
	Chute de voyageurs en station		
	Chute de voyageurs depuis une rame vers l'extérieur		
	Chute de personnes en ligne		
	Chute d'un piéton depuis un pont-route		
Heurt, coincement, écrasement	Heurts, coincement ou écrasement de voyageurs dans la rame	Critique	Individuel
	Heurts, coincement ou écrasement de voyageurs en station		
	Heurts, coincement ou écrasement d'une personne (agents, voyageurs, tiers) en emprise clôturée et non clôturée		
	Heurts, coincement ou écrasement de voyageurs en carrefour ou en emprise non clôturée		
Incendie	Incendie sur le matériel roulant	Catastrophique	Collectif
	Incendie hors matériel roulant		
Intoxication, asphyxie, suffocation, brûlure	Intoxication, asphyxie, suffocation, brûlure dans une rame	Catastrophique	Collectif
	Intoxication, asphyxie, suffocation, brûlure hors de la rame		
Explosion	Explosion dans/sur matériel roulant	Catastrophique	Collectif
	Explosion hors du matériel roulant		
Panique	Panique dans une rame en ligne ou en station	Catastrophique	Collectif
	Panique à l'extérieur de la rame (en ligne ou en station)		
Risques naturels et technologiques	Risque sismique	Catastrophique	Collectif
	Risque inondation		
	Risque de mouvement de terrain		
	Risques météorologiques		
	Risques technologiques		

3.1.3.b *L'Analyse des Modes de défaillance et de leurs Effets (AMDE)*

L'AMDE(C) est une méthode statique d'analyse des risques, s'appuyant largement sur une formalisation des connaissances sous la forme de tableaux qui sont employée à l'étude organisée des causes et des effets des défaillances (et leur criticité). Cette méthode est apparue dans les années 60 en aéronautique aux Etats-Unis puis s'est propagée à de nombreux domaines industriels. Malgré de nombreuses critiques à son encontre en particulier sa lourdeur d'application et les difficultés de formalisation mathématique, elle reste l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine de la sécurité, de la maintenance et de la fiabilité.

La mise en œuvre d'une AMDEC nécessite au préalable de connaître précisément le système et son environnement. Ces informations sont le résultat de l'analyse fonctionnelle et éventuellement du retour d'expérience (Legros, 2009) : définition des limites physiques et fonctionnelles du système, caractérisation

de l'environnement, conditions de fonctionnement et spécifications des phases du cycle de vie, identification, hiérarchisation et allocation des fonctions du système, aux sous-systèmes et composants.

La mise en œuvre d'une AMDEC consiste alors à établir les modes de défaillance des composants du système (Zwingelstein, 1996). Pour faciliter l'analyse, les experts utilisent des tableaux de modes de défaillance générique.

Tableau 21 : Exemple de liste des modes de défaillance (Zwingelstein, 1996)

Modes de défaillance génériques	
1. Défaillance structurelle	2. Blocage physique au coincement
3. Vibrations	4. Ne reste pas en position
5. Ne s'ouvre pas	6. Ne se ferme pas
7. Défaillance en position ouverte	8. Défaillance en position fermée
9. Fuite interne	10. Fuite externe
11. Dépasse la limite supérieure tolérée	12. Est en dessous de la limite inférieure tolérée
13. Fonctionnement intempestif	14. Fonctionnement intermittent
15. Fonctionnement irrégulier	16. Indication erronée
17. Ecoulement réduit	18. Mise en marche erronée
19. Ne s'arrête pas	20. Ne démarre pas
21. Ne commute pas	22. Fonctionnement prématuré
23. Fonctionnement après le délai	24. Entrée erronée (augmentation)
25. Entrée erronée (diminution)	26. Sortie erronée (augmentation)
27. Sortie erronée (diminution)	28. Perte de l'entrée
29. Perte de la sortie	30. Court-circuit (électrique)
31. Circuit ouvert (électrique)	32. Fuite (électrique)
33. Autres conditions de défaillance exceptionnelles suivants les caractéristiques du système, les conditions de fonctionnement et les contraintes opérationnelles	

La recherche des causes des modes de défaillance peut être guidée au moyen d'un diagramme de causes et effets (Diagramme d'Ishikawa), ou encore 5M. Il s'agit d'un outil mnémotechnique qui incite l'analyste à observer les causes d'un évènement de défaillance selon cinq aspects :

- **Matière :** relatif à l'état intrinsèque des matériaux ou des matières en entrée d'un processus.
- **Matériel :** relatif aux équipements, machines, matériels informatiques, logiciels, technologies, etc.
- **Méthode :** relatif aux modes opératoires, aux procédés de conception, fabrication, réalisation, maintenance, etc.
- **Main-d'œuvre :** relatif aux interventions humaines lors de la mise en œuvre, de la maintenance, de l'exploitation, etc.
- **Milieu :** relatif à l'environnement, le contexte voire le positionnement.

3.1.3.c *La Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR)*

Cette méthode est un prolongement de l'AMDE(C) qui présente l'inconvénient de ne traiter que les effets de défaillances uniques. La méthode MCPR est une démarche inductive qui va permettre d'étudier les effets de combinaisons de défaillances conduisant aux mêmes conséquences en procédant à des regroupements (Zwingelstein, 1996) :

- toutes les pannes résumées internes (PRI) désignent les modes de défaillance provenant du système étudié qui produisent les mêmes effets sur le système étudié ou les autres systèmes élémentaires,
- toutes les pannes résumées externes (PRE) désignent les modes de défaillance provenant d'autres systèmes élémentaires qui conduisent aux mêmes effets sur le système étudié,
- toutes les pannes résumées globales, qui se composent des PRI et des PRE, désignent les modes de défaillance produisant les mêmes effets sur le système étudié ou les autres systèmes élémentaires.

3.1.3.d *La Méthode des Arbres des Causes ou de Défaillance*

La méthode de l'arbre de défaillance a été conçue en 1962 au sein de la société Bell Téléphone dans le cadre d'une évaluation de la sécurité d'un système de lancement de missile intercontinental (Rausand & Høyland, 2004). Elle a fait l'objet d'améliorations peu après au sein de la société Boeing qui y a introduit des outils informatiques pour l'aide à l'analyse quantitative et qualitative des arbres de défaillance, puis s'est étendue à de nombreux domaines de l'industrie (Zwingelstein, 1996). Un arbre de défaillance est un diagramme logique qui permet de représenter schématiquement les interrelations entre un événement redouté et l'enchainement de ses causes probables. Les causes peuvent être d'origine humaine, technique, environnementale ou encore faire suite à des événements intermédiaires indésirables.

L'arbre de défaillance est une technique déductive qui commence par l'étude d'un évènement redouté pour aller jusqu'aux causes ou événements de base situés au plus bas niveau de l'arborescence. Cette méthode est très utilisée en électronique où les modes de défaillance des composants sont connus, indépendants entre eux et quantifiables en probabilité (Legros, 2009). Dans ce type d'utilisation, l'arbre des causes ou de défaillances s'apparente à un conditionnement en théorie des probabilités. Les combinaisons d'événements probables peuvent être exprimées à l'aide d'opérateurs booléens et les événements terminaux sont supposés indépendants au sens des probabilités.

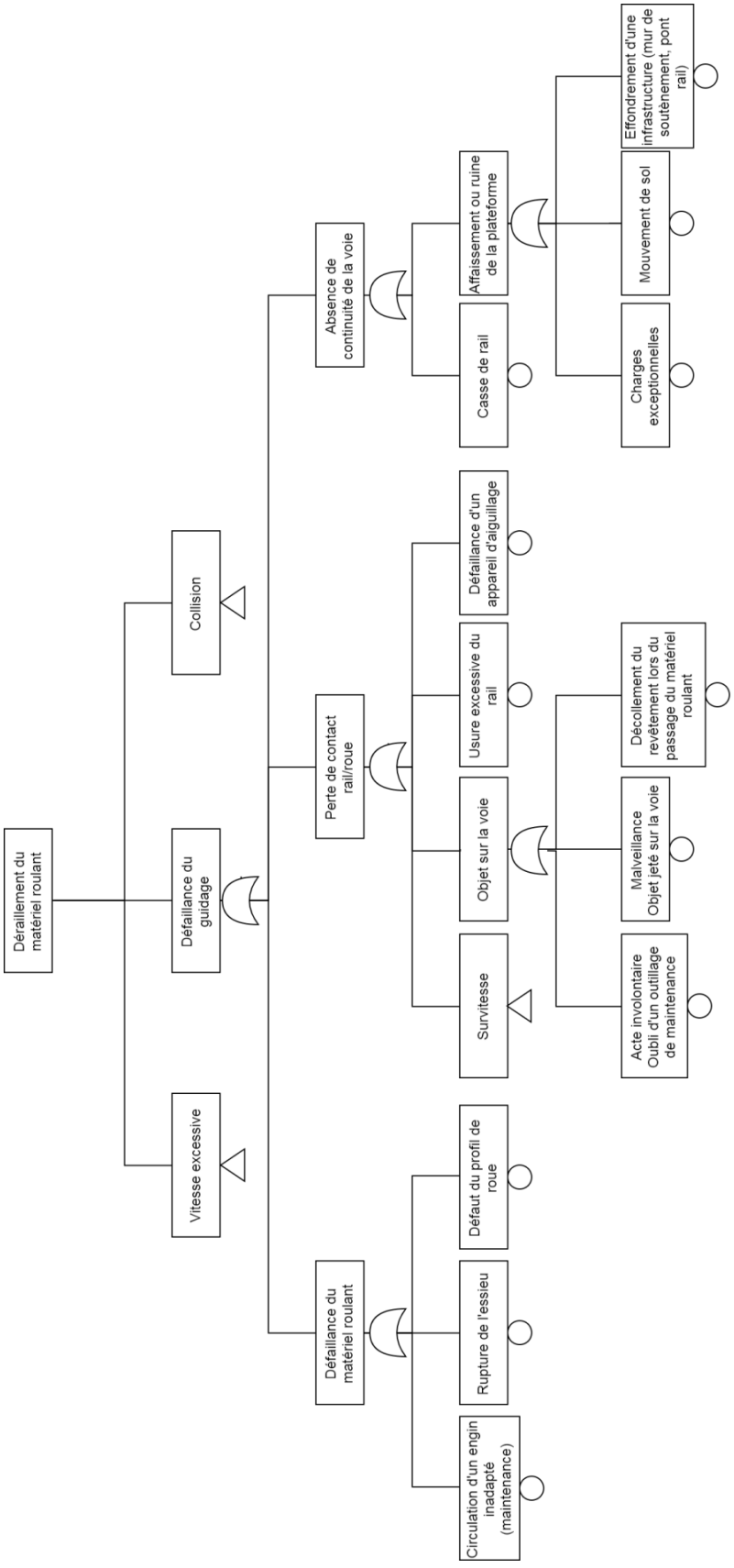


Figure 49 : Exemple d'arbre des causes possibles pouvant conduire à une situation de déraillement d'un matériel roulant (source : auteur)

3.1.3.e *La Méthode des Arbres d'Evénements (MAE)*

La méthode des Arbres d'Evènements permet à partir d'une liste d'événements et de fonctionnements attendus du système observé de construire un ensemble de situations d'arrivée ou scénarii (Legros, 2009). Il s'agit d'une approche inductive à la différence de la précédente dont le raisonnement est purement déductif. De la même manière, il est possible en pondérant chaque réponse du système (événement) par une probabilité d'estimer la probabilité d'occurrence des scénarii. On peut simplifier la liste des événements initiateurs par la méthode MCPR vue précédemment qui permettra de regrouper les événements initiateurs produisant les mêmes conséquences mais dont le mode de défaillance diffère.

3.2. ANALYSE FONCTIONNELLE DE LA VOIE FERREE

Si la voie ferrée de tramway est un système en apparence simple, un examen rapide de sa composition permet de rendre compte d'un assemblage de composants trop complexe (Chapitre 1). Il en découle de nombreux interfaçages, du plus visible (le contact rail-roue) au moins visible (les sous-couches de plates-formes), qui deviendront le berceau des premiers signes de vieillissement. Le chapitre 2 donne les premiers indices de mécanismes de dégradation régis par des processus physiques complexes, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions à l'intérieur du système et avec son environnement.

Notre objectif est de proposer une représentation ordonnée des connaissances disponibles afin d'une part de proposer une formalisation du fonctionnement du système ; d'autre part d'engager une étude de son dysfonctionnement (§3.3).

Notre ancrage théorique se situe sur une branche des méthodes de sûreté de fonctionnement : les méthodes qualitatives. Ces méthodes ont récemment fait l'objet d'adaptation dans le domaine du génie civil. Les exemples développés montrent des applications expérimentales de l'analyse fonctionnelle aux domaines des digues (Serre, 2005), des ouvrages de protection contre les crues torrentielles (Ghariani et al., 2014), des tunnels de métro (Hidalgo, 2015) ou encore des couvertures urbaines (Fund, 2016). Les méthodes qualitatives sont les prémisses de la modélisation quantitative, dont l'introduction de la variable temporelle constitue bien souvent le graal de la simulation. La modélisation qualitative n'en demeure pas moins un outil de réflexion particulièrement pédagogique et utile dans une démarche exploratoire telle que la nôtre.

3.2.1. ANALYSE FONCTIONNELLE EXTERNE

L'analyse fonctionnelle externe permet de découvrir ou redécouvrir pourquoi un système existe. Il faut partir du besoin fondamental pour lequel le système a été conçu. L'analyse fonctionnelle externe est une technique s'appuyant sur le principe de la « boîte noire ». Il s'agit de s'intéresser aux relations entre le système et son environnement.

3.2.1.a *Définition du système : les limites du système et la position du cycle de vie*

Nous avons présenté au chapitre 1 les différents composants d'infrastructure de la voie ferrée. Nous précisons les limites physiques de notre système qui vont nous conduire à considérer les milieux extérieurs en interaction.

Les limites physiques de notre système concernent la plateforme de voie ferrée au Gabarit Limite d'Obstacle (GLO). Le GLO est la ligne géométrique théorique enveloppe à l'intérieur de laquelle le matériel roulant reste dans des conditions de marche normales ou dégradées. La règlementation impose une bonne visibilité du GLO qui est généralement matérialisé au sol par un traitement des bordures de revêtement. Cette ligne sert souvent de délimitation domaniale entre les gestionnaires de voirie et le gestionnaire de l'infrastructure, ce qui convient bien à la définition de limite physique de notre système.

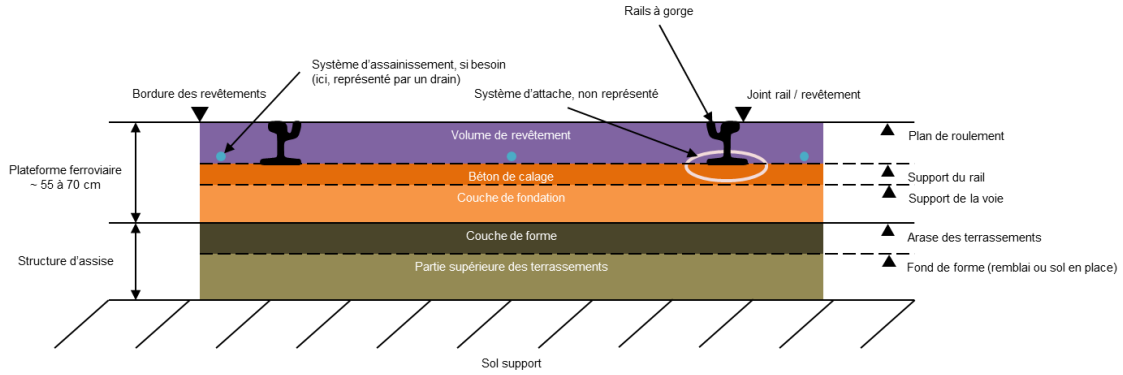


Figure 50 : Schématisation d'une plateforme de voie ferrée (vue en coupe)

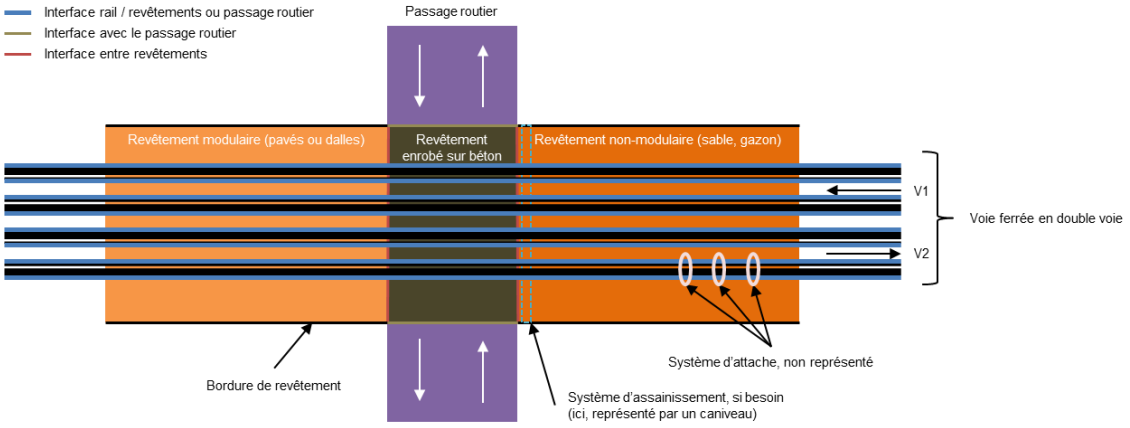


Figure 51 : Schématisation d'une plateforme de voie ferrée (vue plate)

On aurait pu diviser en 2 systèmes distincts le linéaire de voie et la traversée routière dont la fonction principale est plus proche des véhicules routiers. Nous avons fait le choix d'englober à la fois les véhicules ferroviaires et routiers, ce qui englobe tous les cas de figures pour la formalisation des fonctions de conception.

La position du cycle de vie prise en compte dans notre analyse est celle d'une voie ferrée en exploitation. Les phases de conception et de réalisation sont indirectement présentes dans l'étude des dysfonctionnements dont elles peuvent être à l'origine ou des facteurs aggravants (défauts de conception ou de réalisation engendrant des dégradations).

3.2.1.b *L'expression du besoin*

A partir de notre système, dont nous avons précisé les limites, l'analyse fonctionnelle consiste à s'interroger sur le besoin satisfait par le système. Le besoin peut être formalisé par trois questions (Zwingelstein, 1996) :

- A qui le système rend-t-il service ?
  - Aux usagers et à la collectivité.
- Sur quels éléments extérieurs agit le système ?
  - Sur le sol support et les véhicules (ferroviaires et routiers – englobant les routiers et les piétons).
- Pourquoi cette action ? (dans quel but le système existe-t-il ?)
  - Pour assurer la répartition de la charge des véhicules vers le sol support.

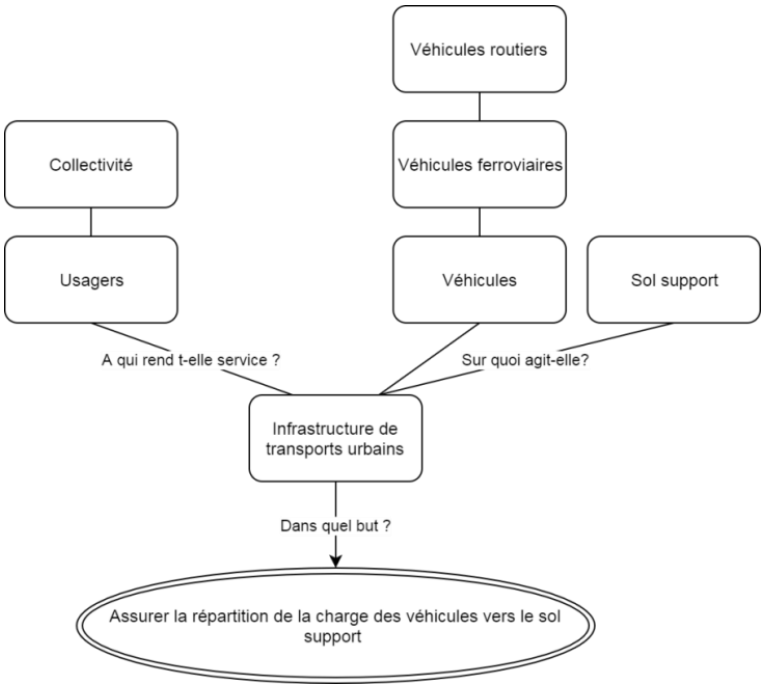


Figure 52 : Matérialisation du besoin fondamental d'une infrastructure de transports urbains

On effectue ensuite le contrôle de validité du besoin en répondant aux questions suivantes :

- Pourquoi le système existe-t-il ? (la réponse sera la cause, l'origine du besoin)
  - Pour répartir la charge : parce que les véhicules peuvent s'enliser et le sol support peut être instable.
- Pourquoi (ou pour qui) ce besoin existe-t-il ? (la réponse donnera le but, la finalité du besoin)
  - Pour garantir la sécurité des circulations et le confort de roulement.
- Qu'est qui pourrait faire évoluer ou disparaitre ce besoin ?
  - Le développement d'un nouveau système de transport de masse nécessitant peu ou pas d'infrastructure,
  - l'évolution des besoins en termes d'offre de transport.

3.2.1.c *Inventaire des éléments du milieu extérieur*

Le sous-système voie ferrée rend service aux usagers en contribuant au fonctionnement du système de transport. Ce besoin sous-tend la présence d'interactions fortes entre la voie ferrée et les éléments du milieu environnant (EME) dont une partie est constituée d'autres sous-systèmes techniques nécessaires au fonctionnement du tramway (véhicules ferroviaires, SSR, équipements électriques, masses métalliques, …).

Tableau 22 : Inventaire des éléments du milieu extérieur

N°	Milieux extérieurs	Remarques
M01	Véhicules ferroviaires	
M02	Sol support	
M03	SSR	Sous-station de redressement
M04	Eaux superficielles et d'infiltration	
M05	Environnement visuel, sonore et vibratoire	
M06	Circulation générale	La circulation générale (véhicules routiers et piétons) agit dès lors qu'il y a une traversée routière possible de la plateforme.
M07	Equipements électriques CFO/CFA	Les équipements CFO (Courants forts) et CFA (Courants faibles) sont alimentés par les sous-stations de redressement.
M08	Masses métalliques accessibles	
M09	Masses métalliques souterraines	
M10	Pollution ponctuelle	
M11	Assainissement urbain	
M12	Température	

Les milieux extérieurs sont constitués d'éléments matériels ou naturels qui agissent sur l'ouvrage lors de sa phase d'utilisation. En examinant l'environnement extérieur de la voie ferrée, nous recensons les éléments du milieu environnant en contact direct avec la voie ferrée, ou agissant sur celle-ci de manière tangible.

3.2.1.d *Recherche des fonctions de service et validation*

Avant d'entamer une exploration des fonctions de services, il faut découvrir ou redécouvrir la fonction de base. La recherche du besoin fondamental permet d'identifier la fonction de base du système : « Assurer la répartition de la charge des véhicules ». Or cette définition pourrait convenir tout aussi bien à un autre système de transport que le tramway. Il convient alors de préciser les fonctions de principe pouvant s'y raccorder, chaque fonction de principe engendrera une ou des fonctions élémentaires.

Notre système étant existant, nous focaliserons notre analyse sur un guidage matériel de type roulement fer/fer.

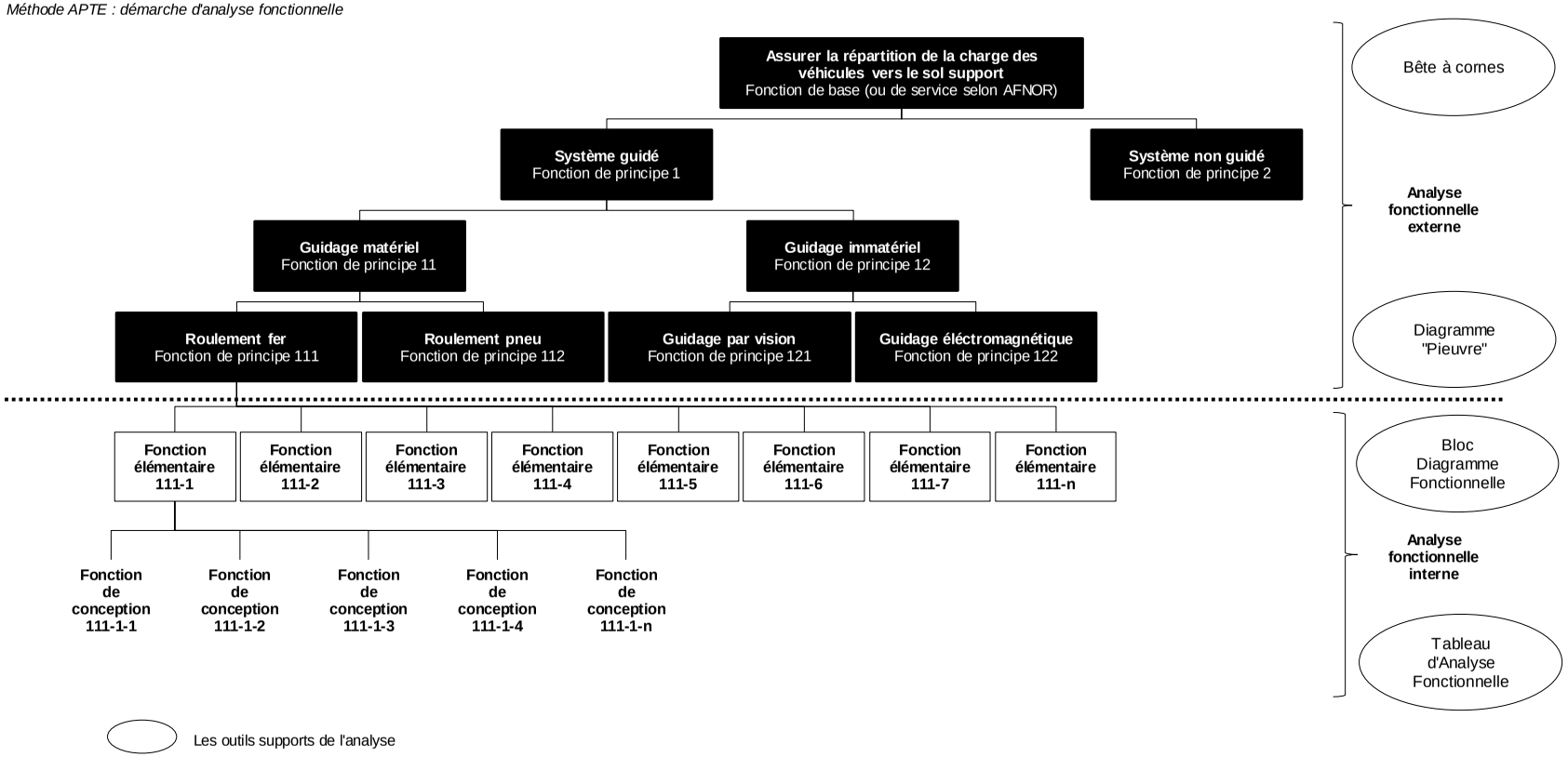


Figure 53 : Démarche d'analyse fonctionnelle

Une fois que les éléments du milieu extérieur et la ou les fonction(s) de principe sont identifis, l'analyse fonctionnelle externe doit procéder à l'identification des fonctions élémentaires. Selon le cadre méthodologique[20] dans lequel nous nous plaçons, les termes utilisés peuvent varier. Nous parlerons ici de fonction de service, en distinguant :

- Les fonctions de service **principales** qui représentent le but de l'action du système. Elles traduisent l'expression du besoin. On les identifie lorsqu'elles mettent en relation au moins deux éléments du milieu extérieur.
- Les fonctions de service **contraintes** qui représentent les actions et/ou les réactions du système à son environnement extérieur. Celles-ci sont imposées. On les identifie dès lors qu'il n'y a qu'un seul élément concerné.

[20] Analyse de la valeur au sens de la norme AFNOR, Méthode APTE, Ingénierie système, etc.

Diagramme "Pieuvre"
Analyse fonctionnelle externe d'une voie ferrée de tramway en exploitation (en section courante et en traversées routières et piétonnes)
Recherche des fonctions élémentaires de la fonction de principe 111 "guidage matériel - roulement fer"

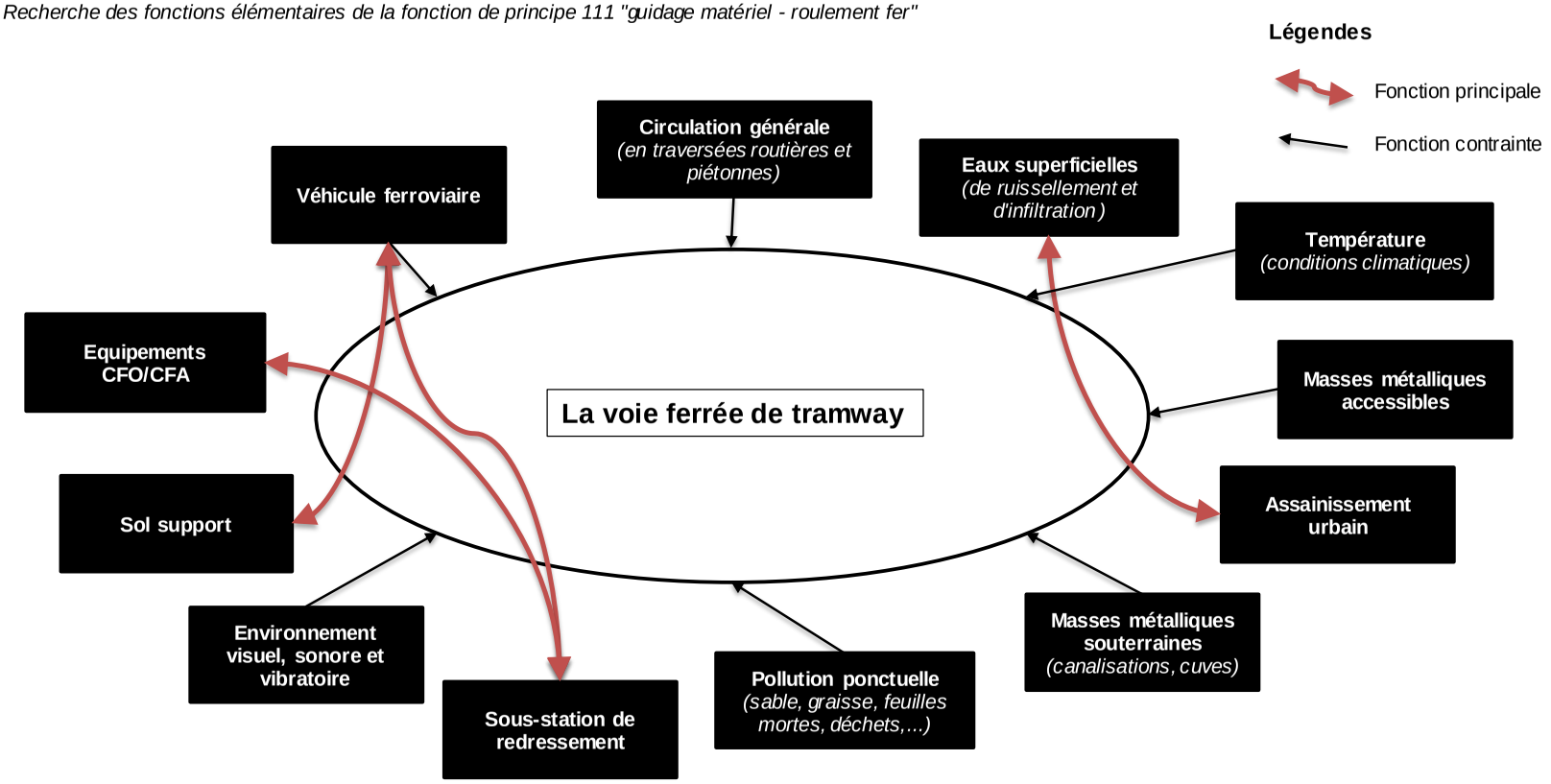


Figure 54 : Diagramme « Pieuvre » de la voie ferrée de tramway

La recherche des fonctions de service à l'aide d'un diagramme « pieuvre » est une solution pratique pour bien distinguer les fonctions principales et de contraintes en plus du tableau d'analyse fonctionnelle.

Tableau 23 : Inventaire des fonctions de service

N°	EME 1	EME 2	Type	Libellé de la fonction de service
FP1	Véhicules ferroviaires	Sol support	Principale	Assurer la répartition de la charge des véhicules vers le sol support
FP2	Véhicules ferroviaires	SSR	Principale	Assurer la continuité du retour de courant de traction
FP3	Eaux superficielles et d'infiltration	Assainissement urbain	Principale	Drainer les eaux superficielles et d'infiltration vers l'assainissement urbain
FP4	Equipements CFO/CFA	SSR	Principale	Assurer la continuité des circuits positifs et négatifs des équipements courants forts et courants faibles
FC5	Véhicules ferroviaires		Contrainte	Guider les roues des véhicules ferroviaires
FC6	Environnement extérieur		Contrainte	Limiter les bruits et vibrations
FC7	Circulation générale		Contrainte	Permettre le franchissement par la circulation générale en traversée routière ou piétonne
FC8	Masses métalliques accessibles		Contrainte	Assurer l'équipotentialité des masses métalliques accessibles
FC9	Masses métalliques souterraines		Contrainte	Contrôler les courants vagabonds
FC10	Température		Contrainte	Résister aux effets de la température extérieure

Pour assurer une parfaite cohérence entre les fonctions de service, on peut effectuer un contrôle de validité en répondant aux questions suivantes, exemple pour la fonction FP3 :

- Pourquoi la fonction existe-t-elle ?
    - Limiter les eaux d'infiltration : parce qu'il faut éviter l'infiltration des eaux superficielles dans le corps de fondation.
    - Collecter les eaux de ruissellement : parce que les surfaces de revêtement engendrent des eaux de ruissellement.
    - Evacuer les eaux d'infiltration : parce que les capacités de stockage sur l'emprise sont limitées.
- Dans quel but ?
    - Pour préserver la pérennité de l'infrastructure.
    - Pour que la pollution par lessivage des surfaces polluées puisse être collectée.
- Quelles sont les causes d'évolution ou de disparition de cette fonction ?
    - Le développement de nouveaux matériaux drainant ou résiliant à l'eau.

3.2.1.e *L'arbre fonctionnel*

La représentation des fonctions de service sous la forme d'un arbre fonctionnel est très employée dans le secteur industriel, en analyse de la valeur. L'arbre fonctionnel consiste à obtenir une représentation hiérarchique des fonctions de service qui permet d'avoir une vision claire et structurée des fonctions. Les feuilles de cet arbre sont des fonctions de service, les autres nœuds intermédiaires sont de nouvelles fonctions de service plus générales. En fait, construire cet arbre est relativement simple, il suffit de se servir du champ *Dans quel but ?* des fonctions. Ce champ contient, s'il a été renseigné consciencieusement,

l'intitulé de la fonction mère, exprimé ci-dessous en termes d'enjeu. A l'inverse, une fonction fille représente un moyen pour réaliser cette fonction mère.

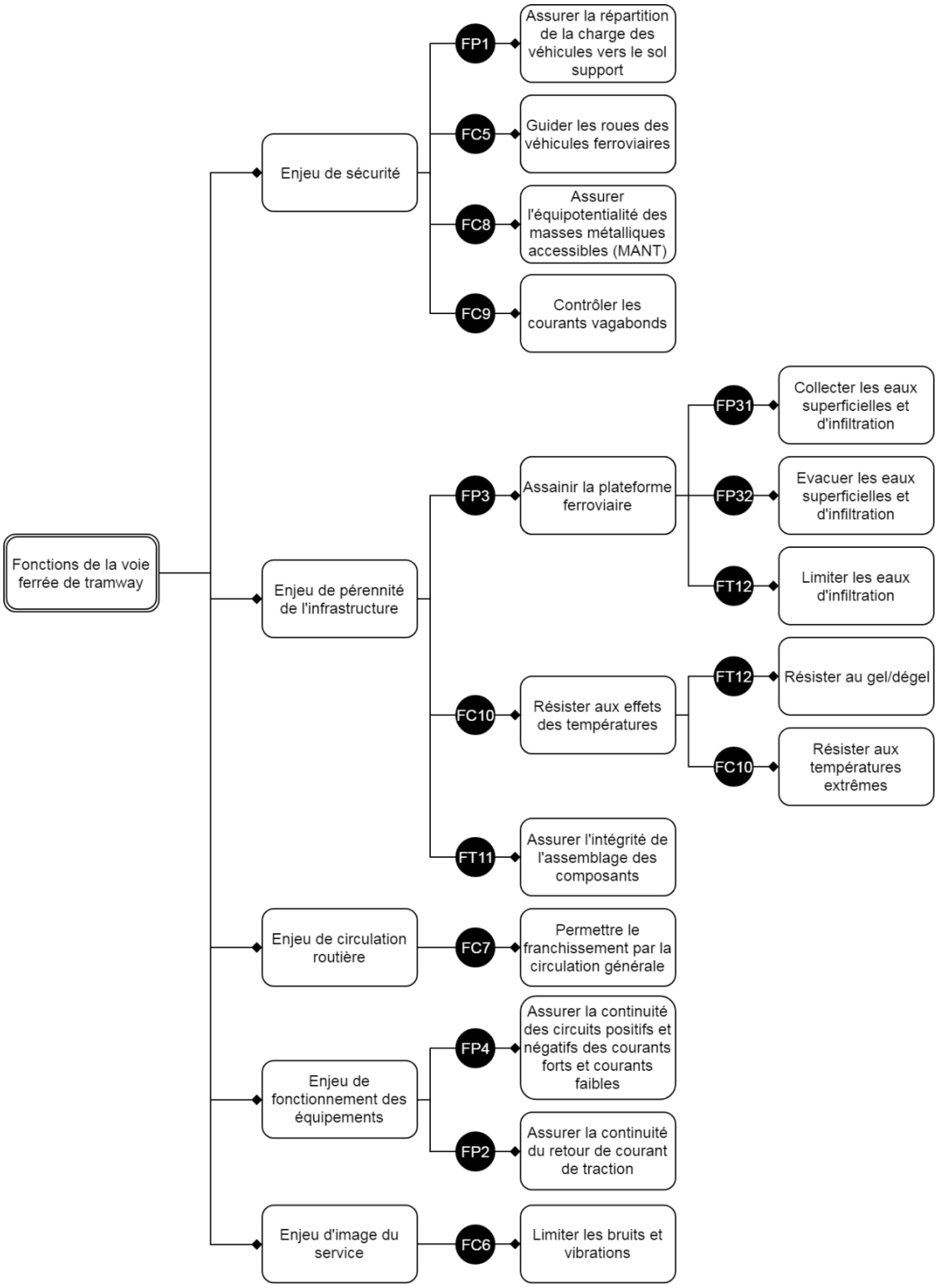


Figure 55 : Hiérarchisation par enjeu des fonctions de service

3.2.2. ANALYSE FONCTIONNELLE INTERNE

L'analyse fonctionnelle interne se focalise sur les interactions entre les composants du système. Ces interactions sont le résultat des **choix de conception**, ce sont les fonctions de conception.

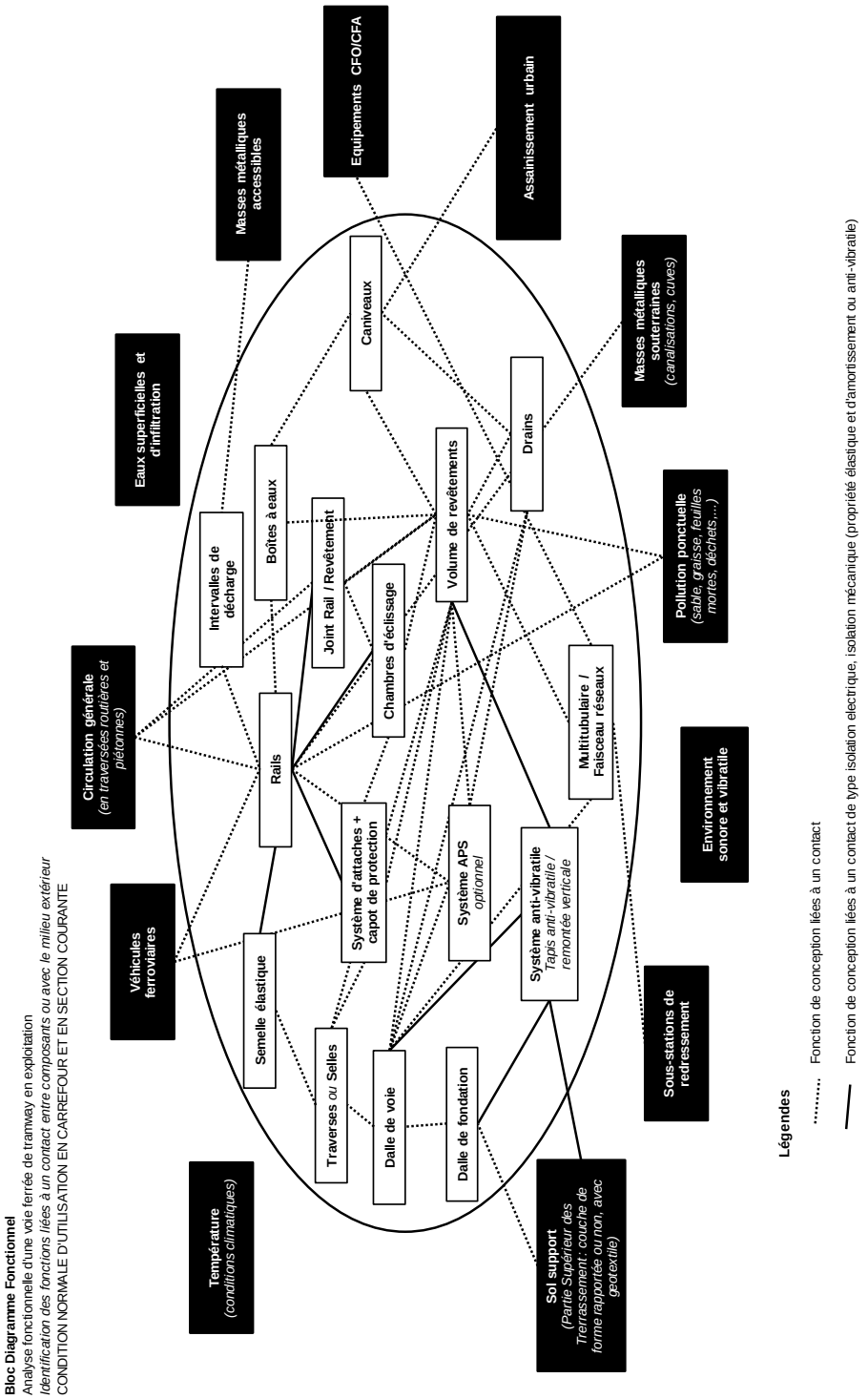


Figure 56 : Bloc-diagramme Fonctionnel des fonctions de conception liées à un contact

3.2.2.a *Analyse structurelle*

L'analyse structurelle du système correspond à l'examen des composants constitutifs du système, selon les limites physiques préalablement fixées. Dans notre cas, cette limite est celle du Gabarit Limite d'Obstacle (GLO). Cet examen doit permettre un découpage en sous-systèmes et composants. Ce découpage doit être effectué au niveau de granularité adoptée pour l'étude.

La granularité correspond à l'échelle spatiale de description d'un système (Peyras, 2003), selon que l'on souhaite examiner le système dans sa globalité, au niveau de ses composants ou au niveau de ses sous-composants, par exemple : les matériaux. Dans notre cas, les actions sur le patrimoine sont généralement réalisées à l'échelle des composants, voire du système global ; ce qui nous pousse à adopter une granularité au niveau des composants.

Tableau 24 : Inventaire des composants – granularité intermédiaire

N°	Composants
C01	Rails
C02	Semelle élastique
C03	Système d'attaches
C04	Traverses
C05	Selles
C06	Système APS
C07	Dalle de voie
C08	Dalle de fondation
C09	Système anti-vibratile
C10	Volume de revêtement
C11	Joint de rail
C12	Chambre d'éclissage
C13	Intervalles de décharge
C14	Boîte à eaux
C15	Drains
C16	Caniveaux
C17	Multitubulaire / Faisceaux réseaux

3.2.2.b *Recherche des fonctions de conception*

Les fonctions de conception expriment un **choix de conception**. Elles résultent des interactions entre les différents composants à l'intérieur du système et avec les **éléments du milieu extérieur.** Les fonctions de conception sont déduites d'un examen systématique des interactions de contact et de flux.

L'examen des interactions a pris la forme de 4 blocs-diagramme fonctionnels (**disponibles en annexe**) représentant :

- les fonctions de contact (action de préparation d'assise ou de support et d'assemblage),
- les fonctions de flux de transfert de charge d'origine mécanique ou thermique,
- les fonctions de flux de transfert de courant (courant de traction, de retour négatif, courants-vagabonds, courants d'alimentation et de shuntage),

- les fonctions de flux de transfert hydraulique (drainage).

Notre application à la plateforme de voie ferrée de tramway permet de traduire ces interactions en une expression formalisée de 134 fonctions de conception (expression fonctionnelle du besoin). Nous donnons dans le **Tableau 24**, un extrait concernant le tableau d'identification des fonctions de conception. Pour chaque composant du système et élément du milieu extérieur en interaction avec le composant examiné, nous identifions systématiquement la nature de l'interaction (contact ou flux) et faisons apparaitre la fonction de conception correspondante.

Tableau 25 : Tableau d'identification des fonctions de conception.

Composant examiné		Composant ou milieu extérieur en interaction		Analyse fonctionnelle		
ID#1	**C1**	**ID#2**	**C2**	**Type d'interactio**	**N°**	**Fonction de conception**
C01	Rails	C06	Système APS	CONTACT	002	- assurer le raccordement électrique (RAIL/APS) de mise au neutre traction des segments APS non alimentés (câbles 0vr raccordés aux rails)
C01	Rails	C13	Intervalles de décharge	CONTACT	003	- assurer le raccordement électrique (RAIL/ID) de mise au neutre traction en cas de mise en potentiel des masses métalliques accessibles
C01	Rails	C14	Boîte à eaux	CONTACT	004	- assurer le raccordement hydraulique des gorges des rails aux boîtes à eaux
C01	Rails	C14	Boîte à eaux	FLUX	005	- évacuer les eaux superficielles vers les boîtes à eaux
C01	Rails	M01	Véhicules	CONTACT	006	- assurer le contact rail-roue
C01	Rails	M01	Véhicules	CONTACT	007	- assurer le contact électrique rail-roue de retour de courant de traction

Parmi les fonctions de conception des composants, certaines constituent un ensemble fonctionnel cohérent du point de vue du type de flux ou de contact qu'elles permettent d'exprimer : **les blocs fonctionnels**. Ces blocs fonctionnels permettent de réorganiser les 135 fonctions de conception en 4 grandes familles :

- Le bloc **« Drainage »** : correspondant aux fonctions contribuant essentiellement au bon drainage hydraulique de la plateforme. Il représente 22,6% des fonctions de conception identifiées.
- Le bloc **« Structure »** : correspondant aux fonctions contribuant essentiellement à la répartition des efforts physiques. Il représente 27% des fonctions de conception identifiées.
- Le bloc **« Energie »** : correspondant aux fonctions liées aux courants forts et courants faibles. Il représente 13,9% des fonctions de conception identifiées.
- Le bloc **« Interface »** : correspondant aux fonctions liées aux interfaces, garantissant l'intégrité physique de la plateforme (l'assemblage), dont nous avons distingué 4 sous-ensembles pour mettre en évidence les fonctions d'isolation mécanique, vibratoire, électrique et l'étanchéité. Les fonctions liées à des interfaces représentent 36,5% des fonctions de conception identifiées.

Ces regroupements permettent de retracer plus facilement les liens existants entre d'une part les fonctions de conception (fonctions internes) résultant d'un choix technique, et d'autre part, les fonctions de service (fonctions externes) du système avec son environnement.

Finalement, notre méthodologie aboutit à la construction d'un tableau d'analyse fonctionnelle qui permet d'organiser l'information obtenue. Un exemple est donné au **Tableau 9**. Le tableau d'analyse fonctionnelle servira de base à l'application de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets.

Tableau 26 : Extrait du Tableau d'Analyse Fonctionnelle concernant le composant rail

		Fonctions de conception	
Composant	**Bloc fonctionnel**	**N°**	**Descriptif**
Rail	Structure	006	- assurer le contact rail-roue
		008	- résister aux efforts verticaux, transversaux et longitudinaux transmis par le passage des véhicules ferroviaires
		014	- préparer la surface de contact (servir d'appui) à la circulation générale
		015	- résister aux efforts verticaux et transversaux transmis par le passage des véhicules routiers (moment de rotation des rails)
	Drainage	013	- les rails collectent les eaux superficielles (eaux pluviales, d'arrosage, de lavage)
		005	- évacuer les eaux superficielles vers les boîtes à eaux
		004	- assurer le raccordement hydraulique des gorges des rails aux boîtes à eaux
	Energie	002	- assurer le raccordement électrique (RAIL/APS) de mise au neutre traction des segments APS non alimentés (câbles 0vr raccordés aux rails)
		003	- assurer le raccordement électrique (RAIL/ID) de mise au neutre traction en cas de mise en potentiel des masses métalliques accessibles
		012	- transmettre le courant de court-circuit (shunt) en cas de detection de potentiel des intervalles de decharge
		016	- assurer le raccordement électrique de drainage des courants vagabonds en cas de masses métalliques souterraines dangereuses à protéger (canalisations de gaz, cuve à fuel, etc)
		010	- assurer le raccordement électrique des rails aux sous-stations de redressement
		007	- assurer le contact électrique rail-roue de retour de courant de traction
		009	- transmettre le retour de courant de traction vers les SSR
		011	- drainer les courants vagabonds vers les SSR

3.3. ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE ET DE LEURS EFFETS (AMDE)

Nous avons appliqué l'Analyse Fonctionnelle à la voie ferrée de tramway. Le résultat de cette analyse permet de comprendre et d'exprimer formellement les fonctions du système et de ses composants. Notre proposition méthodologique s'appuie sur ce résultat pour y joindre une analyse dysfonctionnelle (§3.1.3) fondée sur la méthode d'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).

Cette méthode présente l'avantage indéniable de structurer notre démarche d'analyse des dégradations du patrimoine à la globalité des composants. Elle permet de rechercher les causes et les effets des modes de défaillance pour chaque fonction, de chaque composant du système. Ce traitement systématique doit permettre a priori l'exhaustivité de l'analyse, dans les limites du système défini lors de l'analyse fonctionnelle. Mais cette recherche peut donner des causes et des effets très nombreux, divers, et redondants. S'agissant d'un système existant, le retour d'expérience peut aider au tri et à la sélection des modes de défaillance les plus courants mais au prix d'une exhaustivité se limitant à ce qui s'est déjà produit par le passé.

Les prochains paragraphes décrivent étape par étape la méthodologie d'analyse que nous avons suivie.

3.3.1. STRUCTURATION DES INFORMATIONS ISSUES DE L'ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE ET DE LEURS EFFETS (AMDE)

S'agissant d'une AMDE produit[21], notre analyse vise à étudier les effets et les causes des modes de défaillance de la voie ferrée de tramway pouvant se produire lors de phases de vie en œuvre.

L'étude des effets des modes de défaillance sur les fonctions du système, et sur chacun des composants, suppose un seul mode de défaillance. La démarche considère que tous les autres composants du système sont en état de fonctionner correctement. Avec cette méthode, les effets de combinaison de plusieurs modes de défaillance ne sont pas étudiés de façon explicite mais elle permet d'identifier des défaillances secondaires (une défaillance pouvant en produire une autre). Cette dernière caractéristique est particulièrement adaptée à un système d'infrastructure dont les spécificités d'assemblage entre les composants engendrent naturellement des chaînes de défaillances (propagation des dégradations) plutôt que l'apparition simultanée et indépendante de plusieurs défaillances.

Dans notre grille d'analyse présentée ci-dessous, nous proposons de structurer les causes à l'origine du mode de défaillance à partir de la méthode des 5M (voir §3.1.3.b). Cela nous permet de tenir compte des variations des paramètres importants à l'origine du mode de défaillance en distinguant ceux qui concernent le composant lui-même, ceux qui concernent son environnement ou encore ceux qui sont liés aux processus de conception, de réalisation et de maintenance.

		Fonctions de conception			Cause possible de défaillance					
Composant	**Bloc fonctionnel**	**N°**	**Descriptif**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Main d'œuvre**	**Effet de la défaillance**
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)

Figure 57 : Grille d'analyse AMDE

- La première colonne identifie les composants issus du découpage défini lors de l'Analyse Structurelle du système (§3.2.2.a)

[21] Il existe deux types d'AMDE : l'AMDE produit et l'AMDE processus. L'AMDE produit vise à déterminer les défaillances se produisant en phase d'exploitation alors que l'AMDE processus s'intéresse uniquement à la phase de conception-réalisation.

- La deuxième colonne regroupe les fonctions dont les défaillances produisent les mêmes effets au niveau du système : une dégradation ou des défaillances au niveau du drainage, des interfaces, de l'énergie ou de la structure.
- Les troisième et quatrième colonnes correspondent respectivement au numéro de la fonction et à son intitulé obtenu lors de l'Analyse Fonctionnelle interne (§3.2.2.b). Il s'agit des fonctions de conception.
- La cinquième colonne liste le ou les modes de défaillance(s) particuliers de la fonction de conception. Elle donne une première indication sur l'effet par lequel la fonction de conception n'est plus assurée.
- De la sixième à la dixième colonne, nous listons les causes possibles de la défaillance. Nous obtenons les causes de défaillance d'un composant à partir de l'examen des Blocs diagrammes fonctionnels. Elles peuvent avoir pour origine :
    - les contacts avec le milieu environnant ou les composants en interface,
    - les différents flux de transfert (de charge, de courant ou hydraulique) sollicitant le composant,
    - l'état intrinsèque du composant (dégradation du composant à la granularité intermédiaire ou à l'échelle du matériau),
    - les processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance désignant des malfaçons ou des opérations mal maîtrisées,
    - la panne ou l'absence d'un dispositif matériel (extérieur au système étudié).

  Nous complétons ces informations avec le recueil de l'expertise issue des différents réseaux de tramway rencontrés et de la littérature technique (Urban track, CEREMA, etc.)
- La onzième colonne identifie, de la même manière que pour les causes, les effets de l'occurrence de la défaillance analysée.

3.3.2. LA RECHERCHE DES MODES DE DEFAILLANCE

Cette phase consiste à rechercher les modes de défaillance possibles de l'ouvrage. Un mode de défaillance traduit l'effet par lequel une défaillance est observée (Zwingelstein, 1996). A ce stade, la connaissance ou l'information sur le mode de défaillance n'est pas totalement caractérisée ou disponible.

Le travail consiste maintenant, pour chaque fonction de conception, à déterminer le ou les modes de défaillance possibles. Dans notre méthodologie, nous identifions le mode de défaillance comme une fonction de conception qui n'est plus assurée. Les modes de défaillance sont alors déduits de l'examen des Blocs-diagrammes fonctionnels. Le tableau ci-dessous énumère les principaux modes de défaillance possibles de la voie ferrée de tramway.

Le tableau ci-après s'arrête au niveau des composants mais il existe des sous-types au niveau des matériaux.

Tableau 27 : Les principaux modes de défaillance de la voie ferrée de tramway

Bloc fonctionnel	Modes de défaillance	Fonctions concernées
Structure	1. Défaillance structurelle	37
Drainage	2. Point bas (hydraulique)	11
	3. Ecoulement réduit	8
	4. Défaut de raccordement (hydraulique)	9
	5. Fuite (hydraulique)	3
Energie	6. Circuit ouvert (électrique)	12
	7. Faux contact (électrique)	2
	8. Ne commute pas	1
	9. Fuite (électrique)	4
Interface	10. Défaut d'interface	26
- Isolation électrique	11. Défaut d'isolement (électrique)	5
- Isolation mécanique	12. N'absorbe pas les mouvements différentiels	6
- Isolation vibratoire	13. Défaut d'isolement (vibratoire)	2
	14. Pont vibratoire	7
- Etanchéité	15. Infiltration (hydraulique)	5

3.3.3. L'ANALYSE DES CAUSES ET DES EFFETS DES MODES DE DEFAILLANCE

La plupart de ces modes de défaillance sont déduits de l'examen des Blocs-diagramme fonctionnels complété par le recueil d'expertises : soit en sollicitant des experts, soit en comparant certaines pathologies rencontrées sur des composants d'ouvrage *globalement au moins équivalents* ou encore en étudiant la littérature technique accessible sur ce sujet :

- le projet européen URBAN TRACK (2006 – 2010),
- les ouvrages du CEREMA sur les pathologies des revêtements de plates-formes de tramway,
- différents rapports d'audits de voie ferrée réalisés en France.

Le tableau ci-après fait la synthèse de notre approche de formalisation des retours d'expériences appliquée au composant rail. L'intérêt de ce formalisme illustré sur le cas du rail consiste en une identification exhaustive des effets possibles de défaillance, c'est-à-dire en un inventaire des symptômes observables (effet local) et des enjeux associés pour le système (effet global). Nous utilisons cette décomposition au chapitre 5 pour construire un outil d'inspection systématisée de la voie ferrée.

Tableau 28 : L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (extrait du composant « rail »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance				Effets possibles de la défaillance	
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Rail	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Usure abrasive - Usure ondulatoire - Fatigue du contact roulant	**Défaut de fabrication :** - Défaut du rail (entailles, rayures, fissures internes) **Défaut de mise en œuvre :** - Libération des rails en LRS, mauvaise réalisation des soudures **Défaut de maintenance :** - Intervention de meulage trop fréquente ou mal maîtrisée	**Dispositif matériel :** - Dispositif de lubrification en voie ou sur bogie	**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire (charge, vitesse, trafic, géométrie) - Profil de roue	- Risque de déraillement - Risque de bruits et vibrations - Risque de perturbation des circulations ferroviaires	Usure latérale et verticale Usure sous la forme d'ondulations dans la direction de roulement Fissuration du rail Rupture des rails
	Drainage	Point bas (hydraulique)		**Défaut de mise en œuvre :** - Pente			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Ecoulement réduit	**Etat du composant :** Dépôt de pollution en fond de gorge des rails (feuilles d'arbre, déchets,	**Défaut de mise en œuvre :** - Réalisation des lumières de rail **Défaut de maintenance :** - Nettoyage des fonds de gorge du rail			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité Traces de corrosion
		Défaut de raccordement		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Energie	Circuit ouvert (électrique)	**Etat du composant** Rupture des rails	**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement (liaison équipotentielle)			- Risque de perturbation des circulations ferroviaires - Risque électrique	Rupture de rail Dysfonctionnement électrique du retour traction
		Faux contact (électrique)	**Etat du composant :** Dépôt de pollution sur les rails (feuilles d'arbre, déchets, graisses, etc.)				- Risque de perturbation des circulations ferroviaires	Dysfonctionnement électrique du matériel roulant
		Fuite (électrique)	**Contact :** Défaut d'isolement des rails (chambre d'éclissage, semelle sous rail)	**Défaut de fabrication :** - Conductance des rails **Défaut de mise en œuvre :** - Absence de liaison équipotentielle		**Milieu :** - Humidité - Résistance rail/sol	- Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Variation de tension rail/sol Courants vagabonds

CONCLUSION DE CHAPITRE

Nous avons présenté une synthèse de la compréhension de la voie ferrée de tramway sous la forme d'un modèle qualitatif. Il permet de formaliser notre connaissance technique de la composition du système en composants et leurs interactions à la fois entre composants et leur environnement technique. La complexité de la voie ferrée est mise en évidence par une relecture des choix de conception technique qui sont ordonnés : ses fonctions structurelles, de drainage, d'isolation électrique, mécanique et vibratoire ainsi que ses fonctions d'étanchéité, d'assemblage et d'interface sans oublier son rôle fondamental dans la circulation du retour de courant de traction.

L'application des outils de la sûreté de fonctionnement a permis, par un questionnement systématique, de formaliser les conditions dans lesquelles une dégradation peut se manifester. Elle met en évidence les faiblesses inhérentes à tout système de génie civil : sa conception est imparfaite car elle présente des zones de faiblesses inévitables et sa réalisation n'est pas toujours idéalement maîtrisée. L'analyse des dysfonctionnements formalise de façon systématique et exhaustive les effets locaux des dégradations : les symptômes, ainsi que les effets globaux : les risques associés. Les symptômes constituent une contribution principale de ce chapitre. La plupart d'entre eux sont visuels et contribuent à améliorer les inspections visuelles de la voie par une meilleure compréhension des causes des défaillances observables. Toutefois, ces symptômes et les chaines causales associées à la dégradation des composants et de leurs interfaces restent de nature qualitative. Une formalisation mathématique permettrait de les anticiper mais nécessiterait de modéliser chaque interaction entre les composants, ce qui parait pratiquement impossible sans passer par une simplification importante du modèle fonctionnel.

Or, notre propos est technique et gestionnaire. Il limite notre compréhension technique à une compréhension qualitative. En nous basant sur un niveau de granularité à l'échelle des composants, nous avons contribué à définir des symptômes qui peuvent permettre d'aider les gestionnaires à améliorer leur politique de maintenance préventive par une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des installations de voie. Le processus de dégradation de la voie ferrée se déroule relativement lentement et sur des infrastructures plutôt faciles d'accès, ce qui permet aux spécialistes qui inspectent les voies d'apprécier, au moins à court-terme, les besoins en travaux d'entretien et de renouvellement.

***

Le chapitre 5 présente une utilisation de ces résultats dans la construction d'un outil informatique d'inspection systématisée des installations de voie ferrée de tramway. Outre

les gains de productivité offerts par un tel outil sur le terrain pour la programmation d'actions à court terme, l'enjeu en matière de gestion patrimoniale est de permettre la construction d'un inventaire des désordres tout au long du cycle de vie des infrastructures et de pouvoir enrichir les données de suivi de l'état de la voie ferrée à des fins de modélisation statistique des désordres.

Chapitre 4

LA MAINTENANCE EN THEORIE

La gestion patrimoniale en tant qu'approche dans la gestion d'un bien est applicable à une ressource naturelle ou artificielle. Elle a été employée dans des domaines très divers, incluant les ressources naturelles (de Montgolfier & Natali, 1987), la voirie urbaine (Faivre d'Arcier, Christory, & Mignot, 1993), le patrimoine immobilier (Foucault & Leclerc, 2003), les ouvrages d'art (Foucault & Leclerc, 2003), les réseaux d'assainissement urbains (Ibrahim, 2008) ou encore l'eau potable (Werey et al., 2012). Bien que ces patrimoines disposent de caractéristiques techniques et fonctionnelles diverses, les gestionnaires de patrimoine partagent des problématiques communes à partir desquelles ils développent leurs stratégies d'interventions (C.Vasconcelos, 2005) :

- l'inventaire du patrimoine,
- les méthodes d'évaluation de « l'état de santé » des ouvrages pour le diagnostic,
- les méthodes d'aide à la décision pour la programmation du renouvellement,
- la prédiction de l'évolution du niveau de service des ouvrages.

Sur le plan sémantique, l'approche patrimoniale est une création française à laquelle il n'existe pas d'équivalent en langue anglaise, ou plutôt, il en existe plusieurs (Taillandier, 2009). Ainsi, les composantes techniques de l'exploitation et de la maintenance se réfèrent à la notion de facility management. Elle couvre le pilotage de l'exploitation en y incluant (Foucault, 2013) : les contrats de maintenance, de services et d'utilités (énergie, eau, etc.), la conformité règlementaire ainsi que la gestion des stocks et des ressources humaines nécessaires au bon fonctionnement du patrimoine. Plus spécifique à la gestion immobilière, le pilotage de l'occupation (gestion événementielle, baux locatifs, affectation des surfaces ou aménagements des locaux) se réfère au property management. Enfin, la notion d'asset management [22] renvoie généralement à une gestion plus stratégique. Elle se place à un niveau plus élevé que ceux évoqués précédemment. Les dimensions technique et administrative s'effacent alors au profit d'une vision plus financière (Taillandier, 2009).

A l'instar d'autres types de patrimoine d'infrastructures, l'aspect technique occupe une dimension prépondérante dans une approche patrimoniale. Cette dimension s'exprime par le processus de maintenance qui comprend les actes de surveillance, d'entretien et de remplacement/renouvellement.

[22] Notons que l'asset management est depuis 2014 une discipline à part entière, normalisée par la norme ISO 55000 dans laquelle elle est définie comme l'ensemble des activités coordonnées d'une organisation dans le but de réaliser de la valeur à partir d'actifs physiques.

Dans la pratique courante et compte tenu de l'évolution rapide des techniques de maintenance, le sens donné aux termes varie souvent d'un secteur industriel à un autre (Zwingelstein, 1996). Dans le cas des infrastructures de transport, alors qu'il existe une production abondante de norme dans le domaine, le vocabulaire n'est pas encore stabilisé entre les branches professionnelles, les constructeurs, les opérateurs ou encore les autorités organisatrices (Bourget & Labia, 2010).

Afin de clarifier des termes trop souvent galvaudés, nous débutons ce chapitre par une présentation normative de la maintenance et de ses deux principaux concepts : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Nous présentons ensuite une typologie des modèles de maintenance à partir d'une revue de littérature, ce qui nous permet une meilleure compréhension des différents actes de maintenance. Cette grille de lecture nous parait essentielle avant d'introduire la maintenance en pratique pour les installations de voie ferrée.

4.1. LES GRANDES STRATEGIES DE MAINTENANCE

> La norme NF-EN-13306 définit la maintenance comme l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Au travers de cette définition normative, les termes « maintenir » et « rétablir » sont évocateurs de deux concepts fondamentaux de la maintenance. Le premier terme renvoie à la notion de préventif et suppose alors que le bien est en bon état de fonctionnement. Le second terme, en revanche, renvoie à la notion de correctif et suppose que le bien n'est plus en mesure d'accomplir une fonction requise.

Qu'elle soit préventive ou corrective, la maintenance est surtout un ensemble d'activités que l'on peut regrouper en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion (Figure 58).

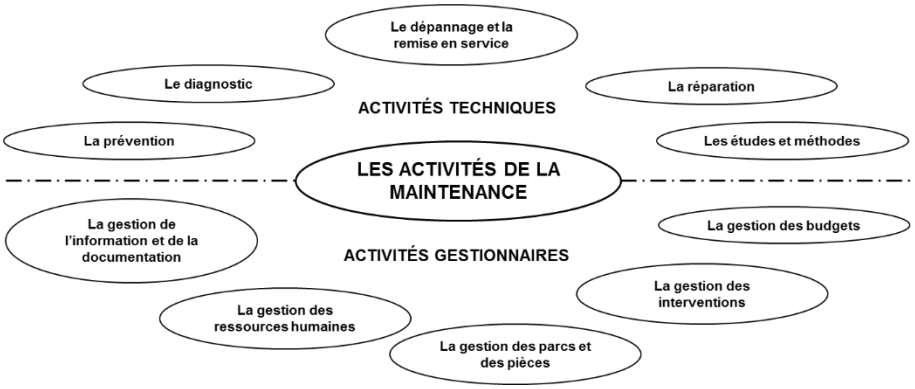


Figure 58 : Les activités de la fonction maintenance (Kaffel, 2001)

Les activités techniques qui regroupent les tâches de réparation et dépannage en passant par la surveillance ont fait l'objet d'une normalisation décrivant les différents types de maintenance. On parle aussi de stratégies de maintenance. Toutefois en pratique, une stratégie de maintenance n'est pas exclusive à un type mais s'appuie très souvent sur un panachage de ces différents types selon le triptyque coût-délai-performance et la composition du patrimoine à maintenir (Figure 59). En réalité, chaque type de

maintenance s'apparente à une stratégie élémentaire plutôt qu'à une stratégie généralisée de maintenance des biens.

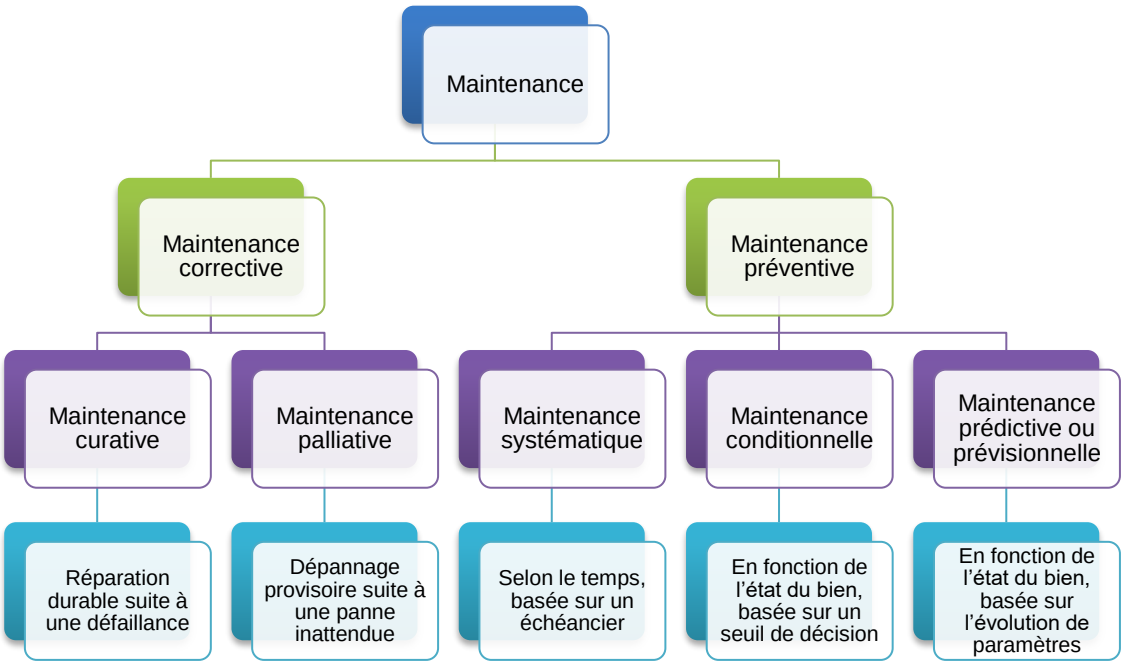


Figure 59 : Les différents types stratégiques de la maintenance

Dans les paragraphes qui suivent, nous présenterons les différentes formes de maintenance avant de les adapter au cas du tramway. Nous terminerons cette première partie de chapitre en évoquant les modèles de maintenance existants.

4.1.1. LA MAINTENANCE CORRECTIVE

> La maintenance corrective désigne l'ensemble des actions exécutées après détection d'une panne et destinées à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (NF-EN-13306).

La maintenance corrective relève d'une logique attentiste car elle se déclenche après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction requise. Ces activités subies comportent la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, provisoirement ou non, et les opérations de contrôle de bon fonctionnement.

Dans ce type de logique, on distingue ensuite la maintenance curative et la maintenance palliative selon que le résultat des actions réalisées présente un caractère provisoire ou permanent (Zwingelstein, 1996). Notons que les normes plus récentes ayant remplacés la NF X 60-010, la notion d'action provisoire ou permanente a disparu au profit d'une distinction temporelle. On parle alors de maintenance corrective d'urgence quand elle est exécutée sans délai ou bien de maintenance corrective différée quand elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une défaillance. Nous renvoyons le lecteur intéressé à la norme NF EN 13-306.

4.1.2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE

> La maintenance préventive désigne l'ensemble des actions exécutées à intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien (NF-EN-13306).

A la différence de la maintenance corrective, ce type de maintenance relève d'une logique proactive car elle intervient sur un bien en fonctionnement, avant que celui-ci ne soit défaillant ou dégradé. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier (maintenance systématique), selon l'état d'un bien (maintenance conditionnelle) ou selon l'évolution de paramètres significatifs (maintenance prévisionnelle).

La distinction entre une tâche de nature préventive et une tâche de nature corrective n'est pas toujours bien définie. (Zwingelstein, 1996) précise à ce propose que lorsqu'au cours d'une tâche préventive, un composant interne d'un matériel est trouvé ou jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective. En outre, s'il est trouvé non défaillant mais dégradé – même au-delà de la valeur de défaillance potentielle, sa réparation ou son remplacement est de nature préventive[23].

La maintenance préventive se décline encore. La norme NF EN 13306 distingue ainsi : les maintenances préventives « systématique », « prévisionnelle » et « conditionnelle ».

- La maintenance préventive « systématique » est exécutée à intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage (p.ex. le temps de fonctionnement d'un bien, le nombre de cycles) mais sans contrôle préalable de l'état du bien.
- Ce type de maintenance vise à maintenir le bien en fonctionnement, soit par le remplacement de certains composants critiques (remplacement systématique), soit au travers de l'entretien courant (nettoyage, lubrification, resserrage, petits remplacements) pour tenter de ralentir le processus de dégradation. Ce type de maintenance est particulièrement adapté dans les cas où l'on connaît de façon presque précise la durée de vie moyenne des composants ou lorsque des contraintes règlementaires ou juridiques s'appliquent obligatoirement (Zwingelstein, 1996).
- La maintenance préventive « conditionnelle » est basée sur une connaissance de l'état de fonctionnement du bien, état qui se caractérise par des paramètres significatifs de ce fonctionnement à l'issue d'une surveillance particulière.
- Le projet de norme version 2015 précise que la maintenance conditionnelle comprend une combinaison de surveillance en fonctionnement et/ou d'inspection et/ou d'essai, d'analyse ainsi que les actions de maintenance qui en résultent. Ce type de maintenance vise à maintenir le bien en fonctionnement mais à la différence de la maintenance systématique, l'action de restauration du bien est subordonnée à l'apparition de certains paramètres révélateurs d'une dégradation ou d'un risque de défaillance du bien. Les données recueillies lors d'une opération

[23] (Zwingelstein, 1996) précise à ce propos qu'une dégradation qui n'aurait pas atteint le point de défaillance potentielle n'est en principe pas à réparer ou à remplacer.

de surveillance sont comparées à un seuil de décision. Si la valeur seuil est dépassée, alors l'intervention de maintenance est déclenchée.

- La maintenance préventive « prévisionnelle » est basée sur des prévisions par extrapolation à partir de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de l'état du bien.
- Cette forme de maintenance est un type de maintenance conditionnelle. Elle s'intéresse à l'évolution des paramètres significatifs de l'état du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Notons que ce type de maintenance intègre également les conditions d'utilisation et l'environnement futur du bien et de son système (Lesobre, 2015) pour la planification. Cette forme avancée de maintenance nécessite une excellente connaissance du système.

4.2. CARACTERISATION DES TACHES DE MAINTENANCE

Les tâches de maintenance sont diverses. Selon le contexte telle que la stratégie envisagée ou le type de patrimoine concerné, ces tâches peuvent désigner des interventions (remplacement, réparation, entretien courant), des vérifications, des inspections ou encore des actions de surveillance. Selon les modèles, les hypothèses et les règles de décision ne sont pas les mêmes. Nous proposons dans les paragraphes qui suivent une description des définitions et des notions élémentaires les plus couramment utilisés pour modéliser les différentes tâches de maintenance.

4.2.1. CLASSIFICATION OPERATIONNELLE SELON LE NIVEAU DE COMPLEXITE

Les « niveaux de maintenance » correspondent à une classification des tâches de maintenance selon des critères de complexité. La complexité se traduit principalement par des niveaux de qualification du personnel et l'utilisation de matériels ou d'équipements spécialisés. Une politique de maintenance bien définie doit clairement identifier les niveaux de maintenance réalisés à l'intérieur de l'entreprise et ceux confiés à des entreprises de sous-traitance ou à des constructeurs (Zwingelstein, 1996).

Généralement, on distingue 5 niveaux. Ceux-ci-dessous sont donnés à titre indicatif mais peuvent varier selon le secteur et les partenaires du contrat de maintenance.

- Le niveau 1 est caractérisé par des actions simples exécutées par du personnel ayant une formation minimale. Ces actions peuvent être réalisées par exemple par le personnel utilisateur et sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité, à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien et avec l'aide d'instruction d'utilisation.

  Exemples : réglage de voyants, de certains fusibles, action de graissage.
- Le niveau 2 est caractérisé par des actions de base devant être exécutées par du personnel qualifié utilisant des procédures détaillées. Ces actions nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation et de mise en œuvre simples (intégrés au bien ou extérieurs).

  Exemples : échange standard, contrôles de bon fonctionnement.
- Le niveau 3 est caractérisé par des actions complexes devant être exécutées par du personnel qualifié utilisant des procédures détaillées. Ces actions nécessitent des procédures complexes

et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation et de mise en œuvre complexes (intégrés au bien ou extérieurs).

Exemples : diagnostic, utilisation d'un banc de contrôle, remplacement de pièces, réparations mécaniques mineures.

- Le niveau 4 est caractérisé par des actions nécessitant du personnel technique spécialisé qui impliquent la maîtrise d'une technique ou d'une technologie et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés.

  Exemples : réglage des moyens de mesure, travaux importants de maintenance corrective (hors rénovation, reconstruction).

- Le niveau 5 est caractérisé par des actions qui impliquent un savoir-faire détenu par le fabricant ou une société spécialisée à l'aide d'un équipement de support logistique industriel. Ces opérations sont généralement proches de la rénovation ou de la reconception.

  Exemples : réparation importante, rénovation, reconstruction, renouvellement.

Les niveaux de maintenance ne sont généralement pas représentés dans les modèles de maintenance. Les modèles préfèrent une désagrégation plus élevée des actions de maintenance. La définition de niveau de maintenance est surtout utile dans un cadre plus opérationnel, pour définir par exemple le cahier des charges d'une relation contractuelle entre un client et un fournisseur de service. Les niveaux fournissent de façon communicante et rapide des informations sur la complexité de la tâche et ses conséquences en termes de coûts et délai de réalisation. Les modèles quant à eux privilégient un niveau de détail plus fin – à l'unité – des actions de maintenance qui modélisent chaque action, par sa durée et son effet sur le système. Notons toutefois qu'une partie des modèles de maintenance intègre des options de regroupements (d'actions), en principe incontournables dans le cadre des systèmes multi-composants.

4.2.2. CLASSIFICATION TECHNIQUE SELON LE NIVEAU DE RESTAURATION DU BIEN

Ici, les interventions de maintenance sont classées selon le degré de restauration du bien. Cette hiérarchisation fait partie – avec la durée des interventions – des deux paramètres d'entrée les plus utilisés dans les modèles de maintenance (Zille, 2009). Selon le niveau de restauration, on distingue couramment: la maintenance parfaite, la maintenance minimale et la maintenance imparfaite (Wang, 2002).

La maintenance parfaite correspond à des interventions dites AGAN de l'anglais « As Good As New ». Dans le cadre d'un modèle de maintenance, une intervention de maintenance est parfaite lorsqu'après celle-ci, le bien est remis dans un état « aussi bon que neuf ». Cette hypothèse permet de simplifier considérablement la modélisation de la maintenance. Toutefois, elle suppose que le bien revient à son état initial à la suite de chaque intervention. Dans la réalité, ce type d'intervention est assimilable à un remplacement complet ou une réparation à neuf du bien et peut correspondre aussi bien à de la maintenance préventive qu'à de la maintenance corrective.

La maintenance minimale correspond à des interventions dites ABAO de l'anglais « As Bad as Old », c'est-à-dire « aussi mauvais que vieux ». Cette hypothèse décrit généralement une intervention de maintenance corrective qui permet au bien de revenir à un état de fonctionnement similaire à celui précédant la défaillance. L'intérêt d'une telle action est de restituer une partie des performances tout en diminuant considérablement la durée et le coût de l'intervention. Elle est sans effet sur le niveau de

dégradation. Le lecteur intéressé par ce type d'intervention pourra trouver une revue bibliographique spécifique à ce type d'intervention dans (Ouali, Tadj, Yacout, & Ait-Kadi, 2011).

La maintenance imparfaite produit un niveau de restauration intermédiaire entre ceux des interventions AGAN et ABAO. Cette spécification convient pour les interventions qui n'assurent pas un remplacement ou qui réduisent le niveau de dégradation sans revenir à l'état neuf. Ce type d'intervention nécessite alors plus de temps qu'une intervention AGAN ou ABAO parce qu'il exige un temps pour le diagnostic et la réparation. La maintenance imparfaite est particulièrement adaptée dans les domaines du génie civil mais elle nécessite une excellente connaissance de l'effet de la maintenance sur le bien.

Enfin, plus à la marge car rarement prises en compte dans la littérature, il existe des interventions de maintenance qualifiées d'améliorative. Cette notion s'apparente à des interventions de type retrofit qui permettent de restituer le bien dans un état « mieux que neuf » (ou better than new) (Sánchez-Silva & Klutke, 2016). Ce type d'intervention peut consister en l'amélioration des performances spécifiées lors de la conception par le remplacement ou l'ajout de certains équipements. Par exemple, dans le cas d'un moteur thermique, cela peut consister en l'ajout d'un pot catalytique. En France, dans le langage métier, on parle de retrofit (anglicisme correspondant à un réaménagement d'un équipement avec des technologies plus récentes).

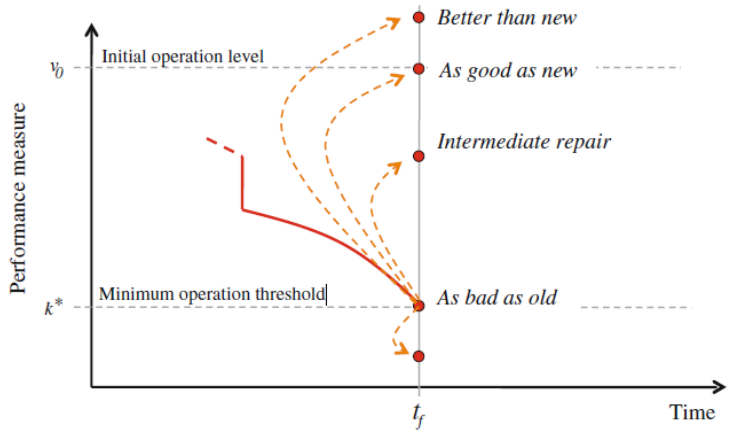


Figure 60: Les différents degrés de restauration d'un bien après une intervention de maintenance (Sánchez-Silva & Klutke, 2016)

4.2.3. CLASSIFICATION DES OPERATIONS DE SURVEILLANCE SELON LE NIVEAU D'EFFICACITE

La surveillance est une tâche de maintenance à part entière. Tout comme les interventions de maintenance peuvent être classifiées selon le niveau de restauration qu'elles permettent, plusieurs hypothèses existent pour qualifier les actions de surveillance. Dans la littérature académique, on identifie les hypothèses suivantes selon l'efficacité de la surveillance (c.-à-d. sa capacité à détecter une défaillance, un défaut ou un désordre) :

- la surveillance parfaite,
- la surveillance imparfaite,

- la surveillance minimale.

La surveillance parfaite est l'hypothèse la plus utilisée dans la littérature de la maintenance car elle permet de simplifier considérablement la modélisation de la politique de maintenance. Cette hypothèse considère que les informations de surveillance reflètent exactement l'état du système. Or, il est rare que cette information soit disponible à chaque instant car les techniques d'observation ou de mesure ne sont pas systématiques en pratique, d'autant plus que les informations de surveillance sont souvent entachées d'erreurs. 35% des historiques de défaillance contenues dans les bases de données de GMAO[24] sont erronés (de Azevedo, 2009).

Une hypothèse plus réaliste est celle de la surveillance imparfaite. Elle considère les imperfections des appareils de mesure qui ne sont capables de fournir qu'une information certes corrélée à l'état du système, mais indirecte ou partielle. Si l'indicateur fournit une information sur l'état du système, il est possible qu'elle soit vraie mais le modèle de décision considère une certaine probabilité que ce soit une fausse alarme ou qu'elle nécessite confirmation. Ce type d'hypothèse engendre nécessairement des difficultés supplémentaires à la modélisation quantitative du système.

Enfin, une dernière catégorie qui n'en est pas vraiment une, plutôt une caractéristique parfois même un résultat des deux premières, il s'agit de la surveillance « minimale ». Cette hypothèse permet de considérer que l'information n'est pas disponible à chaque instant, elle est discrète, par exemple au travers d'inspections. Lorsqu'elle est une caractéristique, un pas de maintenance est fixé et le modèle permet de simuler des stratégies de maintenance et son impact sur la fiabilité du système. Lorsqu'elle est un résultat, on cherche à savoir quel pas de maintenance garantit un certain niveau de fiabilité.

4.3. LES MODELES DE MAINTENANCE

4.3.1. LES MODELES DE MAINTENANCE A UNITE SIMPLE

Si plusieurs centaines de modèles de maintenance ont été proposés dans la littérature, il n'existe qu'un nombre limité de stratégies de maintenance. Pour présenter ces différentes stratégies nous présenterons une taxonomie des modèles de maintenance régulièrement reprise dans les revues de littératures récentes, en particulier celle de (Wang, 2002) enrichie de celles de (Huynh, Barros, Berenguer, & Castro, 2010), (Deloux, 2008), (Nguyen, 2015), et (Zille, 2009). Dans un premier temps, nous présenterons les modèles de maintenance dits « élémentaires » car applicable en l'état aux systèmes à unité simple. Ensuite, nous nous intéressons aux modèles de maintenance applicables aux systèmes à unités multiples qui tiennent compte des différents types de dépendance pouvant apparaitre dans le cas des systèmes complexes.

4.3.1.a *Stratégies de maintenance corrective*

Bien que l'on puisse considérer que la maintenance corrective ne correspond pas à une stratégie dans la mesure où l'on subit les défaillances, elle peut présenter des atouts dans certaines situations (Zwingelstein, 1996).

En effet, les défaillances sont inévitables et lorsque leurs conséquences sur le système ne justifient pas l'emploi de techniques *coûteuses* de maintenance conditionnelle telles que la surveillance, elle peut s'avérer

[24] Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO)

être l'option la plus économique. Ce type de choix requiert alors de bien connaître le taux de défaillance du bien, ses conséquences, le temps requis pour la remise en état et éventuellement de mettre en œuvre des mesures de couverture comme des équipements redondants non-opérationnels.

4.3.1.b *Stratégies de maintenance systématique de remplacements basés sur l'âge*

Les stratégies basées sur l'âge consistent en des interventions systématiques en fonction de l'âge des équipements. L'âge est défini par le temps qui s'est écoulé depuis le dernier remplacement. Il peut être calendaire ou exprimé par unité d'usage (p.ex. les kilomètres parcourus, le temps de fonctionnement, le nombre de cycles, etc.).

Les premiers modèles de maintenance basés sur l'âge (age-replacement policies) ont considéré des interventions de type AGAN, soit des remplacements à neuf de l'équipement, puis se sont étendus avec le développement des concepts de la maintenance imparfaite et minimale (Wang, 2002).

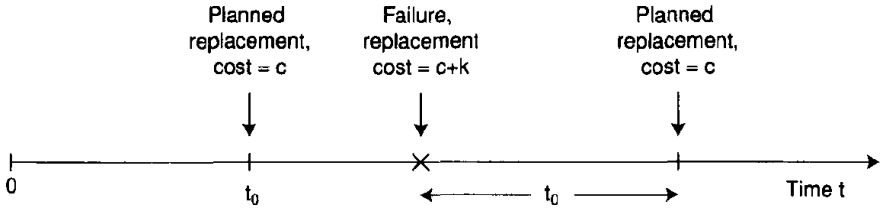


Figure 61: Stratégie de remplacement basé sur l'âge et coûts (Rausant & Hoyland, 2004)

L'optimisation de ces modèles consiste à déterminer la période optimale d'intervention. On entend par optimale la période qui minimise les coûts de maintenance au regard des objectifs de disponibilité du système. En d'autres mots, on recherche la période T0 qui propose le meilleur compromis entre la maintenance préventive et la maintenance corrective (Zille, 2009). En effet, la défaillance des équipements est un fait incontournable et signifie à l'évidence une part plus ou moins importante de maintenance corrective. Ce type de modèle prévoit donc différents types d'intervention (parfaite, minimale, imparfaite) dans deux situations : après une défaillance ou après une durée de T0 unités de temps.

En pratique, ce type de stratégie demande avant tout une excellente connaissance de l'âge des équipements (depuis la dernière intervention) mais se révèle limitée pour une planification opérationnelle à long terme. L'apparition d'une défaillance conduit effectivement à décaler les interventions suivantes. Notons enfin qu'à l'instar d'autres modèles, il existe aussi des incertitudes inhérentes aux hypothèses liées aux moyens d'action de la maintenance : minimale, parfaite ou imparfaite.

4.3.1.c *Stratégies de maintenance systématique de remplacements par bloc*

Avant tout, précisons que par le terme « bloc », on entend une programmation des remplacements par groupe d'équipements identiques. Les opérations de « relamping » ou remplacement systématique des ampoules d'un site industriel en constituent un exemple simple.

Les modèles de remplacement par bloc sont similaires à ceux basés sur l'âge à la différence près qu'ils ne tiennent pas compte de l'historique des pannes. Pour rappel, les modèles basés sur l'âge réenclenchent la période d'intervention après chaque panne. A l'inverse, les modèles de remplacement par bloc s'effectuent

selon un schéma fixe kT (avec k=1, 2, 3,…). Ainsi en cas de défaillance, l'équipement est remplacé sans incidence sur le programme de remplacement préventif. Ce type de stratégie est donc plus simple à mettre en œuvre que les modèles basés sur l'âge.

Toutefois, ces modèles se révèlent théoriquement moins avantageux sur le plan économique avec le risque de remplacer un équipement quasi-neuf. Sur ce point, des travaux proposent d'améliorer cette classe de modèle en introduisant d'autres types d'intervention de maintenance telle que la maintenance minimale (Barlow & Hunter, 1960) lors d'une défaillance intermédiaire ou de considérer un âge minimal (ou un nombre minimal de défaillances) au-dessous duquel le composant ne sera pas remplacé. D'autres variantes sont résumées dans la revue bibliographique de (Wang, 2002).

Enfin, à l'instar des modèles basés sur l'âge, l'optimisation de ce modèle consiste à déterminer la durée de la période T selon le type d'intervention et des critères de coût et/ou de disponibilité.

4.3.1.d *Stratégies de maintenance conditionnelle à taux limite de défaillance*

Cette classe de modèle prévoit une intervention de maintenance préventive lorsque le taux de défaillance ou de fiabilité d'un équipement atteint une valeur cible (Wang & Pham, 2006). Les défaillances intermédiaires sont alors corrigées par des actions de réparation. Ces modèles visent donc à maintenir un certain niveau de fiabilité à horizon fini ou infini.

L'optimisation de ce type de modèle vise alors à déterminer le bon compromis entre indicateurs de fiabilité (p.ex. taux de défaillance) et coûts de maintenance (ratio, coût total, disponibilité…). Ainsi pour son implémentation, cette stratégie nécessite une excellente surveillance des indicateurs de fiabilité du système. Une synthèse des types d'indicateurs de suivi et de critères d'optimisation de cette classe de modèle est présentée dans la revue bibliographique de (Wang, 2002).

4.3.1.e *Stratégies de maintenance conditionnelle séquentielle*

Sous cette politique de maintenance, les interventions de maintenance préventive sur le bien sont réalisées à des intervalles de temps irréguliers. Les intervalles se réduisent en fonction de l'âge des équipements. Ce type de politique considère qu'avec l'âge, les équipements se dégradent plus rapidement et nécessitent des intervalles de plus en plus réduits. Dans ce cadre, il ne s'agit pas nécessairement de définir l'ensemble des intervalles dès la mise en service mais plutôt de recaler la prochaine intervention k+1 après chaque intervention k en fonction du temps restant d'utilisation.

Cet apport de flexibilité conduit théoriquement à une réduction des coûts par rapport à une politique de remplacement préventive systématique car la durée du prochain intervalle est sélectionnée en fonction du temps restant et du coût de maintenance attendu.

4.3.1.f *Stratégies de réparation à temps ou à coût limité*

Dans cette classe de politique, (Misra, 2008) distingue deux sous-classes : les politiques de réparation à coût limité (repair cost limit) et les politiques de réparation à temps limité (repair time limit). Le coût de réparation ou le temps nécessaire à la réparation sont alors évalués lorsque la défaillance intervient. Si le coût ou le temps nécessaire à la réparation est supérieur à un seuil fixé (p.ex. le coût de remplacement de

l'équipement), alors l'intervention de maintenance correspondra à un remplacement sinon à une réparation.

Notons que ce type de politique s'apparente à une stratégie corrective puisque la maintenance est réalisée après la défaillance. Un diagnostic doit être réalisé avant l'intervention pour déterminer le type d'intervention requis, ce qui limite la flexibilité d'une telle politique. Enfin, les critères d'optimisation de ces modèles sont bien souvent focalisés sur les coûts et non la disponibilité du système.

4.3.1.g *Stratégies de maintenance conditionnelle basée sur le nombre de réparations et l'âge*

Sous cette politique, l'équipement est remplacé après un nombre k de défaillances. Les (k-1) défaillances sont corrigées par des interventions de maintenance minimale (ou réparations). Ce cycle se répète après chaque remplacement d'équipement. La variable de décision repose donc sur le nombre k de défaillances. Toutefois, il existe des extensions qui proposent d'injecter une variable T correspondant à l'âge de l'équipement. Sous ces extensions, les k défaillances sont corrigées par de la maintenance minimale. Si les k défaillances apparaissent avant le temps d'opération T, alors les k défaillances sont corrigées par de la maintenance minimale et la défaillance k+1 déclenchera une opération de remplacement. A l'inverse, si le temps T est écoulé avant que le nombre de défaillances n'atteignent le compte k, l'équipement est remplacé à la prochaine défaillance.

4.3.2. LA PROBLEMATIQUE DES SYSTEMES MULTI-COMPOSANTS

Comme nous l'avons précisé en introduction, les politiques de maintenance présentées jusqu'ici sont fondées sur des modèles de maintenance ne prenant en compte que des systèmes à unité simple. Or, les systèmes à unités multiples sont nombreux. En écartant les systèmes naturels pour n'évoquer que les systèmes artificiels (c'.à-d. conçus par l'homme) on peut citer dans cette catégorie : les transports routier, ferroviaire, aérien et maritime, les réseaux d'eau potable et d'assainissement, l'aérospatial, les usines chimiques, le nucléaire, les réseaux électriques pour la production, la transformation, la distribution et la consommation, l'extraction des ressources terrestres, la domotique, les nanotechnologies, etc. Ces systèmes ne cessent de se complexifier et l'intérêt de la recherche scientifique vers des modèles de maintenance de systèmes plus complexes s'intensifie (Misra, 2008).

Il faut comprendre que les décisions de maintenance optimales pour les composants d'un système pris séparément ne conduisent pas nécessairement à une politique optimale du point du vue du système global. Les systèmes à unités multiples sont marqués par des relations de dépendance entre les unités du système. On distingue 3 types de dépendances (Nicolai & Dekker, 2008) :

- les dépendances structurelles,
- les dépendances économiques,
- les dépendances stochastiques.

Les dépendances structurelles tiennent aux interfaces physiques entre les divers composants du système. Il en résulte que la maintenance de l'un des composants entraine des conséquences sur un ou plusieurs autres composants en interface (Lesobre, 2015), par exemple dans le cas où la maintenance dudit composant nécessite le désassemblage d'autres composants. Il en résulte que la décision du mainteneur est restreinte par le regroupement de tâches de maintenance (Nicolai & Dekker, 2008).

Les dépendances économiques sont très courantes dans la plupart des systèmes en exploitation continue (Wang, 2002) tels que les transports de masse car les coûts d'indisponibilité du système sont souvent supérieurs aux seuls coûts de maintenance de l'équipement. Les dépendances économiques impliquent que la somme des coûts de maintenance par composant pris individuellement n'est pas égale au coût de la maintenance groupée des composants du système (Nicolai & Dekker, 2008). Dans ce cas, les politiques de maintenance opportunistes présentées ci-dessous peuvent représenter un fort potentiel de réduction des coûts (Cho & Parlar, 1991).

Enfin, les dépendances stochastiques correspondent aux cas où l'état d'un composant influence l'état des autres composants du système. La défaillance ou le niveau de dégradation de l'un peut provoquer la défaillance ou la dégradation de l'autre de façon non déterministe.

4.3.2.a *Stratégies de maintenance groupée*

Sous cette classe de politique, les modèles cherchent à réaliser des économies d'envergure grâce à la maintenance simultanée de plusieurs composants. Parmi les stratégies de cette classe, trois sont courantes dans la littérature :

- les stratégies de maintenance groupée basées sur l'âge (T-age group replacement policy) où les équipements sont remplacés quand le système atteint l'âge T,
- les stratégies de maintenance groupée basées sur le nombre de défaillances (m-failure group policy) où les équipements sont inspectés à la suite d'une défaillance puis maintenus le cas échéant,
- les stratégies de maintenance groupée basées sur l'âge et le nombre de défaillance qui combinent les avantages des deux politiques précédentes. Sous cette politique, le système est inspecté après un nombre déterminé de défaillances ou lorsque l'âge T est atteint. Après l'inspection, les équipements défaillants sont remplacés. Eventuellement, des modèles proposent de profiter de l'interruption du système pour réaliser des opérations d'entretien courant sur les équipements non défaillants. Ce type de maintenance est opportuniste (voir §2.3.2.2.) et le système est restitué dans un état aussi bon que neuf (AGAN).

Au préalable, la maintenance groupée suppose la création de groupes par la création de différentes catégories d'équipements à maintenir lorsqu'une défaillance apparait. (Wang & Pham, 2006) identifient trois critères de regroupement. Le premier concerne la prise en compte des coûts d'accessibilité des composants défaillants correspondant aux actions de désassemblage et réassemblage. Le second consiste à inclure des redondances d'équipements lors de la conception du système, afin de réduire les coûts d'indisponibilités. Enfin, le troisième vise à catégoriser des équipements fonctionnellement indépendants mais sujets à des défaillances stochastiques dont les fonctions de répartition sont identiques.

4.3.2.b *Stratégies de maintenance opportuniste*

Comme introduit précédemment, le regroupement des tâches de maintenance peut s'opérer de manière opportuniste. Ces stratégies prennent en compte des interactions entre les composants d'un même système (Lesobre, 2015). Ainsi, un matériel peut subir une action de maintenance préventive lorsque l'on

doit effectuer une action de maintenance, préventive ou corrective, sur un autre composant du système (Zille, 2009).

A l'instar de la maintenance groupée, la maintenance opportuniste permet une réduction des coûts en limitant le nombre d'interventions de maintenance sur le système (réduction du temps d'indisponibilité). Les coûts fixes peuvent alors être réduits. Toutefois, ce type de politique est plus complexe à mettre en œuvre car les interventions ne peuvent être prévues à l'avance. Le dimensionnement des ressources humaines et la préparation préalable aux interventions sont alors plus difficiles.

4.3.3. RELATIVITE HISTORIQUE DES MODELES DE MAINTENANCE

Au cours du 20ème siècle, les objectifs et le concept de la maintenance des systèmes techniques ont considérablement changé. Ce changement est d'abord la conséquence de la complexification des systèmes nécessitant de nouvelles techniques de maintenance, avant une prise de conscience de plus en plus large des bénéfices rendus par la maintenance. Lors de la période de l'entre-deux guerres, les systèmes ciblés étaient relativement peu mécanisés (Misra, 2008). Plus simples aussi, les équipements défaillants étaient plus rapides à réparer ou à remplacer. Ainsi, l'indisponibilité des systèmes n'était pas au centre des préoccupations des organisations qui privilégiaient alors des politiques de maintenance corrective (failure-based maintenance). Ce n'est qu'avec la mécanisation accélérée du secteur industriel à partir des années 1950' que les organisations se sont orientées vers d'autres politiques de maintenance du fait de machines plus complexes et plus nombreuses. Les industries devenant alors de plus en plus dépendantes entre elles, la gestion des temps d'indisponibilité/disponibilité est inévitablement apparue comme une préoccupation majeure de la maintenance. C'est ce que l'on appelle la maintenance préventive ou maintenance systématique. Pour ces politiques, les objectifs visaient en priorité à maximiser la disponibilité des équipements entre les interventions de maintenance d'abord limitées aux grandes révisions (Misra, 2008). Sous l'augmentation des coûts de maintenance et des exigences grandissantes en termes de disponibilité et de durée de vie des équipements, le contrôle et les interventions de nature préventive ont été intégrés aux plans de maintenance (1960'). Toutefois, il s'agissait encore de maintenance dite calendaire et réalisée sur des équipements indépendamment de leur état de fonctionnement (maintenance conditionnelle) ou de leur probabilité de défaillance (maintenance *prédictive*). Sous l'influence de l'industrie aéronautique, navale, spatiale et leurs applications militaires, ces derniers concepts ne naissent véritablement qu'à partir des années 1970' avec les concepts de maintenance basée sur la fiabilité.

CONCLUSION DE CHAPITRE

Avec le temps et l'industrialisation rapide des pays développés, les modèles de maintenance se sont complexifiés jusqu'à devenir essentiels pour certaines industries. Ils sont quantitatifs et permettent de simuler des stratégies de maintenance parfois complexe avec un panachage de correctif, de préventif, de prévisionnel sans oublier l'efficacité de la surveillance. Nous rappelons ici les principaux paramètres de ces modèles (Cui, 2008) :

Stratégie de maintenance : remplacement basé sur l'âge, remplacement par bloc, etc.
Structure du système : structure en série, en parallèle, ou mixte.

Nature des interventions de maintenance : parfaite, imparfaite, minimale, améliorative.
Critères d'optimisation : critères de coûts, de disponibilité, de fiabilité, etc..
Distribution des lois de probabilité de défaillance : exponentielle, Weibull, normale, gamma, etc.
Règles d'interruption du système : par exemple pour le système à unité multiple quand des composants sont défaillants, d'autres peuvent continuer à fonctionner ou être en attente de remise en service.
Hypothèses de surveillance : imparfaite, parfaite, inspection au fil de l'eau, supervision en temps réel, etc.
Type de modèle : continu ou discret par exemple.
Distribution des actions de maintenance : exponentielle, Weibull, etc.
Autres : dépendance ou indépendance des distributions, prise en compte de covariables, etc.

***

Ces paramètres sont les déterminants d'une stratégie de maintenance de la plus simple à la plus sophistiquée. Cette revue de littérature permet de situer le contexte général de la maintenance et de ces principaux paramètres. Le chapitre 5 qui va suivre offre une lecture plus spécifique et opérationnelle de la maintenance de la voie ferrée de tramway. Il montre une stratégie de maintenance mixte avec des interventions d'entretien courant fondées sur l'âge et des interventions ponctuelles déclenchées à la demande suite à un constat de désordre.

Chapitre 5

LA MAINTENANCE EN PRATIQUE

Si un système d'inspections périodiques et de maintenance préventive est en place dès la mise en service, toute infrastructure de voie ferrée, correctement conçue, devrait durer des décennies sans nécessiter de reconstruction importante. Cela est dû en grande partie aux faibles charges à l'essieu des véhicules de tramway et à la robustesse de la voie sur dalle en béton, très largement plébiscitée pour ce mode de transport urbain. Mais comme toute installation industrielle, les installations de voie doivent être surveillées et entretenues pour bénéficier de tout leur potentiel de longévité. Longévité qui, à certains égards, reste tout à fait relative. La géométrie de voie est en effet soumise à des sollicitations statiques et dynamiques, dues aux charges de trafic, aux influences climatiques et à d'autres sollicitations extérieurs (chimiques, ou en rapport avec la végétation) qui peuvent être localement très différentes. Selon leur utilisation, les matériaux utilisés et les sollicitations auxquelles ils sont soumis, les éléments constitutifs de la voie ont une durée de vie limitée, à l'issue de laquelle ils doivent être remplacés/renouvelés. La stratégie de maintenance doit être adaptée en conséquence. Enfin, des défauts de conception, de fabrication et de mise en œuvre peuvent survenir et engendrer des usures précoces difficiles à remédier sans passer par des interventions lourdes.

Ce chapitre a pour objectif de formaliser l'état des pratiques en matière de gestion des infrastructures. Un accent est mis sur la surveillance des infrastructures et la collecte des données sur l'état physique de la voie ferrée. Nous dressons d'abord le contexte du parc d'infrastructures tramway, son ampleur, son âge et les acteurs principaux y intervenant. Puis, nous décrivons l'éventail des actes de surveillance et de maintenance qui sont pratiquées. Enfin, nous présentons une contribution méthodologique pour l'inspection systématisée de la voie ferrée de tramway qui a été implémentée dans un outil SIG développé par ARTELIA. Cette solution a aujourd'hui été appliquée pour la première fois sur le réseau de Grenoble et est en cours d'application sur le réseau de Bordeaux

5.1. CONTEXTE DU RENOUVELLEMENT DES VOIES FERREES EN FRANCE

5.1.1. CARACTERISTIQUE DU PARC DE VOIE FERREE DE TRAMWAY

5.1.1.a *Un patrimoine à l'échelle national relativement modeste et jeune*

Les infrastructures de tramway constituent un patrimoine plutôt récent. Après la période de démantèlement des anciens réseaux de tramway lors de l'après-guerre, le tramway fut réintroduit d'abord timidement à Nantes le 7 janvier 1985 (Le Tourneur, 2018), puis à Grenoble le 5 novembre 1987 et s'est étendu à la plupart des grandes villes françaises et agglomérations (Saint-Denis, Rouen, Strasbourg, Orléans, Montpellier, Lyon, etc.) Le développement du tramway en France passe à présent par les villes moyennes, comme en témoigne l'ouverture en 2014 d'un tramway à Aubagne ou le projet de Ligne 1 à Avignon, par l'essor encore timide en France des lignes de tram-train (Mulhouse, Nantes, Lyon et prochainement Bordeaux, Saint-Germain-en-Laye, Massy-Evry) ou encore par les projets d'extension comme à Bordeaux. Cette aventure du tramway en France rencontre donc aujourd'hui quelques limites et renvoie à une forme de saturation des potentialités d'équipements des villes françaises (Gardon, 2018). Dans les grandes villes, les principales lignes sont dessinées, reste les projets d'extension mais ceux-ci présentent des bilans socio-économiques moins intéressants comme en témoigne par exemple le projet d'extension vers St-Médard à Bordeaux : 3 km de voie unique, 5 stations, 12 min de fréquence et 5000 voyageurs/jours prévus au stade des études préliminaires.

Tableau 29 : Le patrimoine tramway en France

Agglo.	Nbre. de lignes	Date de première mise en service	Dernière extension du réseau	Longueur du réseau (en km)	Coût au kilomètre M€/km (VAUDOIS, 2017)	Caractéristiques
Angers	1	2011	2011	12,3	23,6	Portions avec APS
Aubagne	1	2014	2014	2,8		Gratuité des transports
Besançon	2	2014	2014	14,5	15,6	
Bordeaux	3	2003	2016	66,1	30,5 (phase 1)	Portions avec APS(*)
Brest	1	2012	2012	14,3		
Caen	2	2019	2019	17		Abandon du pneumatique en 2019 au profit du contact fer/fer
Clermont-Ferrand	1	2006	2013	15,9	20,7 (Translohr)	Pneumatique
Dijon	2	2012	2012	19	20,99	
Grenoble	5	1987	2015	42,3		
Le Havre	2	2012	2012	13		
Le Mans	2	2007	2015	18,9	21,56	
Lille	2	1909 (ancien	2011	17,5		Aérien et souterrain

Agglo.	Nbre. de lignes	Date de première mise en service	Dernière extension du réseau	Longueur du réseau (en km)	Coût au kilomètre M€/km (VAUDOIS, 2017)	Caractéristiques
		réseau) / 1994				
Lyon	6	2000	2016	66,9		Une ligne directe vers l'aéroport
Marseille	3	1893 (ancien réseau) / 2007	2015	12,7	36,21 (ligne 1)	Aérien et souterrain
Montpellier	4	2000	2012	60,5	29,71 (ligne 1)	
Mulhouse	4	2006	2010	16,2	20,33	
Nancy	1	2001	2001	11,1		Pneumatique
Nantes	3	1985	2015	41,3		
Nice	1	2007	2012	9,2	38,97 (ligne 1)	
Orléans	2	2000	2012	29,3	20,95 (ligne A)	Portions avec APS(*)
Paris / IdF	8	1992	2016	114,8	31,25 (ligne T3)	Portions en réseau pneumatique
Reims	2	2011	2011	11,2	27,48 (ligne A)	Portions avec APS(*)
Rouen	2	1994	1994	15,1		Aérien et souterrain
Saint-Etienne	3	1881 (ancien réseau) / 1983	2010	11,7		
Strasbourg	6	1994	2017	45,4		Extension vers l'Allemagne
Toulouse	2	2010	2015	16,7		
Tours	1	2013	2013	15,5		Portions avec APS
Valenciennes	2	2006	2014	33,8	30,19 (ligne 1)	

(*) Nota : APS désigne la technologie d'Alimentation par le Sol

L'ensemble des lignes de tramway représente un patrimoine d'une longueur totale de 765,7 km et à la vue de la saturation de ce type d'équipement dans les villes françaises, il est fort probable que ce patrimoine ne dépasse jamais les 1000 km à moins d'une mutation brutale. Il est bon de rappeler à cet effet que la liste des tramways, construits depuis 1854 comprend 99 réseaux urbains (VAUDOIS, 2017), alors que depuis 1985 la France n'en compte plus que 28 ; ce qui représente un différentiel de 71 réseaux.

A un coût moyen au km situé entre 12 et 30M€/km, la valorisation de ce patrimoine d'infrastructures atteint plusieurs milliards d'euros. A elle seule, la voie ferrée de tramway contribue à hauteur de 3,6 Mrds€ de la Valeur Actuelle de Remplacement[25] (VAR). A peine le coût d'une ligne de métro du Grand Paris

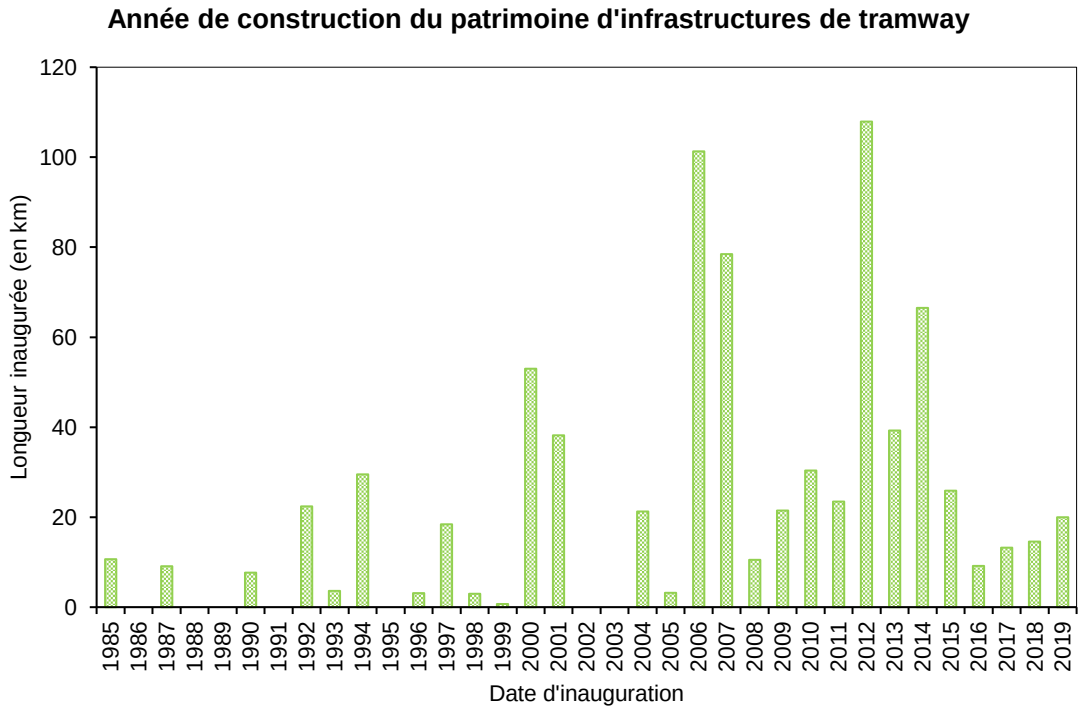
[25] La Valeur Actuelle de Remplacement correspond au coût moyen de construction de l'équipement (dans le cas d'un ouvrage ou d'un bâtiment par exemple) – excluant les coûts reliés à l'acquisition du terrain mais incluant les honoraires professionnels en date d'aujourd'hui et selon les types de conception et les méthodes de construction actuels. Cette valeur évolue donc dans le temps.

Express, et bien loin derrière l'étendu de patrimoines d'infrastructures plus anciens : le réseau routier, le réseau d'eau potable ou encore le Réseau Ferrée National (RFN).

Tableau 30 : Longueur des réseaux routiers, ferrés, de distribution d'eau potable et de tramway

Type de patrimoine	Longueur du réseau	Source
Réseau routier	950 000 km	(Conseil Général des Ponts et Chaussées, 2006)
Réseau ferré	30 000 km	SNCF Réseau
Réseau de distribution d'eau potable	906 000 km	Ministère de la transition écologique et solidaire
Réseau de tramway	765 km	STRMTG, CERTU, Divers

En observant les dates de mise en service des différentes lignes de tramways sur le territoire, on observe un démarrage relativement timide : proposer une alternative au « tout automobile » par un moyen de transport jugé peu moderne à l'époque n'a pas été facile. Sous l'impulsion de l'Etat et les succès à Nantes et à Grenoble qui ont fortement amélioré l'image du tramway, il s'est rapidement étendu de villes en villes ; soutenu par la mise en place d'une ressource dédiée et pérenne : le Versement Transport. Les années 2000 sont les années fastes du tramway avec presque 50% du patrimoine constitué sur la période 2006 – 2012.



Le graphique ci-dessus présente les années de construction des différents kilomètres de lignes de tramway en France. Notons que dans les cas de Saint-Etienne, la date indiquée correspond à la reconstruction générale. Par ailleurs, le Rhône Express a été exclu pour ses caractéristiques trop ferroviaires. L'âge moyen du patrimoine d'infrastructures tramways est de 12 ans.

5.1.1.b *Les premiers renouvellements d'ampleur*

Avec environ 10% du parc construit il y a plus de 25 ans, les premiers réseaux à s'être équipés d'un tramway ont déjà lancé des renouvellements importants, notamment à Nantes, Grenoble ou encore Paris, Strasbourg ou encore Orléans. Les voies en courbes sont particulièrement visées. Certaines interventions ont permis d'améliorer l'infrastructure (par exemple le renouvellement du secteur Commerce à Nantes) ou simplement restituer la qualité d'origine d'un secteur défectueux (par exemple la section sud de la ligne A du tramway d'Orléans). D'autres renouvellements sont actuellement à l'étude ou sont en cours de planification : on peut citer ici les cas d'Orléans, Lille, Rouen et St-Etienne. Nous proposons d'illustrer et de finaliser la mise en contexte des interventions de renouvellement par l'exemple des réseaux de Grenoble et d'Orléans.

Le renouvellement de la ligne A du tramway de Grenoble

A la suite d'un référendum organisé le 22 Juin 1983 par l'ancien maire de Grenoble, M. Alain Carignon, le tramway a été réintroduit au sein du paysage urbain de la ville en 1987 avec la mise en service de la ligne A. Grenoble devient ainsi la deuxième ville de France après Nantes à mettre en service une ligne de tramway moderne. Aujourd'hui, le réseau de tramway Grenoblois compte 5 lignes, sur environ 46 km de voies. Certaines lignes restent relativement récentes et en assez bon état, comme la ligne E datant de 2014, ou bien une extension de la ligne B qui date elle aussi de 2014. Les lignes C et D sont entrées en service respectivement en 2006 et 2007. Les autres lignes A et B sont parmi les plus anciennes de France avec une mise en service respective en 1987 et 1990. Ce sont celles-ci qui font l'objet depuis le début des années 2000 de programmes pluriannuels de renouvellement.

Le Syndicat Mixte des Transports en Commun (SMTC) est l'Autorité Organisatrice des Transports du Territoire de Grenoble-Alpes Métropole. L'exploitation de ce réseau est confiée depuis 1975 à la société SÉMITAG par un contrat de Délégation de Service Public.

La ligne A est longue de 12.7 km, compte 29 stations et dispose d'un parc de 13 rames Alstom Citadis 402 et 16 TFS. Sa vitesse commerciale est de 17 km/h. Elle traverse les communes d'Echirolles, Grenoble et Fontaine entre les stations Echirolles Denis Papin et Fontaine La Poya dans un tissu urbain plus ou moins dense. L'aménagement est multiple sur cette ligne. On y trouve des sections avec des aménagements en « minérale » (pavés et dalles), en enrobé type BBSG, et enfin d'aménagements à caractère « végétal » (gazon, stabilisé). Cette ligne dépend du dépôt d'Eybens. La fréquentation moyenne est d'environ 22.5 millions de voyageurs par an. À la suite de plusieurs études préalables, la ligne A, première ligne de l'agglomération, sera prolongée de deux stations depuis son actuel terminus Denis Papin et desservira la commune du Pont-de-Claix d'ici à la fin de l'année 2019.

La ligne B est longue de 10.5 km, compte 22 stations et dispose principalement d'un parc de 25 rames Alstom Citadis 402, et plus rarement des TFS. Elle traverse les communes de Grenoble, La Tronche, Saint Martin d'Hères, et Gisères entre les stations Cité internationale et Plaine des sports. L'aménagement est multiple sur cette ligne. On y trouve des sections avec des aménagements en « minéral » (pavés et dalles), en enrobé type BBSG, en gravillons ou ballasts, et enfin des aménagements végétalisés type gazon. Cette ligne est exploitée depuis le centre de maintenance des tramways de Gières. La fréquentation moyenne est d'environ 15.4 millions de voyageurs par an. Une extension de cette ligne, d'environ 1,6 km,

a été réalisée entre 2012 et 2014. La ligne B compte donc deux nouvelles station, CEA – Cambridge et Presqu'île, depuis le 1er Septembre 2014.

Figurant parmi les réseaux à disposer de la plus longue expérience tramway en France, le SMTC met en œuvre depuis le début des années 2000 une stratégie patrimoniale fondée sur des diagnostics réguliers de son réseau et des programmes pluriannuels de gros entretien des voies, dont le dernier en date court sur la période 2018 – 2021, avec des programmations de travaux pouvant aller jusqu'en 2023.

Ces inspections ont pour objectif de dresser des plans de renouvellement pluriannuels généralement 4 ans. La grande particularité de la stratégie adoptée par le réseau Grenoblois est que les interventions sur les infrastructures de voie ferrée sont effectuées avec le minimum d'impact sur la circulation du tramway. Les travaux s'opèrent en principe de nuit et sous exploitation.

Pour les chiffres, le coût du programme 2018 – 2021 est d'environ 8 M€. Cela comprend le coût de remplacement d'appareils de voie et le remplacement des rails avec consolidation éventuelle de la voie. Le coût au mètre linéaire de voie simple (hors appareils de voie) est de 2 315 €/mlvs ; soit deux fois plus élevée qu'une pose de voie neuve.

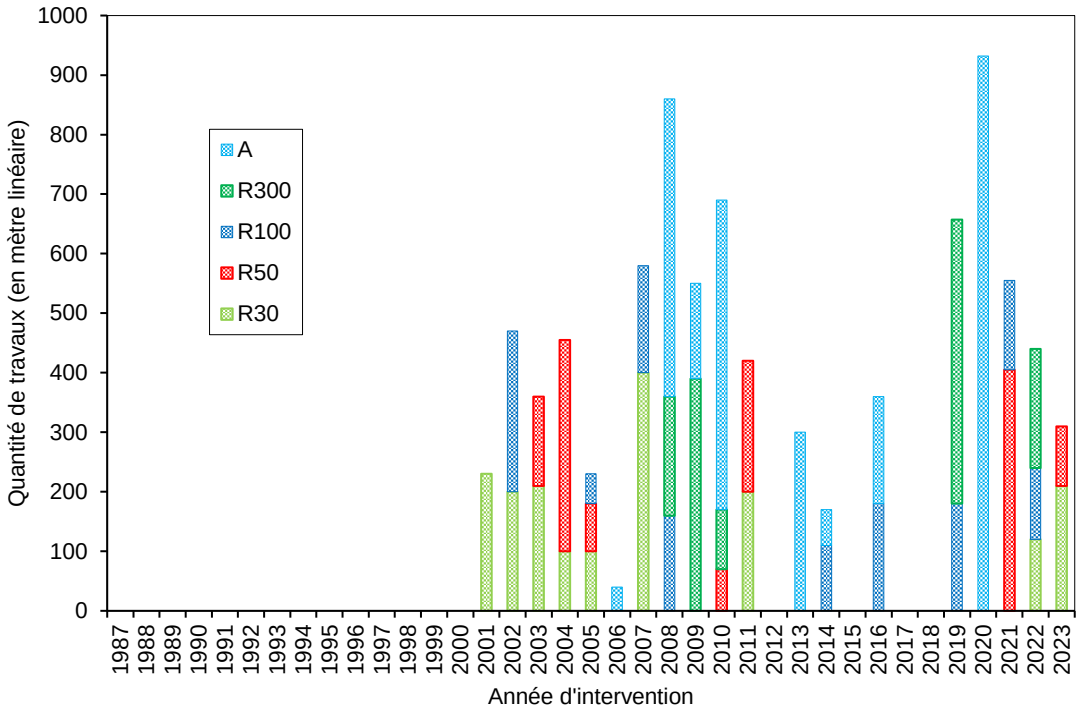


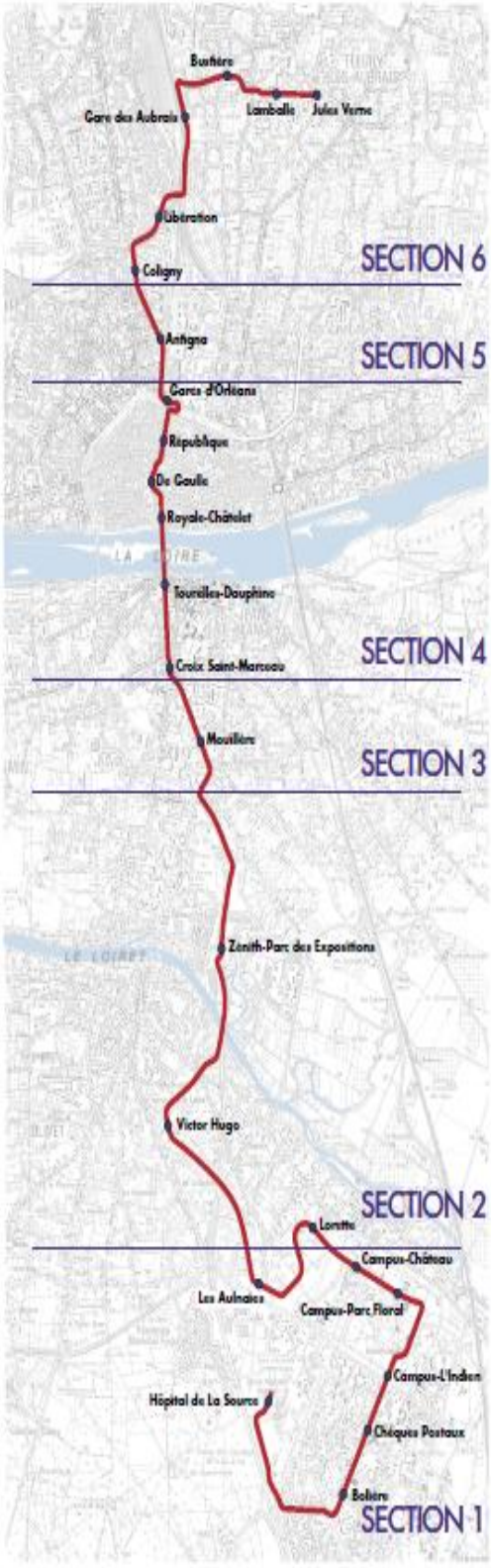
Figure 62 : Historique des travaux de remplacement des rails avec consolidations éventuelle de l'assise sur la ligne A et travaux prévisionnels 2018 - 2023

Le renouvellement de la portion sud de la ligne A du tramway d'Orléans

La Communauté d'Agglomération Orléans Val de Loire (AgglO) est l'Autorité Organisatrice de Transports sur son territoire. Outre de nombreuses lignes de bus, le réseau de transports (TAO) compte deux lignes de tramway : la ligne A en service depuis novembre 2000 et la ligne B plus récente en service depuis juin 2012. L'exploitation de ce réseau a été confiée en 2012 par un contrat de Délégation de Service Public à la société Keolis pour une durée de 7 ans. A la mise en service, l'exploitation était assurée par Transdev.

La ligne A est longue de 18 km, compte 25 stations et dispose d'un parc de 22 rames Alstom Citadis 301 et 302. Elle traverse l'Agglomération d'Orléans du Nord au Sud entre les stations Hôpital La Source et Jules Vernes dans un tissu urbain plus ou moins dense. L'aménagement est minéral dans les sections centrales 3 et 4, mixte entre minéral et végétal dans les sections 5 et 6 et à caractère affirmé « végétal » dans les sections 1 et 2 (gazon, ballast, stabilisé). Elle dispose d'un dépôt d'exploitation au terminus Hôpital de La Source. Elle se caractérisait à l'origine par une vitesse commerciale élevée (vitesse d'exploitation à 80 km/h sur la section à proximité de la station Zénith-Parc des Expositions).

A compter de 2010, des dégradations matérielles des installations de cette ligne sont apparues dans la zone sud de la ligne et ont entrainé des expertises sur l'état de la voie et la réalisation de travaux provisoires sur les sections 1 et 2 entre Zénith-Parc des Expositions et Hôpital La Source. Afin de maintenir l'exploitation de la ligne, des mesures drastiques d'exploitation en mode dégradé ont été prises par l'AgglO : baisse de la vitesse commerciale et affectation de services de rames complémentaires (Citadis 302 plus agressives pour la voie).



Quelques chiffres sur le renouvellement – période de travaux estivaux 2017

Age au renouvellement : 17 ans

Consistance des travaux : Remplacement des rails avec consolidation des supports (4692 mètres linéaires de rail et 12614 point d'ancrage à remplacer)

Coût : 4,5M€ soit un coût de 1918€ par mètre linéaire de voie simple (mlvs) sans compter le coût de la mise en place de navette substitution (fréquence de 10min, 7000 voyageurs quotidiens)

Coupure d'exploitation complète : 6 semaines d'interruption

Avantage : remise en état des installations permettant la restitution des vitesses nominales de 20km/h à 70km/h soit 2 minutes gagnées et 6% de temps de parcours.

5.1.2. LA GESTION DES INFRASTRUCTURES DE TRAMWAYS

La gestion des infrastructures de tramway désigne la manière dont sont organisées les activités de conception, réalisation, exploitation et maintenance des infrastructures. L'organisation de ces différentes activités varie selon les réseaux et les pays.

5.1.2.a *Différents schémas organisationnels*

En France, la loi n°82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs, dite « LOTI » est la loi de référence pour l'organisation des transports et des activités sous-jacentes. Elle confie, sauf pour le cas particulier de l'Île-de-France, la responsabilité de l'organisation des transports publics aux collectivités locales également appelées Autorités Organisatrice (des Mobilités ; ex- des Transports). En France, il existe 3 niveaux d'administration territoriale : la commune, le département et la région, l'Etat assurant la coordination du système de transports au niveau national.

Les communes disposent de la compétence pour l'organisation et l'exploitation des transports urbains. Dans 80% des cas selon l'UTP, elles transfèrent cette compétence à des structures de coopération intercommunale (Communautés Urbaines, Communautés d'Agglomération et Métropoles, notamment) spécialement constituées pour l'organisation des transports urbains ou chargées également de la gestion d'autres services publics. Les structures de coopération intercommunale sont généralement propriétaires d'une grande partie du matériel roulant et des infrastructures. Elles assurent l'organisation des transports des transports sur leur territoire qui constitue le Périmètre de Transport Urbain (PTU).

La législation française et le règlement européen 1370/2006 sur les obligations de service public (ROSP) prévoient que les autorités organisatrices ont le choix de leur mode de gestion. Elles peuvent décider d'externaliser l'exploitation du service public en mettant en concurrence leur contrat de transport public (concessions ou marché public) ou de l'attribuer directement à un « opérateur interne », qui peut être une régie ou une Société Public Locale (SPL). Quel que soit le mode de gestion choisi, l'exploitation de l'ensemble du réseau qui exploitent plusieurs modes de transports est généralement confiée à un unique opérateur, y compris pour les réseaux qui exploitent plusieurs modes de transport : bus, tram, métro. L'opérateur bénéficie d'un droit exclusif pour l'exploitation de la totalité du réseau.

Le Règlement OSP de 2007 rend obligatoire la passation d'un contrat de service public dès lors que des compensations pour obligation de service public sont versées ou qu'un droit exclusif est accordé et ce, quel que soit le mode de gestion.

Il impose une durée limitée aux contrats de service public : dix ans pour les services d'autobus et d'autocar, quinze ans pour le métro, le tramway et le chemin de fer et quinze ans pour les contrats portant sur des modes routiers et ferrés. En fonction des investissements effectués par l'opérateur, la durée du contrat peut être plus longue de 50% au maximum.

Enfin, le Règlement OSP prévoit l'obligation pour l'autorité organisatrice de rendre public, une fois par an, un rapport permettant de contrôler et d'évaluer l'efficacité, la qualité et le financement du réseau de transport public, et ce quel que soit le mode de gestion.

Lorsqu'elles choisissent d'externaliser l'exploitation de leur réseau de transport public, les autorités organisatrices disposent de deux possibilités : la concession de services (qui peut être une délégation de service public) et le marché public. Dans la plupart des cas en France, la concession est le mode privilégié. Ce dernier prend en charge le risque industriel et tout ou partie du risque commercial. Il est donc directement associé à l'amélioration de la qualité de service et à la fréquentation du réseau ; sa rémunération provenant au moins en partie directement des voyageurs.

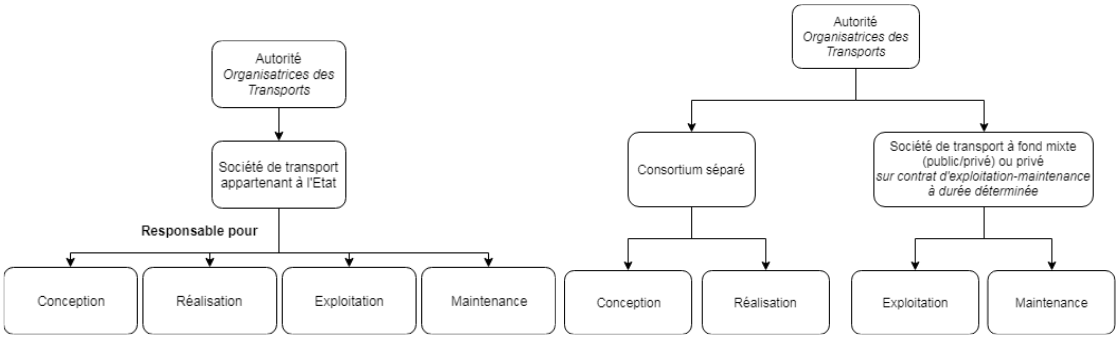


Figure 63 : Les modes de gestion principaux en France : le fonctionnement en Régie (à gauche, le cas de l'Île-de-France ; les autres régies en France sont détenus par les collectivités ; à droite, le mode de gestion favorisé pour les collectivités locales).

Notons que dans le cas d'un fonctionnement en Régie, la responsabilité de la société de transport pour la conception et la réalisation passe généralement par la coordination et le contrôle technique des études prises en charge par des bureaux d'études externes.

5.1.2.b *Pluralité des acteurs au cours du cycle de vie des équipements*

De la naissance d'un projet à sa réalisation puis son exploitation, de nombreux acteurs interviennent dans la vie d'un ouvrage. Cette multiplicité des acteurs au cours du cycle de vie engendre une certaine complexité or garder les choses simples pour les responsables de la maintenance contribue à garantir que le système sera entretenu et restera en bon état. Trop souvent, les concepteurs et les constructeurs se concentrent uniquement sur la réalisation du projet sans accorder suffisamment d'attention aux intérêts des futurs responsables de la maintenance. Parfois les porteurs de projet eux-mêmes supposent que la contribution des mainteneurs au projet n'est pas nécessaire, notamment lorsqu'il s'agit de la première ligne et qu'aucun opérateur soit déjà présent. Dans le cas d'un nouveau système ne disposant donc pas encore d'organisation de maintenance, les concepteurs peuvent alors être le mieux placé pour concevoir le programme d'inspection et de maintenance. Mais ceux-là comme les autres devront faire face à la multiplicité des acteurs :

L'Autorité Organisatrice des Transports imagine, organise et finance les transports publics sur son périmètre des transports urbains (PTU). Elle porte la vision globale des transports et son activité principale est la planification, la communication et la coordination des différents acteurs publics ou privés des transports publics urbains.

Le ou les maîtres d'ouvrage d'un projet de transport interviennent pour la gestion d'un projet de transport. Cette compétence peut être gérée de manière internalisée par l'AOT ou déléguée à une entreprise privée en charge pour le compte de l'AOT de la maîtrise d'ouvrage déléguée. Le maître d'ouvrage lance les appels d'offre, concerte avec les élus, gère les contrats et à en charge la conception et la réalisation de l'insertion urbaine et du système dans la ville.

Le gestionnaire d'infrastructure opère sous l'autorité du Maître d'Ouvrage. Il s'agit de la personne en charge de la surveillance, du suivi et de l'entretien des ouvrages. Il lui fournit les données et les documents de synthèse nécessaire à l'établissement de sa politique de gestion. Il lui appartient en autre d'informer le Maître d'Ouvrage de l'état réel de l'ouvrage et de l'entretenir. Le gestionnaire d'infrastructure peut très bien être une structure interne à l'AOT, lui-même MOA ou bien une structure hybride avec une répartition des rôles entre l'AOT et l'opérateur. On peut citer à titre d'exemple les Société d'Economie Mixte (SEM) ou les Sociétés Publiques Locales (SPL) qui sont détenues majoritairement par des fonds publics avec la présence d'un partenaire privé.

Le ou les maîtres d'œuvre d'un projet de transport agissent pour le compte du maître d'ouvrage, lequel a délégué la conception et la réalisation de l'insertion urbaine et du système dans la ville. Les maîtres d'œuvre réalisent les études techniques et financières, assistent le maître d'ouvrage dans la passation des contrats de travaux, vérifient la conformité des études d'exécution ainsi que la réalisation des travaux en lien avec les entreprises titulaires de marché. Ils peuvent en phase d'exploitation-maintenance intervenir pour des modifications du système ou en tant qu'auditeur technique pour le compte du gestionnaire d'infrastructures.

Les constructeurs ou entreprises titulaires de marché sont les entités chargées de réaliser des prestations d'ordre matériel, logiciel ou intellectuel dans le cadre d'un contrat avec la Maîtrise d'ouvrage mais qui sont pilotés par les maîtres d'œuvre. En fonction du contrat les entreprises titulaires peuvent être amenées à être responsable de la conception détaillé et/ou de la réalisation et de l'exécution des travaux des sous-systèmes correspondant au périmètre de leur marché.

L'exploitant est l'entité qui assure le transport de voyageur, la circulation des matériels roulants, l'exploitation des installations et la sécurité en exploitation. Dans le cas où un exploitant est déjà présent sur le réseau, il peut être amené à formuler des avis sur les études et en produire.

Le mainteneur est l'entité en charge de la maintenance des équipements, généralement il s'agit de la même entité que l'exploitant. En phase projet, il peut également être amené à formuler des avis sur les études et en produire.

Le STRMTG est l'organe étatique chargé d'approuver les projets de transport du point de vue de la sécurité. Ils ont un rôle de contrôle des procédures d'exploitation et de maintenance pratiquées sur les

différents réseaux en France ; notamment par le biais de l'approbation du Règlement Sécurité de l'Exploitation (RSE) à la charge de l'opérateur des transports.

Les gestionnaires de voirie opèrent sous l'autorité de l'AOT si les communes de son périmètre ont transmis la compétence voirie ce qui n'est pas nécessairement le cas. Dans le cas où l'AOT ne dispose pas de la compétence voirie, elle joue un rôle de coordinateur avec les différents services techniques en charge de la voirie. Les interfaces sont alors nombreuses pour la gestion des carrefours et les abords des voies. En carrefour, la question de la domanialité peut parfois aboutir à ce qu'il existe plusieurs mainteneurs. Les interventions de maintenance lourde devant nécessité un balisage doivent nécessairement être soumis au(x) gestionnaire(s) de voirie.

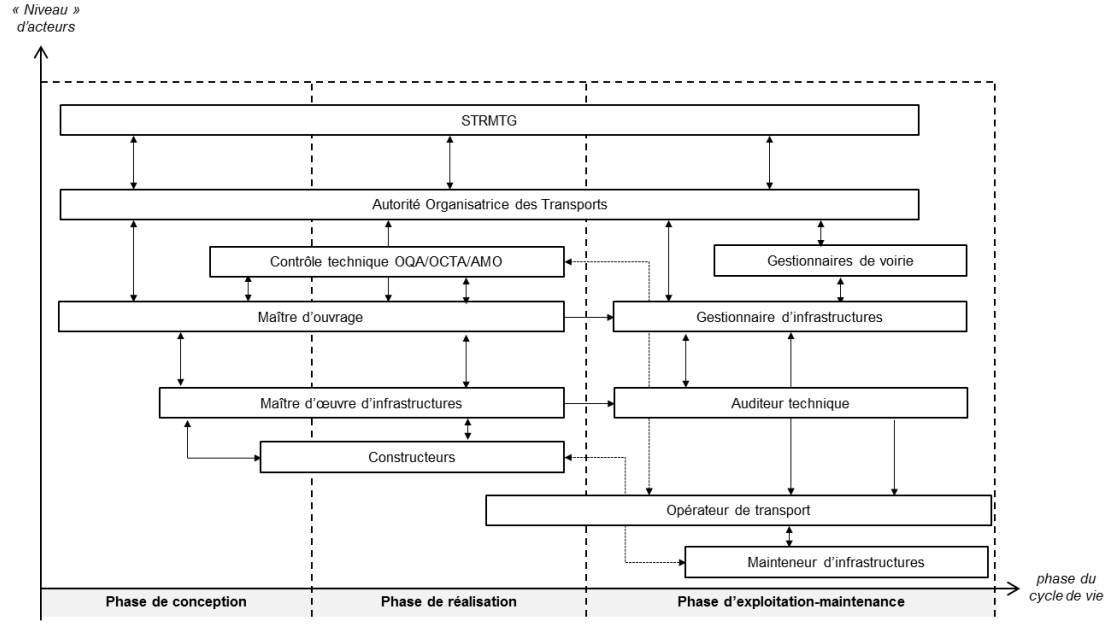


Figure 64 : Organigramme des principaux acteurs en lien avec la gestion des infrastructures

5.1.2.c *L'absence de codification technique de la maintenance*

D'abord, rappelons que si le tramway renait sous l'impulsion de l'Etat avec le concours Cavaillé en 1975, on attribue son essor et son développement à la dynamique de décentralisation des villes françaises à partir de 1982 (Le Tourneur, 2018). En fait, si l'Etat incite, il ne contraint pas (Mazoyer, 2018) ; si bien que le tramway s'est développé sans autorité technique centrale à l'image des services techniques de l'état pour les ponts, les routes ou le ferroviaire. Ce n'est qu'à partir de 2001 que le Service Technique des Remontées Mécaniques (STRM) voit ses compétences élargies au domaine des transports guidés et devient le STRMTG, et en 2004 il est habilité à délivrer des certificats de conformité.

Il n'y a donc pas eu à l'émergence du tramway d'organisme chargé de formaliser des règles et standards minimums à respecter. Bien sûr, les premières lignes de tramway se sont appuyées sur des expertises, notamment en provenance de pays qui n'avaient pas abandonné le tramway ou des expertises issues du ferroviaire lourd (RATP et SEMALY principalement) mais il n'y a pas eu à l'origine une autorité technique centrale à l'image de la SNCF, du SETRA (devenu CEREMA) ou encore les anciens services des Ponts

et Chaussées. Les similitudes de principe avec le ferroviaire ne sauraient occultées les spécificités de ce mode de transport urbain plus légers :

- une plus grande diversité de type de pose de voie (i.e. voie végétalisé, voie encastrée, …),
- mode d'exploitation privilégiant la conduite à vue,
- diversité dans les priorités aux feux, variétés des limites de vitesses, géométrie du tracé, rayon de courbure et pente plus serrées ou plus raides,
- diversité des matériels roulants qui sont par ailleurs plus légers au poids par essieux,
- proximité avec les zones riveraines, les habitations, et les modes doux, …
- partage de la voirie avec les modes routiers, …
- approche paysagère, personnalisation des matériels roulants, soucis esthétique des aménagements urbains, …

Ces différences avec le mode ferroviaire lourd mais aussi entre les différents systèmes de transport guidés urbains eux-mêmes a rendu difficile la régulation et l'homogénéisation des pratiques de conception et de maintenance comme en témoignent les résultats de l'enquête réalisée pour le projet européen URBAN TRACK (2006 – 2010). Si effectivement, la plupart des tâches de maintenance sont homogènes, les tolérances admissibles et pratiques varient fortement. En France, si le STRMTG doit approuver le Règlement Sécurité de l'Exploitation, il assure surtout une mission de sécurisation des espaces publics et des usagers. Très porté sur les questions de conception à ses origines qui remontent à 2003, on observe depuis quelques années une préoccupation accrue du STRMTG sur les questions de maintenance dite « sécuritaire ».

La conduite d'une démarche de « retour d'expérience » qui consiste selon (Legros, 2009) à se mettre « à l'écoute des signaux provenant de l'installation » et à se saisir de tout accident, incident, anomalie pour en retirer le maximum d'enseignements est donc de fait laisser à la charge des réseaux eux-mêmes. Or, il existe de grandes disparités dans les capacités d'action des gestionnaires d'infrastructure qui peinent à se mobiliser collectivement pour construire cette démarche de retour d'expérience à une échelle nationale.

5.2. STRATEGIE DE MAINTENANCE DES VOIES FERREES DE TRAMWAY

L'infrastructure est le sous-système ayant la plus grande influence sur le processus d'exploitation-maintenance des matériels roulants y circulant (Restel & Wolniewicz, 2017). Elle se distingue par de fortes contraintes urbaines (bruits, riverains, trafic routier) et de fortes contraintes d'exploitation quand il s'agit de la renouveler.

En effet, comme toutes les installations industrielles, les installations de voie doivent être entretenues. La géométrie de la voie est soumise à des sollicitations statiques et dynamiques, dues au charges de trafic, aux influences climatiques et à d'autres sollicitations extérieures (chimiques, ou en rapport avec la végétation) (CF. PARTIE I). Selon leur utilisation et les sollicitations auxquelles ils sont soumis, les éléments constitutifs de la voie ont une durée de vie limitée, à l'issue de laquelle ils doivent être remplacés/renouvelés.

La stratégie adoptée par les réseaux est généralement une maintenance préventive qui repose fondamentalement sur les actions des acteurs suivants :

- les opérateurs qui sont amenés à réaliser des actes de surveillance et de maintenance dite de sécurité mais peuvent aussi être chargé de la maintenance dite « patrimoniale ». C'est d'ailleurs le cas pour l'ensemble des réseaux rencontrés : Strasbourg, Lyon, Nantes, Grenoble, Orléans et Bordeaux.
- les Autorités Organisatrices des Transports qui par leur rôle de gestionnaire d'infrastructure pilote le suivi des actifs et missionnent ponctuellement des expertises externes pour auditer leur réseau,
- les bureaux d'études qui par le biais d'appels d'offre sont missionnées pour conduire des inspections.

5.2.1. LES ACTES DE SURVEILLANCE

Les actes de surveillance sous-tendent l'existence d'un contrôle réalisé sur un matériel. Le contrôle selon l'AFNOR désigne la vérification de la conformité par rapport à des données préétablies. Au sens strict du terme, cette activité nécessite la définition de critères pour décider la conformité du matériel. Pour les infrastructures de tramway, la quasi-totalité des contrôles sont non-destructifs et relèvent principalement d'inspection visuelle pour la détection des symptômes visuels. Les contrôles visuels sont généralement réalisés par les agents d'exploitation : les conducteurs et les agents de maintenance au moment d'une inspection périodique ou inopinée. Quelques contrôles nécessitent l'utilisation d'appareils de mesure, on parlera alors de symptômes dits « mesurés » ou « calculés » en référence aux travaux de (Peyras, 2003). Les gestionnaires réalisent généralement au moins une inspection annuelle périodique sur leur réseau. Les contrôles destructifs peuvent être nécessaires dans les cas très rare où des défauts importants de la plateforme de fondation sont détectés. Ces contrôles sont réalisés par des bureaux d'étude spécialisés en géotechnique.

Tableau 31 : Influence des paramètres voie-véhicule sur le déraillement, l'usure des roues et des rails, les bruits et le confort de roulement (traduit par l'auteur de (Transit Cooperative Research Program, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2006))

Causes et effets redoutés	Déraillement	Usure des roues	Usure des rails	Bruits	Confort de roulement
Influence des paramètres liés au véhicule					
Roues non motrices	Effet minimal	Effet minimal	Effet minimal	Aucun effet	Aucun effet
Diamètre de roue réduit	Effet évitable	Effet augmenté	Effet augmenté	Effet augmenté	Aucun effet
Variation du diamètre de la roue	Effet minimal	Effet minimal	Effet minimal	Aucun effet	Effet minimal
Parallélisme	Effet direct	Effet direct	Effet minime	Aucun effet	Aucun effet
Influence des paramètres liés au profil de roue					
Angle d'attaque	Effet direct	Effet direct	Effet minimal	Effet minimal	Aucun effet
Rayon intérieur de boudin[26]	Effet direct	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet
Hauteur de boudin	Sécurité supplémentaire	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet
Largeur du bandage	Effet évitable	Effet minimal	Effet minimal	Effet minimal	Aucun effet

[26] Côté rail de guidage

Causes et effets redoutés	Déraillement	Usure des roues	Usure des rails	Bruits	Confort de roulement
Rayon extérieur de boudin[27]	Effet direct	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet
Largeur de boudin	Effet indirect	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet
Rayon de la bande de roulement	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct
Influence d'autres paramètres liés au véhicule					
Fixation des bogies centraux	Effet probable minimal	Possible effet minimal	Possible effet minimal	Aucun effet	Aucun effet
Position des suspensions secondaires	Effet minimal	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet
Amortissement inter-caisse	Effet direct	Effet bénéfique	Effet bénéfique	Effet bénéfique	Effet bénéfique
Rigidité de la suspension primaire	Effet direct	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Effet direct
Utilisation du roulement sur boudin[28]	Effet réduit	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Effet direct
Lubrification	Effet minimal	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Aucun effet
Influence des paramètres liés à la voie					
Tolérance du gauge	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct
Dégorgement du rail	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Aucun effet
Influence d'autres paramètres liés à la voie					
Utilisation de voie tangente plus étroite	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct
Courbe de faible rayon	Effet probable	Effet important	Effet important	Effet important	Effet probable
Elargissement du gauge en courbe	Effet probable	Effet important	Effet important	Effet important	Effet probable
Voie tangente de transition entre courbes	Effet probable	Effet probable	Effet probable	Aucun effet	Aucun effet
Utilisation de contre rail	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Effet direct	Aucun effet
Conception de l'interface aiguille - rail	Effet direct	Aucun effet	Effet local	Effet local	Effet local
Contre-rails	Sécurité supplémentaire	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet
Rails noyés	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Effet direct	Aucun effet

5.2.1.a *Les symptômes mesurés*

> Les symptômes mesurés issus de l'auscultation d'une voie ferrée sont obtenus à partir d'un instrument d'auscultation et correspondent donc à des mesures (Peyras, 2003).

En tramway, le critère de remplacement des rails est principalement l'usure, contrairement au ferroviaire dit « lourd » où la fatigue du contact roulant est un critère majeur : apparition de défauts internes (fissures) en fonction du tonnage supporté. En effet, le tramway se distingue par des matériels roulants plus légers (charge maximale par essieu). Les casses de rail, qui interviennent à l'issue d'un mécanisme de fatigue vu au chapitre 2 sont donc plus rares, et souvent de gravité moins importante car en tramway un rail cassé reste toujours maintenu par la plateforme (le système revêtement + béton de calage).

[27] Côté opposé au rail de guidage

[28] Pour le passage d'un appareil de voie, la roue prend appui sur son boudin. Il s'agit d'une caractéristique standard pour les tramways.

Les principaux paramètres géométriques du rail pour en mesurer son usure sont présentés sur la figure ci-dessous :

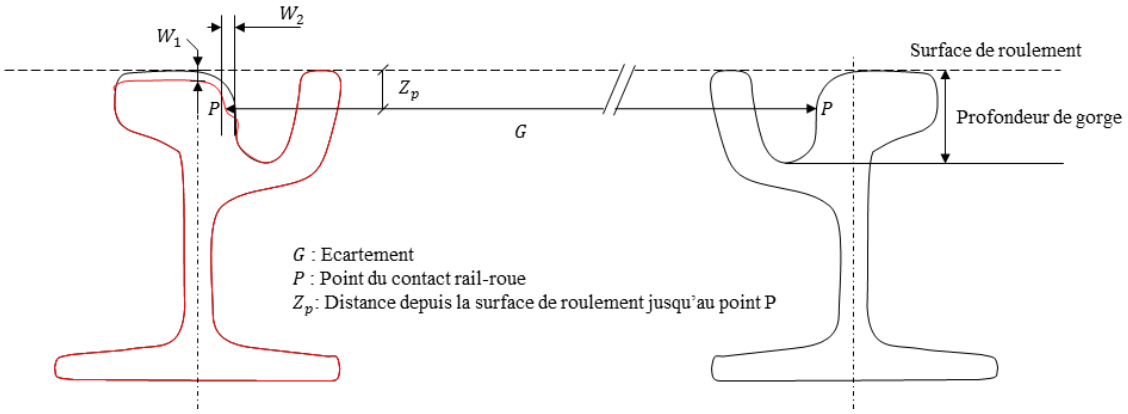


Figure 65 : Profil de rail usé avec usure latérale (W2) et verticale (W1) et déformation du champignon du rail (à gauche) ; Profil de rail nominal (à droite).

Le point P correspond ainsi au point contact rail-roue sur la face active du champignon du rail. Le second est situé sur la table de roulement. Il s'agit d'une abstraction puisque la théorie de Herz (voir en annexe) montre que le contact rail-roue est en réalité de forme elliptique.

La position du point de contact P dépend principalement du rayon de congé des rails. Dans le cas de Grenoble où une inspection de la voie a été réalisée (chap. 6), Zp est fixé à 13 mm. W1 et W2 correspondent respectivement à l'usure verticale et latérale du champignon du rail. De la même manière, il peut être mesuré W3 et W4 qui correspondent eux à l'usure verticale et latérale de la bavette du rail à gorge.

Enfin l'écartement G mesure le gauge, c'est-à-dire l'écartement nominal ajusté de l'usure des rails. Il s'agit donc d'une mesure qui nécessite de prendre la mesure sur le fil de rail opposé. On notera qu'une règle à écartement peut être nécessaire pour la mesure si il le profilomètre utilisé ne le permet pas.

5.2.1.b *Les symptômes visuels*

> Le moyen de détection associé aux symptômes visuels est l'observation visuelle de l'expert ou de l'exploitant. Les symptômes visuels correspondent donc à des anomalies perceptibles à l'œil (Peyras, 2003).

L'observation visuelle est à l'origine de la détection de la majeure partie des défauts et désordres de la plateforme de voie ferrée. L'inspection visuelle tient donc une place prioritaire dans le dispositif de surveillance des réseaux de tramway. Un symptôme visuel possède un caractère nécessairement subjectif lié à l'observation de l'exploitant ou de l'ingénieur spécialisé. Le constat de tels symptômes peut alors conduire à des investigations plus poussées, permettant alors d'obtenir de nouveaux symptômes (mesurés ou calculés) plus précis et d'interprétation plus aisée.

Les symptômes visuels sont décrits plus en détail au chapitre 2 et 3 ainsi qu'au §5.3 du présent chapitre. D'une manière générale, les symptômes visuels correspondent aux défauts et désordres de surface au niveau des interfaces entre les composants :

- l'état du joint rail-revêtement,
- l'état des bordures du Gabarit Limite d'Obstacle généralement matérialisé par un changement de revêtement ou de matériaux puisque le STRMTG impose une ligne visible de démarcation,
- l'état des assainissements,
- l'état des revêtements,
- l'état des interfaces entre le revêtement et tout type d'émergence, caniveaux ou regards de visite.

Les inspections visuelles de la voie peuvent aussi donner lieu à observer les poteaux LAC, les fils de contacts, les armements, les appareils de voie, les rails APS, etc.

5.2.2. LES ACTES DE MAINTENANCE : FREQUENCE, CONSISTANCE ET SEUILS DE DECLENCHEMENT

Si les pratiques de maintenance au sens des actes réalisés sont homogènes entre les réseaux, leurs fréquences, leurs consistances et leurs seuils de déclenchement ou tolérances constituent généralement des informations sensibles, trop rarement partagées. Nous livrons ici une synthèse des informations collectées au cours de nos recherches, principalement issue des guides techniques étrangers et de nos travaux d'enquête auprès des réseaux français :

- le guide allemand (du BOStrab) : (Snowdon & Eng, s. d.)
- le guide américain (du TCRP) : (TCRP, 2012)
- la proposition pour un standard européen issu du projet URBAN TRACK : (Kopf et al., 2010)
- et nos propres recherches réalisées auprès des réseaux français, en particulier pour les fréquences de maintenance.

5.2.2.a *Les tâches de maintenance courante*

Les tâches de maintenance courante désignent les opérations de petit entretien du type graissage, nettoyage et parfois réglage. Elles correspondent aux tâches de maintenance de niveau 1 et 2 définies au chapitre précédent. Ces tâches sont confiées par le gestionnaire d'infrastructures à l'opérateur du réseau qui peut en déléguer une partie à des entreprises spécialisées, notamment le nettoyage et le gardiennage de la voie et ses abords. La maintenance à portée sécuritaire est internalisée et effectuée par des techniciens formés aux contrôles et inspections détaillées des équipements critiques tels que les aiguillages, les appareils de dilatation ou encore les dispositifs de fin de voie. Enfin, la maintenance dite patrimoniale consiste généralement à l'exécution de tâche de maintenance corrective légère comme le remplacement de joint, la reprise de fissures légères ou le nettoyage des dispositifs de drainage.

Le nettoyage des gorges des rails

A moins que la pente de la voie ne soit suffisamment raide pour que le ruissellement des eaux pluviales évacue les débris hors de la gorge quand elle ne provoque pas le colmatage du système de drainage (drains, boîtes à eau, caniveaux), la gorge se remplira de toutes sortes de détritus provenant de la rue et des matériels roulants (sable, graisse). Bien que cette pollution ne présente qu'un risque mineur d'endommager les roues, le véritable danger est de compromettre l'isolement électrique des rails en générant des courants parasites (autrement appelés courants vagabonds) et de perturber les infrastructures équipées de circuits

de voie. Par temps de gel, la pollution accumulée en masse peut également être à l'origine d'un déraillement.

La reprise des joints et le colmatage de fissures

Avec le temps, sous l'effet des diverses sollicitations mécaniques et climatiques, des bris et fissures apparaissent à la surface du revêtement avec le danger de compromettre la relative étanchéité de la plateforme de voie ferrée. Si les fissures restent trop longtemps ouvertes, le danger est que l'eau pénètre dans la sous-couche et entraine la destruction de la plateforme au fil du temps.

La détection des courants vagabonds

La détection des courants vagabonds et la prise de mesures correctives associés à un stade précoce peut faire économiser le coût d'une reconstruction majeure de la voie. Très souvent sous-estimée par les gestionnaires d'infrastructure quand elle n'est pas totalement ignorée, les courants vagabonds peuvent endommager profondément les infrastructures. Les signes de détection visible à l'œil nu sont l'effritement de la surface de béton, de fausses indications du système de détection des véhicules par la signalisation ou l'observation d'arcs électriques mineurs par temps humide. Les drains de voie sont des endroits susceptibles de provoquer des fuites de courants vagabonds et nécessitent donc d'être inspectés et nettoyés régulièrement. Les courants vagabonds peuvent prendre plusieurs années avant de devenir un danger ; ainsi des inspections régulières doivent être conduites. Notons que cette détection dépend surtout des équipes de maintenance associées aux contrôles des équipements de traction électrique.

Les contrôles géométriques

La voie et appareils de voie sont inspectés régulièrement par les équipes de maintenance de voie ferrée. Les principaux paramètres sont indiqués au §5.2.1.a ; il s'agit principalement de mesurer l'écartement des voies, l'usure des rails et de réaliser la maintenance sécuritaire des appareils de voie, des ornières porteuses et des appareils de dilatation.

Tableau 32 : Les tâches de maintenance courante et leur fréquence

Composant	Description	Fréquence
Voie courante	Nettoyage de la plateforme	1 fois par semaine à 1 fois par mois
	Tournée en cabine	1 fois tous les 3 mois
	Tournée à pied	1 fois tous les 6 mois
Voie en courbes	Contrôle de géométrie 25<R<30	1 fois tous les 6 mois
	Contrôle de géométrie 30<R<50	1 fois par an
	Contrôle de géométrie 50<R<100	1 fois tous les 2 ans
	Graissage des courbes	A la demande
Taquets d'arrêt	Nettoyage, vérification et graissage	1 fois par an
Rails	Nettoyage haute pression de la table de roulement	de 1 fois par jour à 1 fois par an
	Curage des fonds de gorge du rail	3 fois par an
	Reprise d'ornière porteuse	1 fois par an

Composant	Description	Fréquence
Dispositif de drainage	Nettoyage des assainissements (caniveaux, boîte à eaux, etc.)	1 fois par mois à 1 fois par an
Joint rail/revêtement	Nettoyage et remplacements éventuels des joints rails/revêtements	1 fois par an
Joint de dilatation	Nettoyage, vérification et graissage	1 fois tous les 6 mois
Revêtement	Gardiennage des surfaces engazonnées (tontes, désherbage, traitement)	Variable
Appareils de voie	Visite	1 fois tous les 4 mois
	Entretien détaillé	1 fois tous les 6 mois
	Nettoyage, vérification et graissage	1 fois par semaine
	Contrôle d'effort à la manœuvre	1 fois par an

5.2.2.b *Les tâches de maintenance ponctuelles*

Les tâches de maintenance ponctuelle correspondent aux actions de maintenance à partir du niveau 3. Elles sont déclenchées à l'issue d'une inspection et nécessitent des matériels et machines spécifiques. Il s'agit des interventions de meulage, reprofilage, rechargement et remplacement des rails et appareils de voie. Elles sont généralement exécutées par des entreprises spécialisées avec de fortes contraintes exportées sur l'exploitation, la voirie et les zones riveraines.

Le meulage des rails

Le meulage des rails est une opération couramment exécutée visant à restaurer le profil d'origine du rail ou la modification d'un nouveau profil pour mieux s'adapter aux roues. La clé de l'opération garantissant son efficacité consiste à adapter la roue au rail et ainsi optimiser le contact pour un transfert de charge optimal. Outre l'élimination des ondulations à la surface des rails et des bruits et vibrations associés, le meulage permet aussi de supprimer les défauts de surface provoqués par la fatigue des matériaux, de diminuer la résistance au roulement et d'améliorer la traction ainsi que les consommations énergétiques. Bien que cela puisse paraitre contre-intuitif, le fait de retirer de l'acier des rails par meulage allonge la durée de vie des rails, car les taux d'usure sont réduits si le contact rail-roue est optimisé. Un meilleur contact rail - roue permet également d'améliorer le shuntage du système de signalisation en diminuant la résistance électrique du retour de courant de traction entre les roues et les rails.

Certaines études suggèrent (TCRP, 2012) qu'un programme de meulage périodique bien exécuté permet d'allonger la durée de vie des rails de 30% ou plus. Le danger d'un meulage exécuté trop tardivement est que le métal durcisse, au niveau des creux générés par l'usure ondulatoire, à une profondeur trop importante en dessous de la surface de roulement. Dans ce cas de figure, même si un meulage correctif est réalisé, le motif ondulatoire se rétabli rapidement. La situation peut devenir difficile à maîtriser à tel point que le rail devra être remplacé à une fraction de sa durée de vie utile. En général, il est recommandé de meuler les rails avant que les ondulations n'apparaissent ou n'apparaissent que légèrement pour éviter le durcissement de l'acier sous l'ondulation.

Les fréquences de meulage doivent donc être adaptées à la situation locale. Cela nécessite une surveillance attentive des taux de croissance de l'usure ondulatoire par le biais d'un appareil de mesure spécialisé de

manière à pouvoir estimer le temps nécessaire pour que l'amplitude des ondulations n'augmente d'un facteur deux ou trois par rapport à une situation de référence (la croissance des ondulations est en grande partie exponentielle).

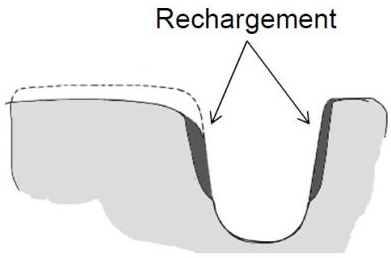
Le remplacement des rails

Un rail cassé dans une voie encastrée ne présente généralement pas autant de risques de déraillement qu'une voie dite « ouverte » (c'-à-d. sur ballast, ou sur dalle béton mais dépourvu de béton de calage et de revêtements de surface à l'entrevoie). Cependant une rupture interrompt le retour de courant de traction pouvant engendrer des fuites majeures de courants vagabonds. Dans ce cas rare, un câble de liaison doit être installé en attendant la réparation définitive.

La réparation d'un rail cassé ou le remplacement d'un rail usé dans une voie encastrée est une opération fastidieuse et coûteuse car elle nécessite le retrait du revêtement et parfois du béton de calage sur une distance importante afin de pouvoir installer un nouveau rail. L'intégrité des habillages des rails (les chambres d'éclissage et la semelle sous rail) doit également être restaurée pour garantir leur parfaite isolation mécanique et électrique avant que la chaussée ne soit elle-même restaurée.

Un rail prend généralement beaucoup de temps à s'user dans un environnement de trains légers (voir le chapitre 6 pour l'étude des durées de vie des voies sur un réseau français). Une usure importante ne sera généralement observée que dans courbes serrées ou aux endroits où les accélérations et les freinages sont intenses. Les stations et autres zones d'arrêt sont également concernées. Rappelons que les matériels roulants sont équipés de sablière accentuant l'usure abrasive des rails. L'utilisation de rail de nuances d'acier plus dures est recommandée pour ces zones à risque.

Rechargement des rails



Le rechargement consiste en un apport de métal au niveau de la face active du champignon du rail ou de la face intérieure de la bavette. On évite de recharger la table de roulement car elle est jugée peu efficace et aussi plus difficile à réaliser vis-à-vis de la restitution d'un profil de rail correcte. On privilégie des rechargements pour des marges d'usure modeste, inférieur à 4 mm. Au-delà, l'opération est possible mais moins durable dans le temps. C'est la raison pour laquelle, il faut considérer cette opération comme une intervention palliative permettant de gagner quelques années avant le remplacement du rail usé.

Tableau 33 : Les tâches de maintenance ponctuelle et leur fréquence

Composant	Description	Fréquence
Voie courante	Remplacement avec ou sans consolidation des composants supports de la voie	A la demande
Voie en courbes	Remplacement avec ou sans consolidation des composants supports de la voie	A la demande
Taquets d'arrêt	Remplacement	A la demande
Rails	Meulage préventif et reprofilage	1 fois tous les 3 ans
	Traitement anti-usure des courbes R<80	1 fois tous les 4 ans
	Traitement anti-crissement des courbes R<80	1 fois tous les 10 ans
	Remplacement	A la demande
Revêtement	Réparations ponctuelles des revêtements minéraux, des joints et des bordures	A la demande 1 fois tous les 5 ans pour 25% de surface (URBAN Track)
Appareils de voie	Remplacement	A la demande

5.3. CONTRIBUTION METHODOLOGIQUE POUR SYSTEMATISER LES INSPECTIONS DE LA VOIE FERREE

5.3.1. PRESENTATION DE LA SOLUTION LOGICIELLE LAMIA

Dans le cadre de nos travaux, nous avons conduit un premier diagnostic avec la solution logicielle LAMIA développée par ARTELIA à l'origine pour le suivi de l'état des digues. Cet outil est utilisé comme support de l'établissement d'un inventaire de données patrimoniales. LAMIA désigne un outil SIG (Qgis) disponible à la fois sur PC et tablette pour faciliter la saisie sur le terrain. LAMIA permet de suivre, de visite en visite, l'évolution des désordres, en rappelant les constats antérieurs et en permettant de comparer les photos ou encore les mesures effectuées.

L'environnement LAMIA est composé :

- d'un module Qgis qui est destiné à la collecte de donnée et la représentation cartographique dans un SIG,
- une tablette « tout terrain » équipée d'un GPS de précision pour la saisie des relevés terrains,
- d'une base de données en PostGIS (PostreGreSQL muni d'une extension cartographique) accessible sur un serveur en ligne ou SpatiaLite ou uniquement en local selon les besoins,

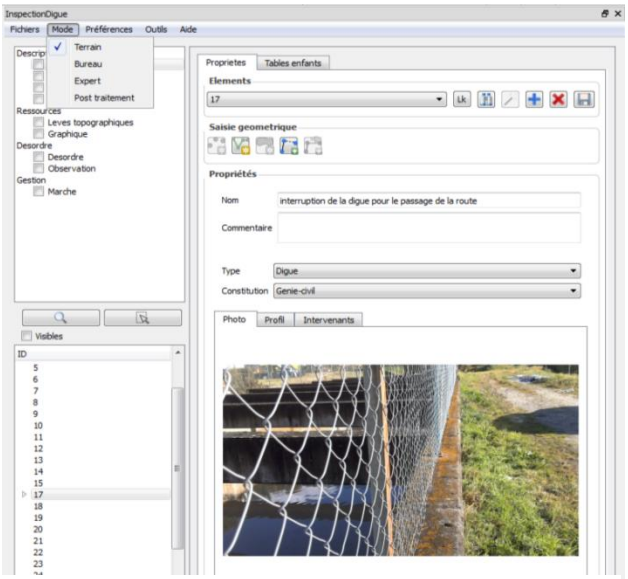


Figure 66 : Aperçu du module complémentaire sous Qgis (Source : ARTELIA)

Dans l'environnement LAMIA, la saisie des données repose sur un module complémentaire pour Qgis développé en langage python. Un mode terrain sur tablette et un mode bureau sur ordinateur sont disponibles.

Le mode terrain permet aux utilisateurs de compléter efficacement les relevés terrains, et notamment :

- de créer des tronçons pour les infrastructures linéaires,
- de référencer les désordres et les documenter par des observations, des photos, de saisir des croquis ou des graphiques à la main et même de faire des profils en long des ouvrages parcourus,
- de localiser les désordres sur la base d'une coordonnée GPS (prise via le GPS de la tablette ou à l'aide d'un GPS de précision connectée à celle-ci), ou sur la base du fond cartographique/cadastre affiché sur l'écran tactile,

Le rapatriement des données vers la base s'opère automatiquement lorsque la tablette est connectée.

Le mode bureau en revanche offre aux utilisateurs un environnement de travail plus adapté à l'analyse fine des données saisies. Il permet notamment :

- de consulter, modifier ou compléter les informations telles que représentées dans le SIG,
- de générer des synthèses et des rapports sur le linéaire et les éléments observés au cours des différentes campagnes (suivi de l'évolution des désordres),
- d'exporter les données sous différents formats, notamment en *.shp,

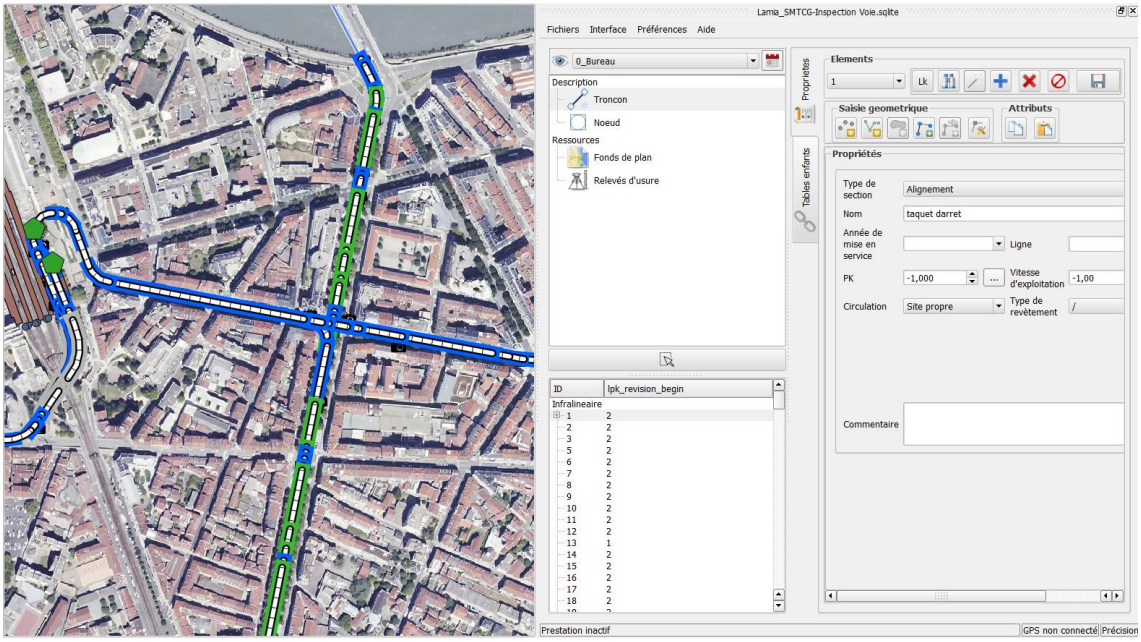


Figure 67 : Aperçu du module complémentaire sous Qgis (Source : ARTELIA)

5.3.2. DECOUPAGE DE LA VOIE FERREE EN TRONÇON HOMOGENE

Un des problèmes majeurs que pose un inventaire quand il s'agit d'une infrastructure linéaire est l'espace dans lequel est évaluée la vétusté. Autant pour un ouvrage ponctuel, il est possible de décomposer l'ouvrage en un assemblage de composants fonctionnellement homogènes puis d'évaluer les composants séparément à la manière de la méthode d'évaluation IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art), autant pour de long linéaire, cela parait assez peu pertinent. Mais alors comment « discrétiser » la voie ferrée et sur la base de quels critères ?

Les résultats de l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets présentés au chapitre 3 montrent que les dégradations de la voie dépendent des sollicitations statiques et dynamiques, dues aux charges de trafic, aux influences climatiques et ponctuellement à d'autres sollicitations extérieures (chimiques, ou en rapport avec la végétation). Le tableau ci-après présente les principaux paramètres de dégradation de la voie ferrée.

Tableau 34 : Facteurs de dégradation de la voie ferrée

Facteurs de dégradation	Paramètres	Effet
Sollicitations statiques et dynamiques	Géométrie de la voie	Local
	Type de circulation	Local
Influences climatiques	Pluie, gèle, températures extrêmes	Global
Autres sollicitation (chimiques, ou en rapport avec la végétation)	Type de revêtement	Local

Les influences climatiques ont un effet global car elles sont uniformément réparties le long des infrastructures linéaires urbaines qui sont la plupart du temps installées dans les mêmes zones climatiques. En revanche, les sollicitations statiques et dynamiques ainsi que les autres sollicitations d'ordre chimique dépendent des paramètres locaux de la voie : le type de section, le type de circulation et le type de revêtement qui influencent directement les sollicitations. Le tableau ci-dessous présente les différents paramètres ayant conduit à la décomposition de la voie ferrée en zones considérées homogènes face au vieillissement. Ces paramètres forment les propriétés d'un tronçon homogène et sont utilisés pour structurer le patrimoine à des fins d'inventaire.

Tableau 35 : Paramètres de structuration du patrimoine de voie ferrée utilisés dans le logiciel SIG

Type de section	Type de circulation	Type de revêtement
alignement	site propre	minéral modulaire
courbe	site partagé	minéral non-modulaire
appareils de voie	traversée routière	végétalisé
appareils de dilatation	fosse anti-intrusion	ballast
traversées obliques	traversée piétonne	platelage (bois)
fin de voie		

Une fois le tronçon créé avec ces propriétés, il est ensuite permis de renseigner d'autres propriétés au tronçon, mais sans effet sur la structuration du patrimoine. Il s'agit de champ de type : localisation, année de construction, année de renouvellement, point kilométrique, rayon de courbure, entraxe, vitesse d'exploitation[29], etc. Ces dernières peuvent être utiles, à la fois pour le repérage des tronçons notamment pour la comparaison dans le temps mais aussi pour apprécier la durée de vie résiduelle théorique ou l'importance stratégique de la zone.

5.3.3. INVENTAIRE DES SYMPTOMES DE DEGRADATION D'UNE VOIE FERREE

Selon les types de section, de circulation ou de revêtement, les symptômes par lesquels on observe un mécanisme de dégradation peuvent être renseignés. L'objectif de l'outil est de permettre des résultats des campagnes de recueil de données sur l'état local de la voie qui sont comparables dans le temps. Les processus de dégradation se déroulant relativement lentement et sur des infrastructures faciles d'accès, le mode privilégie de recueils des symptômes est le contrôle visuel. La saisie des symptômes visuels avec l'outil LAMIA est systématisé et à chaque symptôme peut être associé une photo, un croquis et un commentaire.

Le contrôle visuel des symptômes se positionne à court-terme dans la programmation des interventions. Se positionne ensuite les symptômes mesurés qui pour le rail consiste principalement à la mesure de son usure abrasive, le critère principal de remplacement des rails. Enfin, en l'absence de symptôme, les outils de modélisation permettent de programmer des actions à long terme. Nous n'aborderons pas ici ce dernier cas qui sera abordé au chapitre suivant.

[29] La vitesse d'exploitation aurait pu être un paramètre de structuration du patrimoine. Cependant les zones de vitesses pratiquées sur une ligne de tramway sont tributaires des paramètres de géométrie de la voie et du type de circulation.

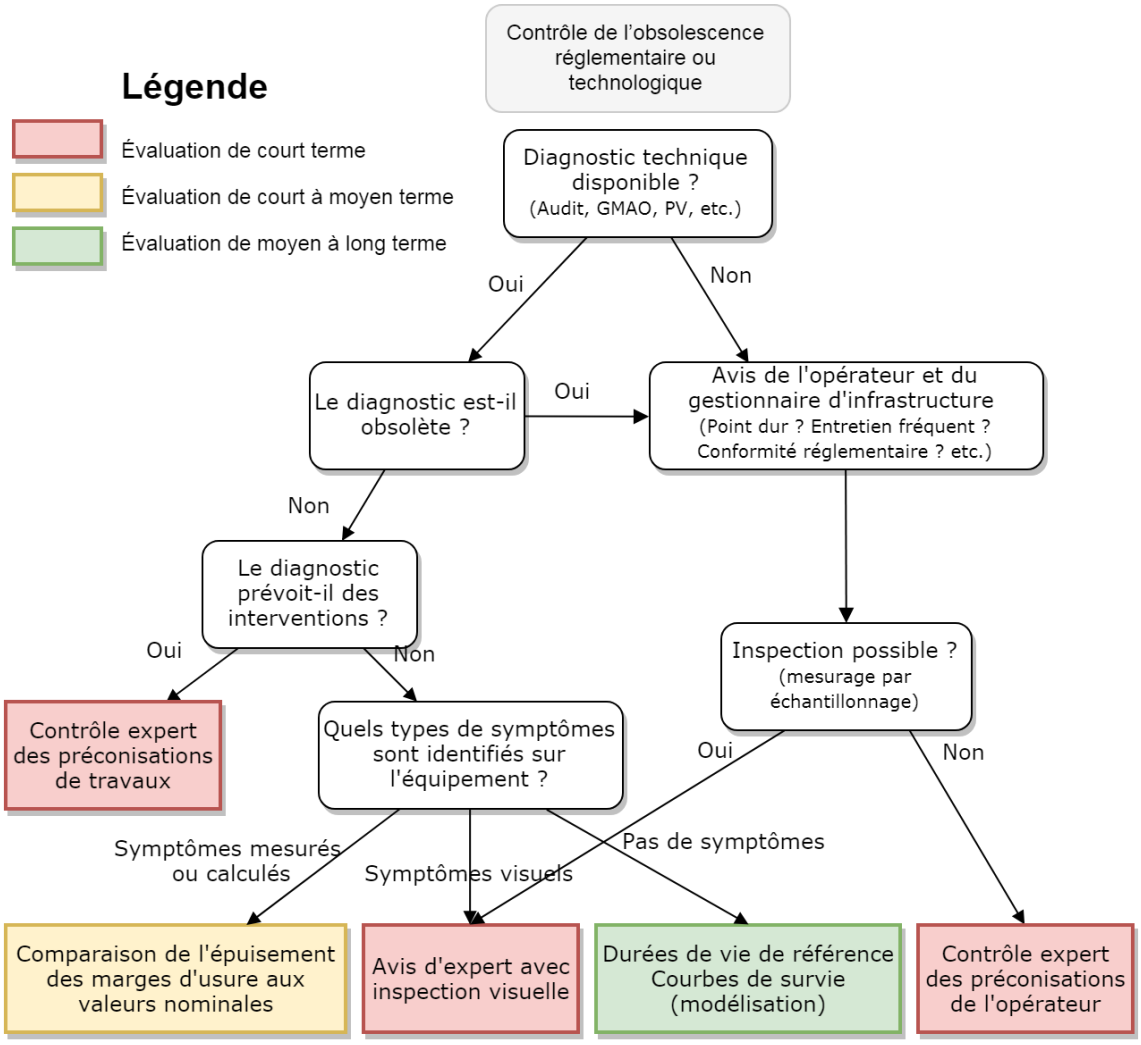


Figure 68 : Importance de l'inspection visuelle dans la programmation des interventions à court, moyen et long terme

5.3.3.a *Etat des rails*

L'analyse des modes de défaillance a permis de structurer l'identification des différents symptômes visuels. On trouvera une description plus précise de ces symptômes dans le chapitre 2 et 3.

Type de section	Variables	Valeurs
Alignement	Présence UO	OK/NOK
	Présence Fatigue	Squat/Head Check/Négatif
	Géométrie de la voie	OK/NOK
	Etat du rechargement	OK/NOK
Courbe	idem	idem
Appareils de voie	idem	idem
Appareils de dilatation	idem	idem
Traversée oblique	Présence UO	OK/NOK
	Présence Fatigue	Squat/Head Check/Négatif

Type de section	Variables	Valeurs
	Géométrie de la voie	OK/NOK
	Etat du rechargement	OK/NOK
	Ornière porteuse	OK/NOK
Fin de voie	idem	idem

5.3.3.b *Etat du revêtement*

L'analyse des modes de défaillance a permis de structurer l'identification des différents symptômes visuels. On trouvera une description plus précise de ces symptômes dans les chapitres 2 et 3.

Type de revêtement	Variables	Valeurs
Minéral modulaire	Fissurations dans les joints Dégarnissage des joints Désafleurement entre pavés et/ou entre dalles Affaissements des pavés et/ou des dalles le long des rails Orniérages plus ou moins avancés Disparitions de pavés et/ou de dalles	OUI/NON
Minéral non-modulaire	Déformations (affaissements, flaches, orniérage) Fissurations (longitudinales, transversales ou faïençage) Arrachements (nids de poule, pelades, plumages) Remontées (ressuage)	OUI/NON
Végétalisé	Dessèchements Apparitions d'herbes folles Disparition du végétal Mauvaise tonte	OUI/NON
Ballast	Tassement Pollution	OUI/NON
Platelage	Décomposition Déformation	OUI/NON

5.3.3.c *Etat des équipements*

L'analyse des modes de défaillance a permis de structurer l'identification des différents symptômes visuels. On trouvera une description plus précise de ces symptômes dans le chapitre 2 et 3.

Equipement	Variables	Valeurs
Joint de rail	Fissurations du joint Dégarnissage du joint Absence du joint ou déchirement Graisseur de voie (*)	OUI/NON Absent/OK/NOK
Assainissement	Fissuration grille	OUI/NON

Equipement	Variables	Valeurs
	Caniveau bouché – trace d'un mauvais écoulement Désafleurement/décollement/desserrage grille Absence	
Dispositif de fin de voie (**)	Heurtoir Taquet d'arrêt	OK/NOK

(*) Champ de saisie visible si on a renseigné une section en courbe

(**) Champ de saisie si on a renseigne une section en fin de voie

5.3.3.d *Etat d'un appareil de voie*

L'analyse des modes de défaillance a permis de structurer l'identification des différents symptômes visuels. On trouvera une description plus précise de ces symptômes dans le chapitre 2 et 3.

Type de section	Variables	Valeurs
Appareils de voie	Côte de protection Pointe d'aiguille Talon d'aiguille Pointe de cœur Patte de lièvre Présence d'un capot de protection	OK/NOK
Appareils de dilatation	Zone de transition Etat du contre-rail Etat de l'ouverture	OK/NOK

5.3.3.e *Usure des rails*

L'usure des rails est mesurée à l'aide d'un profilomètre. Le profilomètre relié à la tablette permet de comparer le profil existant à son profil nominal. Les différences obtenues permettent alors de déduire :

- l'usure abrasive verticale, au niveau du plan de roulement,
- l'usure abrasive latérale, au niveau du flan de guidage et au niveau de la bavette dans le cas d'un rail à gorge.

Les mesures au profilomètre sont systématiques au niveau des points durs, principalement au niveau des voies en courbe et des zones d'accélération ou de décélération.

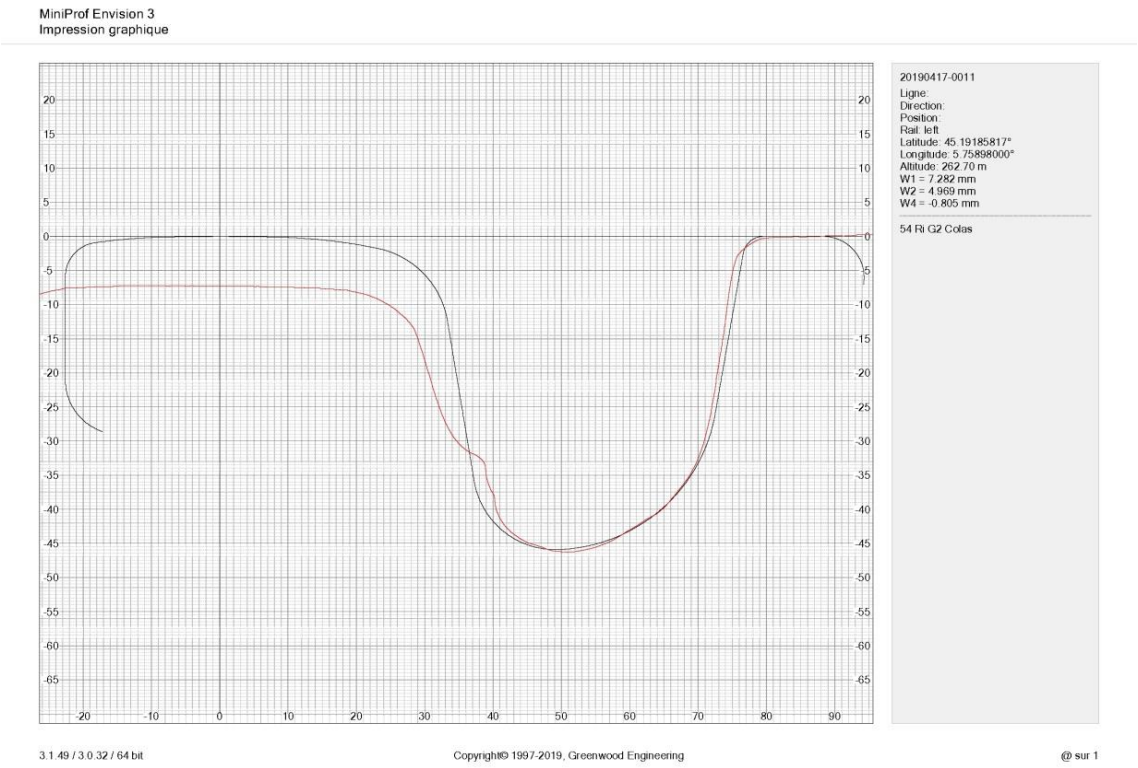


Figure 69 : Mesure d'un profil de rail usé : usure latérale et vertical du champignon du rail et écoulement plastique sous le point P du contact rail-roue

5.3.4. ADAPTATION DE LA METHODE VSC POUR LA HIERARCHISATION ET LA PRIORISATION DES INTERVENTIONS A COURT-TERME

La méthode VSC (Visite Simplifiée Comparée) est un outil de gestion du patrimoine qui a été développé par les services de l'Etat (le Réseau Scientifique et Technique relatif aux Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées). VSC est une méthode à caractère générique qui permet de gérer avec une méthode unique des ouvrages de nature hétérogène. La méthode est principalement appliquée aujourd'hui pour la gestion des ponts, des voies navigables, des structures portuaires ou encore les phares et les balises du littoral.

Elle est entièrement tournée vers des visites d'inspection dite simplifiée, c'est-à-dire principalement visuel sur des points de contrôle accessible. L'objectif est de permettre de constituer puis de suivre dans le temps un inventaire du patrimoine à la manière d'une photographie de l'ouvrage. Ce qui nous intéresse ici et que nous proposons d'adapter pour la voie ferrée de tramway, c'est sa capacité à évaluer l'état de vétusté d'un parc et hiérarchiser les actions de maintenance préventive et corrective. La priorisation a recours à deux indicateurs établis selon les résultats des inspections :

- l'Indice d'Etat (IE) : traduisant l'état global de l'ouvrage sur le plan technique, il résulte de la combinaison de deux indices :
    - l'Indice d'état mécanique (IEm) qui rend compte de la performance mécanique de l'ouvrage (p.ex. la capacité portante),

- l'Indice d'état d'usage (IEu) qui évalue la performance fonctionnelle, c'est-à-dire la capacité de l'ouvrage à répondre aux attentes des usagers (p.ex. la sécurité, l'exploitation, la règlementation ou encore le confort d'usage).

- l'Indice Stratégique (IS) : traduisant l'importance de l'ouvrage pour le gestionnaire sur le plan stratégique.

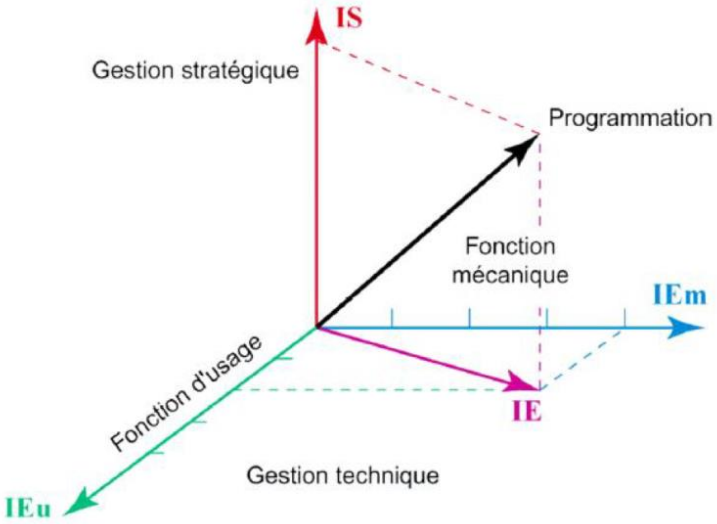


Figure 70 : Principe d'évaluation de la méthode VSC

Si les indices d'état peuvent être élaborés à partir de l'inventaire des symptômes observables présentés ci-avant, l'indice stratégique a nécessairement recours aux cas spécifiques des ouvrages, c'est-à-dire mise en contexte dans leur environnement d'exploitation, mais aussi co-construit avec le gestionnaire d'infrastructures selon ses propres critères :

- les enjeux politiques et/ou financiers,
- les impacts sur la vie quotidienne, les circulations routières,
- les conséquences de la baisse du niveau de service ou de la ruine sur le réseau (p.ex. sur la construction des itinéraires), son importance stratégique dans la continuité ou la résilience de l'exploitation (p.ex. tous les appareils de voie ne se valent pas),
- la plus ou moins grande facilité d'intervention sur l'ouvrage.

Pour ces raisons, l'application de l'échelle VSC aux symptômes observables sur la voie ferrée de tramway se limite aux seuls indices d'état mécanique et d'usage.

5.3.4.a *L'Indice d'Etat mécanique (IEm)*

L'objectif de l'indice mécanique est d'évaluer l'état structurel de l'ouvrage : résistance mécanique, qualité des matériaux dans la mesure où la dégradation est suffisamment importante pour affecter le comportement structurel.

Tableau 36 : Correspondance entre les symptômes observés et l'indice d'état mécanique

Indice d'Etat mécanique		Symptômes observés
1	Désordres mécaniques graves Risque de ruine immédiate	Rupture de rail, Déformation très importante de la géométrie de la voie (rail ou plateforme) Usure abrasive en dehors des limites d'alerte
2	Désordres mécaniques graves sans risque de ruine immédiate	Usure abrasive importante (dépend du profil de rail et de roue) Déformation importante de la voie Fissuration de la dalle avec remontées de fissures Rupture des attaches ou des traverses ou des selles Présence de fatigue : squat, head-check avec fissurations importantes
3	Dégradation des matériaux ou désordres mécaniques sans gravité	Déformation de la voie au passage du matériel Présence d'usure ondulatoire Apparition d'amorces de dégradations légères au niveau du revêtement Fissuration des attaches ou des traverses Dégradation du revêtement au droit des attaches Délitement, décollement, déchirement, arrachement des joints Délitement des chambres d'éclissage Présence de fatigue : squat, head-check avec fissurations faibles
4	Bon état structurel	R.A.S

5.3.4.b *L'Indice d'Etat d'usage (IEu)*

L'objectif de l'indice d'usage est d'évaluer les conditions d'exploitation pour les différents usagers et les problèmes de sécurité d'usage.

Tableau 37 : Correspondance entre les symptômes observés et l'indice d'état d'usage

Indice d'Etat d'usage		Symptômes observés
1	Dégradation des éléments d'usage Problèmes de sécurité immédiats	Ecartement en dehors des limites Côte de libre passage non respectée Dépavement important Variation de tension rail/sol Variation de tension APS : perte de l'équipotentialité au cheminement des barres de contact
2	Dégradation des éléments d'usage créant des difficultés d'exploitation	Usure importante, problème de stabilité (casse des supports) conduisant à des réductions de vitesse
3	Dégradation des éléments d'usage créant des problèmes d'inconfort	Bruits et vibrations anomales Dépavement, Eaux stagnantes, traces d'humidité, obstruction des drains
4	Bon état des équipements ou des éléments d'usage	R.A.S

La détermination de l'Indice d'Etat est effectuée à l'aide de la formule suivante :

$$IE = \min(IEm; IEu) \quad (19)$$

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'urgence des actions associées aux différentes combinaisons possibles des indices d'état mécanique et d'usage.

Tableau 38 : Correspondance entre l'indice d'état et les actions de maintenance corrective et préventive associées

	EVALUATION DE L'ETAT		ACTIONS			EXEMPLE
	IEM	IEU	NIVEAU	TYPE	TEMPORALITE	
1	Désordres mécaniques graves Risque de ruine immédiate	Dégradation des éléments d'usage Problèmes de sécurité immédiats	Mise en sécurité immédiat		Immédiat *quelques jours ou semaines*	Réduction de vitesse Fermeture de la voie
2	Désordres mécaniques graves sans risque de ruine immédiate	Dégradation des éléments d'usage créant des difficultés d'exploitation	Renforcement, confortement ou réparation	Curatif	Court terme *1 à 2 ans*	Remplacement de rails avec ou sans consolidation des supports Renouvellement de la voie (avec béton de voie voir béton de fondation)
3	Dégradation des matériaux ou désordres mécaniques sans gravité	Dégradation des éléments d'usage créant des problèmes d'inconfort	Entretien spécialisé ou réparation	Préventif	Moyen terme *3 à 4 ans*	Meulage Rechargement Remplacement de joints
4	Bon état structurel	Bon état des équipements ou des éléments d'usage	Entretien courant		Long terme *5 à 6 ans*	

CONCLUSION DE CHAPITRE

L'analyse des dates de mise en service des installations de voie ferrée en France a permis de mettre en perspective le contexte dans lequel s'inscrivent les préoccupations des gestionnaires en matière de renouvellement. Après le timide démarrage des années 1990, les années 2000 ont marqué un déploiement accru de ces équipements dans la plupart des métropoles et des villes de taille moyenne. Entre 2006 et 2012, presque 50% des installations de voie ont été mises en service. L'âge moyen d'un tronçon de voie est de 12 ans. Ce déploiement rencontre aujourd'hui quelques limites et renvoie à une forme de saturation. Dans les villes équipées d'un tramway, les principales lignes sont dessinées et les autorités organisatrices cherchent davantage des projets de modification du réseau comme les prolongements, les jonctions ou encore la mise en œuvre de services partiels pour optimiser l'efficacité du réseau de transport. Les premiers renouvellements d'ampleur ont eu lieu comme en témoigne les exemples illustrés d'Orléans et de Grenoble, quand d'autres suivront prochainement et se dessine là, l'ère du renouvellement de ces installations.

Ces installations, dans un contexte de décentralisation et de métropolisation des villes, se sont développées avec une forte hétérogénéité. Au niveau technique, les matériaux, les composants et les assemblages peuvent être très différents (chapitre 1). La maintenance n'est pas standardisée et l'absence d'une autorité technique centrale pour identifier les bonnes pratiques laisse à penser qu'il existe un potentiel d'amélioration de la maintenance difficile à atteindre dans un contexte concurrentiel et multi-acteurs. Au niveau organisationnel, les autorités organisatrices se sont d'ailleurs largement appuyées sur le secteur privé et on observe aujourd'hui une attention toute particulière aux dispositions contractuelles relatives à la gestion à long terme des infrastructures. La multiplicité des acteurs privés ou publics n'est pas en soi un frein à la gestion long terme des infrastructures mais elle pose de toute évidence des questions d'ordre contractuel. En particulier, les contrats de délégation de service correspondent assez mal, car trop courts, à la réalité de la durée de vie des installations de voie. Alors que l'opérateur de transport est la plupart du temps en charge de la maintenance, le renouvellement est à la charge du gestionnaire d'infrastructure. Dans une logique de profit et si les dispositions contractuelles ou les capacités à les faire respecter sont insuffisantes, le report des interventions de maintenance régulière parait inévitable. Sans compter la situation de quasi-oligopole qui règne sur le marché des opérateurs de transports urbains des villes moyennes face à des gestionnaires aux capacités d'action variables.

***

Au niveau technique, nos travaux présentés en deuxième partie permettent de mieux systématiser le suivi à long terme de l'état des installations. A partir des résultats du modèle

qualitatif et fonctionnel de la voie (chapitre 3), nous proposons une méthodologie d'inspection fondée sur l'inventaire des principaux symptômes observables (effet local) et de les hiérarchiser en fonction des conséquences sur le système (effet global). Nos contributions méthodologiques portent aussi sur l'adaptation de la méthode VSC au cas de la voie ferrée et l'intégration dans un outil SIG développé par ARTELIA. La voie ferrée de tramway se dégradant relativement lentement avec des désordres rapidement observables à l'œil nu, les inspections de la voie ferrée offrent un moyen technique rapide de programmer les interventions de maintenance à court-terme. En revanche, le gestionnaire d'infrastructures doit pouvoir construire une vision à plus long terme qui ne peut pas être apporté par les inspections. Le chapitre suivant propose une analyse statistique sur un site français des âges au renouvellement à des fins de prévision budgétaire long-terme. Il propose d'extrapoler cette nouvelle connaissance statistique pour prédire le nombre de renouvellement long-terme sur le réseau étudié et par conséquent estimer l'enveloppe budgétaire d'un programme de renouvellement à long terme.

Chapitre 6

ANALYSE DE L'AGE AU RENOUVELLEMENT D'UNE VOIE FERREE DE TRAMWAY

En pratique, les acteurs français des transports guidés urbains n'effectuent pas encore de suivi statistique de l'usure ni des désordres de plate-forme. Il existe des prémisses qui sont d'une part des campagnes de recueil de données sur l'état local de la plate-forme de voie, et d'autre part des archivages plus ou moins formalisés des opérations d'entretien (meulage, rechargement, remplacement de rail, etc.). Les démarches entreprises sur les différents réseaux rencontrés restent de l'ordre de l'artisanat largement informel. La mise en place d'un appareil statistique est confrontée à des insuffisances. Soit les données sont de mauvaise qualité (exactitude), soit elles ne sont disponibles que partiellement dans le temps et dans l'espace (complétude). La surveillance est jugée coûteuse par les opérateurs tandis que la valorisation des données qu'elle produit nécessite des compétences encore peu représentées voire inexistantes au sein des équipes opérationnelles.

Du côté académique, les travaux pouvant se prévaloir de résultats probants sur la durée de vie des infrastructures de tramway sont peu nombreux. En effet, peu d'entre eux se sont intéressés à des plates-formes bétonnées qui sont spécifiques à ce mode de transport urbain. Une grande partie des efforts de recherche est captée par les réseaux ferroviaires et métros. À la fois parce que leur patrimoine et leur moyens sont plus conséquents, mais aussi parce que les ouvrages sont plus anciens : la problématique du renouvellement est donc plus ancienne. Quelques travaux sur la voie ferrée de tramway méritent cependant d'être évoqués. Ceux de (Ahac & Lakušić, 2017) sur le réseau croate de Zagreb et ceux de (Moridpour & Hesami, 2015) et (Karimpour, 2017) sur le réseau australien de Melbourne. Tous ces travaux se sont intéressés à la modélisation statistique du gauge. Un des paramètres d'évolution de l'état de dégradation de la voie qui mesure l'écartement des rails ajusté de son usure abrasive.

En revanche, les connaissances quantitatives apportées par ces travaux ne donnent aucune information sur les stratégies adoptées par les gestionnaires en matière de renouvellement. Bien que le projet européen URBAN TRACK (2006 – 2010) s'y intéresse, la revue des projets de renouvellement reste très limitée dans le temps et dans l'espace (quelques centaines de mètres linéaires de rail tout au plus). En France, seules les villes de Nantes et de Grenoble, dont le tramway est réapparu respectivement en 1985 et 1987, figurent parmi les réseaux disposant d'une plus longue expérience.

Dans ce chapitre, nous analysons la stratégie de la ville de Grenoble pour planifier ses renouvellements. Nous mettons en évidence quelques paramètres importants qui ont une influence significative sur l'âge au renouvellement des sections de voie ferrée et ses implications sur la stratégie de la ville. Les résultats

qui en découlent montrent que les besoins en renouvellement peuvent être extrapolés afin d'anticiper à plus long terme les moyens nécessaires à une stratégie prévisionnelle.

À partir de l'historique des travaux de la ville de Grenoble, nous analysons l'âge au renouvellement des tronçons de voie ferrée. Nous utilisons pour cela les outils statistiques issus de l'analyse de durée de vie pour construire une lecture inédite d'une stratégie de renouvellement des voies ferrées de tramway.

On présente d'abord quelques notions essentielles associées à cette branche de la statistique et quelques précisions élémentaires concernant le contexte technique du renouvellement des infrastructures grenobloises. Enfin, nous présentons les résultats circonstanciés de notre analyse statistique.

6.1. PRINCIPES ET DEFINITIONS

6.1.1. L'ANALYSE DE DUREE DE VIE

6.1.1.a *Généralités sur les modèles de survie*

Les modèles de survie constituent une branche des statistiques adaptées à l'analyse du temps. Il s'agit de modéliser le temps écoulé T jusqu'à la survenue d'un évènement précis. L'objectif est de modéliser, en fonction de facteurs explicatifs éventuels, une loi :

- de la durée d'un évènement non renouvelable T (p.ex. la mortalité d'un organisme biologique, la première panne, la ruine, etc.),
- d'un processus temporel de durée d'évènements renouvelables $(T_1,\dots T_n)_{n=N}$ (p.ex. la durée entre deux pannes d'un matériel réparable).

Leur champ d'application est varié : démographie, assurance, biologie, économie ou encore fiabilité.

Les modèles statistiques s'appuient largement sur les données pour faire des prédictions dont l'analyse de survie constitue une branche particulière. En analyse de durée de survie, les données représentent des durées de survie et les modèles sont les distributions statistiques des durées de survie. L'exactitude de leurs prédictions, comme n'importe quel modèle statistique, dépend directement de la complétude et de la précision des données fournies. De « bonnes » données, accompagnées du choix du modèle approprié, donnent généralement des prédictions satisfaisantes alors que des données incorrectes ou insuffisantes entraineront presque toujours de mauvaises prédictions.

Cette branche de la statistique se démarque par des outils qui utilisent des échantillons de données souvent très particuliers. D'abord parce qu'on dispose généralement d'une taille d'échantillon relativement faible lié à la difficulté de collecter un grand nombre d'observations. Puis parce que ces données sont parfois incomplètes ou comportent des incertitudes quant au moment où l'évènement est survenu. Les données de durée de survie peuvent donc être séparées en deux types : des données complètes (toutes les informations sont disponibles) ou censurées (certaines informations sont manquantes). Chaque type est illustré dans la figure ci-dessous (Figure 71 : Incomplétude et imprécision des données de durée de survie).

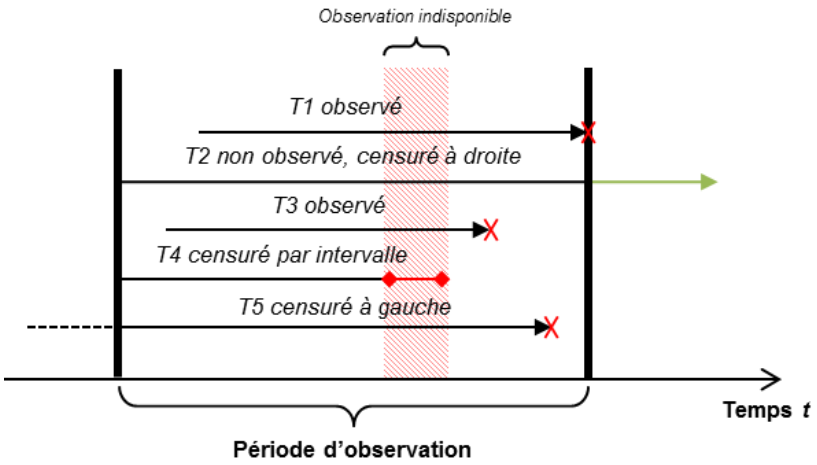


Figure 71 : Incomplétude et imprécision des données de durée de survie

Dans de nombreux cas, il arrive en effet que toutes les unités de l'échantillon, dont on souhaite connaitre la loi de survie, n'aient peut-être pas vécu l'évènement d'intérêt (p.ex. la mort, la panne, la ruine, etc.) ou que les durées exactes de survenue de l'évènement ne soient pas connues. Ces types de données, illustrés ci-dessus, sont communément appelés des données censurées. On distingue alors trois types de censures possibles : les censures à droite (*T2*), les censures à gauche (*T5*) et les censures par intervalle (*T4*).

Les distributions statistiques de ces données de survie peuvent ensuite être décrites plus ou moins fidèlement par des modèles statistiques. Le choix du modèle va influencer significativement la lecture des résultats et leurs interprétations mais aussi les possibilités ultérieures de simulation mathématique (p.ex. à des fins d'évaluation économique de politique de maintenance). Il reste évident que la description qui va suivre est volontairement succincte tant la littérature scientifique abonde de modèles mathématiques pour l'analyse de la maintenance. Nous revenons ici à l'essentiel, c'est-à-dire ici aux modèles statistiques qui permettent d'estimer la distribution des données de survie en se basant sur des données expérimentales ou provenant d'un historique de maintenance. Il en existe trois types : non paramétriques, semi-paramétriques et paramétriques.

La modélisation non-paramétrique est la plus simple à mettre en œuvre car elle permet une première lecture des données de survie sans prendre aucune hypothèse sur la forme de la distribution du taux de défaillance. Le plus connu est celui de Kaplan-Meier (1957) qui est couramment utilisé en prémisse des autres modèles et que nous utilisons dans la deuxième partie de ce chapitre. En revanche, ils ne disposent pas de très bonnes propriétés mathématiques, puisqu'ils sont non-dérivables, ce qui limite leur utilisation à des fins de calcul et de simulation.

À l'instar des modèles non-paramétriques, les modèles semi-paramétriques ne prennent aucune hypothèse sur la forme de la distribution du taux de défaillance. Par contre, ils reposent sur une hypothèse fondamentale qui consiste à dire que le taux de défaillance est à priori influencé par des covariables et qu'elles agissent de manière proportionnelle. Le modèle de Cox est, dans cette catégorie, largement utilisé dans la littérature scientifique mais nécessite de vérifier l'hypothèse des risques proportionnels pour les différents sous-ensembles de valeur des covariables à disposition.

Enfin, les modèles paramétriques se distinguent nettement des deux précédents car ils peuvent calculer la forme de la distribution du taux de défaillance. Ils formulent l'hypothèse que la distribution des durées de survie appartient à une famille de loi paramétrique de forme connue mais dont les paramètres restent à estimer. L'estimation des paramètres du modèle est ensuite obtenue à l'aide d'algorithme permettant de maximiser la vraisemblance des observations (dans le cas de la méthode du maximum de vraisemblance). Les lois de Weibull constituent probablement l'une des familles de loi paramétrique la plus populaire.

6.1.1.b *L'analyse de durée de vie dans le domaine du renouvellement d'infrastructures*

Une infrastructure quelle qu'elle soit s'use au fil du temps.

D'un point de vue économique, cette usure se définie comme la conjonction de la diminution de la qualité de service et de la productivité offerte par l'équipement considéré et de l'augmentation des coûts d'entretien et de réparation nécessaires à son maintien en service.

D'un point de vue physique en revanche, cette usure caractérise un ensemble de mécanismes de dégradation dont la source provient des méthodes de conception, de fabrication et de mise en œuvre; des conditions d'exploitation et de maintenance; et du vieillissement des matériaux.

Ces mécanismes de dégradation occasionnent des désordres (c'-à-d. des symptômes observables) pouvant conduire à des défaillances : une altération ou cessation de l'aptitude du bien à accomplir une fonction requise. Les infrastructures présentent donc des probabilités de défaillance et des fonctions de survie spécifique.

Deux types de défaillance se produisent au cours de la durée de vie (Herz, 1996) : les défaillances initiales et les défaillances dues au vieillissement. Les défaillances initiales résultent le plus souvent de défauts de conception, de fabrication ou de mise en œuvre lors de la construction de l'ouvrage. Les défaillances dues au vieillissement se répartissent autour de la valeur moyenne de la durée de vie ou de la durée d'utilisation (voir figure ci-après).

Sur la base de cette valeur moyenne de la durée de vie, des stratégies à long terme peuvent être développées, pour savoir quand et comment le besoin de renouveler une infrastructure doit être satisfait. Le renouvellement est un investissement de remplacement d'une infrastructure existante à l'identique ou à fonction identique. Contrairement à une stratégie curative selon laquelle on répare selon l'urgence et sans prévoir à la suite d'une avarie, la stratégie prévisionnelle décide de renouveler selon des critères patrimoniaux (âge de l'infrastructure, état de l'infrastructure), économiques (coûts actualisés vs ceux de maintien en service) ou conjoncturels (opportunité d'une réfection de voirie) (Fauquert, 2005).

Dans certains cas, il apparait même en pratique que l'approche patrimoniale fondée sur la valeur moyenne de la durée de vie est la seule possible pour évaluer des ordres de grandeur lorsque les données précises font défaut (Renaud, Bremond, & Le Gat, 2011).

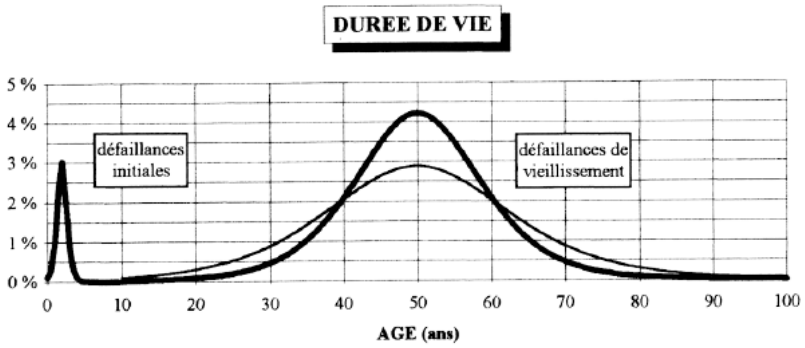


Figure 72 : Type de défaillances au cours de la durée de vie d'une infrastructure (Herz, 1996)

Si la notion de durée de vie peut sembler triviale, elle nécessite toutefois de définir un critère de fin de vie. Or lorsqu'il s'agit de déterminer la fin de vie d'une infrastructure, il est souvent établi que celle-ci n'est pas le résultat d'un évènement subi (p.ex. la survenue d'une panne soudaine) mais d'un choix, guidé par des considérations diverses notamment technico-économiques, conduisant à son renouvellement et donc la fin de sa durée de vie utile.

Ainsi, puisque nous nous apprêtons à une analyse de « durées de vie », il nous parait commode de préférer parler d'une analyse de « l'âge au renouvellement ». Car les données que nous analysons par la suite correspondent à des durées de maintien en service qui exprime la durée d'utilisation de l'infrastructure entre sa mise en service et son renouvellement. Nous précisons au §6.1.2 les critères sur lesquelles les renouvellements de l'infrastructure que nous considérons ont été décidés.

6.1.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES ACTES DE RENOUVELLEMENT DE LA LIGNE A DU TRAMWAY DE GRENOBLE

6.1.2.a *Les marges d'usures*

Les rails de tramway de la ligne A mis en service en 1987 sont des rails à gorge de type 35G. Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 39 : Caractéristiques principales du rail 35G

Caractéristiques principales du rail 35G	
Masse linéique (en kg/m)	54,78
Hauteur (en mm)	152,50
Largeur de gorge (en mm)	36
Profondeur de gorge (en mm)	40

Il n'y a pas vraiment de débat possible sur la valeur de la côte d'usure verticale maximale admissible. Pour les rails à gorge, cette valeur est définie par la différence entre la profondeur de gorge et la hauteur du boudin des roues. Le dépassement de cette côte signifie que le boudin de la roue est en contact avec le fond de la gorge du rail. Cette situation engendre un mauvais confort de roulement (vibrations de la caisse), augmente le risque de déraillement et accentue les bruits et les vibrations perceptibles par les riverains. Dans notre cas, le boudin des véhicules mesure une hauteur nominale de 31 mm ce qui fixe la côte d'usure verticale maximale à 9 mm environ.

En revanche, les tronçons de voie renouvelés à partir de 2001, les nouveaux rails qui sont de type 35GP, 35GPU ou 41GP admettent une valeur de la côte d'usure verticale plus importante à 13,9 mm.

Pour la valeur de la côte d'usure latérale maximale admissible, la situation est davantage sujette à l'interprétation des différents réseaux comme le montre les résultats de l'enquête réalisée par le projet européen URBAN TRACK (2006 – 2010). Cette valeur est liée à la fois à l'écartement des deux files de rail et de l'usure latérale constatée. C'est la conjonction de ces deux valeurs qui donnent le gauge. Sur le réseau, la valeur de la côte d'usure latérale maximale a été fixée à 9 mm.

Bien que les relevés d'usure des rails ont été réalisés à l'aide d'un chariot de mesure qui permet d'enregistrer les valeurs d'écartement du rail, des largeurs d'ornières droite et gauche, du dévers et du gauche, les décisions du programme de gros entretiens ont retenu uniquement l'usure latérale et verticale. On peut toutefois considérer que la dégradation de l'écartement des files de rails, qui se manifeste par une dérive graduelle de sa valeur initiale (1 435 mm), soit restée dans des valeurs convenables du fait du calage en béton même si nous n'avons pu accéder à cette information.

6.1.2.b *Consistances des actes de renouvellement*

Les interventions de renouvellement de la voie ferrée que nous retenons pour l'analyse concernent essentiellement les composants supports et guides du matériel roulant, c'est-à-dire les rails, les attaches et éventuellement les ancrages comme les traverses ou les selles. Ce type d'intervention s'appuie sur des considérations techniques formalisées dans un audit d'infrastructure qui sont basées :

- selon l'état d'usure des rails, apprécié au regard des limites d'usures précédemment prédéfinies de profils et d'alignements, ou de l'apparition de déformations ne pouvant plus être corrigées par meulage ou rechargement. Les règles de l'art considèrent à ce propos qu'à partir de 4 ou 5 rechargements consécutifs, il est recommandé de remplacer le rail.
- selon une approche multicritère : stabilité de l'infrastructure support de la voie ferrée, remplacement de traverses, consolidation des points d'ancrage sur le béton de fondation, réduction des nuisances sonores et vibratiles, reprise du drainage, végétalisation de la plateforme ou encore l'opportunité offerte par des opérations connexes. Dans de telles circonstances, le remplacement des rails qui n'ont pas encore atteint leurs limites d'usure peut être une option avantageuse afin d'éviter des travaux jugés trop successifs.

Dans notre échantillon de données sur les travaux de renouvellement, aucune des interventions n'a nécessité une reprise du béton de fondation. Une modification du béton de fondation implique en effet la présence potentielle d'une cause de désordre qui n'est pas due au vieillissement normal de la voie. Les interventions qui ont été effectuées sur la ligne concernent donc :

- **des opérations de remplacement de rail :** elles s'avèrent nécessaires lorsque l'usure relevée est trop importante et/ou que les rechargements déjà opérés ne permettent plus de restituer un profil et un apport de matière autorisant une exploitation projetée au-delà de la programmation de travaux (ici 4 ans). Le remplacement est réalisé de manière à assurer la circulation des tramways sur les rails neufs par simple éclissage et reprise des nivelles pour assurer une continuité de roulement. L'assemblage final se fait par soudure aluminothermique. Dans les zones courbes, les

rails sont cintrés et traités à l'égal des rails initiaux déposés. La qualité géométrique de la voie reste inchangée car les supports de voie existant comme les points d'ancrage ou les traverses conservent leur état initial. Elle peut même être améliorée car les tolérances des attaches peuvent être resserrées permettant ainsi de gommer certains défauts.

- **des opérations de remplacement de rail et de consolidation de la voie :** elles s'avèrent nécessaires lorsque les supports de voie sont dégradés. Cette intervention consolide l'assise de la voie avant de remplacer le rail. Cette disposition permet d'éviter les aléas de repose des attaches existantes, généralement corrodées, sur le rail neuf, et les conséquences qui pourraient en découler sur l'exploitation. La consolidation passe par un calage provisoire du rail, puis l'ancrage d'une selle directement dans le béton de voie calée par un mortier de résine de type époxy polyuréthanne.

Compte-tenu de ces considérations techniques, nous formulons l'hypothèse que ces interventions permettent un niveau de restauration AGAN[30], c'est-à-dire un état « aussi bon que neuf ».

6.1.3. CARACTERISATION DES VARIABLES

Les données recueillies sur un seul réseau de tramway, concernent essentiellement les voies en courbe de rayon de courbure entre 25 et 300 mètres, du tronçon le plus ancien de la ligne A mis en service en 1987. Sur une fenêtre d'observation qui s'étend ici de 1987 à 2017 soit 30 ans, les renouvellements sont identifiés à l'issue d'un audit des infrastructures réalisé par un bureau d'étude indépendant sur la base des données de maintenance fournies par l'opérateur du réseau.

Pour l'ensemble du linéaire de la ligne, les dates de pose, les longueurs et les caractéristiques géométriques sont connues. Pour les tronçons de voie ayant été renouvelés, les dates de renouvellement et la nature des travaux réalisés sont également connues. En revanche, on ne connait pas avec précision l'évolution de la production kilométrique, ce qui nous limite à une analyse circonstanciée au périmètre de la ligne. On tiendra compte de ce paramètre par l'utilisation d'une variable différenciant les tronçons se situant en tronc commun, c'est-à-dire qu'ils sont circulés par des véhicules venant de différente ligne. C'est le cas de la ligne A qui partage un tronc commun avec la ligne B. Pour les branches simples aux extrémités, la production kilométrique depuis 1987 est identique puisque la ligne ne dispose pas de terminus partiel. Les extensions de ligne apparue après 1987 ne sont pas prises en compte dans notre analyse.

Pour prendre en compte la géométrie des voies, nous avons catégorisé les linéaires de voie renouvelée selon leur rayon de courbure :

- C : ensemble des voies en courbe,
- R30 : sous-ensemble des courbes de rayon inférieur ou égal à 30m,
- R50 : sous-ensemble des courbes de rayon inférieur ou égal à 50m et supérieur à 30m,
- R100 : sous-ensemble des courbes de rayon inférieur ou égal à 100m et supérieur à 50m,
- R300 : sous-ensemble des courbes de rayon inférieur ou égal à 300m et supérieur à 100m,
- A : Alignement droit.

[30] As Good As New

6.2. ANALYSE STATISTIQUE DES ACTES DE RENOUVELLEMENTS

6.2.1. GENERALITE

Si une grande majorité des tronçons de voie en alignement droit est encore présente à la fin de la fenêtre d'observation, plus de 95% de l'effectif des tronçons en courbe présent en 1987 a été remplacé pendant cette période. Les travaux prévisionnels sur la période 2019 – 2023 sont également représentés. Deux tiers de ces travaux concernent des voies en courbe ayant déjà été renouvelées. Le tiers restant concerne deux courbes de rayon inférieur à 300m, une courbe de rayon inférieur à 100 m et un tronçon en alignement droit.

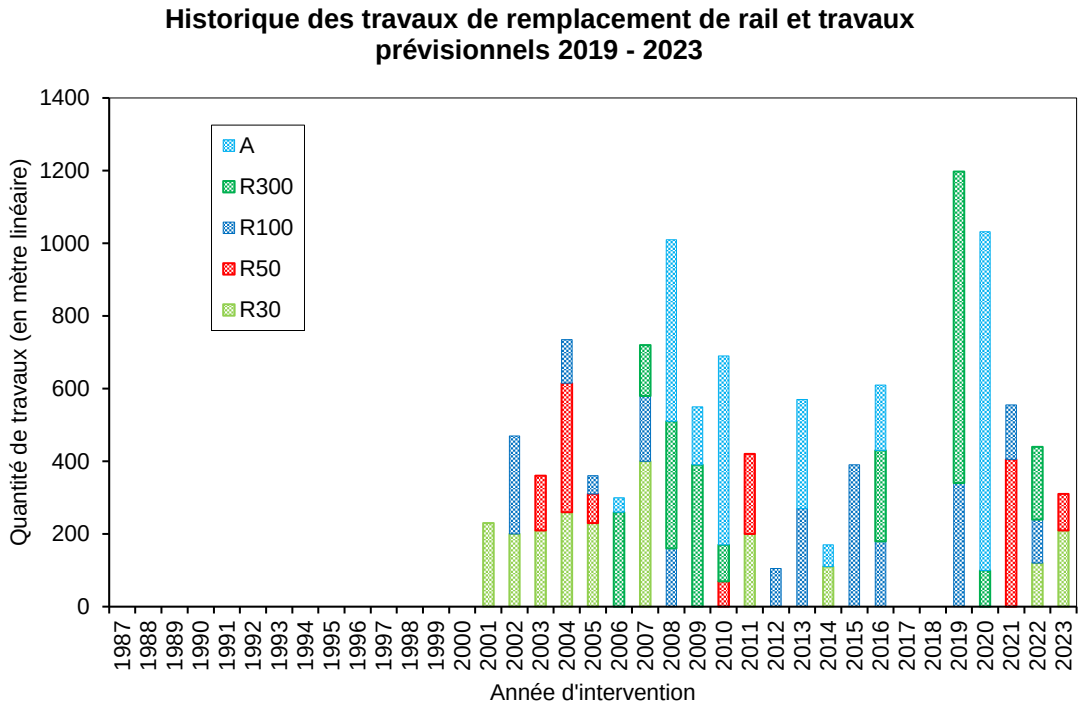


Figure 73 : Historique des travaux de remplacement de rail sur la ligne A et travaux prévisionnels 2019 - 2023

Tableau 40 : Statistique des âges au renouvellement pour les courbes et les alignements

Catégorie de voie	Linéaire total (avec censure) (en m)		Linéaire renouvelé (en m)	Données censurées à droite		Moyenne	σ	Coefficient de variation	Me
C	7317	24,6%	8532	200	2,7%	20,84(*)	6,14	29,4%	20
A	22483	75,4%	2692	19791	88,0%	-	-	-	-

(*) Attention la présence de données censurées dans le calcul de la moyenne.

6.2.2. ANALYSE DE L'AGE AU RENOUVELLEMENT

Les statistiques descriptives des sections de voie selon la catégorie de rayon de courbure sont représentées dans le tableau ci-dessous. On peut constater qu'après plusieurs années d'exploitation subsiste un linéaire de 200 m de la catégorie R100 (Rayon de courbure inférieur à 100 m). Il s'agit d'une courbe en S, dont la

forme particulière n'est peut-être pas comparable avec le reste de l'échantillon. Nous avons toutefois décidé de la conserver dans notre analyse des pratiques de renouvellement sur la ligne car selon notre découpage du linéaire, une courbe en S peut être considérée comme deux voies en courbe consécutives de rayon inférieur à 100 m.

Tableau 41 : Statistique des âges au renouvellement par catégorie de voie

Catégorie de voie	Linéaire total (avec censure) (en m)		Linéaire renouvelé (en m)	Données censurées à droite		Moyenne	σ	Coefficient de variation	Me
R30	1530	5,1%	2170	0	0,0%	16,23	3,45	21,3%	16
R50	875	2,9%	1380	0	0,0%	16,49	2,60	15,8%	17
R100	2265	7,6%	2335	200	8,8%	22,58(*)	5,16	22,8%	23
R300	2647	8,9%	2647	0	0,0%	25,35	6,03	23,8%	26
A	22483	75,4%	2692	19791	88,0%	-	-	-	-

(*) Attention la présence de données censurées dans le calcul de la moyenne.

Comme on pouvait s'y attendre, les rayons de courbure ont une influence sur les valeurs médianes et moyennes de durée de vie au sens de la durée d'exploitation. Toutefois, cette influence n'est pas significative entre les courbes de rayons inférieurs à 30 et 50 m.

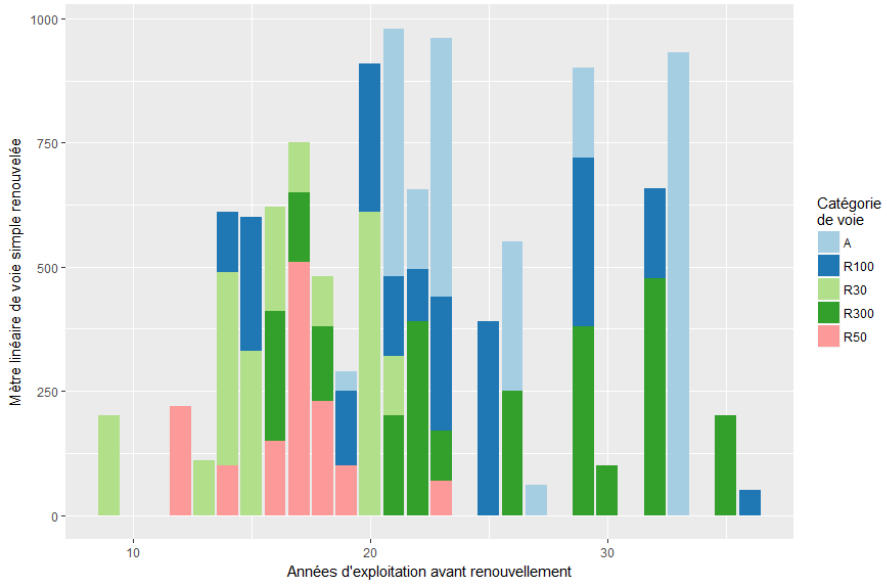


Figure 74 : Histogramme de l'âge au renouvellement des tronçons de voie ferrée

Le test de Khi-deux affiche un p-value<$2.2e^{-16}$, on rejette donc largement l'hypothèse d'indépendance. Il existe un lien statistique entre le taux et l'âge au renouvellement.

La comparaison interclasse des valeurs moyennes de durée de vie constitue une première étape d'analyse des pratiques de renouvellement sur le réseau. En pratique, cette valeur est d'ailleurs parfois utilisée pour évaluer et anticiper les besoins en financement sur le long terme pour le renouvellement du patrimoine. Toutefois, la seule prise en compte de cette valeur conduit à un raisonnement erroné du rythme de

renouvellement. En effet, (Renaud et al., 2011) montrent que le taux de renouvellement calculé en prenant l'inverse de la durée de vie aboutit à un rythme de renouvellement qui ignore l'historique de pose, et pire encore cette stratégie conduit à des renouvellements préventifs sans compensation significative sur la qualité de service et les coûts d'exploitation. Autrement, si on prend en compte l'historique de pose, la valeur moyenne de durée de vie conduit à la « stratégie du pompier » (Herz, 1996) selon laquelle on répare selon l'urgence et sans prévision. Dans ce cas, le gestionnaire se laisse guider par des impératifs techniques et risque de se voir confronter à un afflux important de travaux auxquels il aura de grandes difficultés à faire face financièrement.

6.2.3. ESTIMATION NON PARAMETRIQUE DES COURBES DE SURVIE

Pour comparer les distributions statistiques des durées de vie, nous appliquons l'estimateur non-paramétrique de Kaplan-Meier. La modélisation non-paramétrique est la plus simple à mettre en œuvre car elle fournit une première lecture des données de durées de vie sans prendre aucune hypothèse sur la forme de la distribution du taux de défaillance. Le plus connu est celui de Kaplan-Meier (1957) utilisé en prémisse de modèles plus sophistiqués (les modèles semi-paramétriques et paramétriques). En revanche, il ne dispose pas de très bonnes propriétés mathématiques puisqu'il est non-dérivable, ce qui limite son utilisation à des fins de calcul et de simulation.

Appliqué à nos données d'âge au renouvellement, il va permettre de représenter la fonction cumulée de survie autrement appelée fonction de survie, c'est-à-dire la fréquence cumulée de proportion de linéaire de voie n'ayant pas fait l'objet de travaux de gros entretien.

Pour rappel l'estimateur de Kaplan-Meier est de la forme suivante :

$$S(t_i) = \frac{(n_i - d_i)}{n_i} \times S(t_{i-1}) = \frac{(n_1 - d_1)}{n_1} \times \frac{(n_2 - d_2)}{n_2} \times \ldots \times \frac{(n_i - d_i)}{n_i} \qquad (20)$$

Avec:
S(ti) : probabilité cumulée de voie en exploitation au temps ti,
ni : le nombre de rails « à risque » juste avant le temps ti,
di : le nombre de rails remplacés au temps ti

La figure ci-après présente sur le même graphique, la comparaison des différentes fonctions de survie obtenues. L'axe horizontal représente les années d'exploitation avant renouvellement depuis la mise en service et l'axe vertical présente la probabilité de ne pas être renouvelé, c'est-à-dire le taux de survie. La probabilité de renouvellement est équivalente à la probabilité contraire de survie (1-S(ti)). Les courbes de survie sont représentées par des lignes en escalier dont la hauteur des marches est proportionnelle aux mètres linéaires de voie simple renouvelés sur un intervalle d'un an. Les lignes pointillées représentent l'intervalle de confiance.

Graphiquement, on observe que les probabilités de survie pour les courbes sont les plus faibles à presque tous les instants t (exprimés en année). Ces observations empiriques corroborent les enseignements de la littérature scientifique. Les sollicitations particulières subites par une voie en courbe (notamment tangentielles) au niveau du contact rail-roue sont responsables d'une usure abrasive bien plus importante. Naturellement, une voie en courbe, usée plus rapidement, est plus susceptible d'être renouvelée qu'une

voie en alignement droit. Graphiquement il n'est pas possible de dire qu'il existe une différence significative entre les courbes de rayon 30 et 50 mètres, ni entre les rayons 100 et 300 mètres. Et ici, le test du Logrank n'est pas approprié car toutes les courbes de survie ne respectent pas le principe des risques proportionnels (les courbes de chacun des groupes se croisent).

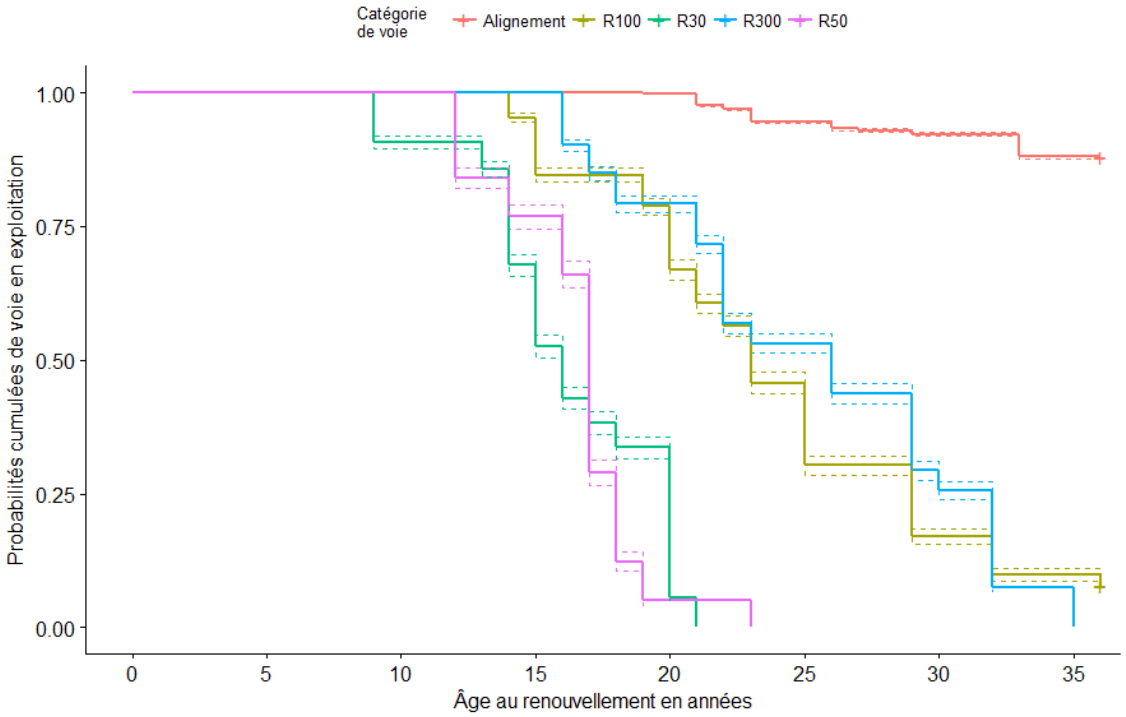


Figure 75 : Influence du rayon de courbure sur la distribution des âges au renouvellement

6.2.3.a *Comparaison des courbes de faible et grand rayon de courbure*

Compte tenu des similitudes graphiques entre les distributions d'âge au renouvellement entre les courbes de rayon 30 et 50 mètres et entre les courbes de rayon 100 et 300 mètres, nous choisissons de les regrouper. Ce regroupement en deux classes, celui des courbes de faible et grand rayons de courbure se justifient également par les vitesses d'exploitation pratiquées qui est fortement contrainte par la géométrie pour les courbes de faible rayon. Le tableau ci-après donne les statistiques de base pour ces deux classes de rayon de courbure.

Tableau 42 : Caractéristiques principales des classes de faible et grand rayon de courbure

Catégorie de voie	Linéaire total (avec censure)		Linéaire renouvelé	Données censurées à droite		Moyenne	σ	Coefficient de variation	Me
Faible rayon	2405	8%	3550	0	0,0%	16,3	3,15	19%	17
Grand rayon	4912	16,5%	4982	200	4,01%	25,4	6,21	24,45%	23

La comparaison graphique donnée par la figure ci-dessous permet de constater une différence significative entre les courbes de faible et grand rayon de courbure. Le taux de survie est systématiquement plus faible

pour les courbes de faible rayon. Cette observation est confirmée par le test du Logrank [31]qui donne un p-value<0,0001.

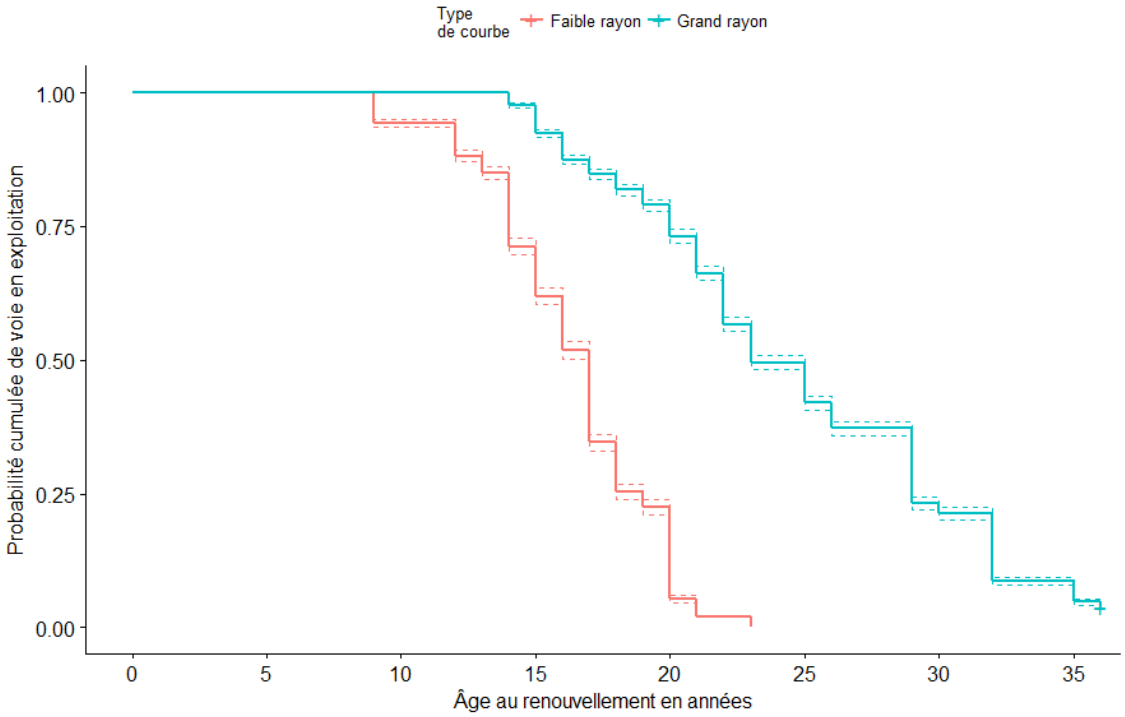


Figure 76 : Comparaison des fonctions de survie des courbes de faible et grand rayon

6.2.3.b *Influence du type d'exploitation de la ligne*

Ne pouvant disposer avec précision de l'évolution de la production kilométrique sur la ligne, nous nous reportons sur l'influence du type d'exploitation de la ligne sur l'âge au renouvellement. Nous proposons de comparer les taux de survie des courbes de faible et grand rayon et de courbure selon qu'elles se trouvent, ou non, sur le tronc commun avec la ligne B du réseau.

Tableau 43 : Caractéristiques principales des données d'âge au renouvellement par type d'exploitation

Type d'exploitation	Classe de rayon	Linéaire renouvelé (en m)	Données censurées à droite		Age moyen	Me	σ	Coefficient de variation
Simple	Faible rayon	1950	0	0%	16,99	18	3,01	17,72%
	Grand rayon	4152	200	4,82%	25,95	26	6,15	23,70%
Tronc commun	Faible rayon	1600	0	0%	15,53	17	3,14	20,22%
	Grand rayon	1030	0	0%	19,59	20	2,99	15,26%

[31] Le test du Logrank est basé sur la comparaison, tout au long de la durée d'exploitation, des risques de renouvellement dans chaque groupe par rapport au taux que l'on devrait avoir s'il n'y avait pas de différence entre les deux groupes.

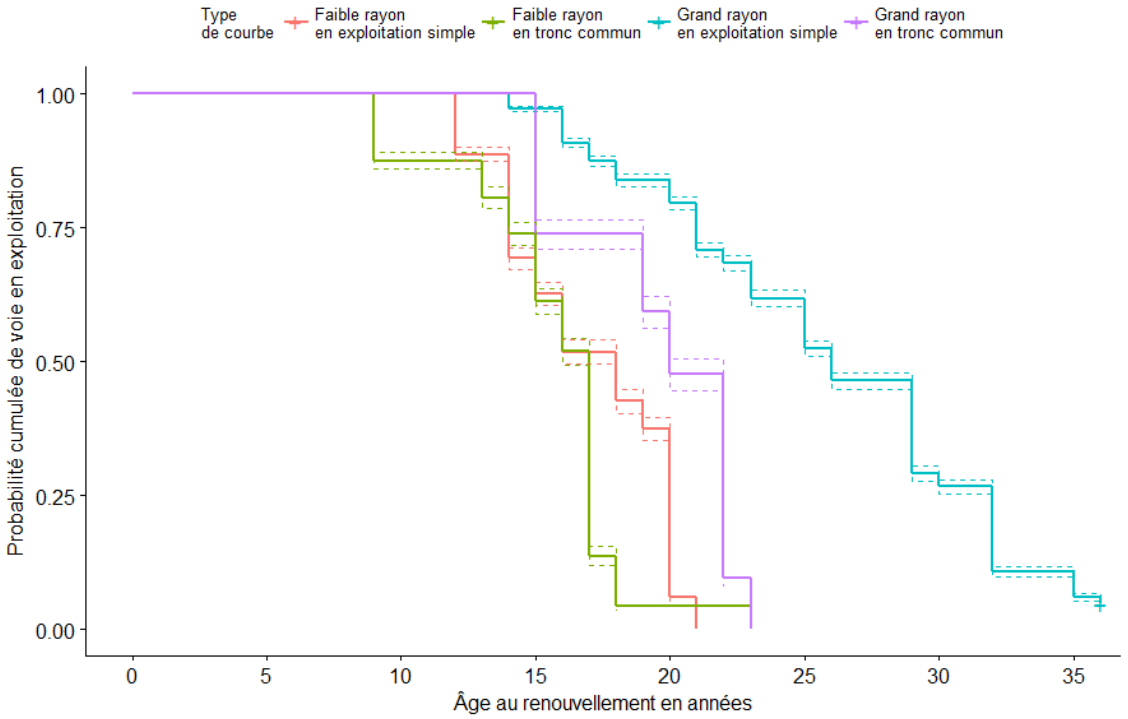


Figure 77 : Influence du type d'exploitation sur la distribution des âges au renouvellement des courbes de faible et grand rayon

Le tableau ci-contre montre que les courbes du tronc commun présentent des valeurs médianes et moyennes systématiquement plus faibles que celles situées sur une branche simple. Cette observation empirique corrobore la littérature académique puisqu'il parait attendu que le tronc commun soit davantage sollicité.

En revanche, la comparaison des courbes de survie donne une lecture sensiblement différente. Pour les courbes de faible rayon de courbure, l'influence du type d'exploitation est très limitée sur le taux de renouvellement tandis qu'il est significatif pour les courbes de grand rayon de courbure. Une explication probable pourrait être apportée par d'autres discriminants et en particulier celui de la vitesse d'exploitation qui se trouve bien plus réduite pour les courbes de faible rayon. À cette problématique, les modèles semi-paramétriques pourraient fournir une méthode appropriée mais nécessite de vérifier l'hypothèse des risques proportionnels et de disposer de davantage de données.

6.2.4. ESTIMATION PARAMETRIQUE DES COURBES DE SURVIE

Pour prévoir le nombre de renouvellements d'un équipement, il est essentiel de prévoir sa « durée de vie », c'est-à-dire sa durée d'utilisation (séparant les entrées de leurs sorties du patrimoine). Cette durée pour les ouvrages de génie civil dépend essentiellement des propriétés de robustesse et de fiabilité de l'équipement et de ses composants, et de ses conditions d'exploitation, d'entretien et de mise en œuvre. Le résultat de l'estimateur de Kaplan-Meier a identifié deux classes de rayon de courbure dont l'analyse graphique permet de supposer des similitudes en termes de distribution statistique des durées de vie. Toutefois, ces propriétés non-paramétriques limitent son utilisation à la description de l'âge au renouvellement en tant que variable aléatoire que l'on cherche à expliquer, et non à prévoir.

Pour prévoir, les modèles paramétriques se révèlent très utiles car ils permettent d'estimer la forme de la distribution du taux de défaillance. Ils formulent l'hypothèse que la distribution des durées de survie appartient à une famille de loi paramétrique de forme connue mais dont les paramètres restent à estimer. L'estimation des paramètres du modèle est ensuite obtenue à l'aide d'algorithmes permettant de maximiser la vraisemblance des observations (dans le cas de la méthode du maximum de vraisemblance mais d'autres méthodes parfois plus sophistiquées existent aussi). Les lois de Weibull constituent probablement l'une des familles de loi paramétrique la plus populaire.

Cette loi particulière de paramètre d'échelle η et de forme β est particulièrement adaptée pour la modélisation des modes de défaillance relevant de l'usure. En dépit d'une taille d'échantillon réduite (N=62), nous proposons de l'utiliser pour prévoir le taux de défaillance. La loi de Weibull s'exprime de la manière suivante:

$$R(t) = exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] = exp[-H(t)] \quad (21)$$

Avec :

R(t): la survie du système à l'instant t,

H(t): la fonction de risque cumulé (soit l'intégral du taux de risque instantané ou taux d'avarie instantané noté $\lambda(t)$).

Notons la particularité fondamentale de la loi de Weibull par rapport à la loi exponentielle qui suppose un taux de risque constant, ici l'hypothèse de Weibull tient compte de la variation du risque sur la durée. Il en résulte que suivant β soit supérieur, égal ou inférieur à 1 la loi de Weibull peut correspondre à un taux de risque instantané croissant, constant ou décroissant. Le paramètre η est un simple changement d'échelle des temps, usuellement désigné sous le nom de durée de vie caractéristique, qui n'intervient pas dans la forme de distribution, laquelle ne dépend que de β.

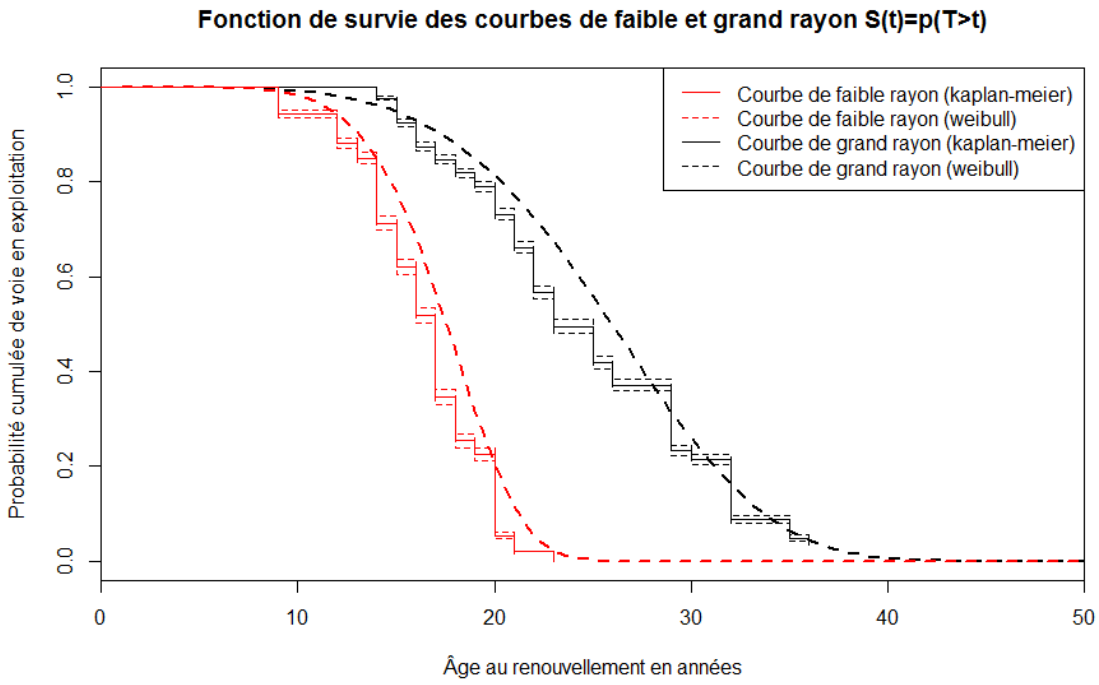


Figure 78 : Estimation paramétrique des lois de survie des courbes de faible et grand rayons

La méthode des maximums de vraisemblance appliquée aux courbes de survie non paramétriques estimées au chapitre 6 donne ainsi η=17,6 et β=6,06 pour les courbes de faible rayon et η=27,11 et β=4,45 pour les courbes de grand rayon. Remarquons qu'une loi de Weibull dont le paramètre de forme est supérieur à 3 s'accommode approximativement à une loi normale.

L'estimateur paramétrique obtenu permet alors de ne plus concevoir l'âge comme une variable aléatoire que l'on cherche à expliquer (il s'agit du rôle de l'estimateur non-paramétrique) mais comme un paramètre renvoyant à un taux de survie.

La moyenne de durée de vie, à partir de laquelle on estime généralement les besoins en renouvellement, se calcule pour une loi de Weibull par l'expression suivante :

$$E\left(t_{système}\right) = \eta.\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \quad (22)$$

Avec E ($t_{système}$) correspondant à l'espérance de la durée de vie du système.

Toutefois, l'estimation des besoins en renouvellement à partir d'une durée de vie moyenne, donc sans dispersion, pose un problème pour les gestionnaires qui risquent de se voir confronter à des afflux importants de travaux auxquels ils auront de grandes difficultés à faire face financièrement (Renaud et al., 2011). Pour résoudre ce problème, nous proposons une approche fondée sur la théorie du renouvellement qui suppose l'existence d'un système dont la distribution d'âge au renouvellement sous conditions extérieures constantes (sollicitations, pratique de maintenance, humidités, etc.) puisse être modélisée par une fonction de survie R(t)).

6.3. PREVISION DES RENOUVELLEMENTS

6.3.1. MODELISATION ET APPROXIMATION D'UNE LOI DE RENOUVELLEMENT

Supposons que le système soit renouvelé, en un temps négligeable, par un nouveau système aux caractéristiques identiques à $t=T_1$. Donc T_1 est la durée de vie du premier système. Puis, supposons que le nouveau système soit lui aussi remplacé instantanément à $t=T_2$. Alors la durée de vie du second système correspond à la différence de T_2-T_1. Si nous considérons ces séquences de renouvellement comme parfaitement continues et infinies, nous obtiendrons des durées de vie T_1, T_2-T_1, T_3-T_2, T_{n+1}-T_n, qui sont distribués de manière indépendante et identique avec une fonction F(t). Tel que

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{23}$$

Alors, selon la théorie de la fonction de renouvellement, le nombre attendu de renouvellements, dans un intervalle de temps t, satisfait l'intégrale suivante :

$$M(t) = F(t) + \int_0^t M(t-x).f(x).dx \tag{24}$$

Nous modélisons la distribution des âges au renouvellement par une fonction de Weibull à deux paramètres (β, η). Toutefois, le calcul de la fonction de renouvellement pour la distribution de Weibull n'admet pas de solution analytique. Il est néanmoins possible de recourir à des approximations, ce qui intéresse particulièrement les opérateurs à la recherche de simplicité d'utilisation.

Pour une très faible valeur de t, le nombre de renouvellements est soit égal à 0, soit égal à 1, de sorte que sa valeur approximative pour $t<<\mu$ est

$$M(t) \approx 1.F(t) + 0.[1 - F(t)] = F(t) \tag{25}$$

Pour des valeurs intermédiaires de t, tel que $t<t_\varepsilon=1{,}43\mu$, et un taux de risque instantané croissant, (Jiang, 2010) propose l'approximation de la fonction de renouvellement suivante :

$$M(t) \approx pF(t) + qH(t) \tag{26}$$

Avec $p + q = 1$ et où p dépend du paramètre de forme de la loi de Weibull selon la formule suivante :

$$p = 1 - exp\left[-\left(\frac{\beta - 1}{0.8731}\right)^{0.9269}\right] \tag{27}$$

Pour un temps t suffisamment long, (L. Smith, 1953) a montré que le nombre moyen de renouvellements avait un comportement asymptotique tel que :

$$\lim_{t\to\infty}\left\{M(t) - \frac{t}{\mu}\right\} = \frac{\sigma^2}{2\mu^2} - \frac{1}{2} \tag{28}$$

(Parsa & Jin, 2013) estiment que l'approximation de Smith donne des résultats appropriés à partir de $t>t_0$ tel que

$$t_0 = \begin{cases} \frac{3}{2} c_x^2 \mu \quad si \quad c_x^2 > 1, \\ \mu \quad si \quad 0{,}2 < c_x^2 < 1, \\ \frac{1}{2c_x} \mu \quad si \quad 0 < c_x^2 < 0.2 \end{cases} \tag{29}$$

Avec

c_x : le coefficient de variation soit σ/μ

Résultat, pour l'estimation du nombre de renouvellements d'une loi de Weibull avec les paramètres issus de l'analyse de l'âge au renouvellement, nous obtenons les domaines de validité ci-dessous.

Tableau 44 : Domaine de validité des différentes approximations de la fonction de renouvellement M(t)

Type de rayon de courbure	η Paramètre d'échelle	β Paramètre de forme	t_ε Jiang's approx.	t_0 Smith's asymptotic approx.
Faible rayon (R<50m)	17,6	6,06	25,17	42,54
Grand rayon (R<300m)	27,11	4,45	38,76	48,53

Comme on peut le vérifier sur la figure suivante, l'approximation par la méthode asymptotique donne des résultats convenables lorsque t est grand. À l'inverse, la méthode proposée par Jiang est plus précise pour des valeurs plus faibles et on pourra se contenter de cette approximation pour des valeurs modérées de t. La méthode de Jiang présente l'avantage de fournir des résultats rapides et à très faible coût. Pour nos paramètres, le modèle de Jiang garantit des valeurs de M(t) jusqu'à 25 et 40 ans depuis la mise en service avec une erreur ε contenue sous 0,01.

Enfin, si l'on souhaite mesurer l'effort à consentir par le gestionnaire pour maintenir le système, la dérivée de la fonction de renouvellement M(t) permet de calculer le taux de renouvellement m(t).

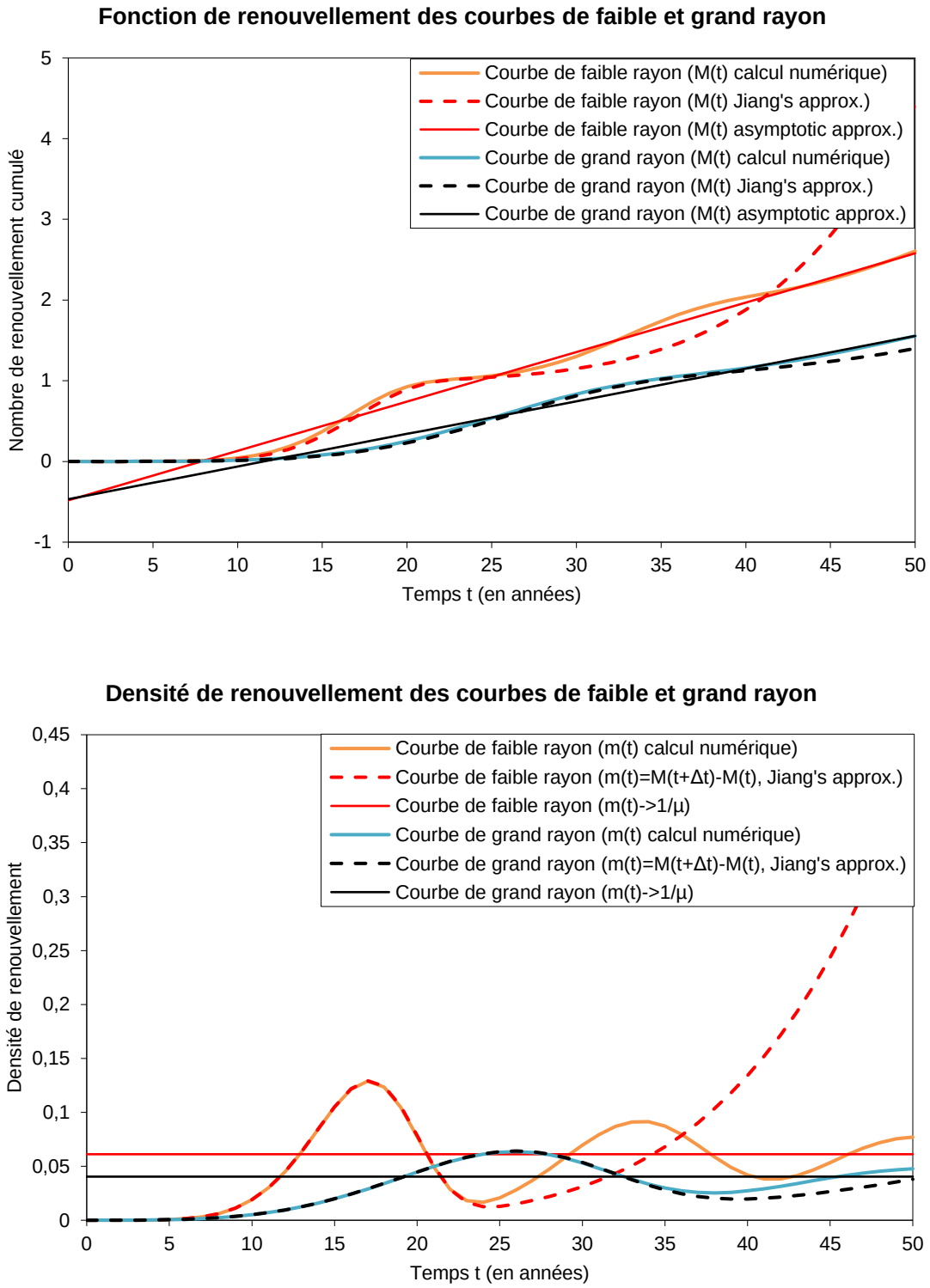


Figure 79 : Comparaison des différentes approximations de la fonction de renouvellement

6.3.2. RESULTATS DE PREVISION SUR LE RESEAU DE GRENOBLE

6.3.2.a *Méthode de calcul*

Notons a une section de voie en courbe dont la fonction de répartition est noté F_a, la fonction de renouvellement M_a, de longueur L_a et d'âge τ_a(depuis le dernier remplacement) à partir de l'année de référence $T_0 = 2024$.

Si $\tau_a = 0$ alors pour chaque âge ΔT, la longueur annuelle de rail à renouveler est de :

$$\varphi_a^{(0)}(\Delta T) = L_a . m_a(\Delta T) \text{ with } m_a(\Delta T) \equiv M_a(\Delta T + 1) - M_a(\Delta T) \quad (30)$$

Toutefois, pour la plupart des sections de voie, $\tau_a > 0$, nous devons donc tenir compte du temps qui reste jusqu'au prochain renouvellement. Notons p_a la probabilité que le renouvellement se produise à l'age $\tau_a + \rho_a$, donc à $T_0 + \rho_a$ on obtient :

$$p_a(\rho_a) = F_a(\tau_a + \rho_a + 1) - F_a(\tau_a + \rho_a) \quad (31)$$

Pour une année donnée $T = T_0 + \Delta T$, le flux de travaux de rénovation associé à la section est donc :

$$\ell(\Delta T) = L_a \left\{ p_a(\Delta T) + \sum_{i=0}^{\Delta T - 1} p_a(i) . m_a(\Delta T - i) \right\} \quad (32)$$

En sommant chacune des sections $\ell_a(\Delta T)$, nous obtenons les prévisions globales année après année des travaux de renouvellement des sections courbes du réseau.

6.3.2.b *Application numérique*

Le modèle par calcul numérique a été appliqué à l'ensemble des courbes du réseau. Un référentiel des courbes a été créé. Il identifie 86 courbes de rayon 25 à 300 m, le rayon de courbure, la date d'installation, la date éventuelle de dernier remplacement et le nombre de rechargement réalisé sur les rails.

La Figure 80 montre le résultat de l'application du modèle qui permet de projeter l'enveloppe des travaux de remplacement des rails jusqu'en 2050 (et au-delà). Les principaux résultats sont (i) que ce réseau implique un niveau de base de renouvellement d'environ 700 m/an, (ii) qu'un pic pouvant atteindre 900 m/an se produira entre 2035 et 2045. Ces deux informations ont mis en lumière les besoins budgétaires de la ville de Grenoble pour maintenir son réseau de tramway dans des conditions d'utilisation appropriées.

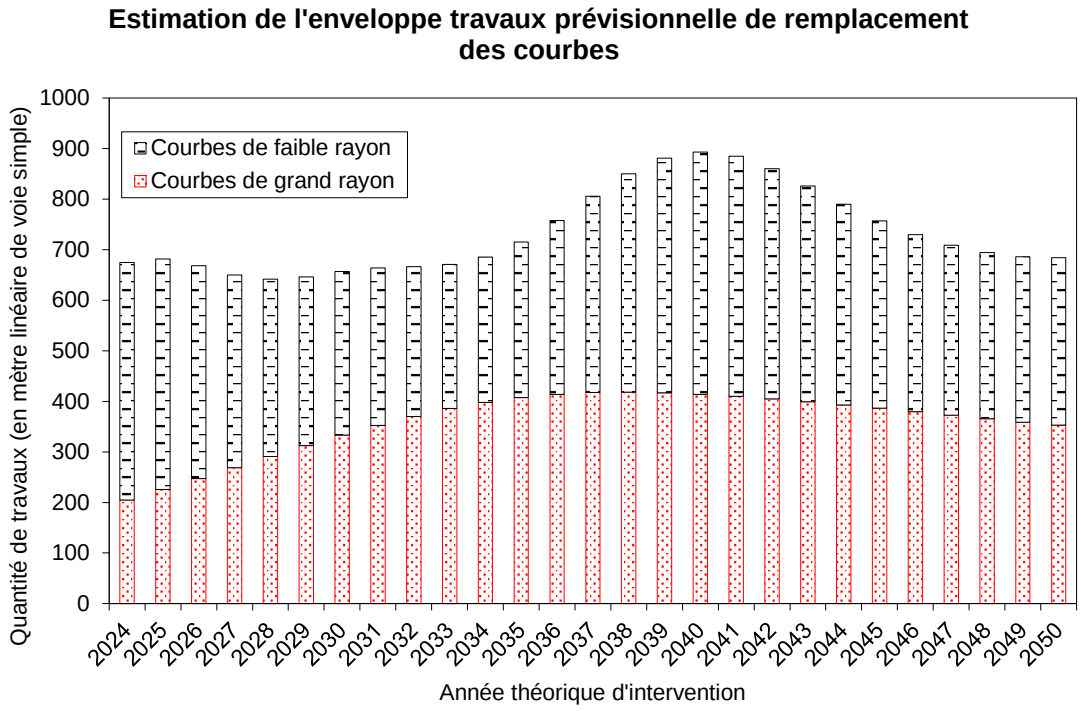


Figure 80 : Application du modèle de durée de vie des voies en courbes sur les courbes du réseau de Grenoble

Le modèle permet ainsi de définir un linéaire annuel de travaux de remplacement et un lissage des dépenses qui tient compte des écarts statistiques des durées de vie par rapport à la moyenne. En revanche, cette projection budgétaire ne tient pas compte des effets de « bloc » qui implique le remplacement d'une courbe par bloc pour des raisons techniques[32]. À cet effet, un parcours de la voie à pied a été réalisé pour effectuer des inspections par mesurage de l'usure et par contrôle visuel de l'état des voies. Il a ensuite été proposé une allocation des besoins en travaux selon 3 niveaux de certitude :

- **Niveau 3 de certitude (fort) :** les investissements ont été inscrits au programme à la suite d'un constat avéré de dégradation nécessitant une intervention à court terme.

  Critères pris en compte: usure abrasive du rail, nombre de rechargement, rayon de courbure.

- **Niveau 2 de certitude (moyen) :** les investissements ont été inscrits au programme à la suite d'extrapolations effectuées à partir d'un constat de dégradation nécessitant une intervention à court et moyen terme.

  Critères pris en compte: usure abrasive du rail, nombre de rechargement, rayon de courbure

- **Niveau 1 de certitude (faible) :** les investissements ont été inscrits au programme sur la base d'une hypothèse de durée de vie nécessitant une intervention à moyen long terme.

  Critères pris en compte: probabilité de survie associée à la classe de rayon de courbure

[32] En courbe, les rails nécessitent d'être cintrés ce qui implique généralement le remplacement entier d'une courbe pour des raisons pratiques et économiques.

CONCLUSION DE CHAPITRE

Les gestionnaires d'infrastructure de tramway ont traditionnellement orienté leurs stratégies de gestion patrimoniale sur la construction et l'expansion de leur patrimoine. L'accent est aujourd'hui en train de se déplacer du développement d'infrastructures nouvelles vers le maintien des infrastructures existantes. Si en France, les réseaux de tramway sont nombreux, la plupart sont récents, et le peu d'entre eux qui ont atteint des âges suffisamment avancés dispose de données limitées. Les données d'état sont généralement de mauvaise qualité mais tendent à s'améliorer. L'absence de standard de la maintenance rend leur communication difficile, renforcée par un contexte organisationnel au mieux concurrentiels entre les opérateurs, au pire conflictuel entre les opérateurs et les maîtres d'ouvrage si ce n'est pas parfois les deux. Les résultats des campagnes de recueil de données sur l'état local de la plate-forme de voie ne sont souvent pas comparables dans le temps, et lorsqu'ils peuvent l'être, ne sont pas représentatifs de l'ensemble du stock d'infrastructures. Cependant, le processus de dégradation se déroule relativement lentement et sur des infrastructures plutôt faciles d'accès, ce qui permet aux spécialistes d'estimer, à court terme, les besoins en travaux d'entretien et de renouvellement. Un procédé d'évaluation technique standardisé, pouvant être complété par des avis d'experts est toutefois à recommander. L'archivage informatique retraçant dans le temps et dans l'espace les opérations est par ailleurs essentiel.

Le recours aux statistiques correspondantes permettrait d'alimenter des stratégies prospectives à long terme, en particulier financières, des opérations de renouvellement. Nous avons mis en œuvre dans ce chapitre, une méthode qui présente l'intérêt de nécessiter peu d'informations. Nous avons montré comment estimer une fonction de survie non-paramétrique pour les voies ferrées de tramway en utilisant les données communément disponibles par les gestionnaires d'infrastructure et censurées à droite. Ce type de modélisation est une précieuse prémisse à l'estimation de fonctions de survie paramétrique qui permettent, au-delà de la période d'observation, d'extrapoler l'âge au renouvellement. Ces outils statistiques permettent de renseigner davantage que la notion de durée de vie et offrent des perspectifs utiles pour évaluer les besoins en financement sur le long terme pour les travaux de renouvellement. En revanche, nous rappelons que la mesure du temps jusqu'à la survenue d'un renouvellement, reflète une stratégie propre au gestionnaire qui dépend directement des considérations techniques de l'expert l'ayant conduit à programmer cette décision.

***

Pour le moment, nos observations circonstanciées mettent en évidence de façon quantifiée la durée de vie réduite des courbes de faible rayon, voire même de grand rayon de courbure. Ces observations pourraient être affinées en prenant en compte beaucoup plus finement

l'évolution de la production kilométrique, voire d'autres paramètres tels que les traitements effectués sur le champignon du rail (traitement anti-usure par exemple), la fréquence des meulages et les rechargements effectués pour observer leur incidence sur la durée de vie. Une taille plus importante de l'échantillon permettrait également une meilleure estimation des paramètres de vieillissement.

.

Chapitre 7

VERS UNE APPROCHE SOCIO-ECONOMIQUE DU RENOUVELLEMENT

La recherche économique dans le secteur des infrastructures publiques présente un intérêt particulier, parce que ce dernier constitue la base du développement socio-économique d'un pays et que des sommes colossales y sont consacrées chaque année, dans des domaines aussi divers que le transport, l'énergie, la santé, la culture, l'éducation ou la justice. A l'échelle nationale et supranationale, le domaine des infrastructures publiques retient l'attention des programmes gouvernementaux mais aussi d'organisations internationales comme la banque mondiale et l'OCDE car il a le pouvoir de façonner à long terme – parfois pour plusieurs siècles – un pays, sa croissance, la qualité de son environnement et sa capacité à affronter les défis futurs. En France, la loi du 31 décembre 2012 de programmation des finances publiques rend obligatoire[33] la conduite, par les porteurs de projet, d'une évaluation socio-économique préalable pour l'ensemble des investissements publics civils de l'Etat et de ses établissements publics, tous secteurs confondus. Ce type d'évaluation vise à mesurer la valeur sociale créée pour la collectivité. Elle rend compte, en analysant les gains de bien-être et les coûts induits pour la collectivité, l'ensemble des effets attendus d'un investissement. Les effets pris en compte couvrent un périmètre très large qui va au-delà des seuls gains financiers. Elle a finalement pour objectif de déterminer si les gains pour la collectivité surpassent les coûts consentis pour les obtenir. Parmi les coûts consentis, les coûts financiers figurent parmi les plus importants car ils représentent pour le porteur du projet, la contrainte budgétaire. Ils peuvent entraver, à eux seuls, la réalisation d'un investissement pourtant considéré comme créateur de richesse sociale. En fait, l'estimation des coûts d'investissement, puis l'analyse financière constituent les maillons d'une évaluation beaucoup plus vaste.

Dans le domaine des transports urbains et des transports en général, une évaluation socio-économique ex-post au plus tard cinq ans après la date de mise en service des infrastructures est obligatoire pour les projets les plus importants[34]. D'un point de vue technique, l'évaluation ex-post est similaire à l'évaluation ex-ante à la différence que la première s'appuie sur des données historiques mesurées au lieu de données prévisionnelles. Son principal objectif consiste à déterminer les effets réels d'un investissement une fois celui-ci réalisé, à les comparer aux prévisions, et à analyser les écarts entre les prévisions et les réalisations.

[33] Le décret n°2013-1211 du 23 décembre 2013 précise que cette obligation concerne les projets dont le financement apporté par l'Etat et ses établissements publics est supérieur à 20 millions d'euros, et pour ceux dont le financement dépasse 100 millions d'euros, une contre-expertise indépendante est rendue obligatoire.

[34] La loi du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs dit LOTI précise que cette obligation concerne les projets dont le coût d'investissement dépasse 83 millions d'euros.

Or, si la plupart des réflexions économiques interroge à juste titre les éventuels glissements des coûts et des avantages du projet, aucune ne tient compte des coûts élevés prévisibles des travaux de renouvellement. Or, ces interventions, qui consistent soit au remplacement[35], soit en la modernisation[36] de tout ou partie des composants du système ont de lourdes conséquences sur le coût **complet** des infrastructures alors que celui-ci est déterminant dans le choix d'une solution de transport et de son tracé. Ce chapitre a pour objectif de mesurer l'importance des facteurs de coût liés à des opérations de renouvellement.

Dans un premier temps, nous présentons une analyse critique du processus d'estimation dans l'ingénierie des infrastructures à partir d'une revue de littérature et nous montrons en quoi l'estimation d'une opération de renouvellement diffère du processus traditionnel. Dans un second temps, les principales notions élémentaires d'évaluation économique sont présentées, puis nous proposons une méthode d'évaluation socio-économique du renouvellement. Plusieurs méthodes de calculs sont décrites et une partie de la méthodologie est appliquée afin de mesurer l'influence des rayons de courbure sur le coût complet et d'évaluer l'intérêt d'une tactique de renouvellement selon le mode opératoire de travaux.

7.1. L'ESTIMATION DANS L'INGENIERIE DES INFRASTRUCTURES

Chaque projet de construction d'infrastructure traverse, depuis l'émergence de son idée jusqu'à sa mise en œuvre, différentes phases de conception. Pour chacune de ces phases, différents types d'estimation sont réalisés. L'avancement des études permet en effet une meilleure définition du projet, qui permet à son tour d'aboutir à des estimations encore mieux définies car les caractéristiques techniques du projet sont plus détaillées. Dans ce sous-chapitre, nous décrivons les méthodes et le déroulement du processus d'estimation des coûts au travers des sept phases successives d'un projet d'infrastructure en France, tout en gardant à l'esprit que (1) en théorie le coût constaté ne sera pas indifférent du résultat de l'estimation prévisionnelle (Figure 81), et que (2) en pratique la magnitude et la fréquence des sous-estimations sont nettement plus importantes que pour les surestimations dans le contexte des infrastructures (Flyvbjerg, Holm, & Buhl, 2002). Ces erreurs constituent le principal défaut du processus traditionnel d'estimation, dont nous présenterons les principales causes qui bénéficient d'une littérature académique abondante (Siemiatycki, 2018). Enfin, nous identifierons les particularités d'une estimation liée à un projet de renouvellement par rapport à l'estimation d'un projet neuf.

[35] Le remplacement est une opération qui vise au remplacement de tout ou partie des composants du système par des composants neufs assurant des fonctions similaires.
[36] La modernisation est une opération qui vise à une amélioration des fonctions d'origine. Cette amélioration peut se traduire par des gains de performance ou l'ajout de nouvelles fonctions.

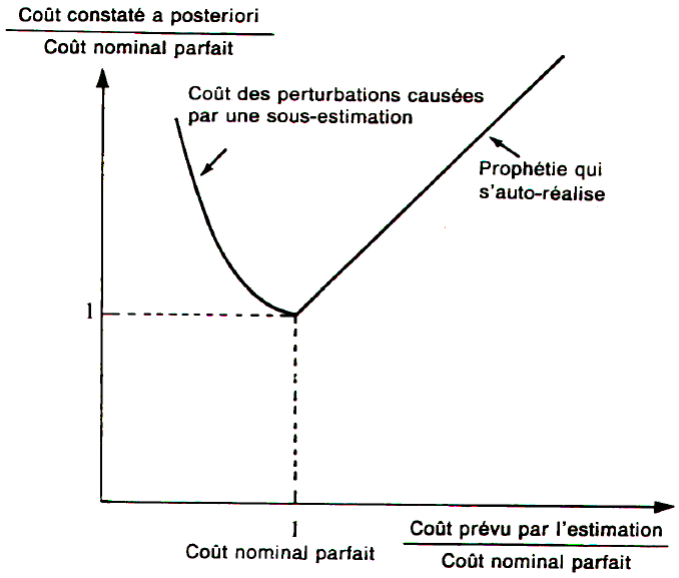


Figure 81 : De l'importance d'une prévision réaliste des coûts (Glade, 2005)

7.1.1. LES METHODES D'ESTIMATION DES COUTS

L'objectif de l'estimation des coûts est de produire, en fonction de la phase d'avancement du projet, des informations permettant d'établir le budget du projet. Dans la démarche de conception traditionnelle dite « à coût objectif », le budget est un élément crucial dans les phases de conception puisque les résultats économiques attendus auront un impact sur la réalisation du projet ou non et sur sa propre conception. Autrement dit, la contrainte budgétaire devient capitale et au même niveau que les objectifs de performance (les spécifications techniques et fonctionnelles) et de délai. Cela suppose donc que l'on soit capable de fixer un coût objectif réalisable, sinon, la réalisation du projet est compromise ou les spécifications techniques et fonctionnelles sont modifiées. Dans ce dernier cas, le coût objectif devient alors une contrainte et les performances deviennent les grandeurs variables.

Toutefois, les données requises pour établir un objectif de coût réaliste ne sont souvent pas disponibles directement, voire pas du tout, en raison des incertitudes associées aux caractéristiques techniques du projet et du fait que les données économiques sur des projets pouvant servir de référence manquent ou nécessitent d'être analysées. En conséquence, le choix d'une méthode d'estimation dépend du niveau d'information disponible.

Les méthodes peuvent être classées en 3 catégories :

- **les méthodes analogiques :** elles consistent en une ou plusieurs comparaisons avec un ou plusieurs projets passés de référence. La comparaison peut s'effectuer aussi sur des sous-systèmes particuliers à partir du moment où l'on dispose de données comparables et/ou corrélées. Ces méthodes sont les plus simples à mettre en œuvre et permettent d'aboutir rapidement à des résultats facilement interprétables. Toutefois, elles supposent que l'on dispose d'un système ou d'un sous-système comparable, ou alors que l'on sache en apprécier les principales différences souvent à dire d'expert. Elles sont alors bien adaptées lors des phases amont d'un projet pour l'identification des premières enveloppes budgétaires.

- **les méthodes paramétriques :** elles consistent à établir des corrélations entre des variables explicatives et le coût. On distingue généralement deux groupes de méthodes paramétriques : les estimations avec utilisation de barèmes et les estimations statistiques. Le barème est généralement un coût rapporté à une grandeur physique significative issue d'une base de données d'entreprise. Il s'agit d'une méthode rudimentaire mais qui permet de chiffrer le projet ou un élément du projet en multipliant le coût unitaire calculé par le barème et les quantités à produire. Les estimations statistiques sont des méthodes mathématiques plus avancées qui permettent aussi des résultats rapides. En revanche, elles sont plus exigeantes en matière de base de données sur des projets antérieurs. Ces dernières sont davantage gourmandes en observation et le coût de traitement des données, particulièrement chronophages, est encore plus important. Il faut traiter séparément les projets par catégorie, selon le type d'ouvrage mais aussi selon la méthode d'exécution par exemple et enfin renseigner les variables caractéristiques (ou descripteurs techniques) dont on suppose qu'elles possèdent un pouvoir explicatif des coûts. La robustesse des résultats augmente avec le nombre d'observations, mais en cas de projet aux caractéristiques trop éloignées de l'échantillon, de ruptures technologiques ou d'innovations majeures, l'estimation ne pourra être gérée avec une très grande fiabilité. Finalement, les méthodes paramétriques sont bien adaptées pour les phases en amont et préliminaires des projets pour peu que l'on dispose des caractéristiques principales du projet. Toutefois, de par leur grande diversité, on peut parfois les retrouver dans des phases de conception plus avancées. Elles sont généralement jugées plus fiables que les méthodes analogiques et aussi plus rigoureuses du point de vue théorique.
- **les méthodes analytiques :** elles procèdent par une analyse technique détaillée du projet et estiment le coût total du projet par addition des différents coûts élémentaires. Elles reposent donc sur une bonne connaissance des caractéristiques techniques et des informations détaillées sur l'élément à chiffrer notamment les composants élémentaires, les quantités et les coûts unitaires. Ce niveau de détail rend généralement ces méthodes moins adaptées aux phases en amont et préliminaires mais il est possible de recourir en partie à des analogies et des ratios empiriques pour pallier le manque d'informations. Imbriquées avec les méthodes précédentes, elles peuvent donc être appropriées pour fournir des estimations précoces tout en offrant une excellente compréhension des différents postes de coût. Elles sont d'ailleurs indispensables pour la mise en œuvre de méthodes de contrôle et de pilotage des coûts (p.ex. analyse de la valeur, conception à coût objectif, etc.). En revanche, le principal défaut de ces méthodes est qu'elles sont peu performantes pour gérer les coûts indirects ou de nature systémique.

Pour terminer, quelle que soit la méthode, il faut nécessairement construire une banque de données de coûts fiables et donc capitaliser intelligemment sur les projets passés. En pratique, ces méthodes sont imbriquées à des niveaux différents selon l'avancement des études. Les phases de chiffrage sont rarement cloisonnées et des retours en arrière sont possibles. Finalement, la méthode la plus juste est celle qui s'adapte le mieux aux données.

7.1.2. LES FACTEURS DE COMPLEXITE DES COUTS DES INFRASTRUCTURES

« Il n'existe pas de formule simple pour définir le coût des infrastructures quelle qu'elle soit » disait (Zhang, 1994), auteur d'une thèse de doctorat sur la modélisation statistique multivariée des coûts des tunnels de

métro. En effet, le coût des études et des travaux d'infrastructure est lié à des facteurs de complexité que l'on peut répartir en quatre rubriques :

- les facteurs liés à **l'environnement physique** : particularités du site d'accueil de l'ouvrage (topographie, climat, zone inondable, etc.) et de son sous-sol (encombrement, géologie, etc.), les caractéristiques éventuelles de son environnement urbain ou naturel (densité d'occupation du site, contraintes d'insertion urbaine, zones protégées, etc.), ou encore l'existence de risque (sismique, hydraulique, l'exposition aux vents, etc.),
- les facteurs liés **aux spécificités du projet**, à la nature et à la consistance du programme : le caractère plus ou moins modulaire et (ou) standardisé des ouvrages ou à l'inverse leur conception spécifique, le nombre d'ouvrages, le linéaire ou la quantité de travaux, l'emploi de technologies sophistiquées ou complexes (structure, matière, équipement, performances ou contraintes d'utilisation singulières), l'architecture et l'organisation des chantiers (phasage des travaux, exploitation sous contrainte, la durée, méthodes d'exécution particulières, etc.),
- les facteurs liés **« aux exigences contractuelles »** (France & Ministère de l'écologie, 2011) : la multiplication des acteurs ou la complexité « institutionnelle », des décisions diffuses ou itératives, des circuits d'approbation complexes, des procédures de validation peu claires, l'incomplétude ou l'inexactitude des données d'entrée, des clauses contractuelles particulières (procédure d'assurance qualité spécifique, l'exigence d'emploi d'outils CAO-DAO, le caractère inflationniste, trop segmenté et parfois répétitif des réunions), le fractionnement des missions et des allotissements de travaux, l'importance du champ des variantes proposé par l'entreprise ou encore la durée des prestations.
- et les facteurs plus traditionnels liés **à la conjoncture et à l'environnement socio-économique** : on peut évoquer à titre d'exemple, la pénurie de main-d'œuvre spécialisée ou non, la hausse des prix des matières premières, mais aussi d'autres facteurs plus locaux comme le contexte concurrentiel, ou la localisation exceptionnelle du site comme les zones de hautes montagnes ou les cas d'insularité.

Ainsi l'estimation des coûts d'un projet neuf, par exemple pour une infrastructure de transport, fondée sur la seule longueur de la ligne sans considération pour les éléments essentiels de leur définition physique (équipements, matériels roulant, capacité, espacement des stations, etc.) et leur environnement risque de conduire à des erreurs grossières d'appréciation. En règle générale, la maîtrise d'ouvrage va donc choisir une équipe de maîtrise d'œuvre pour examiner conjointement les éléments de complexité pouvant influencer, soit en qualité, soit en quantité, les études et les travaux d'infrastructure.

7.1.3. Le processus traditionnel d'estimation des couts de projets d'infrastructure : le pilotage d'un processus progressif

En France, les phases d'un projet de construction sont définies dans le cadre de la loi n°85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée. De la phase préliminaire à la phase de mise en service, la loi précise le contenu et les objectifs de chaque phase d'un projet de construction, à l'exception de la phase amont qui n'est pas définie par la loi. Cette phase comprend l'ensemble des études réalisées avant la phase préliminaire, et son niveau de réflexion, sa durée et son coût peuvent être extrêmement variables(CEREMA, 2014).

La consistance des études menées lors de la phase Amont varie en fonction de la présence ou non d'une politique stratégique des transports sur le territoire. Lorsqu'elle existe, cette politique fait l'objet d'un Plan de Déplacement Urbain (PDU) qui, selon les cas, aura analysé les besoins en déplacement du territoire, ou plus finement, aura identifié un ou plusieurs corridors de déplacement et ses besoins en infrastructure. À ce stade, une estimation est réalisée sur la base de ratio grossier (en l'absence d'étude détaillée) à la fois pour analyser la soutenabilité financière du projet d'investissement que pour la prise en charge future des coûts d'exploitation. Il s'agit plus des prémisses de l'analyse socio-économique proprement dite. À l'issue de la phase amont, les études permettront de fixer, sur le corridor de déplacement de déplacement, le choix du mode de transport et ses variantes de tracé, en cohérence avec l'estimation de la demande, les capacités de financement de l'investissement et les principales contraintes d'insertion pouvant écarter certains modes.

À partir des résultats de la phase amont, les études préliminaires formalisent une phase d'exploration des variantes du projet au regard des différents choix techniques locaux liés à son environnement rapproché et à ses aspects fonctionnels, socio-économiques et financiers. Ainsi, les variantes évaluées à ce titre sont des variantes techniques à l'intérieur des emprises définies, selon les cas, dans le Plan de Déplacement Urbain (PDU) ou la Déclaration d'Utilité Publique (DUP) et les études menées en phase Amont. **L'estimation préliminaire** reste à l'issue de cette phase encore imprécise mais s'affine sur la base d'une décomposition par poste de coûts (Tableau 45) grâce au choix définitif des principales variantes techniques.

Tableau 45 : Décomposition des coûts d'investissements en 19 postes de dépense (CERTU, 1997)

I.	Etudes d'avant-projet/projet	**X.**	Revêtement du site propre
II.	Maîtrise d'ouvrage	**XI.**	Voirie (hors site propre) et espaces publics
III.	Maîtrise d'œuvre de travaux	**XII.**	Equipements urbains
IV.	Acquisitions foncières et libération des emprises	**XIII.**	Signalisation
V.	Déviation de réseaux	**XIV.**	Stations
VI.	Travaux préparatoires	**XV.**	Alimentation en énergie de traction
VII.	Ouvrages d'art	**XVI.**	Courants faibles et PCC
VIII.	Plateforme	**XVII.**	Dépôt
IX.	Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	**XVIII.**	Matériel roulant
		XIX.	Opérations induites

Partant des études préliminaires, la phase suivante dite d'Avant-projet a pour objet d'optimiser la conception en cohérence avec son enveloppe budgétaire. Les études géométriques, par exemple, relatives à l'urbanisme et à l'insertion « physique » du système dans son environnement rapproché sont réalisées ce qui conduit à une estimation plus précise – **l'estimation prévisionnelle (C0)** – car le coût prévisionnel est détaillé par partie d'ouvrage et par nature de travaux et les incertitudes[37] y sont indiquées. D'autres études sont conjointement réalisées avec le même effet sur la définition du projet et son estimation prévisionnelle telles que : les études d'exploitation, les études de circulation, les études « systèmes » liées

[37] Les incertitudes peuvent prendre la forme d'une provision pour risque identifié (PRI) ou provision pour risque non identifié (PRNI). Elles sont généralement contenues autour de 10 à 15% selon les bases d'estimation utilisées.

au choix du mode de transport, les études de planification et d'organisation des travaux pour ne citer que les principales. A l'issue de la phase d'Avant-projet, le maître d'ouvrage dispose d'un niveau de définition du projet décisif permettant à la fois de sécuriser le projet et lui permettre de pouvoir décider de poursuivre ou non la réalisation du projet (CEREMA, 2014). C'est ce que montre la figure ci-dessous : l'optimisation de la conception du projet le plus en amont possible présente un intérêt économique car les potentialités de gains sont importantes et les coûts engagés sont faibles. En même temps, la phase de conception apparait aussi comme une phase majeure pour la maîtrise de la performance du projet (le rapport coûts-avantages) car c'est lors de celle-ci que la plus grande part des coûts du projet est engagée.

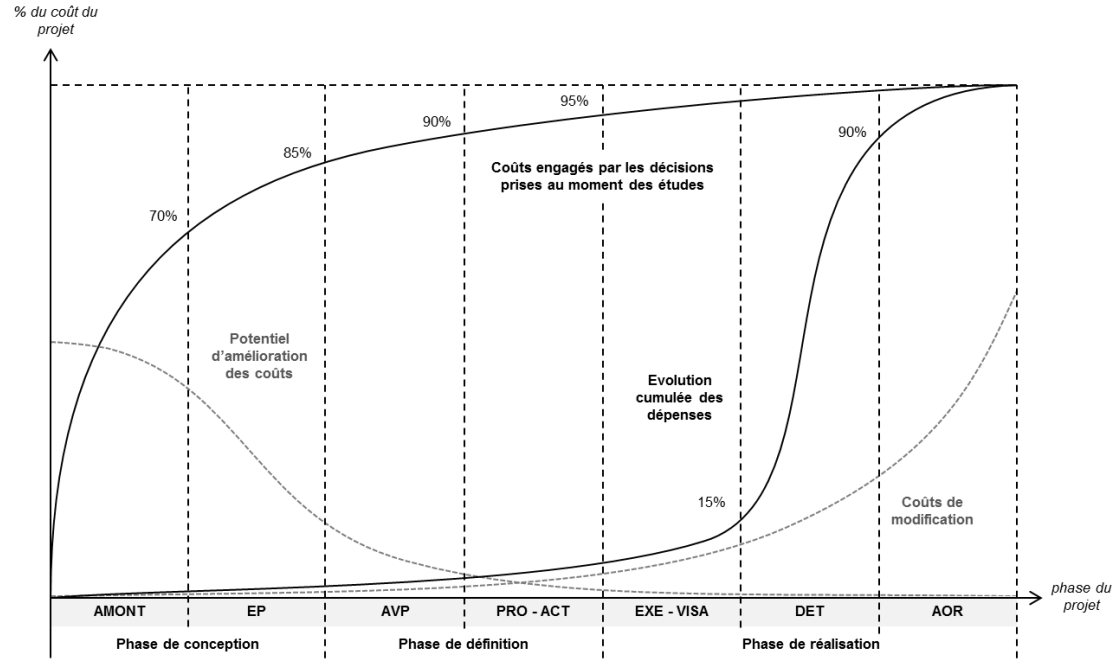


Figure 82 : L'engagement progressif des coûts d'un projet d'infrastructure (adapté de (Perry & Bernard, 2003))

Lors de la phase de projet, les études entrent dans une phase de développement des choix de conception retenus. Elles précisent le projet et mettent l'accent sur les dispositions constructives et leurs spécifications détaillées ce qui conduit à une meilleure estimation des prix unitaires des matériaux et des quantités élémentaires. A ce stade, l'estimation est la plus rigoureuse possible car il s'agit de la dernière estimation avant la phase d'appel d'offres et l'exécution du projet, c'est **l'estimation consolidée (C)**. Elle doit permettre une consultation sans ambiguïté en corps d'état séparés selon l'allotissement des marchés de travaux. Vient ensuite la phase d'appel d'offres qui, parmi les entreprises candidates, sélectionnera le contractant le plus approprié au regard d'une comparaison multicritère dont le prix est presque un intangible. L'estimation actualisée est d'autant plus importante que les entreprises choisies s'y engagent contractuellement.

Toutes ces phases d'étude conduisent aux phases de réalisation : les études d'exécution (EXE) et leur vérification par le maître d'œuvre (VISA) puis les travaux (DET) et leur réception (AOR). La réalisation, pour faire simple, est une phase d'exploitation des études de projet pour sa mise en chantier. À ce stade, les estimations quantitatives contractuellement déterminées dans la phase d'appel d'offre peuvent néanmoins encore évoluées pour certaines raisons, notamment si les clauses contractuelles attribuent certains risques au maître d'ouvrage (p.ex. l'augmentation du niveau des prix), ou encore si lors de la

construction, plusieurs ajustements ou modifications peuvent sembler nécessaires ou souhaitables. Les coûts supplémentaires induits par ces modifications conduisent alors à de nouvelles négociations avec l'entreprise contractante et à de nouvelles études ; c'est à ce niveau que le coût du projet peut être lourdement impacté. On parlera à l'issue des études des entreprises lors de la phase EXE, de **l'estimation définitive (Cd)**, mais ce n'est qu'après les opérations de réception des ouvrages que l'on pourra vraisemblablement calculer le coût réel du projet.

7.1.4. DE LA DIFFICULTE D'UNE ESTIMATION REALISTE : LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

La construction et la maintenance des infrastructures – les projets d'infrastructures publics – sont essentiellement de la responsabilité du secteur public. Elles se caractérisent par une forte intensité capitalistique, de longues périodes de maturation et de construction (parfois plusieurs décennies sont nécessaires) et un processus complexe d'évaluation, dont on pourrait penser qu'il est maîtrisé avec l'expérience acquise au fil des projets.

Il y a pourtant, et ce depuis longtemps dans les projets d'infrastructures, une large propension à la dérive des coûts et des délais à la mise en service. Elle est constatée mondialement et tout secteur confondu (Flyvbjerg et al., 2002), la littérature académique et technique est abondante à ce propos, et un nombre significatif d'études ex-post indiquent que ces écarts sont récurrents, pour ne pas dire courants, entre les coûts estimés et réels d'un projet. Les écarts constatés varient significativement selon ces études; la dérive moyenne des coûts par exemple (average cost deviation) peut varier de +6 à +179%[38] (Miranda Sarmento & Renneboog, 2017) selon les études sans distinction de secteur. Mais ces disparités restent malgré tout significatives au sein d'un même secteur. Plusieurs auteurs ont ainsi montré dans le secteur du rail des dérives moyennes relativement importantes, notamment (Pickrell, 1990) +50% constaté aux Etats-Unis, (Dantata, Touran, & Schneck, 2006) +30% aux Etats-Unis, (Cantarelli, Flyvbjerg, & Buhl, 2012) +10,6% aux Pays-Bas et +30% au niveau mondial, (Love, Zhou, Edwards, Irani, & Sing, 2017) +22% en Australie ou encore (Flyvbjerg, 2007) qui calcule une dérive moyenne des coûts sur un échantillon mondial à +44,9%.

La première raison de ces disparités serait liée au **point de référence** à partir duquel l'écart relatif est calculé. En effet, comme nous l'évoquons au §7.1.3, entre l'estimation préliminaire et le démarrage des travaux, plusieurs estimations sont établies et affinées avant d'être soumises à une approbation définitive.(Love, Smith, Simpson, Regan, & Olatunji, 2015) suggère par exemple que ce point de référence devrait être fixé au moment de la signature de contrat avec les entreprises de travaux, quand d'autres auteurs situent le point de référence au moment de la prise de décision formelle de construire (Cantarelli, van Wee, Molin, & Flyvbjerg, 2012; Flyvbjerg, 2007) ; ce qui peut correspondre à des temporalités très différentes lors de comparaison internationale. D'autant plus que certains cadres juridiques, différents selon les pays, peuvent influencer le moment de prise de décision, notamment lorsqu'il s'agit de marchés de conception-réalisation traditionnel ou les moins classiques marchés de partenariat également connus sous le nom de partenariat public-privé.

[38] + 179% de dérive moyenne des coûts des projets destinés aux Jeux Olympiques de 1960 à 2012 (Flyvbjerg & Stewart, 2012)

Également, la plupart des grands projets financés par les fonds publics ont tendance à suivre une longue période de maturation au cours de laquelle de nombreuses modifications de projet peuvent être apportées et s'accompagner alors de coûts connexes. Dans certains cas, une comparaison directe entre l'estimation initiale au moment de la décision de construire et les coûts réels semblerait trompeuse (Love, Ahiaga-Dagbui, & Irani, 2016). C'est d'autant plus vrai que le point de référence se situe en amont du processus d'évaluation. De plus, les modifications de projet, surtout si cela impacte le périmètre du projet peuvent induire une augmentation des honoraires, et donc du coût des études. Dans l'idéal, il faudrait alors pouvoir distinguer les facteurs de dérive des coûts, ce qui requiert des enquêtes qualitatives pour chaque projet et ce faisant, limite considérablement la taille des échantillons pouvant être raisonnablement étudiés.

Ce qui nous conduit à la dernière raison de ces disparités, les tailles des échantillons étudiés sont très diverses et souvent trop petites (en particulier pour le secteur du rail), les coefficients de variation sont globalement trop grands et finalement les distributions statistiques ne permettent pas de produire des conclusions aves un niveau de confiance statistique suffisant. D'autres facteurs peuvent limiter la comparaison statistique de ces études, notamment la taille des projets étudiés ou encore la prise en compte ou non de l'inflation (Siemiatycki, 2009).

Avec ces limitations en tête, gardons néanmoins à l'esprit que (1) ces études ont le mérite d'exister, (2) leurs résultats doivent être perçus comme un aperçu d'une tendance de fond, et (3) indépendant du point de référence utilisé; il existe un consensus général pour dire que les projets d'infrastructures font fréquemment l'objet d'une dérive des coûts et parmi eux, le secteur du rail est typiquement confronté à des surcoûts imprévus d'une magnitude globalement plus importante. A titre d'exemple, les résultats ci-dessous de l'étude de (Flyvbjerg et al., 2002), considérée comme une contribution majeure dans ce champ académique (Siemiatycki, 2018), illustre ce propos (Tableau 46). Sur son échantillon presque 9 projets sur 10 ont enregistré une augmentation des coûts.

Tableau 46 : Dérive moyenne des coûts des projets d'infrastructure (à prix constant) (Flyvbjerg et al., 2002)

Type de projets	Taille de l'échantillon	Dérive moyenne des coûts (%)[39]	Ecart-type	Coefficient de variation (%)
Rail	58	44,7	38,4	85,9
Ouvrage d'art	33	33,8	62,4	184,6
Route	167	20,4	29,9	146,6
TOTAL	**258**	**27,6**	**38,7**	**140,2**

Mais alors que la littérature académique (celle qui relève d'une recherche académique) et technique (celle qui relève d'une mission d'audit : industriel, bureau d'étude, gouvernement) est abondante et cohérente dans la constatation générale que les projets d'infrastructure subissent régulièrement une dérive des coûts, il y a des désaccords considérables sur les raisons pour lesquelles les coûts augmentent si souvent. Les diverses explications qui ont émergées de ces études ainsi que le nombre conséquent de références croisées entre ces études rendent, en outre, difficile l'identification d'une seule explication.

[39] Le point de référence choisi pour le calcul est situé au moment de la prise de décision formelle de construire.

Pour les explications les plus courantes, (Ahiaga-Dagbui & Smith, 2014) proposent de les classer en deux catégories, certes connexes, mais pas moins différentes dans la compréhension des causes à l'origine de l'augmentation des coûts : la sous-estimation et le dépassement des coûts. Ils proposent de décrire les sous-estimations comme la différence entre le coût à la création du projet (au stade des études préliminaires) et le coût à la fin de la phase de définition, et les dépassements comme la différence entre le coût à l'achèvement du projet et celui au stade de la définition du projet. Ils apportent une clarification supplémentaire à la notion de **point de référence** qui fournit un cadre utile pour catégoriser les résultats des études académiques et techniques.

La plupart des études académiques reconnaissent les difficultés techniques associées à la prévision d'évènements futurs. Comme évoqué précédemment, les projets d'infrastructures publics tendent généralement à suivre de longue période de maturation au cours de laquelle des modifications sur la consistance et la portée du projet peuvent survenir. Les coûts estimés à la création d'un projet ne tiennent souvent pas compte de beaucoup de détails, soit parce que les données sont indisponibles, soit parce qu'elles sont imprécises ou inadéquates. (Flyvbjerg, Skamris holm, & Buhl, 2003) notent que ces difficultés techniques à prévoir ces évènements augmentent avec la complexité du projet (voir l'introduction du §7.1 qui énumère les principaux facteurs de complexité). Toutefois, les modifications de projet au cours des études – même significatives – sont la conséquence d'un processus de conception rationnel tant les coûts engagés restent faibles à ce stade (Figure 82). (Love et al., 2016) considèrent d'ailleurs qu'il serait trompeur de conclure que le projet a été sous-estimé alors que celui-ci a subi d'importantes modifications **en phase d'étude.** En revanche, ils considèrent que lorsque des modifications de projet – même mineures – interviennent en **phase de réalisation**, elles conduisent généralement à des dépassements de coût au sens de la définition de (Ahiaga-Dagbui & Smith, 2014).

En fait, de la littérature académique on distingue nettement deux groupes de pensées (Ahiaga-Dagbui & Smith, 2014; Love et al., 2015; Siemiatycki, 2009). Le premier groupe soutient l'idée que les projets d'infrastructures publics font régulièrement l'objet d'un dépassement des coûts auquel il identifie la plupart du temps deux causes majeures d'ordre technique : les modifications de projet en phase de réalisation (Love et al., 2017) et les dispositifs d'information, de gestion et de suivi de la performance des projets qui sont jugés perfectibles (Siemiatycki, 2009). D'autres facteurs techniques, internes à la gestion de projet, sont régulièrement évoqués tels que les erreurs ou les omissions dans les documents contractuels (p.ex. les cahiers des clauses administratives et techniques), les défauts de conception ou d'ordonnancement des travaux, la gestion des interfaces, la mauvaise gestion des risques, les retards de calendrier, l'inflation inattendue des prix, les conditions climatiques ou géotechniques imprévues, etc. A partir des travaux de (Busby & Hughes, 2004), (Love, Edwards, Irani, & Walker, 2009) proposent d'introduire la notion d'éléments pathogènes pour mieux décrire ces chaînes causales pouvant donner lieu à des reprises d'étude ou de travaux et ainsi contribuer au dépassement des coûts. Un pathogène y est présenté comme un artefact représentant des conditions latentes, pouvant rester passif pendant une longue période de temps – jusqu'à parfois devenir une partie intégrante d'une tâche, d'une pratique, d'une routine ou encore d'une organisation circonstanciée du travail. Lorsqu'il est combiné à un évènement ou un acte inapproprié ou dangereux, il conduit à des erreurs et des omissions dont les conséquences peuvent entrainer des incidents et/ou des reprises engendrant des surcoûts imprévus. Ces explications sont majoritairement soutenues par les professionnels, les institutionnels ainsi que les auditeurs mais aussi quelques chercheurs qui sont généralement rattachés à des départements d'ingénierie et génie civil au sein

d'une université. A partir d'un point de vue interne de la gestion des projets d'infrastructures, ils mettent en avant l'influence des facteurs techniques dans le dépassement des coûts.

Au contraire, le second groupe, même s'il reconnait que les facteurs techniques sont importants, estime que la dérive des coûts constatée sur les projets n'est pas simplement le résultat de déficiences techniques (Siemiatycki, 2009). En fait, une très grande partie de la littérature académique issue de la planification urbaine, de la psychologie, de la sociologie en passant par le management et la gestion des affaires, insiste sur l'importance de facteurs externes à la gestion de projet sur la dérive des coûts tels que le rôle de la psychologie cognitive, la pression politique et organisationnelle, ou encore les intérêts économiques des acteurs.

Du point de vue de la psychologie cognitive, le biais d'optimisme fait partie des explications les plus courantes dont la prégnance est notamment confortée par les travaux nobélisés de (Kahneman & Tversky, 1979) sur la théorie des perspectives. Cette dernière suggère que les gens prennent des décisions fondées sur les perspectives de gains probables, ou de pertes et non nécessairement basées sur le résultat réel de la décision. Elle explique en outre que la prise de décision, en univers incertain, est souvent entachée de biais systématique et que l'erreur de jugement est souvent systématique et prévisible plutôt qu'aléatoire. On peut également citer les travaux de (Lovallo & Kahneman, 2003) qui soutiennent que la plupart des gens sont très optimistes la plupart du temps. On retrouve aussi parfois, les travaux plus controversés de (Kruger & Dunning, 1999) qui implique que le niveau d'incompétence ne génère pas seulement de piètres performances mais aussi limite la capacité des gens à l'autocritique. Toutes ces théories alimentent l'idée que sur le plan cognitif, les gens ont tendance à surestimer leurs propres talents et leurs capacités à contrôler les évènements futurs incertains tout en minimisant l'impact d'évènements aléatoires et les risques externes (Siemiatycki, 2009). Selon cette explication, c'est cet optimisme qui, renforcé par la pression organisationnelle, pousserait les porteurs de projet à choisir tacitement les hypothèses les plus favorables (Martin Wachs, 1986; Miranda Sarmento & Renneboog, 2017; Pickrell, 1990). Néanmoins, il ne s'agirait pas d'un véritable biais d'optimisme de nature involontaire selon (Flyvbjerg, 2007) mais plutôt d'un optimisme « calculé » qui inciterait les porteurs de projet à présenter des estimations optimistes, étant donné que les risques de pénalité sont jugés insignifiants. Les travaux de (Lovallo & Kahneman, 2003) renforcent l'argumentation de Flyvberg dans la mesure où ils expliquent que les points de vue pessimistes sont souvent interprétés comme des signes de déloyauté, ce qui limite encore davantage les capacités d'autocritique de l'organisation et conforte ainsi les prévisions optimistes.

Concernant les pressions organisationnelles et politiques, celles-ci prendraient diverses formes et augmentent avec la taille des projets. D'abord, pour certains projets emblématiques, il peut arriver que les politiciens et d'autres groupes d'intérêts soient amenés à s'engager dans des projets avant de procéder à des analyses rigoureuses, ce qui rendrait difficile leur désaffection ultérieure, et ce même si les coûts ont considérablement augmentés (Siemiatycki, 2009). D'aucuns évoqueraient ici l'effet du biais des coûts irrécupérables mais les études sur le sujet ne semblent pas lui attribuer une importance significative pour les grands projets (De Bondt & Makhija, 1988). La plupart des articles évoquant les causes politiques de la dérive des coûts suggèrent que les porteurs de projet, sous la pression des politiques et des décideurs, sont inciter à « cuisiner » l'estimation des coûts et des avantages du projet (Martin Wachs, 1986; Miranda Sarmento & Renneboog, 2017). Enfin, (Flyvbjerg et al., 2002) ajoute que les décideurs politiques et les autorités locales sont eux-mêmes fortement incités à sous-estimer les coûts (et inversement surestimer les

avantages) de leurs propres projets, notamment ferroviaires (Flyvbjerg, 2007; Pickrell, 1990), de manière à pouvoir présenter en apparence de meilleurs projets et obtenir des financements étatiques, et/ou l'adhésion du grand public.

Enfin sur le plan économique, on trouve généralement deux types d'explication (Flyvbjerg et al., 2002). La première vient du fait que les intérêts personnels des acteurs économiques du projet les pousseraient à influencer directement ou indirectement le processus de prévision d'une manière qui rend plus probable la réalisation du projet ; car tant que le projet avance ils gagnent de l'argent. Ainsi, sous-estimer les coûts et surestimer les avantages d'un projet serait un choix économiquement rationnel. La seconde s'appuie en grande partie sur un des concepts du « costing » de la Figure 82. Notamment, qu'il existerait un intérêt public à vouloir sous-estimer délibérément les coûts, et ceci dans l'espoir que les acteurs économiques et même les agents publics soient inciter à les réduire à leur tour. Inversement, une surestimation aurait tendance de la même façon qu'une prophétie auto-réalisatrice à inciter les parties-prenantes à dépenser plus d'argent. Ainsi, maintenir les coûts bas est plus important que d'estimer correctement les coûts.

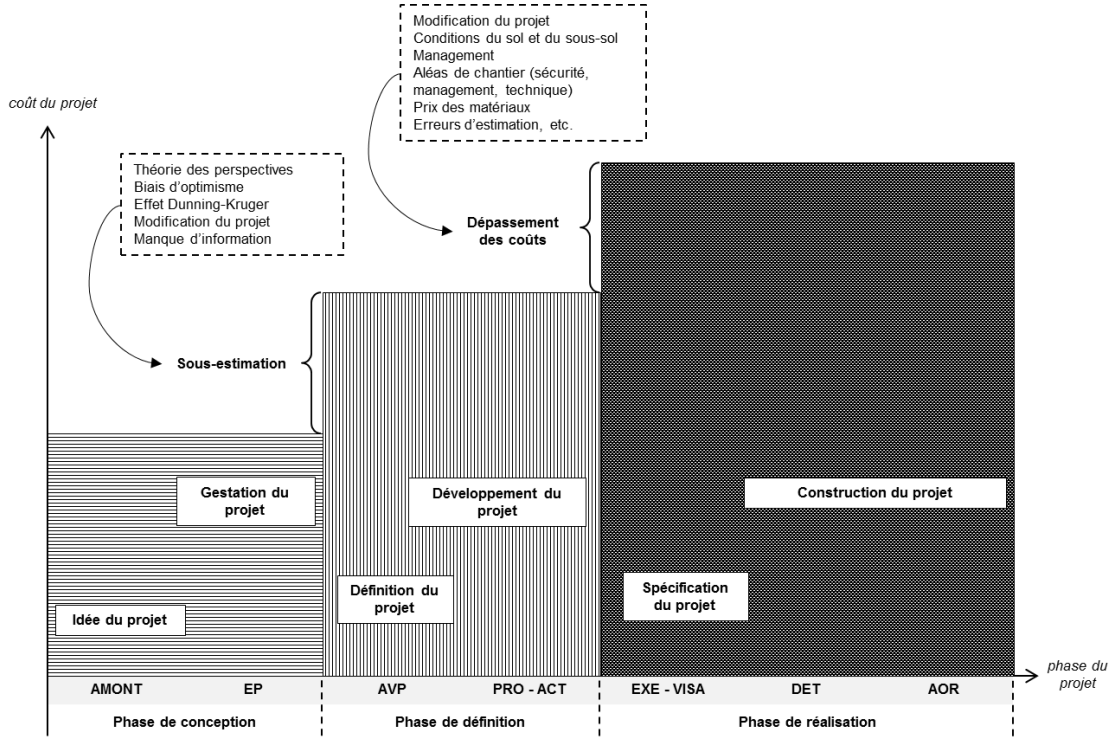


Figure 83 : Modèle conceptuel de compréhension de la dérive des coûts des grands projets ; traduit de (Ahiaga-Dagbui & Smith, 2014)

Finalement, même si ces deux groupes de pensées présentent des approches foncièrement différentes de la dérive des coûts des projets d'infrastructures, soit par la sous-estimation, soit par le dépassement des coûts, les explications et les mesures de réduction du risques proposées ne sont pas exclusives. (Love et al., 2015) exprimaient ainsi l'utilité de combiner ces deux approches pour comprendre la complexité des causes à l'origine de la dérive des coûts alors qu'ils sont les auteurs parmi les plus critiques des arguments de Flyvberg (Love, Edwards, & Irani, 2012). Pour (Ahiaga-Dagbui & Smith, 2014), les effets des facteurs externes sont probablement catalysés par les risques et les incertitudes qui caractérisent la période de maturation des projets. Le risque d'avoir une estimation influencée par des facteurs politiques,

économiques et psychologiques est alors plus important en phase de conception et de définition qu'il ne l'est en phase de réalisation. Le point de référence est ainsi fondamental. La plupart des contributeurs du premier groupe, en fixant le point de référence au moment de la passation des contrats de travaux, focalisent leurs observations sur les causes à l'origine d'un dépassement de coût qu'ils expliquent généralement par des causes techniques. Au contraire, les contributeurs du second groupe (essentiellement des chercheurs académiques), en fixant le point de référence au moment de la décision formelle de construire, s'exposent aux modifications de projet qui complexifient l'identification des causes à l'origine d'une sous-estimation qui s'entremêlent aussi avec les causes d'un éventuel dépassement des coûts.

Notons enfin qu'étonnement, les cas de surestimation, même s'ils sont plus rares, de magnitude moins grande et ont des conséquences à priori moins graves, sont évoqués seulement de façon épisodique. Les explications théoriques selon laquelle une surestimation conduit à une augmentation des coûts réels d'un projet d'infrastructure souffre d'un manque criant d'observations réelles.

7.1.5. LES PARTICULARITES INHERENTES A L'ESTIMATION D'UN PROJET DE RENOUVELLEMENT

En comparaison à la démarche de conception classique présentée précédemment, les projets de renouvellement adoptent une démarche sensiblement différente. D'abord, des études de diagnostic remplacent les études préliminaires. Indispensables, ces études vont permettre de réaliser un état des lieux techniques des infrastructures qui doit permettre de proposer un programme de travaux. Les études de diagnostic peuvent conduire à l'éclairage de points précis permettant d'appréhender des informations nécessaires à l'établissement des phases suivantes des études. En ce sens, par rapport à la démarche de conception classique qui démarre par des études à une échelle globale, un projet de renouvellement requiert des investigations plus fines et localisées.

Dans notre cas d'un projet de renouvellement soit de rails seuls avec consolidation éventuelle, soit de renouvellement complet de plateforme, la phase de diagnostic comprend dès le départ un recensement de l'ensemble des équipements à évaluer. Cette étape peut nécessiter, le cas échéant, de nouvelles campagnes de mesure de la voie et des investigations détaillées comme par exemple des sondages géotechniques si les désordres affectent la stabilité de la plateforme ou la mise à nu des équipements de drainage et des attaches élastiques.

Pouvant s'appuyer sur la documentation technique des équipements existants, consolidée dans le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE) et le Dossier d'Intervention Ultérieure sur l'Ouvrage (DIUO), le contexte de risque et d'incertitude qui caractérise la période de maturation des projets d'infrastructures nouvelles s'en trouve nécessairement modifié. On ne dispose encore que d'un retour d'expérience très restreint des projets de renouvellement de plateforme de tramway, mais vraisemblablement que les modifications imprévues sur la consistance et la portée des travaux de renouvellement resteront circonscrites à des facteurs techniques. Il y a donc tout lieu de penser que les projets de renouvellement s'exposent davantage à des risques de dépassement de coût des travaux, qu'ils soient liés à des aléas de chantier où à l'évolution des prix, ou bien encore à des risques de sous-estimation. Toutefois, cela ne veut pas dire non plus que les estimations actuellement proposées et que nous proposons soit fiables : d'abord de manière générale on ne dispose encore que d'un retour d'expérience limité des projets de ce type, et ensuite concernant

l'estimation que nous proposons : celle-ci ignore totalement la nature exacte des matériaux utilisés et les conditions précises d'exécution des travaux. Elle doit être considérée comme l'estimation d'un projet de renouvellement fictif.

7.2. L'EVALUATION MONETARISEE ET SES INDICATEURS

L'évaluation monétarisée est une méthode issue de la théorie économique classique permettant de réaliser des analyses coûts-avantages. Elle repose sur la notion de valeur actualisée et le concept de « taux d'actualisation ». Le taux d'actualisation permet de prendre en compte la valeur du temps, autrement dit il reflète les préférences individuelles ou collectives pour le présent par rapport au futur (Charlot-Valdieu & Outrequin, 2013). Son utilisation permet de réaliser l'équivalence entre des avantages qui seront disponibles à des époques différentes, ou entre des dépenses qu'il faudra engager selon un échéancier différent (Blanquier, 1984). Ce paramètre qui sert à tout calcul économique inter-temporel (Lebègue, 2005) est à la base du calcul de la valeur actualisée d'un projet. Selon le périmètre de l'évaluation, on préfère distinguer :

- la Valeur Actualisée Nette (VAN) lorsque l'indicateur représente une balance des coûts et des avantages financiers,
- et la Valeur Actualisée Nette – Socioéconomique (VAN-SE) lorsque l'indicateur représente une balance des coûts et des avantages que l'on aura préalablement monétarisés.

La combinaison des résultats de l'évaluation économique et de l'analyse financière de l'investissement révèle parfois une rentabilité socio-économique différente de la rentabilité financière. Ces résultats permettent d'éclairer l'intérêt du projet pour la collectivité et sa faisabilité. Lorsque les deux VAN sont du même signe, soit elles sont négatives et il vaut mieux renoncer à l'investissement, soit elles sont positives et l'investissement est intéressant pour la collectivité. Au contraire, une divergence appellera à des conclusions plus nuancées : soit l'investissement est souhaitable pour la collectivité mais il est de nature à mettre en difficulté l'opérateur, soit il est viable financièrement mais il n'est pas opportun pour la collectivité. Les évaluations socio-économiques prennent généralement en compte divers scénarios d'investissements dans l'objectif de les comparer, et éventuellement d'identifier la potentielle nécessité d'amélioration par des variantes.

L'évaluation socio-économique ne peut donc s'effectuer que lorsqu'on dispose d'éléments suffisants sur les coûts et les avantages du projet et ne devrait être achevée que lorsque le projet d'investissement a atteint un niveau de maturité relativement avancé (Guesnerie, 2017). Il est d'usage en France de situer le bon moment à l'issue immédiate des études préliminaires des investissements dans le cadre de l'enquête publique précédant la Déclaration d'Utilité Publique (évaluation ex-ante), c'est-à-dire jusqu'en phase d'Avant-Projet lorsque les coûts sont suffisamment connus. Puis a posteriori, l'évaluation socio-économique intervient une nouvelle fois au plus tard cinq ans après la date de mise en service dans le cadre du bilan LOTI (évaluation ex-post) qui pourra s'adosser sur des données historiques au lieu de données prévisionnelles.

7.2.1. LA VALEUR ACTUALISEE NETTE (VAN)

La valeur actualisée nette d'un projet correspond à la somme des flux financiers nets générés par le projet (R et D) au cours de sa phase d'exploitation (T), moins le coût d'investissement du projet (C), plus la valeur résiduelle (VR), soit :

$$VAN_0(a, yserv) = \sum_{t=yserv-1}^{yserv-n} -\frac{C_t}{(1+a)^t} + \sum_{t=yserv}^{yserv+T-1} \frac{R_t - D_t}{(1+a)^t} + \frac{V_R}{(1+a)^{yserv+T}} \quad (33)$$

Avec :

- VAN_0: est la valeur actualisée (également appelée bénéfice actualisé), c'est-à-dire la balance actualisée entre les coûts et les avantages actualisés à l'année précédant la mise en service. Par convention, il s'agit de l'année 0.
- n : est le nombre d'années de dépenses d'investissement lors de la phase de conception-réalisation précédant la mise en service de l'équipement.
- C_t : est le montant de l'investissement pour la conception-réalisation du projet à l'année t.
- R_t : est la somme des recettes résultant de l'investissement à l'année t,
- D_t : est la somme des dépenses d'entretien et d'exploitation afférentes à l'investissement à l'année t.
- T : est le nombre d'années de fonctionnement du projet que l'on souhaite évaluer,
- $yserv$: est l'année de mise en service, par convention l'année 1.
- V_R : est la valeur résiduelle de l'investissement après T années de fonctionnement

La VAN est calculée sur une période de temps T qui peut être différente de la durée de vie technique du projet N. Si cette période est inférieure à la durée de vie technique du projet, le calcul doit intégrer une valeur résiduelle V_R correspondant aux avantages procurés par l'équipement en fin de vie. Ces avantages peuvent être divers, liés à la revente ou à la somme des avantages nets procurés par le maintien en condition opérationnelle de l'équipement. Dans ce cas-là, les séquences de maintenance et de renouvellement sont intégrées au calcul.

Les dépenses qu'il faut consentir pour la remise en état de l'investissement après T années de service sont liés à la valeur résiduelle. On note α le coefficient de renouvellement (Blanquier, 1984) tel que :

$$\alpha = 1 - \frac{V_R}{C} \quad (34)$$

7.2.2. LA VALEUR ACTUALISEE NETTE SOCIO-ECONOMIQUE (VAN-SE)

La valeur actualisée nette socio-économique est un indicateur qui étend le périmètre d'évaluation du calcul conventionnel de la VAN. Il vise à représenter l'effet global d'un projet sur la collectivité, par l'agrégation de ses différents effets (monétaires et monétarisées) sur les différents agents de la collectivité. A l'instar du calcul économique conventionnel, il est basé sur le principe du bilan année par année des coûts et des avantages estimés du projet pour chaque catégorie de variable pendant la période T d'évaluation.

$$VAN_0(a, yserv) = \sum_{t=yserv-n}^{yserv-1} -\frac{C_t}{(1+a)^t} + \sum_{t=yserv}^{yserv+T-1} \frac{AN_t}{(1+a)^t} + \frac{V_R}{(1+a)^{yserv+T}} \quad (35)$$

Avec AN_t le bénéfice net procuré par l'investissement. Il a été particulièrement étudié pour l'évaluation socio-économique de projet d'infrastructures de transport. Pour les investissements en Transports Collectifs en Site Propre (TCSP), ce bénéfice net s'apprécie par rapport à une situation de référence, généralement celle « sans projet [40] » (CERTU, 2002) :

$$\Delta AN_t = \sum_{t=yserv}^{yserv+T-1} \frac{\Delta R_t + \Delta A_t + \sum_i \Delta S_t^i - D_t - \Delta E_t}{(1+a)^t} + \frac{V_R}{(1+a)^{yserv+T}} \quad (36)$$

Avec :

- E_t : est l'ensemble des coûts externes monétarisés générés par le projet (autrement appelés externalités négatives),
- A_t : est l'ensemble des avantages des usagers pendant l'année t, par exemple les gains de coût généralisés de déplacement,
- S_t^i : est le surplus des autres agents (usagers, exploitants et collectivités publiques responsables des autres modes de transport : voiture, taxi, autocar, voirie, …),

Le périmètre étendu de la VAN-SE pour les projets d'infrastructure de transport englobe traditionnellement les coûts d'investissement, de grosses réparations et d'exploitation pour l'ensemble des acteurs concernés par le projet, les coûts d'exploitation ainsi que les avantages monétarisables procurés par les gains de temps de parcours, de sécurité liés à la diminution des accidents corporels et matériels, de fonctionnement pour le réseau routier et les gains environnementaux (bruits, pollution locale, gaz à effet de serre).

La VAN-SE permet alors de représenter la valeur du projet pour l'ensemble de la collectivité en un indicateur unique. La monétarisation est employée en tant que pondération de la valeur des effets les uns par rapport aux autres. Pour certains avantages comme la valeur du temps, elle nécessite de recourir à différentes valeurs tutélaires selon les catégories d'usagers.

[40] En France, la situation de référence se définit comme la situation optimisée la plus probable en l'absence de projet à l'horizon considéré. Cette définition cherche à éviter les problèmes de la situation « Do nothing » prise comme situation de référence qui conduirait à gonfler artificiellement le TRI des projets. L'utilisation d'une alternative « Do minimum », construite autour d'une situation optimisée sans investissement majeur apparait comme très largement partagé, notamment par la France, la Grande-Bretagne, la Finlande ou encore les Etats-Unis (GRESSIER, 2005).

Tableau 47 : Valeur du temps selon le motif du déplacement (DG Trésor, 2014)

Motif du déplacement	Valeur de l'heure par passager en €$_{2010}$
Professionnel	17,5
Domicile-travail/étude/garderie	10,0
Autres (achat, soin, visite, loisir, tourisme, …)	6,8
Sans détail du motif	7,9

7.2.3. LE TAUX DE RENDEMENT INTERNE (TRI)

Le taux de rendement interne correspond au taux d'actualisation qui rend la VAN égale à zéro, en égalisant la somme des flux nets générés par le projet au cours de sa phase d'exploitation avec l'investissement. Ce taux d'actualisation singulier peut être interprété comme un taux d'intérêt rémunérateur de l'investissement consenti : c'est donc un indicateur de rentabilité financière ou socio-économique selon le périmètre d'évaluation.

Son calcul repose sur les mêmes intrants que pour le calcul de la VAN/VAN-SE à partir de la formule suivante :

$$TRI = r\ tel\ que \sum_{t=yserv}^{yserv+T-1} \frac{(R_t - D_t)}{(1+r)^t} - \tau(r, yserv) + \frac{V_R}{(1+a)^{yserv+T}} = 0 \qquad (37)$$

Avec :

$$\tau(a = r, yserv) = \sum_{t=yserv-1}^{yserv-n} \frac{C_t}{(1+a)^t} \qquad (38)$$

Le projet est jugé rentable si le TRI est supérieur au taux d'intérêt « i » sur le marché (emprunt ou placement selon les cas). Le taux d'intérêt « i » retenu peut varier selon les cas. En effet, si le financement du projet est assuré par l'emprunt, le taux d'intérêt à retenir sera le coût du crédit, et la période de calcul sera la durée du crédit. En revanche, si le financement est assuré par de l'autofinancement en fonds propres, le taux d'intérêt retenu correspond au taux d'intérêt du marché sur lequel on aurait placé l'argent.

Ce taux est qualifié d'« interne » car il est propre au projet. Cet indicateur présente la caractéristique d'être indépendant du taux d'actualisation. Cet avantage permet la classification d'un portefeuille d'investissements de tailles différentes et générant des flux de trésorerie de différents profils de temps (MEEDM, 2010). Toutefois, certains économistes considèrent qu'il s'agit aussi d'un inconvénient car le taux d'actualisation doit intervenir dans les choix économiques, il s'agit même d'une variable très importante (Blanquier, 1984).

7.2.4. L'INDICE DE RENTABILITE (IR)

L'indice de rentabilité mesure ce que chaque euro investi génère en flux actualisés. Il est le rapport entre la valeur actualisée des flux monétaires et/ou monétarisables et le montant actualisé de l'investissement. Il permet de représenter l'effet de levier de l'investissement. Il fait apparaitre « l'intensité » des avantages

procurés par l'investissement ce qui permet d'estomper l'effet de la taille de l'investissement sur le montant du bénéfice actualisé retiré de l'opération (Blanquier, 1984).

$$IR(a, yserv) = \frac{VAN_0(a, yserv)}{\tau(a, yserv)} \quad (39)$$

7.2.5. LE TAUX DE RENTABILITE IMMEDIATE (TI)

En théorie, le taux de rentabilité immédiate permet de déterminer l'année optimale de mise en service de l'investissement. Il est le rapport entre le bénéfice attendu immédiatement à la première année de mise en service (t=1) et l'investissement initial actualisé $\tau(a, yserv)$. L'année optimale de mise en service est celle où le taux de rentabilité immédiate devient égal au taux d'actualisation.

$$TI(a\ , yserv) = \frac{AN_{t=1}}{\tau(a, yserv)} \quad (40)$$

Soit :

$$TI(a, yserv) \geq a \quad (41)$$

Toutefois, ce résultat n'est satisfaisant que dans l'hypothèse d'un investissement ayant une durée de vie infinie comme le montre (Blanquier, 1984). Dans le cas d'un investissement ayant une durée de vie limitée, la date optimale de mise en service de l'investissement dépend des séquences et des coûts de renouvellement.

(Blanquier, 1984) montre que pour un investissement dont la durée de vie est limitée à D, dont le renouvellement s'opère sur une base continue et sur une période de temps [0,N] plus longue que l'intervalle [0,D], il faut satisfaire l'inégalité suivante :

$$\frac{AN_t}{\tau(a, yserv)} \geq a\left[1 + \frac{\alpha}{(1+a)^D - 1}\right] \quad (42)$$

Avec α correspondant au coefficient de remise à neuf de l'investissement après D années d'exploitation. Il est donc certainement inférieur à 1 car il n'intègre pas l'acquisition foncière ni la remise en état de l'ensemble de l'investissement. On notera que lorsque α=0, on retrouve la formule précédente pour un investissement d'une durée de vie infinie.

7.2.6. CHOIX DU TAUX D'ACTUALISATION

La plupart des approches à long terme, en particulier les analyses en cycle de vie, concerne la consommation des ressources, et souvent – comme c'est notre cas – les coûts sur de longues périodes de temps. Or, rappelons que l'échéancier des coûts est ici un élément substantiel ; car gagner ou économiser un euro aujourd'hui est meilleur que demain en raison du coût d'opportunité du capital. Par exemple, un euro gagné en 2017 peut être investi et utilisé pour gagner un profit, et a par conséquent plus de valeur qu'un euro gagné en 2020 (il peut en effet à minima être placé sur un compte d'épargne). Ainsi, les

dépenses et les recettes futures doivent être exprimées dans leur valeur rapportée à une année de référence, correspondant la plupart du temps au moment de la prise de décision, à l'aide d'un taux d'actualisation.

Pour fixer ce taux d'actualisation, il convient d'abord de faire la distinction entre le secteur privé et le secteur public. Pour le secteur privé, il est possible d'établir un taux d'actualisation en le basant sur le coût moyen pondéré du capital (CMPC en français ou WACC en anglais). Les entreprises disposent de trois sources principales de financement: les **capitaux propres** apportés par les associés (p.ex. les cadres dirigeants et les collaborateurs), les **capitaux externes** prêtés par des tiers (p.ex. les banques) et **l'autofinancement** sous réserve de conditions de bénéfice sur les revenus antérieurs. Or ces diverses sources de financement ont un coût. Le coût des capitaux propres correspond au taux de rendement attendu par les associés liés à leur propre coût d'opportunité du capital, et le coût des capitaux externes correspond aux intérêts demandés par les tiers (autrement dit, les créanciers). Les investissements des entreprises sont donc financés par ces prêts qui engendrent une dette, jusqu'à ce que les revenus l'emportent sur les coûts du capital (la dette, les intérêts de la dette, et les rendements attendus des associés). Sans discuter des détails, un coût moyen pondéré du capital peut être calculé sur la base des taux du marché et de la structure de la dette et des fonds propres, et permettre de déterminer un taux d'actualisation. Il s'assimile ainsi à un taux d'intérêt qui se réfère à une optimisation microéconomique au sens où l'on va chercher à optimiser son investissement au regard de ses capacités financières et des conditions d'obtention des ressources financières nécessaires. Dans les cas où le niveau de risque du projet diffère de celui de l'entreprise, il est possible de traiter techniquement ces effets, soit directement sur les flux économiques (méthode dite « au numérateur »), soit au travers d'un taux d'actualisation ajusté d'une prime de risque (méthode dite « au dénominateur »). Cette dernière approche est la plus courante en analyse financière (Quinet, 2014).

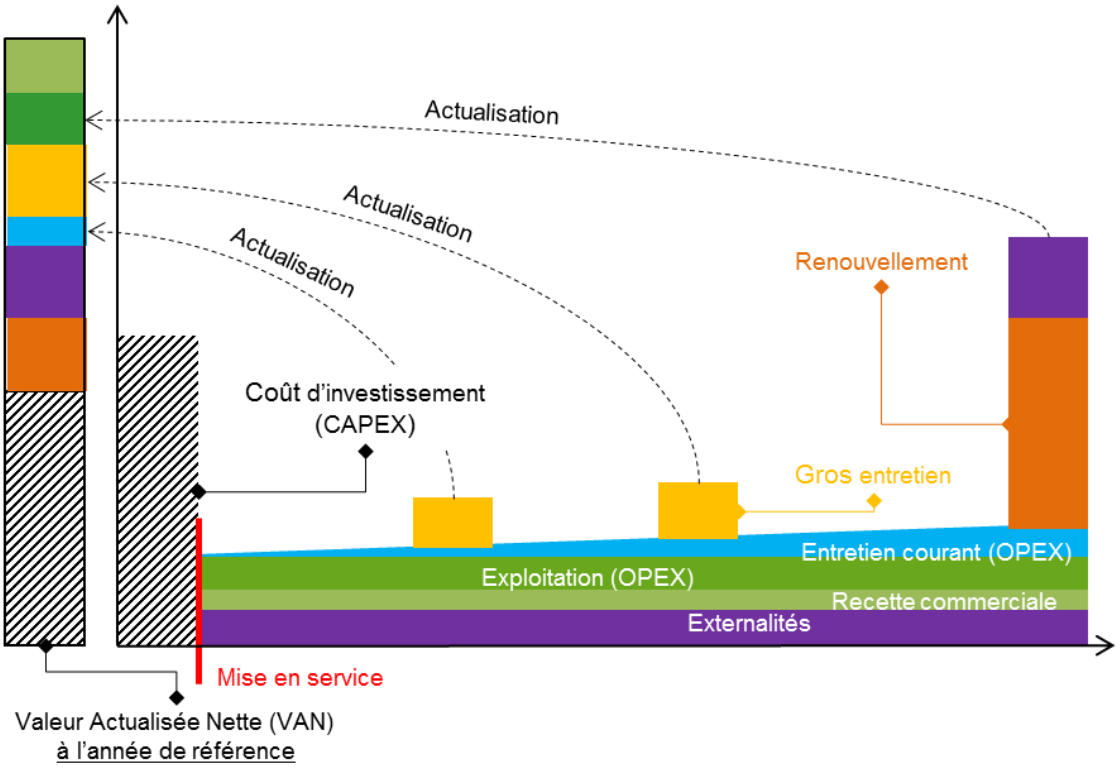


Figure 84 : Principe du taux d'actualisation

En revanche pour le secteur public, la détermination d'un tel taux est plus compliquée. L'analogie avec les analyses financières reste purement formelle. D'abord, remarquons que les investissements publics sont dépensés en accord avec un budget, par exemple d'une collectivité, issu de sources de financement public (p.ex. dotation de l'Etat, impôts, taxes, etc.). La détermination d'un taux d'actualisation sans risque diffère donc sensiblement déjà du fait de la nature des fonds mais aussi d'autres paramètres propres à chaque état (notamment la préférence pour le présent, les coûts du risque liés à l'incertitude de l'avenir, etc.). En France, le choix d'un taux d'actualisation fait l'objet de nombreux débats parmi les économistes illustrés par les évolutions successives de la prise en compte du risque apportée par les rapports de (Gollier, Baumstark, Fery, Auverlot, & Raynard, 2011; Lebègue, 2005; Quinet, 2014).

Sans entrer dans les détails, nous retenons les formules proposées par le rapport (Gollier et al., 2011), ainsi que les valeurs issues du rapport (Quinet, 2014). Le taux d'actualisation (r) se détermine alors par la formule suivante :

$$r = rf + \varphi\beta \tag{43}$$

Avec

$$rf = \delta + \gamma\mu - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2 \; et \; \emptyset = \gamma\sigma^2 \tag{44}$$

rf et φ représentent respectivement le taux sans risque et la prime de risque, le coefficient β – ou les coefficients β lorsque le projet comporte des avantages ou des coûts qui ont des corrélations différentes

avec l'évolution macroéconomique – est relatif au projet à évaluer. Il représente la variation moyenne du bénéfice socioéconomique du projet (exprimé en %) lorsque le PIB/hbt varie. Le paramètre δ est le taux de préférence pure pour le présent tandis que γ est le coefficient d'aversion relative pour le risque. Enfin, μ et σ représentent respectivement l'espérance et l'écart-type du taux de croissance du PIB/hbt.

Résultat, pour l'estimation des coûts du cycle de vie de la voie ferrée liés aux dépenses successives de maintenance et de renouvellement, le risque macro-économique existe. Nous le prenons en compte par la méthode dite « au dénominateur ». Les calculs effectués par (Becker, Delache, Brunel, Sigaud, & Sauvant, 2013) proposent de retenir une élasticité de 0,4 entre les coûts d'investissement et d'entretien et le PIB en volume. Autrement dit, les coûts liés aux travaux de renouvellement et à la maintenance augmentent de 0,4% quand le PIB augmente de 1%. En ajoutant la corrélation entre le surplus de coût d'investissement et d'entretien et le PIB, on aboutit à un bêta socioéconomique de 0,5%. Enfin, les recommandations de (Quinet, 2014) désignent un taux d'actualisation sans risque de 2,5%, avec une décroissance progressive jusqu'à 1,5% au-delà de 2070 et une prime de risque de 2% passant à 3% à partir de 2070.

Ces valeurs permettent d'estimer un taux d'actualisation de 3,5% pour notre calcul avant 2070. Notons que si le périmètre de l'estimation était amené à prendre en compte les flux économiques reliés à la variation de trafic ferroviaire urbain, dont le béta est de 1,1%, il faudrait calculer un béta socioéconomique composite ou recourir à la méthode dite « au numérateur ».

7.3. METHODOLOGIE D'EVALUATION ECONOMIQUE DU RENOUVELLEMENT DE LA VOIE FERREE DE TRAMWAY

Un équipement public tel qu'une infrastructure ou un véhicule de transport est destiné à des utilisations réitérées. Le service rendu aux usagers durant une période se mesure d'abord par le nombre d'utilisations, typiquement un nombre de déplacements, et aussi par la qualité du service : en efficacité (vitesse) et en confort des déplacements. La qualité de l'équipement détermine les conditions d'usage. Elle influence le confort (vibrations et bruits subis par les usagers) et souvent aussi la performance en temps. Mais le service rendu par l'équipement au cours du temps n'est pas strictement indépendant de son vieillissement ; apprécié en termes de la production qu'il permet, il peut même se modifier sensiblement. Même si en absolu, aucun accroissement qualitatif ni quantitatif de l'équipement n'est à attendre d'un renouvellement, il permet d'en restituer le niveau de qualité intrinsèque et aussi le service rendu. Les seuls effets d'un renouvellement au sens strictement comptable (ICCA, 2007) sont une prolongation de sa durée d'utilisation et une diminution des frais de fonctionnement due à une baisse des dépenses d'entretien lors des premières années après la mise en service. L'opération de renouvellement est donc un investissement. Elle accroit, comparativement à un état courant déprécié, le potentiel de service de l'équipement. La phase d'usage qui suivra la transition sera un état courant bénéficiant de cette amélioration. Mais paradoxalement, les renouvellements qui sont plus fréquents avec l'âge, entrainent aussi une diminution des rendements, et donc du service rendu ce qui peut être contradictoire avec les exigences de disponibilité du service. Il faut donc arbitrer entre les avantages futurs de l'intervention et ses coûts spécifiques. Les avantages, comme les coûts, concernent les usagers du service, l'opérateur, mais aussi d'autres acteurs avec lesquels le service interfère : autres usagers des lieux, riverains de la circulation et du chantier,

fournisseurs divers, finances publiques, etc. La collectivité maîtresse d'ouvrage du système cherche à tenir compte des intérêts des uns et des autres. Nous nous plaçons dans cette perspective collective pour identifier qualitativement les avantages et les inconvénients d'une telle intervention sur une infrastructure de tramway, et pour leur associer une grandeur autant que possible d'ordre économique.

Le tableau ci-dessous distingue pour chaque catégorie d'acteurs, les coûts et les avantages :

- en état courant, il s'agit de l'infrastructure strictement avant et après le renouvellement : elle permet de mettre en évidence l'amélioration de la qualité intrinsèque de l'équipement,
- en état transitoire qui correspond à une phase de transformation : elle permet de mettre en évidence les effets spécifiques de l'acte de renouvellement.

Tableau 48 : Coûts et avantages des états courant et transitoire par type d'acteurs

Acteur	Etat courant	Etat transitoire
La collectivité	-	- externalités environnementales (effets amont-aval, pollution atmosphérique) - pertes / gains de taxes - congestion - sécurité
Le gestionnaire d'infrastructure	- amortissement de l'investissement	- coût des travaux - manque à gagner du gestionnaire - surcoûts d'exploitation - dédommagement des usagers
L'opérateur	- coût de maintenance	- manque à gagner de l'opérateur - surcoûts d'exploitation
Les usagers	- temps de parcours	- temps de parcours - consommation de carburants
Les autres usagers des lieux	-	- temps de parcours
Les riverains	- bruits - vibrations	- bruits - vibrations
Les consultants, constructeurs et fournisseurs	-	- marchés publics

7.3.1. LES COUTS ET AVANTAGES A L'ETAT TRANSITOIRE : LES IMPACTS ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX LORS DU RENOUVELLEMENT

Chaque renouvellement d'infrastructure occasionne inévitablement des coûts qui peuvent être classés en deux catégories :

- les coûts directs qui sont liés au renouvellement de l'infrastructure et affectent directement les comptes du gestionnaire d'infrastructure et/ou de l'opérateur. Ils correspondent aux coûts des travaux qui sont liés aux matériaux, à l'outillage ou encore à la main-d'œuvre nécessaire aux études, aux travaux, y compris les coûts administratifs divers. Selon les cas, ils peuvent aussi correspondre aux surcoûts d'exploitation ou encore au dédommagement éventuel des usagers et des riverains (p.ex. les commerçants).

- les coûts indirects qui découlent du renouvellement mais n'affectent pas les comptes du gestionnaire et/ou de l'opérateur ou que de manière détournée. Ils correspondent à l'évaluation économique de toutes les perturbations qui ont un lien avec les travaux et auxquels on ajoute les coûts liés aux impacts environnementaux. La plupart de ces coûts sont supportés par la société.

L'ensemble de ces coûts représente les coûts totaux attribuables à une opération de renouvellement. Or, si les coûts des travaux sont relativement faciles à identifier et à imputer, les coûts indirects sont quant à eux difficilement quantifiables (de Jong & Declercq, 2012).

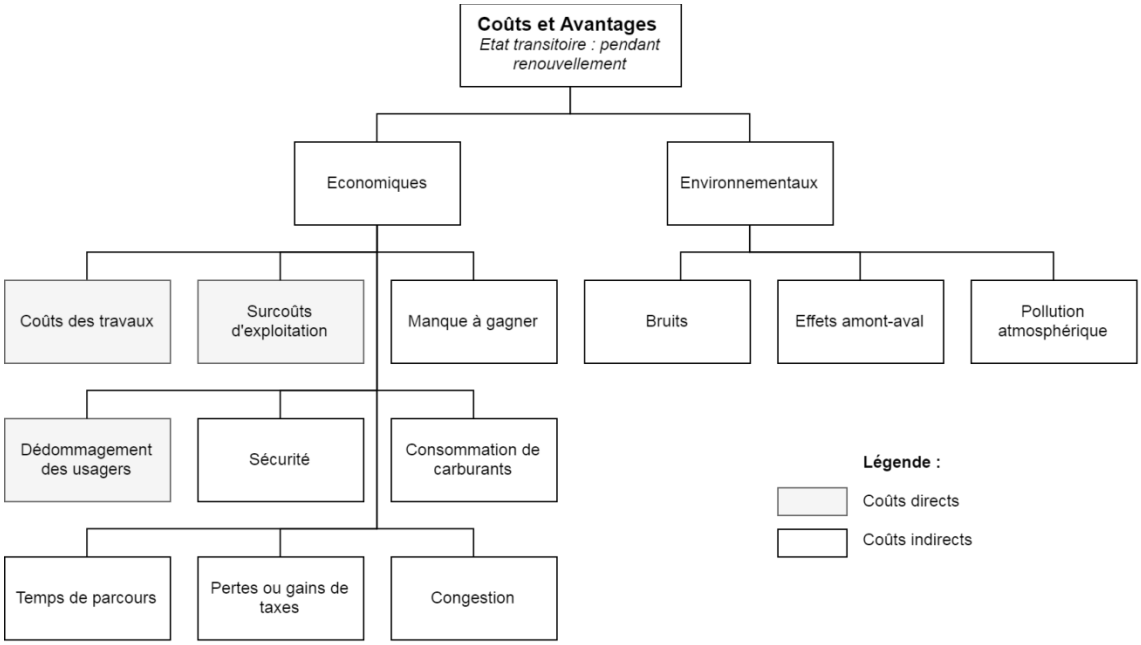


Figure 85 : Hiérarchie des coûts et des avantages d'une opération de renouvellement

Les conséquences directes et indirectes de la phase transitoire provoquent donc :

- des surcoûts d'exploitation, qui représentent un poste de dépenses associé aux ressources supplémentaires engagées pour l'information des usagers, la mise en place de services provisoires ou le facteur multiplicateur des véhicules à mobiliser sur des lignes de transport en commun pour faire face à la demande pendant les travaux.
- une augmentation des temps de parcours (variation d'utilité), qui rend compte des pertes économiques associées aux variations d'utilités subies par les usagers. Cette notion dépend de la valeur du temps.
- des coûts de remise en état (travaux de renouvellement), qui représentent les coûts financiers liés à l'outillage, les matériaux et le coût du travail nécessaire au renouvellement.
- une augmentation de la congestion, engendrée par le report des usagers de la ligne sur les modes routiers ainsi qu'éventuellement la réduction de la capacité des voies routières ou l'indisponibilité des traversées routières provoquées par l'emprise du chantier.
- un manque à gagner, qui – selon les cas – peut être supporté par l'opérateur ou le gestionnaire d'infrastructure. Il représente la perte de recettes commerciales induite par la diminution du trafic voyageur. A noter que lorsque le risque d'exploitation est porté par l'opérateur, la survenance

d'un bris d'infrastructure provoquant une indisponibilité non planifiée provoque un manque à gagner par l'opérateur.

- des pertes ou des gains de taxes, qui sont associés à l'augmentation ou à la diminution de la consommation de carburants.
- une augmentation de la consommation de carburants, qui découle de l'augmentation du trafic et de la congestion.
- des coûts liés au dédommagement des usagers, qui représentent les sommes que l'opérateur ou le gestionnaire rétrocèdent aux usagers en cas de perturbation de l'offre de transport. Le principe de dédommagement n'est pas très courant actuellement et se limite à des cas particuliers (p.ex. l'interruption du RER C lors des inondations de 2016).
- des risques pour la sécurité, qui sont liés au report modal des usagers de la ligne vers le mode routier, plus risqué.
- une augmentation ou une diminution des nuisances sonores, qui représentent les nuisances sonores induites par le chantier lui-même ou encore les variations de bruits liées au trafic routier supplémentaire.
- des effets amont-aval, qui traduisent les coûts engendrés par la pollution des procédés amont-aval à la circulation (production et distribution de l'énergie, production et maintenance des véhicules, construction, maintenance des infrastructures, etc.).
- de la pollution atmosphérique, liée aux trafics routiers essentiellement, correspondant aux émissions de PM2,5, NOx, COVNM et SO^2 engendrés par la circulation.

7.3.1.a *Les coûts liés à l'augmentation des temps de parcours des usagers*

La monétarisation du temps de parcours s'effectue par le calcul du coût généralisé. Il comprend des éléments relatifs aux prix du transport et au calcul du temps généralisé. Ce dernier est relatif aux différentes séquences temporelles du déplacement ainsi qu'aux notions de confort. En principe, on distingue le temps d'accès au système de transport, le temps d'attente et le temps de trajet à proprement parler. Cette distinction renvoie directement à la notion de perception du temps (p.ex. une minute passée à attendre en station n'est pas équivalente à une minute de temps de trajet). De même, le motif de déplacement impacte la valeur du temps (Tableau 50).

Pour le calcul du coût généralisé, deux situations se présentent :

- Les usagers doivent se contenter d'un service dégradé par l'opération de renouvellement. Dans ce cas, la diminution du niveau de service pourra engendrer dans une certaine mesure un report de trafic vers des itinéraires alternatifs qu'il faut être en mesure d'évaluer.
- Les usagers font face à une interruption du service et doivent se contenter d'une solution alternative : par leur propre moyen ou par des itinéraires de détour, la mise en place de service provisoire et/ou la mise en œuvre de terminus partiel.

(Roelofsen, Cats, van Oort, & Hoogendoorn, 2018) proposent une méthodologie pour l'évaluation des différentes stratégies de détour avec une application sur le réseau de transport public de la Haye fondée sur le calcul du temps généralisé. Il distingue les temps de parcours par activité de marche, d'attente, de transport et de transfert.

$$t_g = \sum_k t_k . \beta_k \, , \forall k \in K \tag{45}$$

Avec t_k correspondant au temps par activité k, pondéré par un facteur β pour prendre en compte la perception du temps.

Tableau 49 : Détermination des coefficients de pondération β (Quinet, 2014)

Activité k	Minutes équivalentes (β)
Temps d'attente	1,5
Temps de marche en pré/post acheminement	2
Temps de correspondance	2

Pour évaluer le coût lié au renouvellement, il faut ensuite estimer la différence du temps total généralisé entre l'état courant et l'état transitoire.

$$\Delta C_g = VOT . \Delta t_g + P_{dépl} \tag{46}$$

Avec :

C_g, le coût généralisé,

VOT, la valeur du temps,

$P_{dépl}$, le prix du déplacement,

Tableau 50 : Valeur de l'heure par passager en milieu urbain, tout mode confondu (Source : (DG Trésor 2014))

Motif du déplacement	Valeur du temps (€$_{2010}$ par heure)
Professionnel	17,5
Domicile-travail / étude / garderie	10,0
Autre (achat, soin, visites, loisir, tourisme, …)	6,8
Sans détail du motif	7,9

7.3.1.b *Les coûts marginaux de congestion routière*

Lors d'un renouvellement, l'emprise chantier peut provoquer une fermeture de certains itinéraires ou une diminution de la capacité des voies de circulation routière incitant les usagers de la route à emprunter un détour et accentuant la congestion.

Par définition, les coûts marginaux de congestion dépendent du degré de congestion initial avant l'arrivée de l'automobiliste supplémentaire (ou marginal). Le système est dynamique, néanmoins pour des raisons de simplicité de calcul, il est possible de recourir à un coût marginal moyen.

Coûts marginaux de congestion routière = Longueur du détour L (km) x Volume de trafic supplémentaire induit par l'opération V (veh/h) x Durée du chantier DC (h) x Coût marginal de la congestion routière δ (€/veh-km)

Tableau 51 : Valeurs tutélaires de la congestion routière (Quinet 1998)

	€ par passager	€ par véhicule
Île-de-France	0,15	0,20
Ville de province	0,10	0,12
Rase campagne : autoroute	0,005	0,010
Rase campagne : autres routes	0,010	0,020

7.3.1.c *Les coûts liés à l'augmentation des temps de parcours des autres usagers des lieux dûs au détour des véhicules*

En plus de la congestion supportée par les usagers **habitués** de l'itinéraire de détour, les usagers **détournés** doivent emprunter un itinéraire moins avantageux. Ils supportent alors un surcoût pouvant s'estimer de la façon suivante :

$$C_{g,detour} = \sum_{i=1}^{N} V_i . TO_i . VOT . t_{g,detour} . D_{chantier} \quad (47)$$

Avec

V_i : Le volume de trafic détourné de véhicules de type i,

TO_i : Le taux d'occupation moyen des véhicules de type i,

$t_{g,detour}$: Le temps de détour,

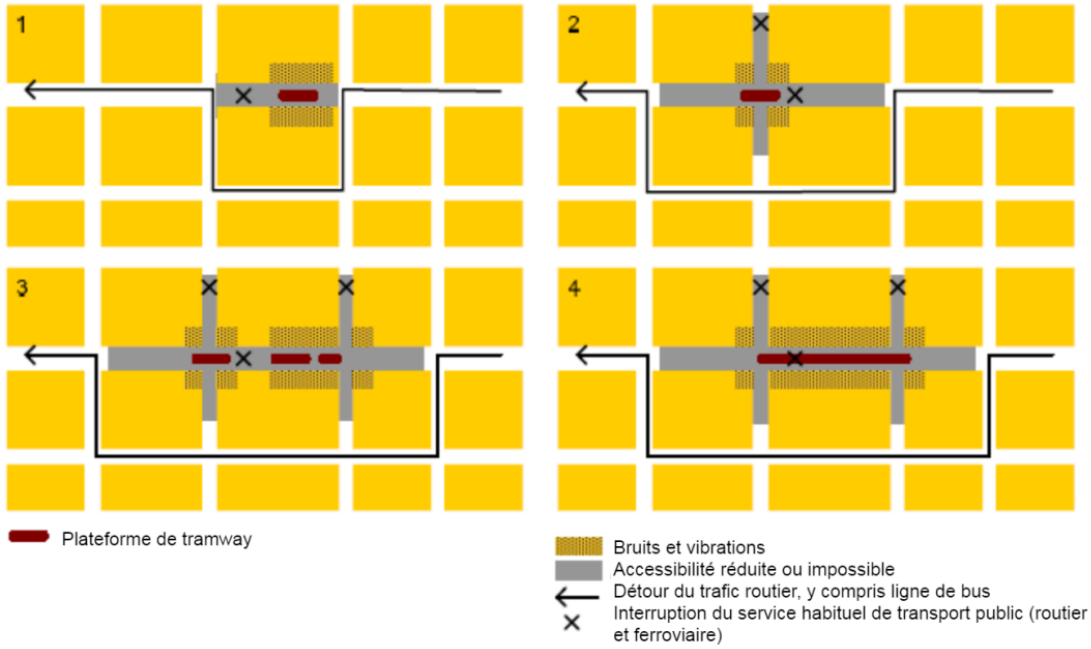


Figure 86 : Schématisation des différents impacts locaux des travaux de renouvellement sur une plateforme de voie ferrée de tramway (de Jong & Declercq, 2010)

7.3.1.d *Les coûts liés aux impacts environnementaux*

Parmi les impacts socio-économiques des travaux de renouvellement des infrastructures, des impacts environnementaux peuvent être subis par la population à des échelles diverses. En effet, ils concernent tout d'abord l'environnement rapproché des travaux et les nuisances ressentis par les riverains vivant à proximité de la zone de travaux (Figure 86) ainsi que les impacts à plus long terme supportés par la collectivité (pollution atmosphérique, pollution dite « amont-aval »).

Les valeurs tutélaires fournies par le rapport Quinet peuvent servir de base solide pour tous les effets à long terme liés à l'augmentation du trafic pouvant être engendrée par une interruption du service de transport.

Coûts des externalités = Volume de trafic supplémentaire induit par l'opération (veh/h) x Longueur du détour (km) x Coûts des externalités liés aux bruits, aux effets amont-aval et à la pollution atmosphérique (€/veh-km)

Tableau 52 : Valeurs tutélaires des effets amont-aval (€$_{2010}$)

Effets amonts-aval (€2010/100 veh.km)	Rapport Quinet
VL	0,9
PL	2,96

Tableau 53 : Valeurs tutélaire de la pollution atmosphérique (€2010)

Pollution atmosphérique (€2010/100 veh.km)	Rapport Boiteux 2	Rapport Quinet
VL interurbain	0,1	0,9
VL urbain diffus	0,8	1,3
VL urbain		1,7
VL urbain dense	2,2	4,3
VL urbain très dense		15,8
Pl interurbain	0,4	6,4
PL urbain diffus	6,9	9,4
PL urbain		17,7
PL urbain dense	19,6	37,0
PL urbain très dense		186,6

Tableau 54 : Coûts moyens et marginaux du bruit (€2010)

Type de peuplement	Type d'infrastructure	Coût moyen VL	Coût moyen PL	Coût marginal VL	Coût marginal PL
Rural	Autoroute	0,5	1,9	0,03	0,1
	Nationale ou départementale	1,9	13,6	0,12	0,8
	Communale	10,5	115,2	0,63	6,9
Semi-urbain	Autoroute	2,0	7,8	0,12	0,5
	Nationale ou départementale	3,3	23,4	0,20	1,4
	Communale	16,9	168,6	1,01	10,1
Urbain	Autoroute	5,6	22,5	0,34	1,3
	Nationale ou départementale	5,7	39,7	0,34	2,4
	Communale	31,5	314,6	1,89	18,9
Urbain dense	Autoroute	8,3	33,1	0,50	2,0
	Nationale ou départementale	9,1	64,0	0,55	3,8
	Communale	37,9	379,3	2,28	22,8
Urbain très dense	Autoroute	14,0	56,0	0,84	3,4
	Nationale ou départementale	16,8	117,9	1,01	7,1
	Communale	43,0	430,5	2,58	25,8

Concernant les effets plus locaux, liés aux bruits dans l'environnement rapproché du chantier, leur évaluation consiste à se baser sur le nombre de travailleurs (et non de riverains) pouvant être affecté.

Coût de la perte de productivité des travailleurs liée aux bruits = Nombre de travailleurs affectés T x Taux moyen horaire (€/h) x Facteur de réduction de la productivité FRP (€/h) x Durée du chantier DC (h)

Le facteur de réduction de la productivité selon le type de travail peut être déterminé à l'aide des travaux de (Gilchrist & Allouche, 2005) ci-dessous :

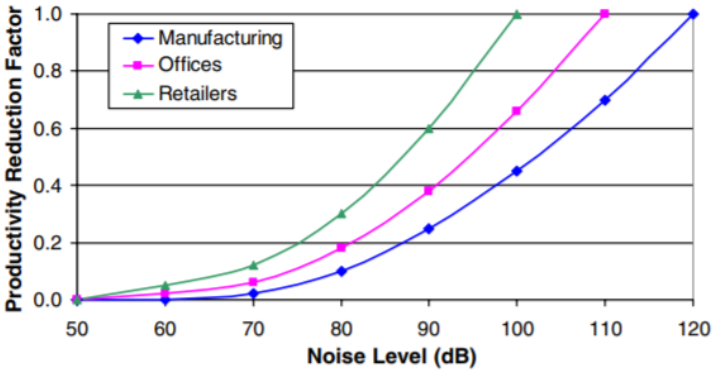


Figure 87 : Effet du bruit sur la productivité des travailleurs

7.3.1.e *Les coûts liés aux pertes / gains de taxes*

Les pertes ou les gains de taxes pour la collectivité proviennent de différentes sources. La première source de gain est liée à l'usage, par le voyageur de son propre véhicule automobile; ce comportement va générer des revenus fiscaux pour la collectivité via les taxes sur la consommation de carburant.

Le calcul est similaire au 7.3.1.b. On estime le montant de la taxe δ, le nombre de véhicule de type i ainsi que la distance parcourue et la consommation de carburant.

$$Taxes = \sum_{i=1}^{N} V_i . consommation . \delta_{taxes} . distance \qquad (48)$$

La seconde source de perte est reliée à la réduction des espaces de stationnement du fait de l'emprise du chantier et aux pertes de recettes supplémentaires en l'absence de distribution des amendes pour stationnement interdit. (Modieli Amadou et al., 2010) proposent les formules de calcul suivantes :

Coût des pertes d'espaces de stationnement = Nombre d'espaces de stationnement perdus NSP x Taux du parcomètre TP (€/h) x Nombre d'heures opérationnelles par jour H (h/jour) x % d'occupation de l'espace concerné PP (%) x Durée du chantier DC (jours).

Coûts des pertes des revenus d'amendes de stationnement = Coût d'une amende CA (€/billet) x Fréquence d'amendes FA (billets/h) x Durée du chantier DC (h) x (Espaces de stationnement interdits perdus ESP (m2) / Espaces de stationnement interdits totaux EST (m2)).

7.3.1.f *Les coûts liés à la consommation de carburants*

La hausse des coûts liés à la consommation de carburant pour les usagers détournés de leur itinéraire ainsi que les usagers reportés sur la route est calculée comme suit :

Cout de la consommation de carburant = Longueur du détour L (km) x Volume de trafic V (veh/h) x Durée du chantier DC (h) x Consommation de carburant C (l/veh-km) x Prix du carburant δ (€/l)

7.3.1.g *Les coûts liés à l'augmentation des accidents*

L'augmentation du trafic routier lié aux éventuels reports de trafic peut engendrer un accroissement du nombre d'accidents tels que des dommages matériels, des blessures légères et fatales. Une méthode d'estimation intéressante a été trouvée dans (Ormsby, 2009) :

Coûts de l'accroissement du taux d'accidents = Coût moyen de la collision CMC (€/km) x Longueur de la zone de construction LZC (km) x Nombre de véhicules par jour NVJ (véhicules/jour) x Durée du chantier DC (jours).

Le coût moyen de la collision dépend du type de véhicule et peut être déterminé à partir des statistiques du nombre d'accidents rapportés aux volumes de trafic.

Tableau 55 : Valeurs tutélaires proposées par (Ormsby, 2009) pour le canada, en $$_{2009}$$

Type de véhicule	Coût moyen de collision
Véhicule personnel	161,02$/1000veh-km
Bus	503,08$/1000veh-km
Véhicule de marchandise	171,09$/1000veh-km

7.3.1.h *Les coûts liés aux surcoûts d'exploitation ou au dédommagement des usagers et le manque à gagner*

Ces surcoûts doivent être évalués spécifiquement à l'opération de renouvellement et des moyens mis en œuvre par la collectivité. Il faut estimer le nombre de personnel qui doit être mobilisé pour l'information des usagers et également pour la mise en place d'un service provisoire.

Lors d'un renouvellement planifié, il est entendu contractuellement entre l'opérateur et le gestionnaire d'infrastructure de fixer un coût au kilomètre perdu correspondant à la production kilométrique ne pouvant être réalisé par le tramway du fait du renouvellement planifié et un coût kilométrique pour la mise en place d'un service provisoire. Ces informations sont généralement confidentielles.

Concernant le dédommagement des usagers, la pratique est encore peu répandue en France. Parmi les renouvellements d'ampleur, les commerçants riverains ne sont jamais indemnisés pour une éventuelle perte du chiffre d'affaire due aux travaux. Dans le cas des usagers, on peut citer le cas des usagers du RER C qui ont été indemnisés lors des inondations du RER C en 2016.

Enfin, le manque à gagner correspond à la non réalisation ou à la diminution des recettes commerciales pendant les travaux. Une formule simple consiste à mesurer l'écart des recettes commerciales sur l'ensemble du réseau, sur la même période, un an auparavant.

7.3.1.i *Les coûts de remise en état*

Les opérations de renouvellement d'une infrastructure de transport en milieu urbain nécessitent des plages d'indisponibilité dont la durée et les conséquences peuvent être pénalisantes pour l'exploitation (la circulation des véhicules) et pour le système urbain (p.ex. les autres usagers des lieux, etc.)

Dans le cas de l'une plateforme de voie ferrée de tramway, plusieurs parades techniques existent pour limiter ces nuisances mais influencent les coûts spécifiques de l'intervention. D'abord, il est possible d'intervenir de nuit sans gêner l'exploitation (nuits courtes) ou en diminuant l'amplitude horaire (nuits longues). Selon la consistance des travaux, il est possible de les reprendre d'une nuit à l'autre tant que les composants supports et guides du matériel roulant ne sont pas touchés, par exemple dans le cas d'une reprise du revêtement. Enfin lorsque ces parades ne sont pas disponibles pour des raisons techniques, politiques ou financières, il peut être avantageux de recourir à la fermeture totale ou partielle des voies en circulation. Là encore, plusieurs options existent : fonctionnement en voie unique temporaire ou voie fermée.

Le tableau ci-après présente à titre indicatif les types de travaux pouvant engendrer des contraintes sur l'exploitation.

Tableau 56 : Contraintes d'exploitation par type de travaux

Classe de travaux	Description des travaux	Modalités de mise en œuvre
Travaux préparatoires	Installation de la zone de chantier Stockage des matériaux et matériels	Mise en œuvre possible de jour même pendant l'exploitation sans contrainte exportée
	Dégarnissage du revêtement (dalles béton, pavés pierre, gazon, enrobé, Dépose du béton de rehausse	Mise en œuvre possible de jour même pendant l'exploitation avec contraintes exportées Mise en place de mesures de protection telles que limitation de vitesse, californiens et signalisations provisoires
Travaux de renouvellement	Dépose du rail Dépose de l'armement du rail (attaches, selles, chambre d'éclissage) Remplacement du rail et de l'armement, réglage des rails, puis scellage Reprise du système de drainage (dont remplacement des drains voire même reprise du béton de fondation) Reprise de l'isolation électrique et mécanique du rail (chambre d'éclissage)	Mise en œuvre exclusivement en coupure d'exploitation
Travaux de finition	Selon le type de pose de voie, rechargement du béton de rehausse, du substrat, et mise en œuvre du revêtement neuf Pose des chambres d'éclissage,	Mise en œuvre possible de jour même pendant l'exploitation avec contraintes exportées

Classe de travaux	Description des travaux	Modalités de mise en œuvre
	Mise en œuvre du joint du rail, finitions des bordures de revêtement	Mise en place de mesures de protections telles que limitation de vitesse, et signalisations provisoires
	Nettoyage de la zone chantier	Mise en œuvre possible de jour même pendant l'exploitation sans contraintes exportées

Enfin, la durée des plages d'indisponibilités varie selon la quantité de travaux, de leur nature (type de pose de voie) et du mode d'organisation du chantier (avec ou sans piste) et du mode d'organisation du travail: journée de 8h, 2x8h ou 3x8h. Les cadences sont elles-mêmes fonction du linéaire continu des zones touchées. A titre d'exemple, on a relevé des expériences de renouvellement pouvant traiter jusqu'à 800 mètres linéaires de voie double, sur un front de travaux pour une coupure d'été de 6 semaines.

Rappelons que l'exemple illustrant la méthodologie de la recherche se restreint à la modélisation des coûts associés au remplacement des rails, avec consolidation éventuelle de l'assise de la voie. Ces interventions d'ampleur ont été constatées à Grenoble et à Orléans, et dans une moindre mesure à Nantes qui se distinguent par des travaux d'amélioration beaucoup plus consistants de la voie ferrée (renouvellement complet de la plateforme de voie ferrée avec changement du type de pose de voie).

Comme expliqué au §7.1.1 plusieurs méthodes d'estimation des coûts sont possibles. Néanmoins le recours à une méthode analogique nous parait trop rigide pour rendre compte des différentes tactiques possibles pour le gestionnaire. D'abord, les retours d'expérience sont peu nombreux et sont largement insuffisants pour discriminer les coûts des travaux selon la tactique de renouvellement. Puis, les informations manquent concernant le type de pose de voie notamment en cas de consolidation et en ce qui concerne la nature des revêtements qui représentent un coût non négligeable du montant total des travaux.

Réseau	Année	Type de travaux	Durée du chantier	Travaux sous exploitation	Coût des travaux (€/mlvd)	Source
Orléans	2017	Remplacement des rails avec consolidation de la voie	6 semaines	Coupure complète d'exploitation	3836	(« Orléans », 2017)
Orléans	2018	Remplacement des rails sans consolidation	7 semaines	Coupure complète d'exploitation	2843	(Métropole, 2018)
Grenoble	2018 – 2021	Remplacement des rails sans consolidation	variable	Coupure partielle d'exploitation (nuits longues)	3393 – 5550	Estimation Ingérop – Programme de travaux
Grenoble	2018 – 2021	Remplacement des rails avec consolidation de la voie	variable	Coupure partielle d'exploitation (nuits longues)	4753 – 6304	Estimation Ingérop – Programme de travaux

Notre démarche vise donc à proposer une estimation des délais et des coûts de façon fine (du niveau de détail d'une entreprise de travaux) basée sur des barèmes fournis par l'entreprise Artelia et des hypothèses grossières concernant les quantités précises de matériaux et fournitures. Ce niveau de détail est en

revanche celui qu'il convient d'adopter pour guider la décision du maître d'ouvrage d'organiser les travaux sous exploitation ou en coupure d'exploitation puisqu'il permet de distinguer :

- les différents délais associés aux travaux préparatoires (y.c. installation de chantier), aux travaux de renouvellement et aux travaux de finition,
- les différents coûts en différenciant le coût de la main d'œuvre et le coût de la fourniture ainsi que l'outillage nécessaire, de manière à prendre en compte les impacts financiers des travaux s'effectuant de nuit.

La méthodologie d'estimation et les hypothèses prises sont présentées dans le détail au chapitre suivant.

Notons que notre démarche ne prétend pas avoir le dernier mot sur l'estimation des coûts des interventions de renouvellement. Nous pouvons d'ores et déjà noter des lacunes factuelles nécessitant des approfondissements futurs. Néanmoins, nos résultats sont suffisamment robustes pour nous autoriser quelques conclusions.

7.3.2. LES COUTS ET AVANTAGES A L'ETAT COURANT : LES IMPACTS ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

Les conséquences directes et indirectes à l'état courant provoquent eux :

- une augmentation ou une diminution du confort de déplacement, qui représente les bruits et vibrations liés au roulement, le confort peut diminuer avec le vieillissement du système.
- une augmentation des temps de parcours (variation d'utilité), qui rend compte des pertes économiques associés aux variations d'utilités subites par les usagers. Cette notion dépend de la valeur du temps.
- des coûts d'amortissement, qui représentent le poste de dépense associé à la consommation des actifs.
- des coûts de maintenance, qui peuvent augmenter avec le vieillissement du système.

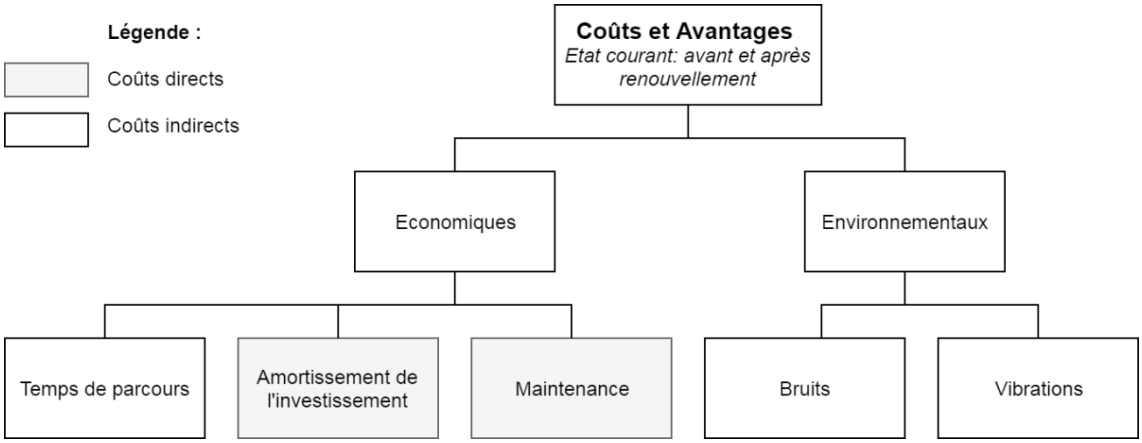


Figure 88 : Hiérarchie des coûts et des avantages à l'état courant

7.3.2.a *Les coûts d'amortissement*

En France, les règles de comptabilité des Services Publics à caractère Industriel et Commercial (SPIC) sont régies par la norme comptable M4. Celle-ci indique que les coûts significatifs de renouvellement d'une immobilisation corporelle doivent être comptabilisés comme l'acquisition d'un actif séparé et la valeur nette comptable du composant remplacé ou renouvelé doit être comptabilisée en charges.

L'amortissement représente la consommation des avantages économiques attendus de l'actif lorsque son utilisation est limitée dans le temps. La notion de charges d'amortissement permet de prendre en compte l'effet d'un renouvellement anticipé d'une infrastructure. Dans notre travail, nous mesurons la valeur en capital d'une infrastructure par leur valeur de remplacement moins les amortissements cumulés. Autrement dit, lors d'un renouvellement anticipé nous prenons en compte un surcoût correspondant aux annuités d'amortissement à venir.

7.3.2.b *Les coûts liés à l'augmentation des temps de parcours des usagers*

Selon le type de désordre qui se manifeste sur les infrastructures de voie ferrée de tramway, des mesures correctives peuvent conduire à une réduction des vitesses d'exploitation. Ces mesures sont décidées au cas par cas, en fonction de la vitesse nominale et du type de désordre.

On notera à titre d'exemple que les dégradations qui sont apparues sur le tramway d'Orléans ont engendré un abaissement de vitesse à 20km/h d'un tronçon initialement circulé à 70km/h, soit environ une charge nette pour les usagers de 2 minutes de temps de parcours.

7.3.2.c *Les coûts liés aux bruits et vibrations*

Il n'existe pas d'étude permettant de valoriser économiquement les bruits et vibrations qui impactent le confort de déplacement des usagers.

7.3.2.d *Les coûts de maintenance courante*

Les coûts de maintenance de la voie ferrée de tramway sont associés à différentes types d'interventions qui sont listés dans le tableau ci-dessous. Une partie de ces interventions consistent en des actions de surveillance de l'état de la voie et en des actions de nettoyage et petite réparation.

Coût de la maintenance courante annuelle = Nombre d'heures de maintenance courante (h/km/an) x Kilomètres de ligne (km) x Coût global horaire (€/h)

Tableau 57 : Les coûts de maintenance courante

Intervention de maintenance	Coût	Unité
Parcours de la voie à pied	16	heures/km/an
Parcours de la voie en cabine	8	heures/km/an
Contrôle géométrique	32	heures/km/an
Relevé d'usure et remplacement	20	heures/km/an
Entretien des joints	16	heures/km/an
Balayage de la plateforme	52	heures/km/an
Curage des fonds de gorge de rail	3	heures/km/an
Nettoyage des assainissements (caniveaux, boîte à eaux, etc.)	6	heures/km/an
Autres contrôles (serrage, ancrage)	8	heures/km/an
Inspection des zones de manœuvre	40	heures/unité/an
Entretien des appareils de voie	130	heures/unité/an
Entretien des superficies engazonnées (tontes, désherbage, traitement) et entretien du système d'arrosage	0,15	heures/m²/an

7.3.2.e *Les coûts de maintenance ponctuelle*

La maintenance ponctuelle correspond aux interventions de type meulage, rechargement, traitement anti-usure et remplacement du revêtement

Tableau 58 : Les coûts de maintenance ponctuelle

Intervention de maintenance	Coût	Unité
Meulage du rail	10	€/mlvs
Traitement anti-usure des courbes R<80m	130	€/mlvs
Traitement anti-crissement des courbes R<80m	150	€/mlvs
Maintenance ponctuelle du revêtement, des joints et des bordures	100	€/mlvs

7.4. ESTIMATION DES COUTS DE POSSESSION

7.4.1. INFLUENCE DES RAYONS DE COURBURE SUR LE COUT DE POSSESSION

A partir de nouvelles connaissances statistiques constituées pour le réseau de Grenoble au chapitre 6, nous proposons de calculer une partie des coûts précédemment présentés en nous limitant aux coûts de possession de l'infrastructure. Le coût de possession comprend les dépenses engagées par le gestionnaire d'infrastructures pour maintenir en condition opérationnelle son équipement. Pour l'application à la voie ferrée, ces coûts comprennent les dépenses liés à l'investissement initial, les renouvellements successifs sur la période d'analyse (remplacement de rail avec ou sans consolidation des supports), la maintenance courante et la maintenance ponctuelle (meulage, rechargement, reprise du revêtement).

Les hypothèses prises pour ce calcul sont synthétisées dans le tableau ci-après. Trois cas sont présentés selon le rayon de courbure (faible rayon, grand rayon, alignement droit). Les fréquences des opérations d'entretien courant, de maintenance et de renouvellement sont ajustées en conséquence. Pour l'hypothèse de remplacement des rails d'un alignement droit, en l'absence de retour d'expérience sur l'âge au renouvellement, on peut considérer que sur la période d'observation de 50 ans, le premier remplacement a lieu entre la 41ème et 50ème année.

Tableau 59 : Paramètres de simulation

	Courbe de faible rayon	Courbe de grand rayon	Alignement droit
Taux d'actualisation	3,5%	3,5%	3,5%
Longueur	150mlvs	150mlvs	150mlvs
Revêtement	Non-modulaire	Non-modulaire	Non-modulaire
Rayon de courbure	Faible rayon <50m	Grand rayon entre 50 et 300m	Rectiligne
Investissement initial	180 000€	180 000€	180 000€
Entretien courant	Parcours de la voie à pied et en cabine, contrôle géométrique, relevé d'usure, entretien des joints, curage des fonds de gorge, nettoyage des assainissements, balayage de la plateforme	Parcours de la voie à pied et en cabine, contrôle géométrique, relevé d'usure, entretien des joints, curage des fonds de gorge, nettoyage des assainissements, balayage de la plateforme	Parcours de la voie à pied et en cabine, entretien des joints, curage des fonds de gorge, nettoyage des assainissements, balayage de la plateforme
Entretien courant (€)	8,4€/mlvs/an	8€/mlvs/an	3,6€/mlvs/an
Meulage	1 fois tous les 2 ans	1 fois tous les 3 ans	1 fois tous les 10 ans
Traitement anti-usure	1 fois tous les 4 ans	1 fois tous les 8 ans	aucun
Traitement anti-crissement	1 fois tous les 10 ans	1 fois tous les 12 ans	aucun
Réparation du revêtement	1 fois tous les 4 ans sur 25% du linéaire	1 fois tous les 4 ans sur 25% du linéaire	1 fois tous les 4 ans sur 25% du linéaire
Remplacement de rail	2315€/mlvs	2315€/mlvs	2315€/mlvs
Fréquence de remplacement	Weibull à deux paramètres (η=17,6 ; β=6,06)	Weibull à deux paramètres (η=27,11 ; β=4,45)	Remplacement prévu entre 41 et 50 ans

Le principal avantage de la voie sur dalle béton est lié à ses coûts de maintenance (y compris la gêne que la maintenance représente pour l'exploitation), plus faibles que ceux de la voie ballastée. La durée de vie de la voie sur dalle est également considérée plus longue, avec une durée de vie d'au moins 50 ans (contre 30 ans pour une voie ballastée). Notons qu'il n'y a pas encore suffisamment d'études à long terme sur sa durée de vie réelle, y compris dans le domaine du ferroviaire.

Toutefois, ces avantages qui sont bien réels dans le cas d'une voie ouverte dont le rail et les supports d'attaches peuvent être remplacés aisément, sont légèrement moindres lorsque la voie est encastrée dans la chaussée. Les difficultés d'accès aux rails et aux attaches rendent les interventions de remplacement coûteuses : elles nécessitent une phase de démolition puis de reconstruction et les cadences de travaux sont réduites car il n'y pas de possibilité de mécaniser des interventions qui restent de nature artisanale. Si ces interventions sont relativement rares pour les sections en ligne droite dont on peut s'attendre à ce que

les rails durent jusqu'à 40 ans[41], les courbes serrées propres aux transports guidés urbains requièrent des interventions dont la fréquence est méconnue, y compris des praticiens.

La Figure 89 présente une comparaison des coûts de possession entre les courbes de faible et de grand rayon et le cas d'un alignement droit. On observe que les coûts de remplacement des rails captent la majeure partie des coûts de possession de système avec respectivement 47% et 38% pour les courbes de faible et de grand rayon. Les traitements spécifiques du rail pour limiter son usure et son crissement par rechargement le long du rail d'un nouvel apport de matière permettent de prolonger la durée de vie des rails, pour autant ils représentent eux-aussi des coûts non négligeables : 21% pour les faibles rayons de courbure et 12% pour les grands rayons ; tandis que le meulage peut être considéré comme marginal dans les deux cas.

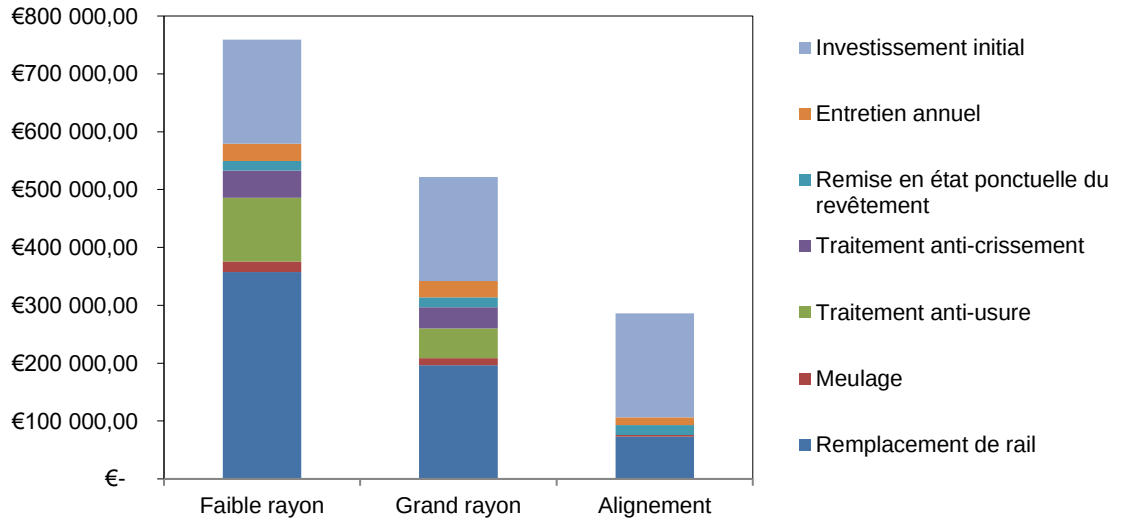


Figure 89 : Comparaison des coûts de possession des courbes de faible et grand rayon sur 50 ans

Sur l'ensemble de la durée de vie (Figure 90), le surcoût de possession lié à la présence des courbes de faible rayon est important. Sur 50 ans, il est ainsi 45% plus important que pour les courbes de plus grand rayon, et 165% plus important qu'un alignement droit. Ce résultat nous semble significatif et s'ajoute aux critiques récurrentes sur les tracés sinueux de certaines lignes de tramway, en particulier l'impact des courbes sur la vitesse commerciale des lignes (Zembri, 2012). Ce résultat nous apparait être une contribution majeure qui permettrait d'enrichir le calcul socio-économique en phase amont en ajoutant par exemple un facteur de surcoût lié à la présence de courbe sur le tracé de voie.

[41] Pour l'estimation des coûts en alignement droit, nous rappelons que les données de retour d'expérience sont insuffisantes pour une analyse statistique. Néanmoins, les données actuelles sur la longévité des sections droites permettent de fixer une hypothèse raisonnable d'un remplacement entre la 41ème et 50ème année d'exploitation.

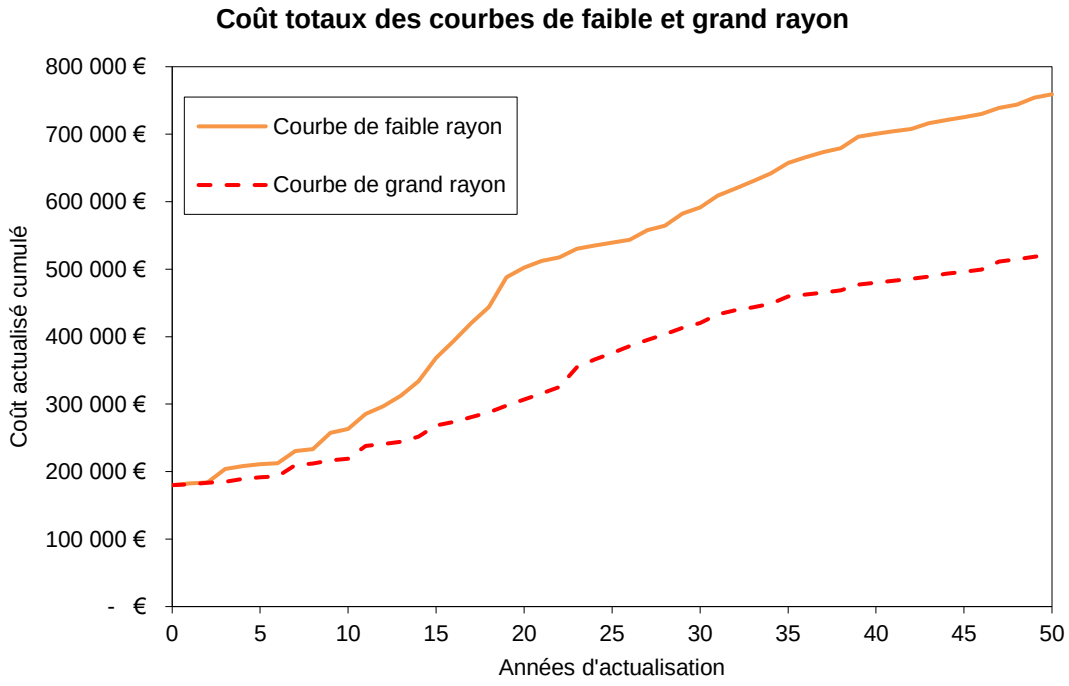


Figure 90 : Evolution des coûts de possession des courbes de faible et grand rayon

7.4.2. INFLUENCE DU MODE OPERATOIRE DE TRAVAUX SUR LE COUT DE RENOUVELLEMENT

Les coûts d'une intervention de travaux sur le génie civil des installations, à l'image d'un remplacement de rail, sont en principe dominés par les coûts de personnels, suivis des coûts de matériaux et d'outillages et des coûts d'études pour terminer. Or, pour effectuer une opération de remplacement de rail, différentes tactiques de travaux peuvent être envisagées selon le type de pose de voie (voie ouverte, voie encastrée).

7.4.2.a *Coûts directs des travaux par mode opératoire*

Pour le type de pose de voie le plus répandue, c'est-à-dire la voie encastrée, on observe généralement deux tactiques correspondant à un mode opératoire de travaux :

- travaux sous coupure d'exploitation : ce mode opératoire offre les meilleures cadences de travaux mais implique l'interruption des circulations de jour comme de nuit afin de libérer la zone de travaux des contraintes relatives à la circulation des rames,
- travaux sous exploitation : ce mode opératoire s'appuie en grande partie sur des travaux de nuit, soit en nuits courtes (1h – 5h), soit en nuits longues (22h – 5h). La coupure d'exploitation dans ce dernier cas est partielle. Les cadences de travaux sont plus longues mais permettent la continuité totale ou partielle du service de transport.

Sur la base d'une estimation des coûts de manière analytique sur un cas fictif d'un tronçon d'une longueur de 150m, nous proposons une estimation grossière de ces différentes tactiques de travaux. L'objectif est de pouvoir discuter des avantages et des inconvénients de chacune des tactiques précitées.

On peut décomposer une intervention de remplacement de rail en 4 phases de travaux successives impliquant des qualifications différentes :

- La phase d'installation de chantier : préparation de la zone, balisage, approvisionnement des matériaux. Cette phase peut s'effectuer sous exploitation de jour comme de nuit.
- La phase de démolition des revêtements : dans le cas d'une voie encastrée, il est nécessaire de passer par une phase de dépose des revêtements pour pouvoir atteindre les attaches de rail. Observons que certaines poses de voie apportent une certaine facilité d'accès à ses composants comme, par exemple, la voie engazonnée ou encore la pose de voie Nantaise mise en œuvre très récemment. Cette phase peut s'effectuer sous exploitation de jour comme de nuit.
- La phase de renouvellement : elle consiste à la dépose des rails usés par des rails neufs. Dans le cas d'un scénario sous exploitation, le rail à poser est éclissé pour permettre la circulation des tramways. Cette phase s'effectue de nuit ou de jour sous coupure d'exploitation.
- La phase de finition : pose du nouveau revêtement et travaux de finition des bordures. Cette phase peut s'effectuer sous exploitation de jour comme de nuit.

Tableau 60 : Dimensionnement de la main-d'œuvre de chantier et des temps de travaux par phase

Phase de travaux	Nombre de personnes	Durée en maintenant l'exploitation	Durée en coupant l'exploitation
Phase d'installation de chantier	4 personnes	3 jours	3 jours
Phase de démolition des revêtements	4 personnes	5 jours	2 jours
Phase de renouvellement	8 personnes	30 jours	15 jours
Phase de finition	4 personnes	5 jours	3 jours

Nous prenons ici l'hypothèse selon laquelle le scénario sous coupure d'exploitation n'envisage qu'un seul front de travaux ce qui conduit à un nombre de personnel identique à un scénario sous exploitation. Pour le scénario sous exploitation, on considère un rythme de travail de nuit basé sur une amplitude horaire de 7h correspondant à des nuits longues. Aucun renforcement des supports d'attaches ou d'ancrage n'est prévu.

Tableau 61 : Coûts horaires de la main-d'œuvre de chantier

Tarification	Coût horaire (€/h)
Jour	47,5
Nuit	95
Une journée de travail correspond à 7 heures.	

La comparaison des coûts de remplacement des rails pour une courbe de 150m figure sur le tableau suivant.

Tableau 62 : Comparaison des montants de travaux

	Maintien d'exploitation	Interruption d'exploitation
Installation de chantier	3 990 €	3 990 €
Dépose revêtement	6 650 €	2 660 €
Travaux de renouvellement	159 600 €	39 900 €
Finition : revêtement-bordure	6 650 €	3 990 €
Total	176 890 €	50 540 €
Coût matériaux & outillages	138 370 €	138 370 €
Etude EXE	18 916 €	11 335 €
TOTAL	334 176 €	200 245 €
Ratio au mètre linéaire de voie simple	2 228 €/mlvs	1 335 €/mlvs

L'intérêt du calcul présenté n'est pas tant de dire qu'une tactique de renouvellement fondée sur un mode de travaux sous exploitation est plus couteuse financièrement qu'une tactique fondée sur une coupure d'exploitation, mais d'apprécier l'importance de prendre en compte les coûts économiques directs et indirects dans le choix de la décision.

7.4.2.b *Discussion et comparaison des montants de travaux entre les deux tactiques de renouvellement*

Des calculs grossiers des principaux postes de coûts économiques comme par exemple les coûts liés à l'augmentation des temps de parcours en phase transitoire nous permettent d'apprécier les avantages d'une stratégie sous exploitation.

Prenons pour hypothèse que la fréquentation du tronçon de ligne dans laquelle une intervention de renouvellement est nécessaire correspond à un minimum de 5000 voyageurs/jours. D'abord, indiquons qu'il s'agit d'une hypothèse particulièrement basse a la vue des capacités offertes par le mode de transport. L'interruption du service de transport engendre alors :

- des surcoûts d'exploitation liés à la mise en place de service de bus provisoire,
- une augmentation des temps de parcours pour les voyageurs

Pour les coûts indirects liés à l'augmentation des temps de parcours des voyageurs

On peut sans aucun doute prendre l'hypothèse que la rupture de charge engendrée par les bus de substitution entraine un rallongement moyen des temps de parcours de 10 minutes. A une valorisation horaire classique de 10€/h, on obtient un surcoût économique pour le scénario sous coupure d'exploitation de 125 000 €.

D'un autre côté, pour le scénario sous exploitation, on peut considérer que si le service de transport est maintenu, la zone de chantier impose des limitations de vitesse puisque les tramways traversent au pas la zone de travaux. On peut estimer cet allongement des temps de parcours de 1 minute, soit un surcoût pour le scénario sous exploitation de 25 000 €.

Pour les coûts directs des surcoûts d'exploitation liés à la mise en place de bus de substitution

Admettons dans un scénario le plus favorable qu'il existe sur la ligne des possibilités de mise en place d'un terminus partiel sur la ligne qui nécessite une interruption de l'exploitation sur au moins 4 stations. Cela implique la mise en place d'un service provisoire de bus permettant de raccorder les 4 stations tramways d'une longueur que l'on peut estimer grossièrement à 1 km.

La production kilométrique journalière est alors de 192 kilomètres. A raison d'une interruption pour travaux de 15 jours et une fréquence de passage de 10 minutes, on arrive à un total 2880 km de substitution parcourus. Nous avons obtenu, auprès d'un réseau, le tarif pratiqué par un opérateur de transport pour mettre en place un service de substitution. Ce surcoût peut être calculé sur la base d'un montant de 500€ HT + 4,20€/km de substitution réalisé du fait de l'interruption, soit un total de 12 596€.

Bilan et discussion

En prenant en compte grossièrement les coûts liés à l'augmentation des temps de parcours et à la mise en place d'un service substitution, on peut présenter les conclusions suivantes :

- Les coûts directs de travaux uniquement présentent un différentiel de 133 931€ à l'avantage net pour le scénario sous exploitation.
- La prise en compte des coûts annexes liés à l'augmentation des temps de parcours et la mise en place d'un service de substitution engendre un différentiel de 115 822 € à l'avantage du maintien de l'exploitation.
- Les deux différentiels se compensent largement :

Tableau 63 : Comparaison des scénarios avec ou sans maintien de l'exploitation et prise en compte des coûts annexes

	Maintien d'exploitation	Interruption d'exploitation	Différentiels
Coûts directs de travaux	334 176 €	200 245 €	133 931€
Coûts indirects liés à l'augmentation des temps de parcours des usagers	25 000 €.	125 000 €	- 100 000€
Coûts directs des surcoûts d'exploitation liés à la mise en place de bus de substitution	0€	12 596€	- 12 596€
Total	359 176€	337 841€	21 335€ (5,9%)

- Le différentiel total est d'environ 6% pour un niveau faible de trafic voyageur, donc avantage pour le scénario sous exploitation compte tenu des avantages pour les voyageurs.
- La prise en compte des riverains avec les surcouts liés aux nuisances des travaux donnerait l'avantage au scénario avec interruption d'exploitation compte tenu des durées de chantier réduites permises par ce mode opératoire.
- La prise en compte des automobilistes avec les surcoûts liés au détour et allongement des temps de parcours dépend complètement de la configuration in situ.

- Des travaux sur une longueur de voie plus importante allongeraient la durée du chantier avec un désavantage nettement plus important a priori pour le scénario sous exploitation.

Ces éclairages permettent alors d'envisager des scénarios sous exploitation pour de petits linéaires de travaux, comme par exemple, le remplacement des courbes mais ces derniers seraient nettement moins avantageux économiquement parlant, pour de long linéaire de voie. Or, quand l'ensemble des lignes entrera dans l'ère du renouvellement, cette stratégie devra se confronter à la réalité du marché de la construction et certains réseaux devront choisir entre reporter leur intervention sous coupure d'exploitation ou intervenir, en dehors des périodes estivales, sous exploitation. L'enjeu est de taille car les tactiques sous coupure d'exploitation sont planifiées en principe en période estivale pour limiter la gêne pour les usagers. Il nous semble alors intéressant d'ouvrir des perspectives de recherche à la mise en place d'un observatoire des travaux de renouvellement pour apprécier avec plus de précisions les avantages et les inconvénients des tactiques de renouvellement.

CONCLUSION DE CHAPITRE

Ce chapitre a permis de faire un état de l'art des méthodes utilisées en ingénierie pour l'estimation des coûts des infrastructures et leurs limites. L'estimation des coûts des projets d'infrastructures dépend de nombreux facteurs techniques, cognitifs, économiques ou encore politiques quand les retours d'expérience partagés dans de nombreux pays font état d'une dérive systématique des coûts des projets d'infrastructures de transport. Nous montrons en quoi les projets de renouvellement diffèrent des projets de conception neuve. Ils sont généralement de moins grandes envergures et surtout les incertitudes techniques sont réduites car l'éventail des choix de conception se trouve limité par l'infrastructure existante. Les projets de renouvellement restent néanmoins sensibles aux aléas de chantier qui peuvent survenir, en particulier, à la découverte impromptue de défauts et de désordres en sous-surface visible du revêtement : les attaches de rail, la dalle de voie et/ou de fondation, la substructure, etc. Le risque de surcoûts associé peut être maîtrisé à deux niveaux. Au niveau du diagnostic d'abord, des sondages destructifs peuvent être employés sur les zones suspectes. Au niveau contractuel ensuite, en exportant une partie des risques vers les contrats de travaux.

Dans un deuxième temps, nous avons développé une méthode d'évaluation économique des coûts liées au renouvellement. La méthode permet de mesurer les gains et les inconvénients d'une telle opération pour les différents acteurs : les riverains, les usagers, les routiers, les piétons, le gestionnaire d'infrastructure ou encore l'exploitant. L'originalité de la méthode est de proposer un périmètre d'évaluation très vaste. Toutefois, elle requiert l'estimation précise des données de trafic routier, ferroviaire et les reports modaux associés. Or, s'appuyer sur ce type d'outils de modélisation requiert du temps et des compétences pas toujours mobilisables quand les opérations de renouvellement sont généralement de taille modeste.

Nous avons enfin proposé quelques résultats d'application qui nous permettent de donner quelques indications pratiques sur l'influence du rayon de courbure sur les coûts de possession et l'influence du mode opératoire de travaux sur les coûts d'une opération de renouvellement.

***

Sur la base de ces résultats, nous recommandons que (i) la conception du tramway privilégie des tracés aussi rectilignes que possible, (ii) la conception des réseaux doit anticiper les besoins en renouvellement avec une attention particulière pour les sections courbes et (iii) les études socio-économiques des variantes de tracé doivent prendre en compte l'impact des courbes sur le coût de possession des infrastructures.



CONCLUSION GENERALE

Avant toute conclusion, rappelons que ce travail de thèse a été réalisé dans un cadre industriel et en réponse à des besoins précis, à savoir le développement d'une approche patrimoniale de la voie ferrée de tramway. Malgré tout, loin de restreindre le champ d'action de nos travaux à ce domaine, nous avons cherché à les généraliser en dissociant autant que possible le contexte des moyens mis en œuvre. Notre approche est donc ainsi utilisable dans des secteurs variés, pas de façon directe évidemment mais en adaptant la démarche proposée à de nouvelles problématiques.

***

Au fil des chapitres présentant les problèmes que pose la gestion à long terme des infrastructures, puis les méthodes utilisables pour les résoudre, nous avons exposé les principaux traits de l'approche patrimoniale. Celle-ci s'est constituée par l'agrégation de trois courants : ceux de l'analyse systémique, des méthodes de diagnostic et de pronostic des besoins d'intervention, et de l'approche socio-économique appliquée aux renouvellements des infrastructures. Les deux premiers courants permettent d'aboutir à une vision du patrimoine que l'on peut qualifier de « technique » : pour celle-ci, le patrimoine est un ensemble d'éléments susceptibles, moyennant une gestion adéquate, de maintenir en condition opérationnelle les installations de voie. Le troisième courant complète les précédents par la dimension économique : en effet, les interventions de renouvellement sont coûteuses et ont des impacts qui dépassent largement le périmètre immédiat des infrastructures. Ce n'est donc pas uniquement la réalité technique du patrimoine qu'il convient d'analyser mais aussi les interactions qui existent entre les installations de voie, le système de transport et son environnement urbain.

Pour bien gérer un système de transport, la seule approche technique ne suffit pas : il n'est pas suffisant, dans la majorité des cas, d'établir un plan de gestion parfaitement calibré aux désordres susceptibles d'apparaitre sur les installations pour arriver à une bonne gestion du patrimoine ; on a également besoin de mesurer les impacts sur le système urbain.

En conclusion, nous insisterons sur quatre aspects ; ils ont rapport à l'analyse systémique du système technique ; à la qualité des données d'inventaire et de suivi de l'état des infrastructures ; à la prévision budgétaire et à l'analyse socio-économique des renouvellements.

L'approche patrimoniale relève d'une compréhension fine du système technique qui consiste à analyser les matériaux, les composants ainsi que les formes d'assemblage et les interactions entre les composants et avec l'environnement extérieur. Nous avons mis en œuvre cet aspect dans le cadre conceptuel général de l'analyse systémique présentée au chapitre 3. Dans l'état actuel d'avancement de notre démarche, les outils proposés nous paraissent satisfaisants pour atteindre deux buts : d'une part, maîtriser intellectuellement la complexité du système technique ; d'autre part, faire le diagnostic du problème posé par son vieillissement. C'est sur cette dernière étape que portent surtout nos interrogations et nos

recherches actuelles, et c'est surtout sur elle que nous insisterons dans cette conclusion, après quelques rappels de ce qu'est un bon diagnostic.

Faire un diagnostic, c'est comprendre pourquoi « quelque chose ne va pas ». Pour y parvenir, nous avons vu qu'il était possible d'employer des modèles mathématiques complexes utilisant un grand nombre de données. Mais en pratique, tel est rarement le cas. Le plus souvent, l'essentiel est d'avoir une compréhension claire des différents phénomènes liés au vieillissement.

La première chose à faire lorsqu'on veut porter un diagnostic sur un « problème » est de bien définir le cadre d'analyse. Il est bien évident que, les interdépendances entre tous les sous-systèmes et systèmes de sous-système étant innombrables, on pourrait élargir à l'infini le cadre d'analyse, et toujours découvrir de nouveaux éléments susceptibles d'exercer une influence… Il est non moins évident, dans un but d'efficacité opérationnelle, qu'il faut savoir limiter le champ d'investigation.

Une question très liée à la précédente est celle de la finesse d'analyse de chaque facteur de dégradation ou de défaillance du système. Nous pensons que dans un premier temps, il faut essayer de prendre une vue d'ensemble aussi large que possible du problème, même si l'on est contraint de rester à un niveau très qualitatif. A ce stade, il faut repérer d'une part quels sont les facteurs importants qui sont en cause, d'autre part quels sont les principaux leviers d'action.

Nous avons montré que, comme pour beaucoup d'infrastructures, les leviers d'action pour les installations de voie apparaissaient en nombre limité et que lorsqu'il y a un « problème[42] », on peut souvent identifier assez facilement quels facteurs sont à la base de celui-ci. Nous avons vu également que les processus associés au vieillissement se déroulent relativement lentement et dans notre cas, sur des installations faciles d'accès ; ce qui permet à des personnes qualifiées, de repérer avec aisance les premiers signes de vieillissement appelés symptômes, puis de les traiter dans une fenêtre de décision qui est, dans la plupart des cas, grande. Cependant les problèmes constatés concernent souvent le court et le moyen terme, et sont plus urgents que les problèmes posés par la gestion du patrimoine, en particulier ceux des opérations de renouvellement, qui ont souvent des échéances à long terme.

Les contributions du chapitre 5 offrent un outil de diagnostic technique « standardisé » pour la programmation des actions à court et moyen terme. Il répond aussi à l'incomplétude et l'imprécision des données actuelles de suivi de l'état du patrimoine puisqu'il permet un archivage informatique retraçant dans le temps et dans l'espace l'évolution du vieillissement des installations. Le recours aux statistiques correspondantes permettrait d'alimenter et d'enrichir le pronostic des interventions à plus long terme. Toutefois, seule la capacité de l'outil à programmer des actions à court et moyen terme a été vérifiée : il améliore les inspections visuelles en les standardisant et formalise l'expertise permettant la programmation des interventions. Pour la programmation des actions à plus long terme, donc, en l'absence de symptômes, nous pensons que l'analyse statistique des données de suivi de l'état du patrimoine offre de belles perspectives de recherche.

En l'état actuel des données disponibles chez les gestionnaires d'infrastructure, nous avons présenté au chapitre 6 un outil qui présente l'intérêt de nécessiter peu d'informations. A partir des historiques

[42] un défaut, un désordre, une dégradation, une défaillance, …

d'intervention, il est possible de projeter l'enveloppe budgétaire à allouer qui tient mieux compte des écarts statistiques par rapport à la moyenne de durée de vie. L'enveloppe budgétaire qui en résulte donne une indication pour le gestionnaire d'infrastructure pour un scénario *statu quo* sans parvenir à se passer complètement de l'avis d'expert pour construire un programme d'intervention à long terme. Néanmoins, l'étude présentée fournit une analyse du retour d'expérience qu'il serait intéressant de conduire sur d'autres réseaux à des fins de comparaison. Ces résultats s'adressent aussi aux praticiens des bureaux d'étude, de la maintenance ou encore des économistes qui y trouveront des indications précieuses pour mieux prendre en compte le vieillissement, en particulier l'usure des courbes. Fort de ces résultats empiriques – alors que l'exercice de thèse relève plus de l'analyse que de la prescription – nous recommandons que (i) la conception des futurs tramways privilégie des tracés aussi rectilignes que possible, (ii) la conception des réseaux anticipe les besoins en renouvellement avec une attention particulière pour les sections courbes, notamment par la mise en place de terminus partiel et d'embranchements pour profiter d'un « effet réseau » ou la mise en œuvre de pose de voie facilitant son renouvellement[43] et (iii) les études socio-économiques des variantes de tracé prennent en compte, même de façon grossière, l'impact des courbes sur le coût de possession des infrastructures.

Enfin, nous avons cherché à nous tirer des rails à ornière en développant au chapitre 7 une méthodologie d'analyse socio-économique du renouvellement ; sans pour autant parvenir à une approche économique aboutie avec une monétarisation de tous les facteurs de coûts. Nous pensons cependant avoir réussi à montrer l'importance des actes de renouvellement dans les coûts de possession mais surtout, l'identification des coûts indirects et des méthodes possibles pour les appréhender. Cela offre des perspectives de recherches intéressantes. De rapides calculs, nous donnent des indications quasi-opérationnelles pour le choix des tactiques de renouvellement en replaçant le système technique dans son contexte urbain et socio-économique. A ce titre, la stratégie adoptée par la ville de Grenoble – en procédant à des interventions sous exploitation – nous semble particulière (et pionnière) en minimisant les impacts sur les usagers (mais pas des riverains qui doivent subir les travaux plus longtemps). Ainsi, ne nous prévalons pas des résultats d'une approche économique mieux aboutie et insistons sur la nécessité d'investir un observatoire des travaux en milieu urbain et de leurs impacts.

***

Diagnostic et pronostic ne sont pas des buts en eux-mêmes : ils sont seulement nécessaires pour « améliorer » la gestion du patrimoine, c'est-à-dire plus conforme aux enjeux du gestionnaire d'infrastructure. Ils sont en revanche très limités pour prendre en compte les enjeux d'un patrimoine plus « urbain » et multi-acteurs. Nous pensons que l'approche économique peut y fournir une espèce de solution vers une gestion mieux intégrée du patrimoine urbain. Au fil des chapitres, nous montrons en filigrane qu'il n'y a pas d'outil miracle pour parvenir à gérer son patrimoine sans emprunter des outils de diverses disciplines et beaucoup d'expertises.

La première limite de nos travaux est que nos contributions justement en matière de diagnostic concernent surtout le court et le moyen terme car ils sont plus urgents, donc plus visibles, que les problèmes que pose la gestion des renouvellements, qui ont souvent des échéances à long terme. Nous pensons néanmoins

[43] Par exemple, le nouveau type de pose de voie dite « Nantaise ».

qu'elles en constituent le socle indispensable, puisqu'on imagine assez mal en effet parvenir à une bonne gestion à long terme avec une mauvaise gestion à court terme.

La seconde limite est liée à la modélisation statistique des courbes de survie en réponse à notre besoin de construire une vision à plus long terme, en l'absence de symptôme. D'abord, soulignons la quantité des données utilisées et par conséquent la robustesse statistique des résultats qui en découlent. Surtout, nous reconnaissons que les résultats sont propres au réseau de Grenoble et qu'une modification du type de rail, des seuils d'intervention ou encore du schéma d'exploitation pourrait fausser les résultats. Ceux-ci sont donc à utiliser avec précaution et expertise. Observons également qu'il n'est pas possible à l'heure actuelle de disposer d'information de retour d'expérience sur la durée de vie des voies rectilignes.

La troisième limite déjà évoquée précédemment, concerne le développement d'une approche socio-économique du renouvellement qui n'a pas pu – faute de temps et de moyens – être appliquée sur un cas réel, et donc d'une certaine manière n'a pas été vérifiée. Certains facteurs de coût nécessitent en effet de disposer d'un modèle de trafic ou de mesures empiriques pour mesurer les effets sur les temps de parcours des usagers mais aussi des automobilistes. De la même manière, on peut citer la monétarisation du bruit et bien d'autres encore.

La quatrième et dernière limite de nos travaux tient au périmètre technique pris en compte dans notre réflexion. En nous limitant aux installations de voie courante, nous avons sciemment ignoré les problèmes posés par les appareils de voie qui nécessitent un entretien plus soutenu et dont la défaillance est critique pour l'infrastructure et pour le fonctionnement global du réseau de transport.

***

A l'issue de ce travail et après avoir présenté successivement ses principaux apports et limites, nous pouvons nous essayer à l'exercice des perspectives de recherche future. Tout d'abord, rappelons les prolongements directs déjà évoqués précédemment.

Il parait avant tout nécessaire d'élargir le périmètre de l'analyse systémique à l'ensemble des infrastructures : les installations de lignes aériennes, les ouvrages d'art ainsi que les appareils de voie[44] de manière à pouvoir disposer d'un outil de diagnostic complet. Cet enrichissement permettrait un gain de productivité au moment des parcours sur voie avec la formation d'une personne habilitée au repérage des désordres sur les différents champs techniques précités.

Ensuite, un deuxième axe de recherche concernerait le développement d'une modélisation statistique plus fine avec la prise en compte par exemple de la production kilométrique, du type de rail, … Un plus grand nombre de données permettrait également de mieux discrétiser les différentes classes de rayon de courbure, en particulier pour les grandes courbes entre 50 et 300 m de rayon. On peut également imaginer une meilleure prise en compte des interventions de maintenance : les impacts du meulage et du rechargement sur la durée de vie du rail. Il sera cependant nécessaire de disposer d'une modélisation plus

[44] Observons que même si ils n'ont pas été présentés dans nos travaux, les symptômes visuels relatifs aux appareils de voie sont d'ores et déjà intégré à l'outil de diagnostic SIG développé par ARTELIA.

sophistiquée et originale à l'image des chaînes de Markov ou des modèles graphiques de durée. On pense ici en particulier au modèle stochastique VirMaLab développé par le GRETTIA.

Une troisième piste pragmatique et de recherche consisterait à l'instrumentalisation d'une voie ferrée de tramway pour mieux prendre en compte les effets long terme du meulage et du rechargement sur la durée de vie des rails. Dans la même thématique, rappelons que les techniques de rechargement restent encore aujourd'hui assez mal maîtrisées et peuvent même, dans certains cas, conduire à une dégradation des propriétés mécaniques des aciers.

Un quatrième développement imaginable, celui-ci d'ordre prescriptif, serait d'harmoniser les pratiques de maintenance et de mieux formaliser les critères d'intervention. De la même façon, il faudrait démocratiser et systématiser les mesures des paramètres d'usure et de géométrie des installations de voie ferrée. Des techniques permettent aujourd'hui de mesurer ces paramètres en un temps record à l'aide d'une rame instrumentée. A titre d'exemple, une telle intervention a été réalisée à Grenoble pour les mesures d'usure et de géométrie de la ligne aérienne de contact : 50 km ont été parcourus dans les deux sens en à peine deux jours. Le même type de dispositif (au laser) existe pour les installations de voie. Enfin, il faut mieux archiver les interventions qui ont été réalisées et surtout améliorer leur localisation dans l'espace et dans le temps.

Enfin, il apparaitrait intéressant d'étudier les bénéfices de disposer d'un système d'information et de gestion pérenne à l'échelle urbaine en associant les divers acteurs, maîtres d'ouvrage et gestionnaires d'infrastructures des équipements urbains. Cette dernière piste de recherche aurait trait aux problèmes posés par la gestion multi-acteurs et aurait pour enjeu de parvenir à créer un nouveau mode de gestion qui allie l'efficacité technique de la gestion mono-acteur, à la pertinence d'une réflexion collective multi-acteurs pour profiter de logiques opportunistes, par exemple de groupement de travaux.

BIBLIOGRAPHIE

Abbouchi, H. (2008). Etude de la fatigue de contact de roulement : Approche expérimentale dans un matériau fragile et modélisation numérique.

Ahac, M., & Lakušić, S. (2017). Track Gauge Degradation Modelling on Small Urban Rail Networks : Zagreb Tram System Case Study. In H. Yaghoubi (Éd.), Urban Transport Systems. https://doi.org/10.5772/65086

Ahiaga-Dagbui, D. D., & Smith, S. D. (2014). Rethinking construction cost overruns : Cognition, learning and estimation. Journal of Financial Management of Property and Construction, 19(1), 38‑54. https://doi.org/10.1108/JFMPC-06-2013-0027

Allaire, D. (2012). Développement d'une approche systémique de la gestion patrimoniale d'un parc immobilier d'envergure nationale pour améliorer sa performance énergétique : Une application menée sur le parc immobilier de l'État utilisé par le ministère de la défense (Université Paris-Est). Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/pastel-00798252/

An, J.-H. (2013). Le choix d'un système de transport durable : Analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface. 365.

Barlow, R., & Hunter, L. (1960). Optimum Preventive Maintenance Policies. Operations Research, 8(1), 90‑100.

Becker, J.-J., Delache, X., Brunel, J., Sigaud, D., & Sauvant, A. (2013). 03-07-2013-élasticités des trafics routiers et ferroviaires. 22.

Blanquier, A. (1984). Sélection des investissements aux niveaux national et régional. Dunod.

Bourget, C., & Labia, P. (2010). Mission de diagnostic et de prospective sur les réseaux de transports urbains de Caen et Nancy.pdf. Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable.

Busby, J. S., & Hughes, E. J. (2004). Projects, pathogens and incubation periods. International Journal of Project Management, 22(5), 425‑434. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2003.09.002

Cambien, A. (2008). Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité. CERTU.

Cantarelli, C. C., Flyvbjerg, B., & Buhl, S. L. (2012). Geographical variation in project cost performance : The Netherlands versus worldwide. Journal of Transport Geography, 24, 324‑331. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.014

Cantarelli, C. C., van Wee, B., Molin, E. J. E., & Flyvbjerg, B. (2012). Different cost performance : Different determinants?: The case of cost overruns in Dutch transport infrastructure projects. Transport Policy, 22, 88‑95. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.04.002

Carrese, S., & Ottone, G. (2006). A model for the management of a tram fleet. European Journal of Operational Research, 175(3), 1628‑1651. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.031

CEREMA. (2014). Projet de transport collectif en site propre TCSP.

CERTU. (1997). Evaluation des transports en commun en site propre : Indicateurs transport pour l'analyse et le suivi des opérations. Lyon: Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques : Ministère de l'équipement, des transports et du logement.

CERTU. (2002). Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP : Evaluation des transports en commun en site propre. Paris: CERTU.

CERTU. (2009). Bibliographie sur l'emission acoustique des tramways. CERTU.

CERTU, & LROP. (2004). Plates-formes de tramway : Pathologie et conception. Lyon: Editions Certu.

CERTU, & LROP. (2009). Plates-formes de tramway : Pathologie et conception. Lyon: Editions Certu.

Chapas, P. (2012). Voie ferrée—Composants, construction et maintenance. In Techniques de l'ingénieur.

Charlot-Valdieu, C., & Outrequin, P. (2013). Coût global des bâtiments et des projets d'aménagement. Mode d'emploi—Catherine Charlot-Valdieu,Philippe Outrequin (Le Moniteur). Consulté à l'adresse http://www.decitre.fr/livres/cout-global-des-batiments-et-des-projets-d-amenagement-9782281116090.html

Cho, D. I., & Parlar, M. (1991). A survey of maintenance models for multi-unit systems. European Journal of Operational Research, 51(1), 1‑23. https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90141-H

Cimbéton. (2004). Structures et revêtements en béton (N° T59). Consulté à l'adresse https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-T59.pdf

Collette, C. (2007). Usure Ondulatoire en Transport Ferroviaire : M´ecanismes et R´eduction.

Conseil Général des Ponts et Chaussées. (2006). Démarche prospective transports 2050—Éléments de réflexion (N° 2006-0036‑01; p. 54). Consulté à l'adresse http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/pj/16000/16000.pdf

Cui, L. (2008). Maintenance Models and Optimization. In Handbook of Performability Engineering (p. 789‑805).

C.Vasconcelos, E. (2005). Thèse—Outils d'aide à la gestion du patrimoine reseau d'assainissement non visitable.pdf. Université Bordeaux I, Bordeaux.

Dantata, N. A., Touran, A., & Schneck, D. C. (2006). TRENDS IN U.S. RAIL TRANSIT PROJECT COST OVERRUN. 20.

De Arizon, J., Verlinden, O., & Dehombreux, P. (2007). Prediction of wheel wear in urban railway transport : Comparison of existing models. Vehicle System Dynamics, 45(9), 849‑866. https://doi.org/10.1080/00423110601149335

de Azevedo, C. (2009). Guide de gestion des actifs industriels : Si les machines parlaient... (Dunod).

De Bondt, W. F. M., & Makhija, A. K. (1988). Throwing good money after bad? : Nuclear power plant investment decisions and the relevance of sunk costs. Journal of Economic Behavior & Organization, 10(2), 173‑199. https://doi.org/10.1016/0167-2681(88)90044-3

de Jong, M., & Declercq, K. (2010). Report on socio-économic costs of infrastructure works [Rapport de recherche]. URBAN TRACK.

de Jong, M., & Declercq, K. (2012). Economic Evaluation of Urban Track Systems : Integration of Life Cycle Costs and Socio-Economic Assessment. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 48, 1264‑1273. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1102

de Montgolfier, J., & Natali, J.-M. (1987). Le Patrimoine du Futur : Approches pour une gestion patrimoniale des ressources naturelles. Economica.

Deloux, E. (2008). Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation conditinue soumis à un environnement stressant.

Donnadieu, G., Durant, D., Neel, D., Nunez, E., & Saint Paul, L. (2003). L'approche systémique : De quoi s'agit-il ?

Donnadieu, G., & Karsky, M. (2002). La systémique, penser et agir dans la complexité. Liaisons.

Ermine, J.-L., & Institut national des télécommunications (Evry). (2006). Cahier de recherche, systèmes d'information 2005. Evry: Institut national des télécommunications.

Faivre d'Arcier, B., Christory, J.-P., & Mignot, D. (1993). Approche patrimoniale et gestion de la voirie urbaine. Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00612889

Fauquert, G. (2005). Le renouvellement des infrastructures des services d'eau et d'assainissement : Pratique et problématique. Flux, n° 60-61(2), 83. https://doi.org/10.3917/flux.060.0083

Felea, I., & Csuzi, I. (2012). SYNTHESIS STUDY ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF AN URBAN TRANSPORT SYSTEM USING ELECTRICALLY DRIVEN TRAMS. (1), 10.

Flyvbjerg, B. (2007). Cost Overruns and Demand Shortfalls in Urban Rail and Other Infrastructure. Transportation Planning and Technology, 30(1), 9‑30. https://doi.org/10.1080/03081060701207938

Flyvbjerg, B., Holm, M. S., & Buhl, S. (2002). Underestimating Costs in Public Works Projects : Error or Lie? Journal of the American Planning Association, 68(3), 279‑295. https://doi.org/10.1080/01944360208976273

Flyvbjerg, B., Skamris holm, M. K., & Buhl, S. L. (2003). How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? Transport Reviews, 23(1), 71‑88. https://doi.org/10.1080/01441640309904

Flyvbjerg, B., & Stewart, A. (2012). Olympic Proportions : Cost and Cost Overrun at the Olympics 1960-2012. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.2238053

Foucault, J.-P. (2013). Cours BA01—Gestion de parc immobilier. Cours UTC présenté à Université de Technologie de Compiègne. Université de Technologie de Compiègne.

Foucault, J.-P., & Leclerc, G. (2003). Le tableau de bord MAESTRO pour la gestion des installations : Résultats du sondage 2000-2001 et guide de participation au sondage 2001-2002. [Montréal]: Pressess internationales Polytechnique.

France, & Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. (2011). Guide à l'intention des maîtres d'ouvrage publics pour la négociation des rémunérations de maîtrise d'oeuvre : Juin 1994 : loi MOP. Paris: Direction des journaux officiels.

Fund, M. (2016). Méthode pour l'évaluation des couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires : Approche par la modélisation fonctionnelle d'un objet technique urbain (Phdthesis, Université Paris-Est). Consulté à l'adresse https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01539549/document

Gardon, S. (2018). Quarante ans de Tramways : De la reconquête des villes françaises à la construction et la diffusion d'un modèle d'aménagement urbain. In Quarante ans de Tramways en France (Libel). Lyon.

Ghariani, N., Curt, C., & Tacnet, J.-M. (2014, avril). Analyse des dysfonctionnements des ouvrages de protection contre les crues torrentielles. Présenté à Fiabilité des matériaux et des structures, Aix-en-Provence.

Gilchrist, A., & Allouche, E. N. (2005). Quantification of social costs associated with construction projects : State-of-the-art review. Tunnelling and Underground Space Technology, 20(1), 89‑104. https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.04.003

Glade, M. (2005). Modélisation des coûts de cycle de vie : Prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité : Application à l'aéronautique. Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/2005ECDL0001

Gollier, C., Baumstark, L., Fery, P., Auverlot, D., & Raynard, C. (2011). Le calcul du risque dans les investissements publics (p. 236).

Gonzva, M. (2017). Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : Approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion (Phdthesis, Université Paris-Est). Consulté à l'adresse https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01619140/document

Grassie, S. L. (2009). Rail corrugation : Characteristics, causes, and treatments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 223(6), 581‑596. https://doi.org/10.1243/09544097JRRT264

GRESSIER, C. (2005). Analyse comparative des méthodes d'évaluation des grandes infrastructures de transport. Ministère des Transports de l'Équipement du Tourisme et de la Mer, (2005‑0353), 01.

Guesnerie, R. (2017). Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics. Direction Générale du Trésor, France Stratégie.

Hempelmann, K., & Knothe, K. (1996). An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation. Wear, 191(1), 161‑169. https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06747-7

Herz, R. (1996). Dégradation et renouvellement des infrastructures [Un modèle de survie par cohorte]. FLUX Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et Territoires, 12(23), 21‑36. https://doi.org/10.3406/flux.1996.1178

Hidalgo, A. P. (2015). Gestion patrimoniale des infrastructures de la ratp : Développement d'un processus d'aide à la décision pour optimiser la stratégie de maintenance. Université Paris-Est.

Huynh, T. K., Barros, A., Berenguer, C., & Castro, I. T. (2010). Value of condition monitoring information for maintenance decision-making. 2010 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 1‑6. https://doi.org/10.1109/RAMS.2010.5447963

Ibrahim, M. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains.

ICCA. (2007). Guide de comptabilisation et de présentation des immobilisations corporelles (p. 116). ICCA.

Jenks, C. W. (1998). RAIL CORRUGATION MITIGATION IN TRANSIT. 33.

Jiang, R. (2010). A simple approximation for the renewal function with an increasing failure rate. Reliability Engineering & System Safety, 95(9), 963‑969. https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.007

Kaffel, H. (2001). La maintenance distribuée : Concept, évaluation et mise en oeuvre. 178.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory : An Analysis of Decision under Risk. Econometrica, 47(2), 263‑291. https://doi.org/10.2307/1914185

Karimpour. (2017). Rail Degradation Modelling Using ARMAX : A Case Study Applied to Melbourne Tram System. Consulté à l'adresse http://www.waset.org/publications/10007902

Kopf, F., Maras, I., Gasser, F., Norkauer, A., Ritz, O., & Kruger, F. (2010). Proposal for European standard for track inspection and maintenance. URBAN TRACK.

Kruger, J., & Dunning, D. (1999). Unskilled and unaware of it : How difficulties in recognizing one's own incompetence lead to inflated self-assessments. Journal of Personality and Social Psychology, 77(6), 1121‑1134.

L. Smith, W. (1953). II.—Asymptotic Renewal Theorems. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section A. Mathematical and Physical Sciences, 64. https://doi.org/10.1017/S0080454100007305

Le Moigne, J.-L. (1994). La théorie du système général : Théorie de la modélisation. jeanlouis le moigne-ae mcx.

Le Tourneur, M. (2018). La (re)naissance du tramway ou l'ouverture de l'ingénierie des transports à la complexité urbaine. In Quarante ans de Tramways en France (Libel). Lyon.

Lebègue, D. (2005). Rapport Lebègue—Révision du taux d'actualisation des investissements publics (p. 112). Consulté à l'adresse Commissariat Général du Plan website: http://metroauxrigollots.fr/archives/pdf/SW54/Rapport_Lebegue_Revision_Taux_Actualisation_Investissements_Publics.pdf

Legros, D. (2009). Maîtrise des risques dans les systèmes de transport : Proposition d'une nouvelle approche de modélisation dynamique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Lesbats, M. (2012). Précis de gestion des risques : L'essentiel du cours, fiches-outils et exercices corrigés. Dunod.

Lesobre, R. (2015). Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants : Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels. Docteur de l'Université de Grenoble.

Leung, K. H. K., Zuo, M. J., & Whitfield, R. (2001). Reliability centered maintenance for light rail equipment. In Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics: Vol. 2. Recent Advances in Reliability and Quality Engineering. https://doi.org/10.1142/4346

Lovallo, D., & Kahneman, D. (2003). How Optimism Undermines Executives' Decisions. Harvard Business Review, 11.

Love, P. E. D., Ahiaga-Dagbui, D. D., & Irani, Z. (2016). Cost overruns in transportation infrastructure projects : Sowing the seeds for a probabilistic theory of causation. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 92, 184‑194. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.007

Love, P. E. D., Edwards, D. J., & Irani, Z. (2012). Moving Beyond Optimism Bias and Strategic Misrepresentation : An Explanation for Social Infrastructure Project Cost Overruns. IEEE Transactions on Engineering Management, 59(4), 560‑571. https://doi.org/10.1109/TEM.2011.2163628

Love, P. E. D., Edwards, D. J., Irani, Z., & Walker, D. H. T. (2009). Project Pathogens : The Anatomy of Omission Errors in Construction and Resource Engineering Project. IEEE Transactions on Engineering Management, 56(3), 425‑435. https://doi.org/10.1109/TEM.2008.927774

Love, P. E. D., Smith, J., Simpson, I., Regan, M., & Olatunji, O. (2015). Understanding the Landscape of Overruns in Transport Infrastructure Projects. Environment and Planning B: Planning and Design, 42(3), 490‑509. https://doi.org/10.1068/b130102p

Love, P. E. D., Zhou, J., Edwards, D. J., Irani, Z., & Sing, C.-P. (2017). Off the rails : The cost performance of infrastructure rail projects. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 99, 14‑29. https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.02.008

Mai, S. H. (2011). Etude de dégradation des voies ferrées urbaines.

MAINLINE. (2013). Maintenance, renewal and improvement of rail transport infrastructure to reduce economic and environmental impacts. Consulté à l'adresse http://www.mainline-project.eu/IMG/pdf/ml-d2.2-f-degradation_and_intervention_modelling_techniques.pdf

Martin Wachs. (1986). Technique vs. Advocacy in Forecasting : A Study of Rail Rapid Transit. Urban Resources, Vol. 4(No. 1), 23‑30.

Mazoyer, H. (2018). Le retour du tramway : Débats et controverses. In Quarante ans de Tramways en France (Libel).

MEEDM. (2010). Guide relatif à la prise en compte du cout global dans les marchés publics de maîtrise d'oeuvre et de travaux. Consulté à l'adresse Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi website: https://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/daj/marches_publics/oeap/gem/cout_global/cout_global.pdf

Métropole, O. (2018). Tram Ligne A : Nouvelle phase de travaux cet été. Consulté à l'adresse http://www.orleans-metropole.fr/351-7067/fiche/tram-ligne-a-nouvelle-phase-de-travaux-cet-ete.htm

Minati, G. (2003). Introduction à la systémique (E. Andreewsky, Trad.). Consulté à l'adresse http://www.afscet.asso.fr/

Miranda Sarmento, J., & Renneboog, L. (2017). Cost Overruns in Public Sector Investment Projects. Public Works Management & Policy, 22(2), 140‑164. https://doi.org/10.1177/1087724X16668357

Misra, K. B. (Éd.). (2008). Handbook of performability engineering. London: Springer.

Modieli Amadou, S., Palacios, M., Picard-Courtois, R., Tardif, I., Québec (Province), Ministère des affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire, & Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines. (2010). Guide pour l'évaluation des coûts socio-économiques des travaux de renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout guide destiné au milieu municipal québécois. Consulté à l'adresse http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2008021

Moridpour, S., & Hesami, R. (2015). Degradation and performance specification of Melbourne tram tracks. Transportation Information and Safety (ICTIS), 2015 International Conference on, 270–276. Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7232120/

Morin, E. (2006). Modélisation d'un réseau électrique de tramway : Du composant au système. 197.

Muller, G. (2007). Traction ferroviaire : Les tramways. 22.

Muller, G. (2011). Tramways—Avantages, contraintes et exploitation. In Techniques de l'ingénieur.

Muller, G. (2012). Alimentation, conception, performances et design. 21.

Nguyen, K. A. (2015). Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe.

Nicolai, R. P., & Dekker, R. (2008). Optimal Maintenance of Multi-component Systems : A Review. In Complex System Maintenance Handbook (p. 263‑286). https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_11

Oostermeijer, K. H. (2008). Review on short pitch rail corrugation studies. Wear, 265(9‑10), 1231‑1237. https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.037

Orléans : Les travaux du tram vont bon train. (2017). Mag'Centre. Consulté à l'adresse http://www.magcentre.fr/135301-orleans-les-travaux-du-tram-vont-bon-train/

Ormsby, C. (2009). A FRAMEWORK FOR ESTIMATING THE TOTAL COST OF BURIED MUNICIPAL INFRASTRUCTURE RENEWAL PROJECTS. 141.

Ouali, M.-S., Tadj, L., Yacout, S., & Ait-Kadi, D. (2011). A Survey of Replacement Models with Minimal Repair. In L. Tadj, M.-S. Ouali, S. Yacout, & D. Ait-Kadi (Éd.), Replacement Models with Minimal Repair (p. 3‑100). https://doi.org/10.1007/978-0-85729-215-5_1

Parsa, H., & Jin, M. (2013). An improved approximation for the renewal function and its integral with an application in two-echelon inventory management. International Journal of Production Economics, 146(1), 142‑152. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.06.016

Perry, N., & Bernard, A. (2003). Cost objective PLM and CE. In A. S.-G. Ricardo Jardim-Goncalves Jianzhong Chia (Éd.), Concurrent Engineering 2003 : The Vision for the Future Generation in Research and Applications (p. p.817-822). Consulté à l'adresse https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00540010

Peyras, L. (2003). Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages (Clermont-Ferrand 2). Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/2003CLF21407

Pickrell, D. H. (1990). Urban Rail Transit Projects : Forecast versus Actual Ridership and Cost. Consulté à l'adresse US Department of Transportation website: http://www.portlandfacts.com/transit/docs/Pickrell(txt).pdf

Quezada, J.-C. (2014). Mécanismes de tassement du ballast et sa variabilité.

Quinet, E. (2014). L'évaluation socioéconomique des investissements publics (N° halshs-01059484). Consulté à l'adresse HAL website: https://ideas.repec.org/p/hal/psewpa/halshs-01059484.html

Rausand, M., & Høyland, A. (2004). System reliability theory : Models, statistical methods, and applications (2nd ed). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.

Renaud, E., Bremond, B., & Le Gat, Y. (2011). La durée de vie des canalisations, une notion insuffisante pour conduire une politique de renouvellement. ASTEE : Les outils de la gouvernance locale des services d'eau et d'assainissement, 10 p. Consulté à l'adresse https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00779405

Restel, F., & Wolniewicz, L. (2017). Tramway Reliability and Safety Influencing Factors. Procedia Engineering, 187, 477‑482. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.403

Roelofsen, D. S., Cats, O., van Oort, N., & Hoogendoorn, S. P. (2018, juillet). Assessing disruption management strategies in rail-bound urban public transport from a passenger perspective. Présenté à CASPT 2018, Brisbane. Consulté à l'adresse https://nielsvanoort.weblog.tudelft.nl/files/2018/07/Assessing-disruption-management-strategies-in-rail-bound-urban-public-transport-from-a-passenger-perspective_CASPT_FullPaper.pdf

Sánchez-Silva, M., & Klutke, G.-A. (2016). Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20946-3

Sato, Y. (1995). Japanese Studies on Deterioration of Ballasted Track. Vehicle System Dynamics, 24(sup1), 197‑208. https://doi.org/10.1080/00423119508969625

Saulot, A. (2005). Analyse tribologique du contact roue—Rail—Modélisation et expérimentations—Cas de l'usure ondulatoire.

Serre, D. (2005). Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. Université de Marne la Vallée.

Siemiatycki, M. (2009). Comparing Perspectives on Transportation Project Cost Overruns. Journal of Planning Education and Research, 29(2), 142‑156. https://doi.org/10.1177/0739456X09348798

Siemiatycki, M. (2018). The making and impacts of a classic text in megaproject management : The case of cost overrun research. International Journal of Project Management, 36(2), 362‑371. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.07.003

Smolnik, M., Heinrich, M., Szybka, J., & Wi, G. (2013). A conception of the modernisation of the chosen tramcars maintenance system. 11.

Snowdon, J., & Eng, I. (s. d.). - Guidance Regulations (SpR)—(March 2004). 71.

Taillandier, F. (2009). La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier (Université de Savoie). Consulté à l'adresse http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00427702

Tassilly, E., & Vincent, N. (1991). A linear model for the corrugation of rails. Journal of Sound and Vibration, 150(1), 25‑45. https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90400-E

TCRP (Éd.). (2012). Track design handbook for light rail transit (Second edition). Washington, D.C: Transportation Research Board.

TRAMSTORE21. (2013). Construire les dépôts de tram durables et performants pour les villes du 21ème siècle.

Transit Cooperative Research Program, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2006). Center Truck Performance on Low-Floor Light Rail Vehicles. https://doi.org/10.17226/14000

Trollé, B. (2014). Simulation multi-échelles de la propagation des fissures de fatigue dans les rails.

VAUDOIS, J.-C. (2017). LE TRAMWAY A LA FRANCAISE Toute une histoire ! Lulu.com.

Veit, P. (2007). RTR Special—Maintenance & Renewal. Hamburg: Eurailpress.

Villemeur, A. (1988). Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité—Facteurs humains—Informatisation (Eyrolles).

Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European Journal of Operational Research, 139(3), 469‑489. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00197-7

Wang, H., & Pham, H. (2006). Reliability and optimal maintenance. London: Springer-Verlag.

Werey, C., Rozan, A., Wittner, C., Gat, Y. L., Gauffre, P. L., Nirsimloo, K., & Leclercq, C. (2012). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : De l'état des réseaux à la planification de leur réhabilitation – Outils, méthodes et perspectives. Sciences Eaux et Territoires, (9). Consulté à l'adresse http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00773686

Yousefikia, M., Moridpour, S., Setunge, S., & Mazloumi, E. (2014). Modeling Degradation of Tracks for Maintenance Planning on a Tram Line. Journal of Traffic and Logistics Engineering, 2(2), 86‑91. https://doi.org/10.12720/jtle.2.2.86-91

Zembri, P. (2012). La conception des transports collectifs en site propre (TCSP) en France : Des tracés problématiques ? Revue Géographique de l'Est, 52(vol. 52 / 1-2). Consulté à l'adresse http://journals.openedition.org/rge/3603

Zhang, C. (1994). La baisse des coûts des tunnels. Mesures, causes et conséquences. 237.

Zille, V. (2009). Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants. Université de Technologie de Troyes, Troyes.

Zwingelstein, G. (1996). La maintenance basée sur la fiabilité : Guide pratique d'application de la RCM. Paris: Hermès.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des deux types de rails à gorge les plus couramment utilisés en France (Muller, 2011) 10

Tableau 2 : Parc des tramways en France (Source : AFAC, MAJ du 16/06/2015) 19

Tableau 3 : Eléments de différenciation des tramways de la gamme Citadis d'Alstom 19

Tableau 4 : Les fonctions d'un dépôt de tramway (TRAMSTORE21, 2013) 35

Tableau 5 : Classification des désordres de revêtement par type de revêtement 41

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des principaux revêtements rencontrés sur les réseaux français (CERTU, 2009) 44

Tableau 7 : Troisième classification des usures ondulatoires (Grassie, 2009) 51

Tableau 8 : Taux d'usure constaté des rails par MTRC Hong Kong selon différents rayons de courbure en 1992 (TCRP, 2012) 52

Tableau 9 : Tableau récapitulatif de diverses expressions de la loi de tassement du ballast en fonction du nombre de cycles de chargement proposées dans la littérature scientifique (Quezada, 2014) 60

Tableau 10 : Seuils de maintenance utilisés pour l'exploitation des données de Melbourne 65

Tableau 11 : Liste des composants avec le plus grand nombre de défaillances pour les matériels roulants de type T4D (Felea & Csuzi, 2012) 68

Tableau 12 : Exemple de données préliminaires de maintenance (Smolnik, Heinrich, Szybka, & Wi, 2013) 69

Tableau 13 : Exemple de données préliminaires de maintenance (Leung, Zuo, & Whitfield, 2001) 70

Tableau 14 : Les principales lois paramétriques utilisées dans le domaine de la fiabilité 73

Tableau 15 : Principales utilisations des lois continues paramétriques (Zwingelstein, 1996) 74

Tableau 16 : Les différentes valeurs théoriques des différentes distributions statistiques des données de défaillance (Felea & Csuzi, 2012) 75

Tableau 17 : Deux conceptions du vieillissement : l'approche physique vs l'approche fiabiliste 77

Tableau 18 : les neuf niveaux de complexité d'un système (Le Moigne, 1994) 80

Tableau 19 : Exemple de Tableau d'Analyse Fonctionnelle 87

Tableau 20 : Exemple de liste d'événements redoutés utilisés pour un transport collectif 89

Tableau 21 : Exemple de liste des modes de défaillance (Zwingelstein, 1996) 90

Tableau 22 : Inventaire des éléments du milieu extérieur 96

Tableau 23 : Inventaire des fonctions de service 100
Tableau 24 : Inventaire des composants – granularité intermédiaire 103
Tableau 25 : Tableau d'identification des fonctions de conception. 104
Tableau 26 : Extrait du Tableau d'Analyse Fonctionnelle concernant le composant rail 105
Tableau 27 : Les principaux modes de défaillance de la voie ferrée de tramway 108
Tableau 28 : L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (extrait du composant « rail ») 109
Tableau 29 : Le patrimoine tramway en France 127
Tableau 30 : Longueur des réseaux routiers, ferrés, de distribution d'eau potable et de tramway 129
Tableau 31 : Influence des paramètres voie-véhicule sur le déraillement, l'usure des roues et des rails, les bruits et le confort de roulement (traduit par l'auteur de (Transit Cooperative Research Program, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2006)) 138
Tableau 32 : Les tâches de maintenance courante et leur fréquence 142
Tableau 33 : Les tâches de maintenance ponctuelle et leur fréquence 145
Tableau 34 : Facteurs de dégradation de la voie ferrée 147
Tableau 35 : Paramètres de structuration du patrimoine de voie ferrée utilisés dans le logiciel SIG 148
Tableau 36 : Correspondance entre les symptômes observés et l'indice d'état mécanique 154
Tableau 37 : Correspondance entre les symptômes observés et l'indice d'état d'usage 154
Tableau 38 : Correspondance entre l'indice d'état et les actions de maintenance corrective et préventive associées 155
Tableau 39 : Caractéristiques principales du rail 35G 162
Tableau 40 : Statistique des âges au renouvellement pour les courbes et les alignements 165
Tableau 41 : Statistique des âges au renouvellement par catégorie de voie 166
Tableau 42 : Caractéristiques principales des classes de faible et grand rayon de courbure 168
Tableau 43 : Caractéristiques principales des données d'âge au renouvellement par type d'exploitation 169
Tableau 44 : Domaine de validité des différentes approximations de la fonction de renouvellement M(t) 174
Tableau 45 : Décomposition des coûts d'investissements en 19 postes de dépense (CERTU, 1997) 185
Tableau 46 : Dérive moyenne des coûts des projets d'infrastructure (à prix constant) (Flyvbjerg et al., 2002) 188
Tableau 47 : Valeur du temps selon le motif du déplacement (DG Trésor, 2014) 196
Tableau 48 : Coûts et avantages des états courant et transitoire par type d'acteurs 201

Tableau 49 : Détermination des coefficients de pondération β (Quinet, 2014) 204
Tableau 50 : Valeur de l'heure par passager en milieu urbain, tout mode confondu (Source : (DG Trésor 2014)) 204
Tableau 51 : Valeurs tutélaires de la congestion routière (Quinet 1998) 205
Tableau 52 : Valeurs tutélaires des effets amont-aval (€$_{2010}$) 206
Tableau 53 : Valeurs tutélaire de la pollution atmosphérique (€$_{2010}$) 207
Tableau 54 : Coûts moyens et marginaux du bruit (€$_{2010}$) 207
Tableau 55 : Valeurs tutélaires proposées par (Ormsby, 2009) pour le canada, en $$_{2009}$ 209
Tableau 56 : Contraintes d'exploitation par type de travaux 210
Tableau 57 : Les coûts de maintenance courante 214
Tableau 58 : Les coûts de maintenance ponctuelle 214
Tableau 59 : Paramètres de simulation 215
Tableau 60 : Dimensionnement de la main-d'œuvre de chantier et des temps de travaux par phase 218
Tableau 61 : Coûts horaires de la main-d'œuvre de chantier 218
Tableau 62 : Comparaison des montants de travaux 219
Tableau 63 : Comparaison des scénarios avec ou sans maintien de l'exploitation et prise en compte des coûts annexes 220

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les sous-systèmes techniques du transport par mode tramway 8

Figure 2 : Schéma en coupe d'un profil de rail Vignole (CERTU & LROP, 2004) 9

Figure 3 : Schéma en coupe d'un profil de rail à gorge (CERTU & LROP, 2004) 10

Figure 4 : Comparaison des structures en pose voie continue et discontinue (Cimbéton, 2004) 11

Figure 5 : Structure type de voie ferrée non-ballastée (structure rigide) avec couche de forme normale (Source : ARTELIA Ville & Transport) 12

Figure 6 : Structure type de voie ferrée non-ballastée avec rail à gorge (CERTU & LROP, 2009) 13

Figure 7: Exemple de traverse béton bi-bloc STRAM 120 STRADAL 14

Figure 8 : Principe de pose sur selles (appuis discontinus) (CERTU & LROP, 2004) 14

Figure 9 : Exemple de pose sur selles avant scellement (Source : ARTELIA Ville & Transport) 15

Figure 10 : Exemple d'attache – Type Vossloh (à gauche) – Type Nabla (à droite) 15

Figure 11 : Branchement simple à gauche 16

Figure 12: Principe des taquets d'arrêts - position fermée - position ouverte 18

Figure 13: Boggie ARPEGE (Source : Alstom) 20

Figure 14 : Schéma électrique simplifié d'un tramway Citadis 302 (Morin, 2006) 21

Figure 15 : Un véhicule ré-enrailleur, Renault RVI (à gauche) ; un véhicule rail-route, Mercedes Unimog (à droite). 24

Figure 16 : Illustration d'un réseau électrique de tramway équipé d'une Ligne Aérienne de Contact (LAC) et d'une Alimentation par le Sol (Morin, 2006). 25

Figure 17: Support latéral d'une ligne aérienne de contact (Morin, 2006). 28

Figure 18: Circuit de voie à joints isolants, canton libre (Morin, 2006) 32

Figure 19: Circuit de voie à joints isolants, canton occupé (Morin, 2006) 32

Figure 20 : Configuration transversale des mobiliers sur un quai latéral classique (Source : ARTELIA Ville & Transport) 33

Figure 21 : Affaissement de pavés à Grenoble (Source : ARTELIA, 2019) 43

Figure 22 : Cas de désaffleurement provoqué par dilatation du revêtement (URBAN TRACK, 2010) (Tramway T1 – France – Crédit photo RATP) 44

Figure 23 : Cas de ressuage et de départs de matériaux en limite d'interface rail/enrobé (URBAN TRACK, 2010) 46

Figure 24 : Cas d'usure abrasive d'un rail à gorge (URBAN TRACK, 2010) (Crédit photo : STIB, Bruxelles) 48

Figure 25 : Cas de fissuration par fatigue en configuration dite « squat » vue de dessus et en coupe (Trollé, 2014) 48

Figure 26 : Paramètres géométriques caractéristiques de l'usure ondulatoire (Saulot, 2005) 48

Figure 27 : Usure ondulatoire du rail (Mai, 2011) 49

Figure 28 : Composantes générales du mécanisme de formation de l'usure ondulatoire (Collette, 2007) 50

Figure 29 : Les deux modes de torsion de l'essieu (Jenks, 1998) 52

Figure 30 : Temporalité de l'usure par fatigue et des actions gestionnaires, adapté de (Trollé, 2014) 53

Figure 31 : Head-checks (Mai, 2011) 54

Figure 32 : Squats (Mai, 2011) 54

Figure 33 : Comparaison des différentes approches disponibles pour modéliser le vieillissement 55

Figure 34: Evolution théorique de la qualité de roulement de la voie et interventions de maintenance (Veit, 2007) 61

Figure 35: Expérience pratique - mesure de l'évolution de la qualité du rail et modélisation (MAINLINE, 2013) 62

Figure 36: Revalorisation de l'index de qualité en fonction de la valeur de l'index au moment de l'opération de maintenance (Veit, 2007) 63

Figure 37 : Impact théorique d'une stratégie de maintenance préventive avec seuil d'intervention sur l'index de qualité (Veit, 2007) 63

Figure 38: Coût total annualisé d'une stratégie de maintenance en fonction du trafic supporté (Veit, 2007) 64

Figure 39: Effet de différentes politiques de maintenance sur le coût du cycle de vie (MAINLINE, 2013) 64

Figure 40: Fonctions de survie pour différentes portions du rail – Défaut de type « A » 66

Figure 41 : Comparaison du nombre de défaillances sur la période d'observation sur les systèmes les plus critiques 69

Figure 42 : Courbe de la baignoire (Carrese & Ottone, 2006) 74

Figure 43 : Aboutissement de la forme canonique OID : le système mémorise (Allaire, 2012) 81

Figure 44 : le principe de la boîte noire 82

Figure 45 : le paradigme systémique (Le Moigne, 1994) 83

Figure 46 : Les étapes de la modélisation systémique d'après (Donnadieu & Karsky, 2002) 84

Figure 47 : Exemple de BdF appliqué à un système de quatre composants (d'après (Zwingelstein, 1996) 86

Figure 48 : Démarche d'allocation en maîtrise des risques (Zwingelstein, 1996) 88

Figure 49 : Exemple d'arbre des causes possibles pouvant conduire à une situation de déraillement d'un matériel roulant (source : auteur) 92

Figure 50 : Schématisation d'une plateforme de voie ferrée (vue en coupe) 94

Figure 51 : Schématisation d'une plateforme de voie ferrée (vue plate) 94

Figure 52 : Matérialisation du besoin fondamental d'une infrastructure de transports urbains 95

Figure 53 : Démarche d'analyse fonctionnelle 97

Figure 54 : Diagramme « Pieuvre » de la voie ferrée de tramway 99

Figure 55 : Hiérarchisation par enjeu des fonctions de service 101

Figure 56 : Bloc-diagramme Fonctionnel des fonctions de conception liées à un contact 102

Figure 57 : Grille d'analyse AMDE 106

Figure 58 : Les activités de la fonction maintenance (Kaffel, 2001) 113

Figure 59 : Les différents types stratégiques de la maintenance 114

Figure 60: Les différents degrés de restauration d'un bien après une intervention de maintenance (Sánchez-Silva & Klutke, 2016) 118

Figure 61: Stratégie de remplacement basé sur l'âge et coûts (Rausant & Hoyland, 2004) 120

Figure 62 : Historique des travaux de remplacement des rails avec consolidations éventuelle de l'assise sur la ligne A et travaux prévisionnels 2018 - 2023 131

Figure 63 : Les modes de gestion principaux en France : le fonctionnement en Régie (à gauche, le cas de l'Île-de-France ; les autres régies en France sont détenus par les collectivités ; à droite, le mode de gestion favorisé pour les collectivités locales). 134

Figure 64 : Organigramme des principaux acteurs en lien avec la gestion des infrastructures 136

Figure 65 : Profil de rail usé avec usure latérale (W2) et verticale (W1) et déformation du champignon du rail (à gauche) ; Profil de rail nominal (à droite). 140

Figure 66 : Aperçu du module complémentaire sous Qgis (Source : ARTELIA) 146

Figure 67 : Aperçu du module complémentaire sous Qgis (Source : ARTELIA) 147

Figure 68 : Importance de l'inspection visuelle dans la programmation des interventions à court, moyen et long terme 149

Figure 69 : Mesure d'un profil de rail usé : usure latérale et vertical du champignon du rail et écoulement plastique sous le point P du contact rail-roue 152

Figure 70 : Principe d'évaluation de la méthode VSC 153

Figure 71 : Incomplétude et imprécision des données de durée de survie 160

Figure 72 : Type de défaillances au cours de la durée de vie d'une infrastructure (Herz, 1996) 162

Figure 73 : Historique des travaux de remplacement de rail sur la ligne A et travaux prévisionnels 2019 - 2023 165

Figure 74 : Histogramme de l'âge au renouvellement des tronçons de voie ferrée 166

Figure 75 : Influence du rayon de courbure sur la distribution des âges au renouvellement 168

Figure 76 : Comparaison des fonctions de survie des courbes de faible et grand rayon 169

Figure 77 : Influence du type d'exploitation sur la distribution des âges au renouvellement des courbes de faible et grand rayon 170

Figure 78 : Estimation paramétrique des lois de survie des courbes de faible et grand rayons 172

Figure 79 : Comparaison des différentes approximations de la fonction de renouvellement 175

Figure 80 : Application du modèle de durée de vie des voies en courbes sur les courbes du réseau de Grenoble 177

Figure 81 : De l'importance d'une prévision réaliste des coûts (Glade, 2005) 182

Figure 82 : L'engagement progressif des coûts d'un projet d'infrastructure (adapté de (Perry & Bernard, 2003)) 186

Figure 83 : Modèle conceptuel de compréhension de la dérive des coûts des grands projets ; traduit de (Ahiaga-Dagbui & Smith, 2014) 191

Figure 84 : Principe du taux d'actualisation 199

Figure 85 : Hiérarchie des coûts et des avantages d'une opération de renouvellement 202

Figure 86 : Schématisation des différents impacts locaux des travaux de renouvellement sur une plateforme de voie ferrée de tramway (de Jong & Declercq, 2010) 206

Figure 87 : Effet du bruit sur la productivité des travailleurs 208

Figure 88 : Hiérarchie des coûts et des avantages à l'état courant 213

Figure 89 : Comparaison des coûts de possession des courbes de faible et grand rayon sur 50 ans 216

Figure 90 : Evolution des coûts de possession des courbes de faible et grand rayon 217

Figure 91 : La théorie de Hertz (Mai, 2011) 246

Figure 92 : Répartition des zones de glissement et d'adhérence au niveau de la surface elliptique de contact entre la roue et le rail (la direction du roulement est suivant l'axe X) 247

Figure 93 : Glissement tournant (Mai, 2011) 247

Figure 94 : Comparaison entre différentes formulations de la loi phénoménologique qui lie les pseudo-glissements et les forces de frottement dans la direction latérale (Tassilly & Vincent, 1991) 248

Figure 95 : Définition des déformations de la roue et du rail 249

Figure 96 : Forces longitudinales et latérales dans le contact roue – rail (Collette, 2007) 252

Figure 97: Contact rail-roue (Collette, 2007) 254

Figure 98: Profil du rail en fonction du nombre de passage de roues (Hempelmann & Knothe, 1996) 256

ANNEXES

Exemple de modélisation dynamique du véhicule et de la voie et présentation des approximations linéaires issues du domaine fréquentiel

Etape 1 : le problème normal – modélisation du contact rail/roue

La modélisation du contact rail roue étudie les contraintes locales de la roue et du rail au voisinage de la surface de contact. Dans le cas du problème normal, il s'agit de calculer les déformations engendrées par l'application d'une charge verticale N et la distribution de la pression normale sur la surface de contact.

La théorie de Hertz (1882) est utilisée pour la résolution du problème normal. Elle considère une roue immobile en contact sur un rail sur laquelle est appliquée une force verticale N (charge normale). Dans l'hypothèse de corps indéformables, la surface de contact serait ponctuelle, or en réalité, si la charge appliquée est suffisamment importante, elle entraine des déformations : c'est le contact hertzien.

Hertz a déterminé analytiquement la forme de la zone de contact et le champ de pression régnant en son sein. La forme de la zone de contact est elliptique, dont les paramètres sont donnés par les formules suivantes :

$$a = m\left(\frac{3N(1-v^2)}{2E(A+B)}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{49}$$

$$b = n\left(\frac{3N(1-v^2)}{2E(A+B)}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{50}$$

où E et v sont respectivement les modules de Young et de Poisson et m, n, A et B des coefficients qui ne dépendent que des rayons de courbure principaux des deux surfaces en contact. Ainsi, la forme de l'ellipse ne dépend que de la position du point de contact de la roue sur le rail. La taille de l'ellipse dépend en revanche de la force normale N. Avec :

$$N = \frac{N_0}{\cos\gamma} \tag{51}$$

$$A = \frac{\cos\gamma}{2R} \tag{52}$$

$$B = \frac{1}{2R_w} + \frac{1}{2R_r} \tag{53}$$

Enfin, la répartition du champ de pression normale appliquée sur cette surface, est donnée par la formule suivante :

$$p_z(x,y) = \frac{3N}{2\pi ab}\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2-\left(\frac{y}{b}\right)^2} \tag{54}$$

où la force normale N, résultante, est donnée par :

$$\iint p_z dxdy \tag{55}$$

La théorie de Hertz n'est valable que si les trois conditions suivantes sont réunis (Johnson K.L. 1985 cité par (Saulot, 2005)) :

- les surfaces de contact sont du second degré, continu et non-conforme,
- chaque solide peut être considéré comme un demi-espace élastique,
- les dimensions du contact sont petites devant les dimensions et ratons de courbure des corps en contact.

Par conséquent, cette théorie ne peut s'utiliser que dans le cas d'une voie ferroviaire rectiligne. Pour les voies en courbe, la méthode des éléments finis ou l'algorithme CONTACT de Kalker permet de résoudre ce problème.

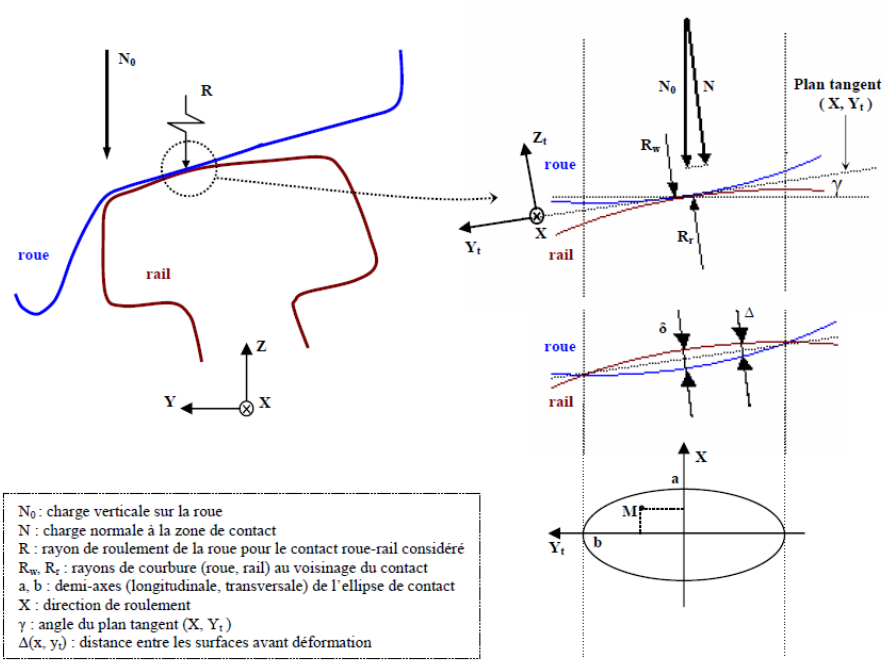


Figure 91 : La théorie de Hertz (Mai, 2011)

Etape 2 : le problème tangentiel – modélisation du contact rail/roue

Le problème tangentiel renvoi, dans le contexte d'un contact entre une roue et un rail, à l'étude des zones de glissement à l'intérieur de la surface de contact car il y a une combinaison entre le frottement et le roulement. Ce contexte rend la loi de Coulomb inadaptée puisqu'elle ne peut considérer que l'une ou l'autre situation.

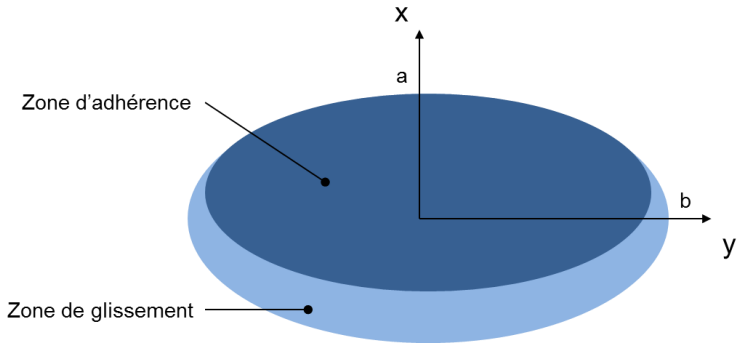


Figure 92 : Répartition des zones de glissement et d'adhérence au niveau de la surface elliptique de contact entre la roue et le rail (la direction du roulement est suivant l'axe X)

Pour résoudre ce problème, les logiciels de dynamique ferroviaire utilisent des algorithmes issus des travaux de Kalker. Il a développé 3 théories successives : la théorie simplifiée, la théorie linéaire et la théorie complète (algorithme CONTACT). La théorie simplifiée et son algorithme FASTSIM reste la plus utilisée malgré ses limitations à des zones rectilignes (car contact hertzien) et l'impossibilité d'étudier des contacts non-stationnaires. Afin d'étudier les efforts tangentiels, il faut d'abord définir les taux de glissement. Ceux-ci sont donnés par les formules suivantes, respectivement les glissements longitudinaux et latéraux :

$$\vec{\varepsilon}_x = \frac{\vec{e}_x . \Delta V}{V} = \frac{V - \omega r}{V} . \vec{e}_x \tag{56}$$

$$\vec{\varepsilon}_y = \frac{\vec{e}_y . \Delta V}{V} = \frac{V_{latéral}}{V} . \vec{e}_y \tag{57}$$

où ΔV est la différence de vitesse entre la roue et le rail, V est la vitesse linéaire de la roue, r est le rayon de roulement et ω est la rotation de la roue.

Un autre type de glissement appelé glissement tournant apparait également lorsque la zone de contact n'est pas parallèle à l'axe de rotation de la roue. Cette situation génère un pivotement de la roue défini par la relation ci-dessous :

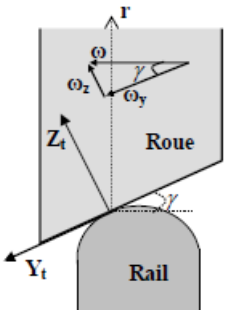


Figure 93 : Glissement tournant (Mai, 2011)

$$\vec{\phi} = \frac{\vec{n} . \Delta\omega}{V} = \frac{\omega_z}{V} . \vec{n} = \frac{\sin(\gamma)}{r} . \vec{n} \tag{58}$$

Ces formules exprimant les vitesses relatives ou de rotation relative par rapport aux vitesses linéaires selon les axes x et y ou angulaire selon l'axe z sont appelés les composantes du pseudo-glissement ou glissement rigide.

La relation entre les composantes de pseudo-glissement et les forces de frottement sont donnés par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{pmatrix} = -Gab \begin{pmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & \sqrt{ab}C_{23} \\ 0 & \sqrt{ab}C_{32} & abC_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \phi \end{pmatrix} \quad (59)$$

où F_x, F_y, M_z sont les forces et moment totaux exercés sur la roue, G est le module de cisaillement et C_{ij} sont les coefficients de Kalker. A mesure que les pseudo-glissements augmentent (jusqu'à une situation de glissement totale), la relation qui permet de les lier aux forces de frottement n'est plus linéaire.

Plusieurs hypothèses ont été proposées mais la loi exponentielle de type F=A(1-exp(-By)) est l'une des plus acceptables dans la littérature (Collette, 2007; Mai, 2011; Tassilly & Vincent, 1991).

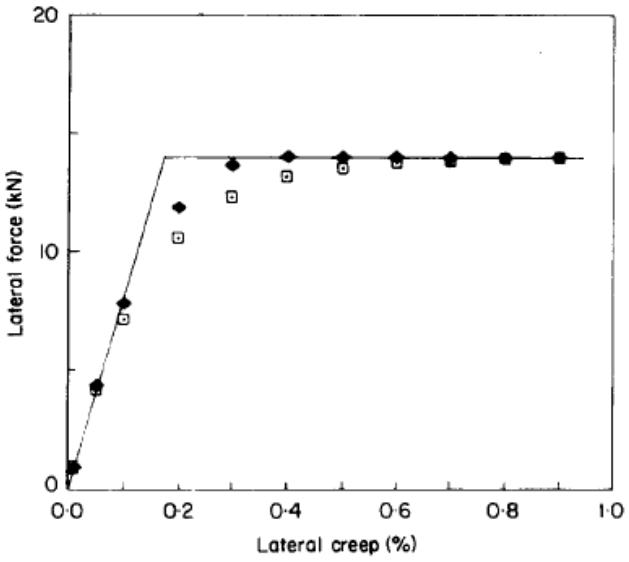
$$F_i = \mu N \left[1 - \exp\left(\frac{-C_0 \varepsilon_i}{\mu N^{\frac{1}{3}}} \right) \right] \quad (60)$$

où C_0 est une constante qui dépend des coefficients de Kalker, et $i = x, y$.

Elle a été établie de manière à vérifier les conditions limites suivantes :

$$\lim_{V_i \to \infty} F = \mu N \quad (61)$$

$$\frac{dF}{dV_i}(0) = C_0 N^{2/3} \quad (62)$$



($\mu = 0{\cdot}35$, $W = 40\,000$ N, $C = 8{\cdot}55$ N$^{1/3}$)——, linear; ◆, polynomial; ⊡, exponential

Figure 94 : Comparaison entre différentes formulations de la loi phénoménologique qui lie les pseudo-glissements et les forces de frottement dans la direction latérale (Tassilly & Vincent, 1991)

Etape 3 : Modélisation des déformations

L'étape 1 permet de déterminer la surface de contact entre la roue et le rail et d'en déduire le champ de pression normal en tout point de la surface (x,y) de contact.

L'étape 2 permet de définir les relations entre les composants du pseudo-glissement et celles des forces tangentielles, ces dernières elles-mêmes fonction de la force normale.

Rappelons que l'application d'une charge suffisamment importante génère des déformations. A l'étape 1, c'est ce phénomène qui permet de justifier selon Hertz la forme elliptique de la surface de contact entre la roue et le rail, puis de définir le champ de pression normal (z) opérant en tout point de coordonnées (x,y). Or, la loi exponentielle définie à l'étape 2 représente seulement la résultante des forces de frottement mais ne fournit aucune information sur la répartition des composantes (x,y) des forces de frottement opérant en tout point de coordonnées (x,y).

Pour ce faire, les modèles d'usure ondulatoire définissent d'abord le champ local de déformation. On note $\vec{u}$ le vecteur des déplacements élastiques relatifs des particules. Ainsi, les coordonnées d'un point de la surface de contact est la somme d'une composante rigide (pseudo-glissement) et d'une composante résultant de la déformation $\vec{u}$ du matériau.

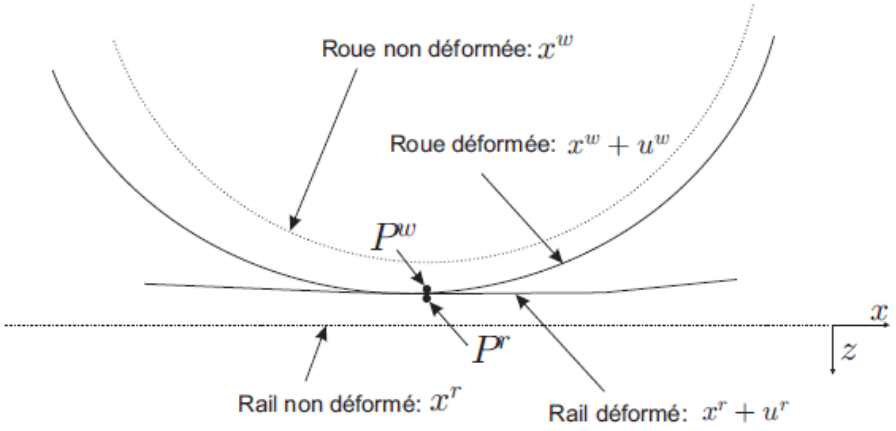


Figure 95 : Définition des déformations de la roue et du rail

Les coordonnées d'une particule P^w de la roue et d'une particule P^r du rail sont égales lorsqu'ils sont en contact. Dès lors on obtient pour coordonnées :

$$x^w(t) + u^w(x^w, t) = x^r(t) + u^r(x^r, t) \tag{63}$$

lesquelles permettent d'écrire les équations des vitesses des particules P^w et P^r :

$$\begin{cases} v^w = \dot{x}^w(t) + \dot{u}^w(x^w, t) = \dot{x}^w(t) + \dfrac{\partial u^w}{\partial x^w}\dot{x}^w + \dfrac{\partial u^w}{\partial t} \\ v^r = \dot{x}^r(t) + \dot{u}^r(x^r, t) = \dot{x}^r(t) + \dfrac{\partial u^r}{\partial x^r}\dot{x}^r + \dfrac{\partial u^r}{\partial t} \end{cases} \tag{64}$$

A partir de ces équations, on définit le glissement réel entre les deux surfaces (c'-à-d. la roue et le rail), soit :

$$s = v^w - v^r \tag{65}$$

Laquelle permet d'écrire en supposant que les champs de déformation sont faibles (Collette, 2007) :

$$s = \dot{x}^w - \dot{x}^r + \left(\frac{\partial u^w}{\partial x} - \frac{\partial u^r}{\partial x}\right)\dot{x} + \frac{\partial u^w}{\partial t} - \frac{\partial u^r}{\partial t} \tag{66}$$

Le premier terme est la différence des vitesses des deux corps considérés comme rigides, le deuxième est la variation du champ des déformations à l'intérieur de la surface de contact et le troisième représente la variation de ces déformations au cours du temps.

Le glissement réel s, peut aussi s'écrire sous forme vectorielle par un vecteur de glissement $\vec{S}$. En considérant une évolution de la surface de contact dans la direction longitudinal, on peut écrire :

$$\vec{S} = V\left(\vec{\varepsilon} - \frac{\partial}{\partial x}\vec{u}\right) + \frac{\delta}{\delta t}\vec{u} \tag{67}$$

où $\vec{\varepsilon}$ représente le glissement rigide défini par le torseur $\begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 \\ \varepsilon_y & 0 \\ 0 & \phi \end{pmatrix}$

Puisque le mouvement reste dans le plan (x,y) (la composante normale de déplacement est donc nulle), on peut écrire :

$$\begin{cases} S_x = V\left(\varepsilon_x - \phi y - \dfrac{\delta u_x}{\delta x}\right) + \dfrac{\delta u_x}{\delta t} \\ S_y = V\left(\varepsilon_y + \phi x - \dfrac{\delta u_x}{\delta x}\right) + \dfrac{\delta u_y}{\delta t} \end{cases} \tag{68}$$

En considérant que les aciers des roues ou des rails partagent les mêmes caractéristiques élastiques, il est possible d'obtenir les relations entre les déplacements $\vec{u}$ et les contraintes tangentielles en utilisant la théorie de l'élasticité. Toutefois, la résolution du système est fastidieuse (Mai, 2011). Les modélisations les plus courantes s'appuyant sur la théorie simplifiée de Kalker ont recours à une loi plus simple afin d'établir la répartition des contraintes tangentielles. Dans sa théorie, Kaler propose une relation linéaire entre les déplacements et les contraintes dont le coefficient L est un paramètre scalaire appelé flexibilité.

Soit :

$$\begin{cases} u_x = Lp_x \\ u_y = Lp_y \end{cases} \tag{69}$$

Ce qui permet d'écrire en considérant un roulement stationnaire (la dérivée temporelle est alors négligée) :

$$\begin{cases} \frac{S_x}{L} = \frac{\varepsilon_x}{L} - \frac{\phi}{L} y - \frac{\delta p_x}{\delta x} \\ \frac{S_y}{L} = \frac{\varepsilon_y}{L} + \frac{\phi}{L} x - \frac{\delta p_y}{\delta x} \end{cases} \quad (70)$$

où L s'expriment en fonction de la forme des corps en contact, du module de Young et des coefficient de Kalker.

On obtient après résolution des équations différentielles :

$$\begin{cases} \quad = \frac{1}{L}(\varepsilon_x - \phi y)(x - \bar{a}) \\ p_y = \frac{\varepsilon_y}{L}(x - \bar{a}) + \frac{\phi}{2L}(x^2 - \bar{a}^2) \end{cases} \quad (71)$$

où

$$\bar{a} = a\sqrt{1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (72)$$

Conformément à la loi de Coulomb, dès que les contraintes tangentielles $p_x$et p_y ne vérifient plus l'inégalité$\sqrt{{p_x}^2 + {p_y}^2} < \mu|p_z|$, on se trouve dans une zone de glissement. Les contraintes sont alors données par les formules suivantes issues de la loi de Coulomb :

$$\begin{cases} p_x = -\mu p_z \frac{S_x}{|(S_x, S_y)|} \\ p_y = -\mu p_z \frac{S_y}{|(S_x, S_y)|} \end{cases} \quad (73)$$

Etape 4 : Modélisation de la dynamique du véhicule et de la voie

Les étapes précédentes ont permis de modéliser la géométrie du contact rail roue et d'établir les relations entre les déformations et les contraintes normales et tangentielles. L'objectif de cette étape est de présenter les équations dynamiques régissant les déplacements de la roue et du rail, c'est-à-dire de modéliser les effets de petites variations de variable.

La dynamique du véhicule et de la voie est pris en compte à travers les réceptances (rapport entre le déplacement et la force appliquée) de la voie et du bogie. Ces receptances sont mesurées en fixant des accéléromètres sur la surface du rail qui enregistrent les mouvements résultants d'une excitation à l'aide d'un marteau instrumenté.

D'une manière générale, un déplacement vertical du rail résulte soit de l'application d'une force verticale, soit d'une force latérale, par l'intermédiaire du couplage des deux directions imposé par la forme des profils.

$$\Delta u_z^r = -R_{zz}^r \Delta N - R_{zy}^r \Delta F_y \tag{74}$$

où Δu_z^r est le déplacement vertical du rail, R_{zz}^r est la réceptance directe du rail et R_{zy}^r la réceptance couplée entre les directions verticales et latérale. Réciproquement, un déplacement latéral du rail est engendré soit par une force latérale, soit par une force verticale pour les mêmes raisons de couplage :

$$\Delta u_y^r = -R_{yz}^r \Delta N - R_{yy}^r \Delta F_y \tag{75}$$

En revanche, il n'y a pas de couplage entre la direction x et les autres directions car on néglige le rayon de courbure du rail dans la direction longitudinale.

$$\Delta u_x^r = -R_{xx}^r \Delta F_x \tag{76}$$

De même pour la rotation :

$$\Delta u_\emptyset^r = -R_{\emptyset\emptyset}^r \Delta M \tag{77}$$

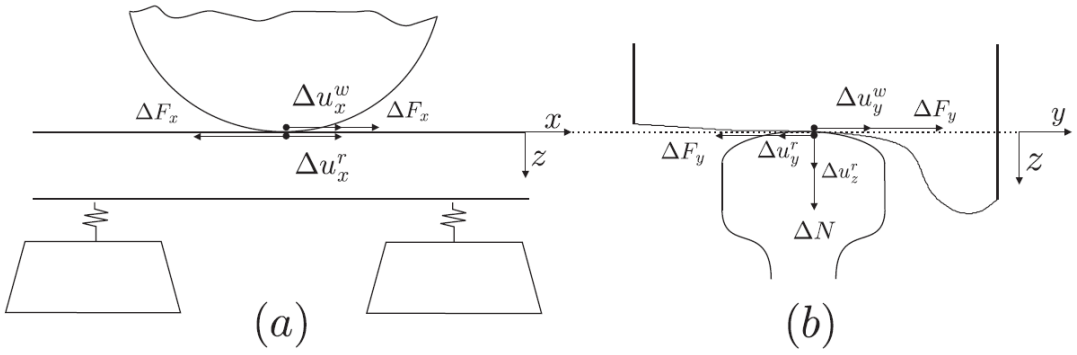


Figure 96 : Forces longitudinales et latérales dans le contact roue – rail (Collette, 2007)

En procédant de façon identique pour la bogie, nous pouvons écrire les équations cinématiques du système voie-véhicule suivantes :

$$\begin{cases} \Delta\mu_z^r = -R_{zz}^r \Delta N - R_{zy}^r \Delta F_y \\ \Delta\mu_y^r = -R_{yz}^r \Delta N - R_{yy}^r \Delta F_y \\ \Delta\mu_x^r = -R_{xx}^r \Delta F_x \\ \Delta\mu_\emptyset^r = -R_{\emptyset\emptyset}^r \Delta M \end{cases} \Bigg| \begin{cases} \Delta\mu_z^w = R_{zz}^w \Delta N + R_{zy}^w \Delta F_y \\ \Delta\mu_y^w = R_{yz}^w \Delta N + R_{yy}^w \Delta F_y \\ \Delta\mu_x^w = R_{xx}^w \Delta F_x \\ \Delta\mu_\emptyset^w = R_{\emptyset\emptyset}^w \Delta M \end{cases} \tag{78}$$

On définit ensuite les variations relatives de la roue par rapport au rail dans les directions longitudinales, latérale, verticale et de spin telles que :

$$\left(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_{z,} \Delta u_\emptyset\right) = \left(\Delta u_x^w - \Delta u_x^r, \Delta u_y^w - \Delta u_y^r, \Delta u_z^w - \Delta u_z^r, \Delta u_\emptyset^w - \Delta u_\emptyset^r\right) \tag{79}$$

et les réceptance couplées du véhicule et de la voie telles que :

$$\begin{cases} R_{xx} = R_{xx}^{w} + R_{xx}^{r} \\ R_{yy} = R_{yy}^{w} + R_{yy}^{r} \\ R_{zz} = R_{zz}^{w} + R_{zz}^{r} \\ R_{zy} = R_{zy}^{w} + R_{zy}^{r} \\ R_{yz} = R_{yz}^{w} + R_{yz}^{r} \\ R_{\emptyset\emptyset} = R_{\emptyset\emptyset}^{w} + R_{\emptyset\emptyset}^{r} \end{cases} \quad (80)$$

Soit, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \\ \Delta u_{\emptyset} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{yy} & R_{yz} & 0 \\ 0 & R_{zy} & R_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{\emptyset\emptyset} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \\ \Delta N \\ \Delta M \end{bmatrix} \quad (81)$$

Etape 5 : Approximation linéaire – domaine fréquentiel

Pour rappel : dans ce qui suit, le Δ correspond à une petite variation de la variable.

Théorie de Hertz

Par linéarisation, la théorie de Hertz peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Delta N = k_c . \Delta d \quad (82)$$

Avec :

- Δd est l'écrasement au centre de l'ellipse de contact résultant de la force ΔN,
- k_c est la raideur de contact de Hertz. Dans la plupart des applications de ce modèle, on considère $k_c = 1.2 \times 10^9 N/m$

Géométrie du contact rail-roue

Lors du passage de la roue, l'irrégularité de la surface du rail Δz crée un écrasement élastique local des deux corps Δd ainsi qu'un déplacement relatif de la roue par rapport au rail.

$$\Delta z = \Delta d + \Delta u_z \quad (83)$$

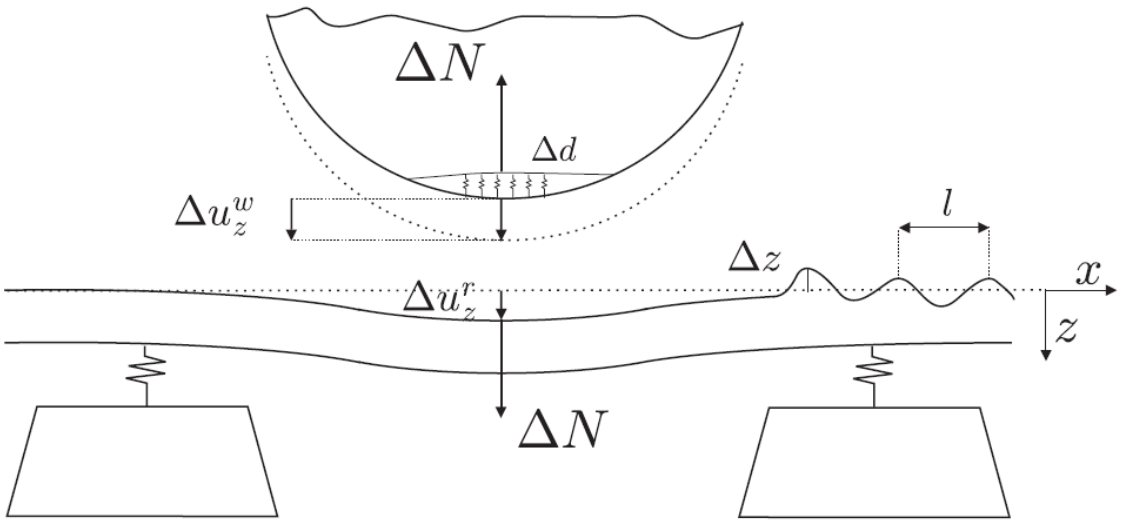


Figure 97: Contact rail-roue (Collette, 2007)

Loi de frottement

Enfin de manière similaire, la loi de frottement peut également être linéarisée. Les petites variations ΔF_i de la force de frottement peuvent s'exprimer en différenciant l'équation suivante :

$$F_i = \mu N \left[1 - \exp\left(\frac{-C_0 \varepsilon_i}{\mu N^{\frac{1}{3}}}\right)\right] \tag{84}$$

$$\Delta F_i = \frac{\partial F_i}{\partial N}\Delta N + \frac{\partial F_i}{\partial \varepsilon_i}\Delta\varepsilon_i = \alpha_i \Delta N + \beta_i \Delta\varepsilon_i \tag{85}$$

Taux de glissement

En supposant que $\Delta u(x,t) = \Delta U(x) e^{i\omega t}$, les taux de glissement $\Delta\varepsilon_x$ et $\Delta\varepsilon_y$ peuvent se définir par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon_x = \dfrac{\Delta\dot{u}_x^w - \Delta\dot{u}_x^r}{V} = i\omega\dfrac{\Delta u_x^w - \Delta u_x^r}{V} = i\omega\dfrac{\Delta u_x}{V} \\ \Delta\varepsilon_y = \dfrac{\Delta\dot{u}_y^w - \Delta\dot{u}_y^r}{V} = i\omega\dfrac{\Delta u_x^w - \Delta u_x^r}{V} = i\omega\dfrac{\Delta u_y}{V} \end{cases} \tag{86}$$

Synthèse du système d'équation de la dynamique ferroviaire

Les équations de la dynamique ferroviaire utilisée dans le domaine fréquentielle peuvent se résumer sous l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_c & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{zz} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & R_{xx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{i\omega}{V} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_x & 0 & 0 & \beta_x & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{yz} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & R_{yy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{i\omega}{V} & -1 & 0 \\ 0 & \alpha_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_y & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d \\ \Delta N \\ \Delta u_z \\ \Delta u_x \\ \Delta \varepsilon_x \\ \Delta F_x \\ \Delta u_y \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta z \qquad (87)$$

La résolution de l'équation matricielle permet alors de calculer$\Delta\varepsilon_x, \Delta\varepsilon_y$, $\Delta F_x, \Delta F_y$.

Etape 6 : Taux d'usure ondulatoire

La matière usée sur la surface du rail après le n^{ième} passage de train est proportionnelle à l'énergie de glissement :

$$\frac{\partial(\Delta_z)}{\partial_n} = -\frac{k_0}{2\rho bV}\Delta P = G(f).\Delta_z \qquad (88)$$

Avec

$$\Delta P = V(F_x\Delta\varepsilon_x + \varepsilon_x\Delta F_x + F_y\Delta\varepsilon_y + \varepsilon_y\Delta F_y) \qquad (89)$$

Le paramètre G(f) est appelé « taux d'usure ondulatoire ». Il permet de prédire la fréquence la plus favorable à la création de l'usure ondulatoire sur la surface du rail. En modélisant la rugosité de la surface du rail par une fonction périodique, puis en utilisant la décomposition de Fourrier (Mai, 2011), il est possible de visualiser l'évolution du profil du rail et l'amplitude de l'usure ondulatoire. Le schéma ci-dessous montre un exemple de sortie du modèle : l'évolution de la rugosité initiale du rail en fonction du nombre de passages de véhicule. La rugosité de la surface du rail entre deux traverses (0,60m) prend une allure sinusoïdale à mesure des passages.

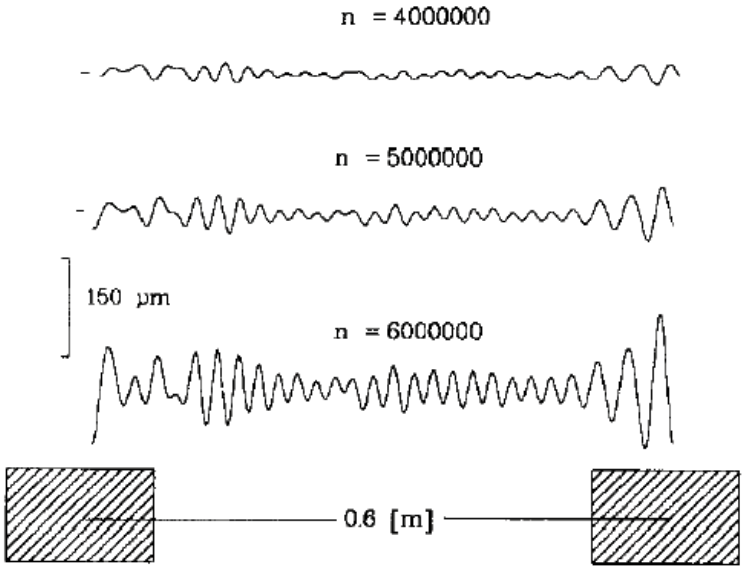
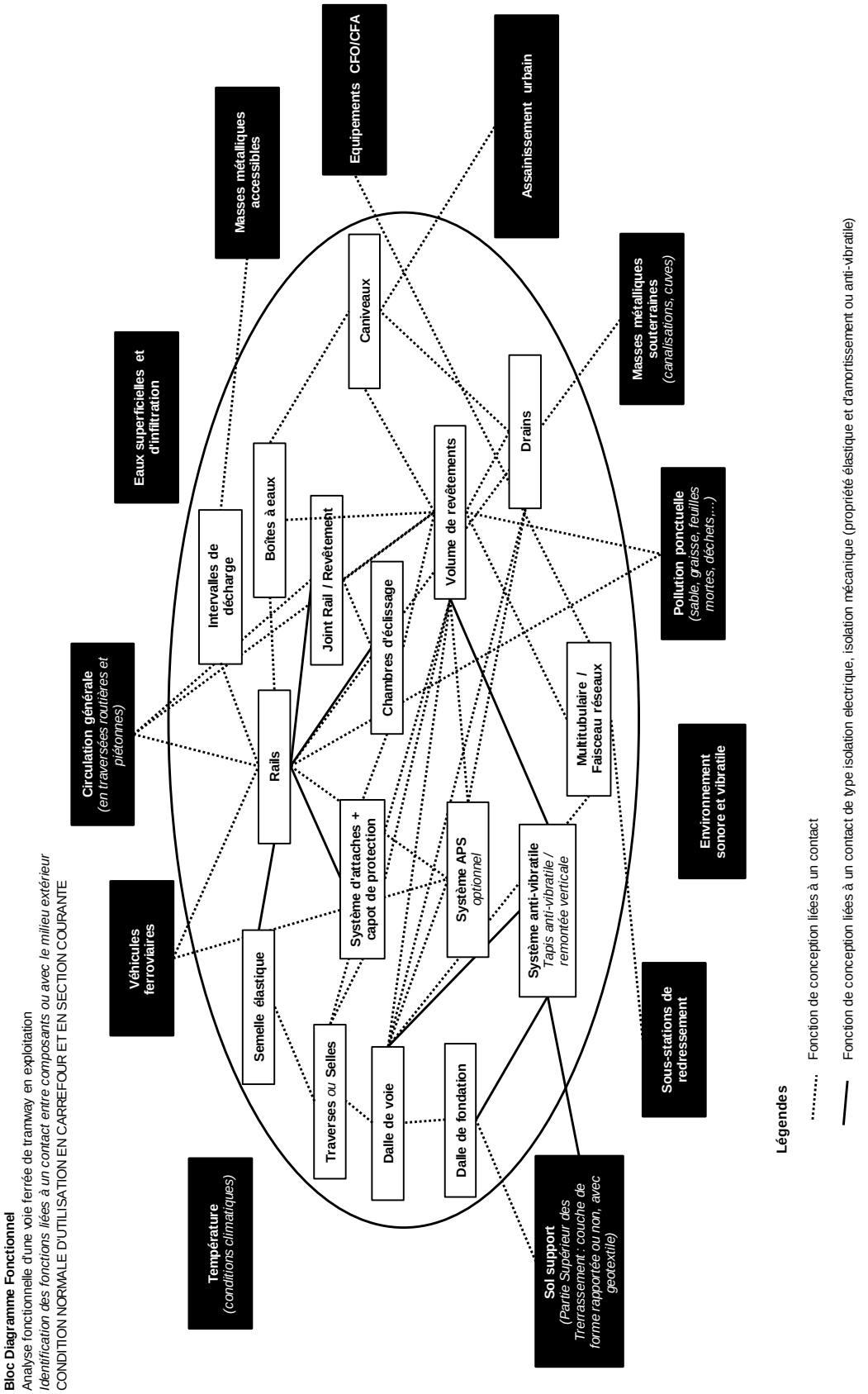
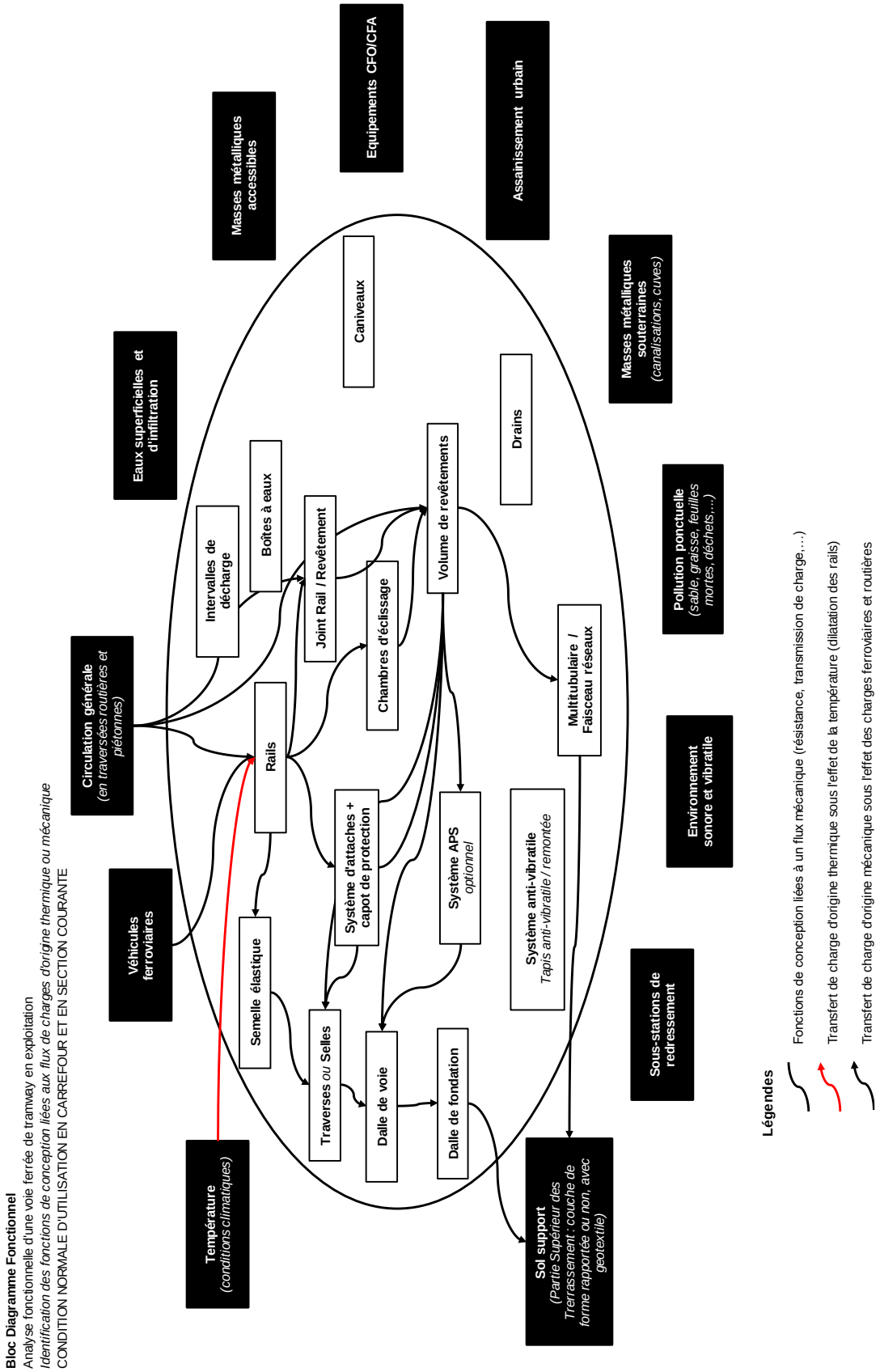


Figure 98: Profil du rail en fonction du nombre de passage de roues (Hempelmann & Knothe, 1996)

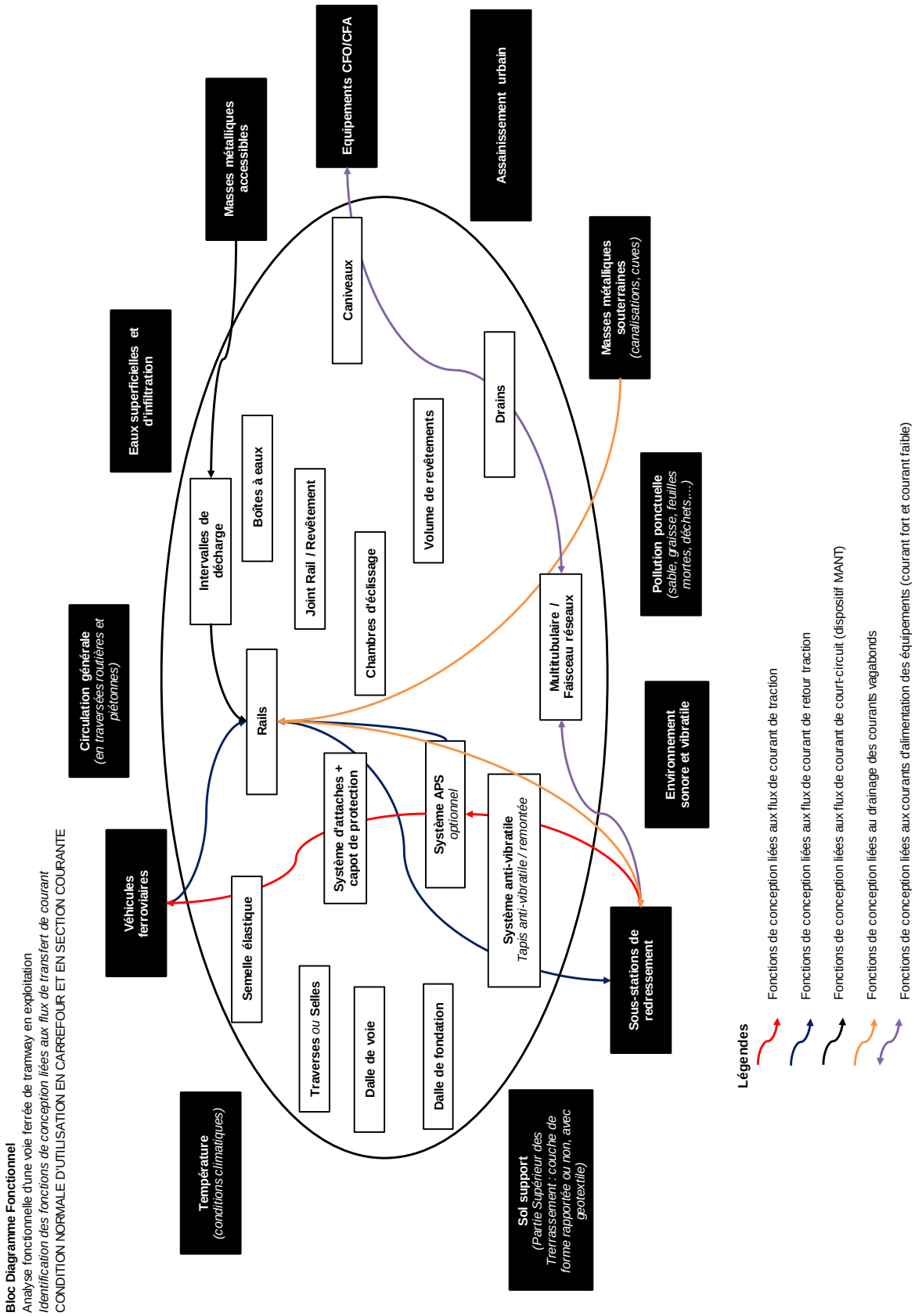
Bloc-diagramme Fonctionnel des fonctions de conception liées à un contact



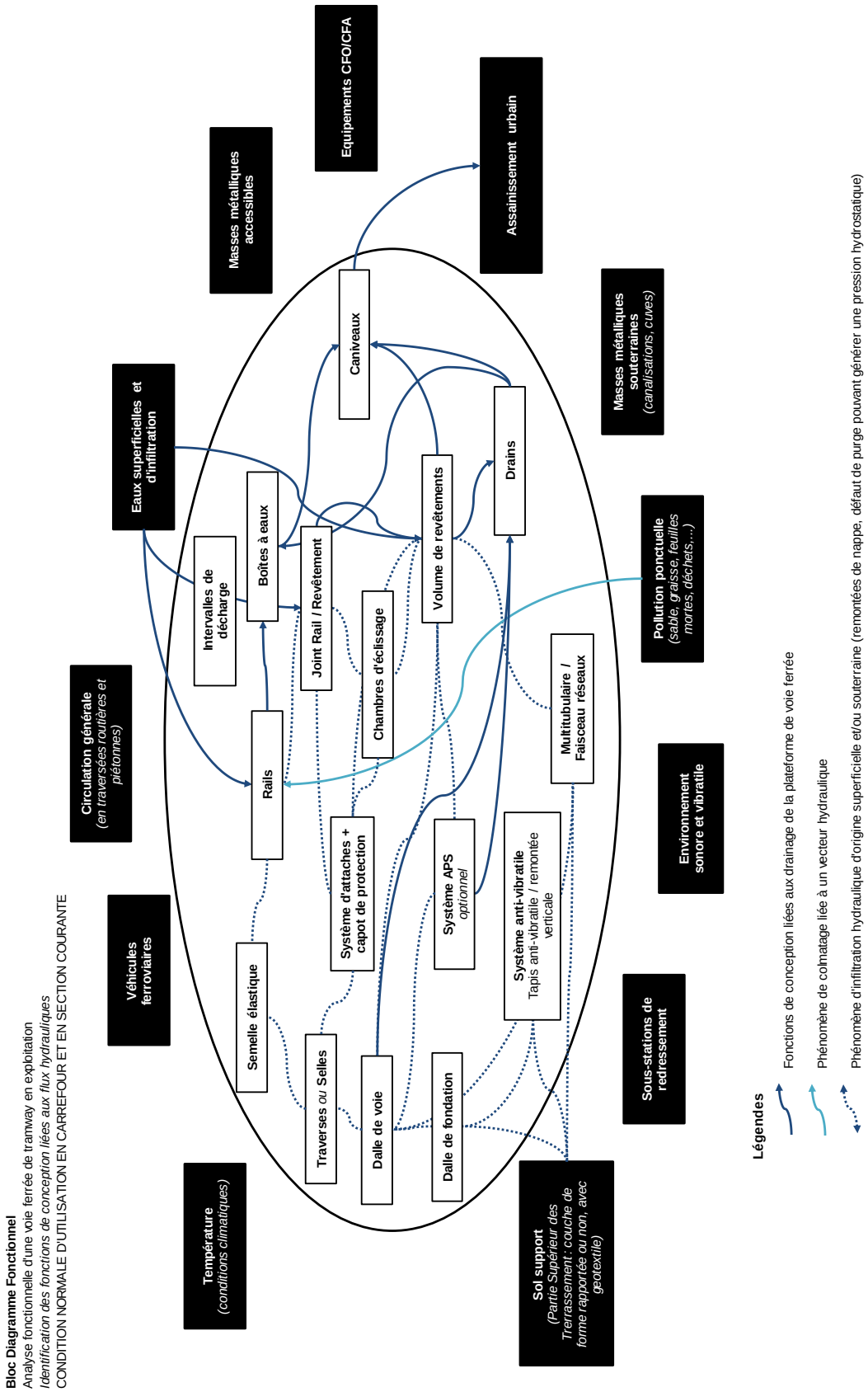
Bloc-diagramme Fonctionnel des fonctions de conception liées aux flux de charges



Bloc-diagramme Fonctionnel des fonctions de conception liées aux flux de transfert de courant



Bloc-diagramme Fonctionnel des fonctions de conception liées aux flux hydrauliques



L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « rail »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Effets possibles de la défaillance		
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Rail	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Usure abrasive - Usure ondulatoire - Fatigue du contact roulant	**Défaut de fabrication :** - Défaut du rail (entailles, rayures, fissures internes) **Défaut de mise en œuvre :** - Libération des rails en LRS, mauvaise réalisation des soudures **Défaut de maintenance :** - Intervention de meulage trop fréquente ou mal maîtrisée	**Dispositif matériel :** - Dispositif de lubrification en voie ou sur bogie	**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire (charge, vitesse, trafic, géométrie) - Profil de roue	- Risque de déraillement - Risque de bruits et vibrations - Risque de perturbation des circulations ferroviaires	Usure latérale et verticale Usure sous la forme d'ondulations dans la direction de roulement Fissuration du rail Rupture des rails
	Drainage	Point bas (hydraulique) Ecoulement réduit		**Défaut de mise en œuvre :** - Pente			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
			Etat du composant : Dépôt de pollution en fond de gorge des rails (feuilles d'arbre, déchets, graisses, etc.)	**Défaut de mise en œuvre :** - Réalisation des lumières de rail **Défaut de maintenance :** - Nettoyage des fonds de gorge du rail		**Dépôt de pollution :** - sablage, graissage trop important - feuilles d'arbres - pollution riveraine,...	- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité Traces de corrosion
		Défaut de raccordement		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Energie	Circuit ouvert (électrique)	**Etat du composant** Rupture des rails	**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement (liaison équipotentielle)			- Risque de perturbation des circulations ferroviaires - Risque électrique	Rupture de rail Dysfonctionnement électrique du retour traction
		Faux contact (électrique)	**Etat du composant :** Dépôt de pollution sur les rails (feuilles d'arbre, déchets, graisses, etc.)			**Dépôt de pollution :** - sablage, graissage trop important - feuilles d'arbres - pollution riveraine,...	- Risque de perturbation des circulations ferroviaires	Dysfonctionnement électrique du matériel roulant
		Fuite (électrique)	**Contact :** Défaut d'isolement des rails (chambre d'éclissage, semelle sous rail)	**Défaut de fabrication :** - Conductance des rails **Défaut de mise en œuvre :** - Absence de liaison équipotentielle		**Milieu :** - Humidité - Résistance rail/sol	- Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Variation de tension rail/sol Courants vagabonds

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « semelle élastique »)

Causes possibles de défaillance						Effets possibles de la défaillance		
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Semelle élastique	Interface	Défaut d'interface	**Etat du composant :** - Défitement de la semelle	**Défaut de mise en œuvre :** - Adhérence du collage - Absence de semelle			- Risque de fuite de courants vagabonds - Risque de bruits et vibrations - Risque d'usure des rails et des composants supports (traverses, attaches, éclisses, etc.)	Détérioration des interfaces pouvant engendrer : - des défauts bcaux d'isolement électrique - des défauts bcaux d'amortissement
	Isolation électrique	Défaut d'isolement (électrique)	**Etat du composant :** - Défaut d'interface			**Milieu humide :** - Infiltrations d'eau - Eaux stagnantes (interstice rail - semelle)	- Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Courants vagabonds
	Isolation vibratoire	Défaut d'isolement (vibratoire)	**Etat du composant :** - Vieillissement du matériau (altération des propriétés élastiques ou élasto-plastiques) - Défaut d'interface				- Risque de gênes des usagers et des riverains	Bruits et vibrations
	Isolation mécanique	N'absorbe pas les mouvements différentiels	**Etat du composant :** - Vieillissement du matériau (altération des propriétés élastiques ou élasto-plastiques) - Défaut d'interface				- Risque de modification des contraintes dynamiques dans le corps de plateforme : -- Risque de bruits et vibrations -- Risque de propagation rapide de dégradations (usure ondulatoire, usure anormale des traverses, etc.)	Apparition de dégradations des composants de la voie Bruits et vibrations

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « système d'attaches »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Milieu environnant	Effets possibles de la défaillance	
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*		**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Système d'attaches	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Fatigue des attaches - Corrosion des attaches **Contact :** - Fissuration, déformation du volume de revêtement au droit des attaches - Fissuration, déformation des ancrages et des supports	**Défaut de conception :** - Faible épaisseur de revêtement au droit des attaches en zone de circulation routière - Dimensionnement des attaches élastiques **Défaut de fabrication :** - Entaille, rayures, fissures des attaches **Défaut de mise en oeuvre :** - Serrage des attaches - Ancrage des attaches		**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire - Trafic routier **Milieu humide :** - Infiltrations d'eau - Défaillance du drainage de la plateforme	- Risque de déformation de la voie - Risque de perturbation des circulations ferroviaires (diminution de la vitesse d'exploitation)	Rupture des attaches
	Isolation électrique	Défaut d'isolement (électrique)		**Défaut de fabrication :** - Résistivité du matériau (butée isolante) **Défaut de mise en œuvre :** - Interface butée isolante - semelle - chambre d'éclissage		**Milieu humide :** - Infiltrations d'eau - Défaillance du drainage de la plateforme	- Risque de courants vagabonds - Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Variation de tension rail/sol Courants vagabonds
	Isolation mécanique	N'absorbe pas les mouvements différentiels	**Etat du composant :** - Rupture des attaches	**Défaut de mise en œuvre :** - Absence ou défaut du capot de protection			- Risque de bruits et vibrations - Risque d'usure des rails et des composants supports	Dégradation du revêtement au droit des attaches : fissurations Déformation de la voie au passage du véhicule ferroviaire Bruits et vibrations
	Etanchéité	Infiltration (hydraulique)	**Etat du composant :** - Fissuration ou rupture du capot de protection	**Défaut de conception :** - Faible épaisseur de revêtement au droit du capot de protection en zone de circulation routière **Défaut de fabrication :** - Fissuration du capot de protection **Défaut de mise en œuvre :** - Mauvais assemblage		**Milieu humide :** - Infiltration d'eau par les interfaces (interstice rail joint chambre d'éclissage) - Mauvais drainage de la plateforme	-Risque de modification des contraintes dynamiques dans le corps de plateforme : -- risque de propagation des dégradations vers les autres composants du système (usure des rails, traverses, revêtement, ...) -- risque de déformation de la voie (géométrie des rails) -- risque de bruits et vibrations	Les infiltrations d'eau peuvent conduire à : - la corrosion des attaches - la rupture

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composants « traverses ou selles »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Effets possibles de la défaillance		
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Traverses	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Altération des propriétés physico-chimique des traverses béton - Fatigue des matériaux **Contact :** - Défaut d'isolement mécanique et vibratoire de la semelle sous rail - Déformation de la dalle de voie	**Défaut de fabrication :** - Formulation des bétons / Armature **Défaut de mise en œuvre :** - Non respect des tolérances		**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire (charge, vitesse, trafic, géométrie) - Trafic routier **Milieu humide :** - Infiltration d'eau - Mauvais drainage de la plateforme	- Risque de déformation de la voie (géométrie des rails)	- Fissuration des traverses - Rupture
Selles	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Corrosion des selles - Fatigue des selles **Contact :** - Défaut d'isolement mécanique et vibratoire de la semelle sous rail - Dégradation des ancrages (Déformation, fissuration)	**Défaut de conception** - Dimensionnement **Défaut de fabrication :** - Entailles, rayures, fissures des selles **Défaut de mise en œuvre :** - Réalisation des ancrages		**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire (charge, vitesse, trafic, géométrie) - Trafic routier **Milieu humide :** - Infiltration d'eau - Mauvais drainage de la plateforme	- Risque de propagation des dégradations vers les autres composants de la voie : -- Usure ondulatoire -- Déformation de la voie	- Rupture des selles - Déformation de la voie - Bruits et vibrations anormales

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « système APS »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Effets possibles de la défaillance		
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Système APS	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Usure du profilé, en particulier en zone de carrefour	**Défaut de mise en œuvre :** - Mise en œuvre de la longrine, des selles, ancrages, et réglages APS hors rolérance		**Sollicitations extérieures :** - Trafic routier - Trafic ferroviaire	- Risque de propagation des fissures - Risque de rupture du coupon APS et son dysfonctionnement électrique	Fissuration dans le sens longitudinale de l'âme du profilé
	Drainage	Défaut de raccordement		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque de fuite de courants vagabonds	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Ecoulement réduit	**Etat des composants :** - Colmatage des drains			**Dépôt de pollution :** - sablage, graissage trop important - feuilles d'arbres - pollution riveraine, ...	- Risque de fuite de courants vagabonds	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Etanchéité	Infiltration (hydraulique)	**Etat des composants :** - Détérioration du système d'étanchéité protégeant le coffret d'alimentation (bouchon, cloche, déformation du regard de la chambre	**Défaut de conception :** - Nivellement des rails APS par rapport au revêtement - Pente **Défaut de mise en œuvre :** - Mauvais assemblage et non-conformité à la norme IP67		**Milieu humide :** - Infiltration d'eau dans la chambre d'alimentation - Mauvais drainage de la plateforme	- Risque de fuite de courants vagabonds - Risque d'électrisation - Dysfonctionnement électrique pouvant conduire à la perturbation des circulations	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Energie	Faux contact (électrique)	**Etat du composant :** - Usure du profilé (abrasion)			**Milieu :** - Pollution sur le rail APS	- Risque de dysfonctionnement électrique (captage par le frotteur)	Usure du profilé ou pollution
		Fuite (électrique)		**Défaut de conception :** - Non respect des distances limites pour le positionnement des équipements conducteurs (grilles métalliques des caniveaux, ferraillage de la voie, etc.) **Défaut de fabrication :** - Défaut d'isolement électrique du système APS		**Milieu humide :** Eaux stagnantes Mauvais drainage	- Risque de corrosion des éléments métalliques (ferraillage, rail, etc.) - Risque d'electrisation	Présence de tension aux abords de la voie Fuite de courants vagabonds
		Circuit ouvert (électrique)	**Contact :** - Détérioration des connexions, notamment au poste de redressement (PR)	**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement **Défaut lors d'une maintenance :** - Sertissage des cosses, serrage excessif, protection par bouchon des connexions	**Dispositif matériel :** - Présence du dispositif anti-rongeur au poste de redressement		- Risque de dysfonctionnement électrique (détection d'alimentation du rail APS, ...) - Risque d'électrisation	Variation de tension : perte de l'equipotentialité au cheminement des barres de contact

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « dalle de voie »)

Causes possibles de défaillance						Effets possibles de la défaillance		
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Dalle de voie	Interface	Pont vibratoire	**Etat du composant :** Délitement des remontées verticales	**Défaut de mise en œuvre :** Absence de remontées verticales			- Risque de propagation de vibrations et gênes des riverains	Absence de remontées verticales
	Drainage	Point bas (hydraulique)	**Etat du composant :** Déformation de la dalle de voie (affaissement) **Contact :** Déformation de la dalle de fondation (affaissement)	**Défaut de mise en œuvre :** Pente			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	- Eaux stagnantes -Traces d'humidité - Affaissement de la plateforme
	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Altération physico-chimique de la dalle de voie Fatigue de la dalle **Contact :** - Déformation de la dalle de fondation	**Défaut de conception :** - Mauvais dimensionnement de la plateforme **Défaut de fabrication :** - Formulation du béton **Défaut de mise en œuvre :** - Coulage du béton mal-maîtrisé (vibration, retrait, cure mal appliquée, réalisation des joints trop tardive, etc. - Epaisseur		**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire (charge, vitesse, trafic, géométrie) - Trafic routier **Milieu humide :** - Mauvais drainage - Eaux stagnantes	- Risque de déformation de la voie - Risque de rupture de la voie	- Fissuration de la dalle de voie et remontées de fissures - Déformation de la dalle de voie

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composants « dalle et système anti-vibratile »)

Causes possibles de défaillance						Effets possibles de la défaillance		
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Dalle de fondation	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Altération physico-chimique de la dalle de fondation - Fatigue de la dalle **Contact :** - Altération physico-chimique du sol support (formation de vide sous fondation, phénomène de	**Défaut de conception :** - Mauvais dimensionnement de la plateforme **Défaut de fabrication :** - Formulation du béton **Défaut de mise en œuvre :** - Coulage du béton mal-maîtrisé (vibration, retrait, cure mal appliquée, réalisation des joints trop tardive, etc. - Epaisseur - Mauvais compactage du sol support		**Sollicitations extérieures :** - Trafic ferroviaire (charge, vitesse, trafic, géométrie) - Trafic routier **Milieu humide** - Mauvais drainage - Infiltrations d'eau par la dalle de voie, le sol support	- Risque de déformation de la voie - Risque de rupture de la voie	- Fissuration de la dalle de fondation et remontées de fissures - Déformation de la dalle de fondation
Système anti-vibratile	Isolation vibratoire	Pont vibratoire	**Etat du composant :** - Défitement des remontées verticales - Altération des propriétés anti-vibratiles (vieillissement du tapis anti-vibratile)	**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de remontées verticales			- Risque de gênes des usagers et des riverains	- Bruits et vibrations

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « volume de revêtement »)

Causes possibles de défaillance						Effets possibles de la défaillance		
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Volume de revêtement	Interface	Défaut d'interface		**Défaut de conception :** Les interfaces induites par la conception constituent des zones de faiblesses **Défaut de mise en œuvre :** Finitions des interfaces lors de la mise en œuvre du revêtement pouvant conduire à la présence de vide				- Symptômes spécifiques non identifiés, dépend fortement du type de revêtement utilisé
	Structure	Défaillance structurelle	**Etat du composant :** - Usure de la couche de roulement - Déformation du revêtement - Ornièrage	**Défaut de conception** : - Dimensionnement de la couche de roulement par rapport au niveau de trafic **Défaut de fabrication :** - Formulation du matériau (dépend du type de revêtement utilisé) **Défaut de mise en œuvre :** **-** Dépend du type de revêtement utilisé		**Sollicitations extérieures :** - Trafic routier	- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme - Risque de propagation des dégradations dans le corps de revêtement pouvant conduire à la ruine	Apparition d'amorces de dégradations légères (dégradation chimique ou physique avec notamment le phénomène de gel-dégel) : - Fissuration - Orniérage - Départ de matériaux - Nid de poule
	Drainage	Point bas (hydraulique)	**Etat du composant :** - Déformation du revêtement - Orniérage - Affaissement	**Défaut de conception** : Maillage des équipements de drainage (dimensionnement) **Défaut de mise en œuvre :** Pente			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Ecoulement réduit	**Etat du composant :** **-** Les matériaux drainants sont souillés par les fines (dépend du type de revêtement utilisé)	**Défaut de conception :** - Les drains utilisés sont inadaptés **Défaut de mise en œuvre :** - Absence de géotextile			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité Obstruction des drains
	Etanchéité	Infiltration (hydraulique)	**Etat du composant :** Dégradation de surface du revêtement, notamment au niveau des interfaces : (faïençage, départs de matériaux, fissures, épaufrures)	**Défaut de maintenance :** Réparation tardive ou inefficace du revêtement (point à temps)		**Sollicitations extérieures :** Trafic routier Climat **Milieu humide :** Défaillance du système de drainage	- Risque de propagation des dégradation dans le corps de plateforme pouvant aller jusqu'à la ruine du revêtement - Risque de corrosion des éléments métalliques (attaches, rails, armatures, etc.)	Apparition d'amorces de dégradations légères (dégradation chimique ou physique avec notamment le phénomène de gel-dégel) : - Fissuration - Orniérage - Départ de matériaux - Nid de poule

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « joint de rail »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Effets possibles de la défaillance		
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Joint de rail	Interface	Défaut d'interface	**Etat du composant** Vieillissement du matériau (altération physico-chimique)	**Défaut de conception :** La forme géométrique du bord de l'enrobé n'est pas adapté, absence de cornière métallique Epaisseur du joint Le joint n'est pas adapté à la circulation routière **Défaut de fabrication :** Qualité du matériau (résistance au effort de poinçonnement) **Défaut de mise en oeuvre :** Adhérence du collage joints/revêtement/chambre d'éclissage **Défaut de maintenance :** Colmatage tardif ou inefficace des joints		**Sollicitations extérieures** Trafic routier Température	- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme - Risque de courants vagabonds	- Délitement, décollement déchirement, arrachement des joints
	Drainage	Point bas (hydraulique)	**Etat du composant :** Creusement des joints	**Défaut de conception :** Maillage des équipements de drainage **Défaut de mise en œuvre :** Pente de la plateforme			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Isolation électrique	Défaut d'isolement (électrique)	**Etat du composant :** Déchirement, arrachement, délitement du joint	**Défaut de mise en œuvre :** Adhérence du collage		**Milieu humide** Eau d'infiltration	- Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Variation de tension rail/sol Courants vagabonds
	Isolation mécanique	N'absorbe pas les mouvements [illegible]		**Défaut de conception :** La forme géométrique du bord de l'enrobé n'est pas adapté, absence de cornière métallique Epaisseur du joint et propriétés élastiques ou élasto-plastiques inadaptées à la zone (p.ex. circulation routière) **Défaut de fabrication :** Qualité du matériau (résistance au effort de poinçonnement)			- Risque de dégradation des interfaces rails/revêtements	Dégradation rapide au voisinage des rails : - Fissuration - Départ de matériaux - Infiltrations d'eau
	Etanchéité	Infiltration (hydraulique)	**Etat du composant :** Vieillissement du matériau Creusement, déchirement, arrachement, délitement du joint	**Défaut de mise en œuvre :** Adhérence du collage joints/revêtement/chambre d'éclissage **Défaut de maintenance :** Colmatage tardif ou inefficace des joints		**Milieu humide** Défaillance du système de drainage	- Risque de propagation des dégradation dans le corps de plateforme pouvant aller jusqu'à la ruine du revêtement, corrosion des attaches Risque de fuite de courants vagabonds	Apparition d'amorces de dégradations au voisinage des rails (dégradation chimique ou physique avec notamment le phénomène de gel-dégel) : - Fissuration - Départ de matériaux - Infiltrations d'eau - Délitement, déchirement du joint

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « chambre d'éclissage »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Effets possibles de la défaillance		
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Chambre d'éclissage	Assemblage et Interface	Défaut d'interface		**Défaut de mise en œuvre :** - Adhérence du collage			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme (perte d'étanchéité) - Risque de défaut d'isolement mécanique et électrique pouvant conduire à des dégradations au voisinage des rails et du revêtement et à des courants vagabonds	- Délitement des chambres d'éclissage - Déformation
	Isolation électrique	Défaut d'isolement (électrique)	**Etat du composant :** - Délitement des chambres d'éclissage	**Défaut de mise en œuvre ;** - Adhérence du collage		**Milieu humide :** - Infiltrations d'eau - Zone engazonnée	- Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Variation de tension rail/sol Courants vagabonds
	Isolation mécanique	N'absorbe pas les mouvements différentiels		**Défaut de conception :** - Epaisseur des chambres et propriétés élastiques ou élasto-plastiques inadaptées à la zone (p.ex. circulation routière) **Défaut de fabrication :** - Qualité du matériau (résistance aux moments de rotation du rail			- Risque de dégradation des interfaces rails/revêtements	- Dégradation du revêtement (déformation, fissuration, ornièrage, etc.)
	Etanchéité	Infiltration (hydraulique)	**Etat du composant :** - Délitement des chambres d'éclissage			**Milieu humide :** - Infiltrations d'eau - Zone engazonnée	- Risque de dégradation des autres composants de la voie - Risque de courants vagabonds	Les infiltrations d'eau sont vecteurs de dégradation : - corrosion des rails et des attaches - humidité

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « intervalle de décharge »)

Causes possibles de défaillance						Effets possibles de la défaillance		
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Intervalle de décharge	Energie	Circuit ouvert (électrique)		**Défaut de conception :** - Non respect de la reglementation **Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque électrique en cas de chute de LAC	Dysfonctionnement du réseau MANT en cas de non raccordement
		Ne commute pas	**Etat du composant :** - condensateur de l'intervalle de décharge fondu	**Défaut de conception :** - Non respect de la reglementation **Défaut de maintenance :** - Absence de procédure de contrôle, absence de contrôle			- Problème de sécurité par l'élévation de potentiel rail/sol non surveillée - Risque courants vagabonds	-Condensateur fondu

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « boîte à eaux »)

Causes possibles de défaillance							Effets possibles de la défaillance	
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Boîte à eaux	Interface	Défaut d'interface	**Etat du composant :** - Détérioration des interfaces	**Défaut de conception :** - Les interfaces induites par la conception constituent des zones de faiblesses **Défaut de mise en œuvre :** - Finitions des interfaces lors de la mise en œuvre du revêtement pouvant conduire à la présence de vide			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Le type de déterioration au niveau des interfaces avec le volume de revêtement dépend du matériau utilisé. La plupart du temps, ces détériorations conduiront à des fissurations superficiels
		Défaut de raccordement		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Drainage	Ecoulement réduit	**Etat du composant :** - Colmatage des boîtes à eaux	**Défaut de maintenance :** - Pollution des fonds de gorge des rails vers les boîtes à eaux par lessivage - Nettoyage du système de drainage mal adapté ou mal maîtrisé			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité Obstruction des boîtes à eaux
		Point bas (hydraulique) Fuite (hydraulique)	**Etat du composant :** - Vieillissement des composants, en particulier au niveau des interfaces	**Défaut de mise en œuvre :** - Pente			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme - Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité Traces d'humidité

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « drains »)

Composant	Bloc fonctionnel	Mode de défaillance	Causes possibles de défaillance			Milieu environnant	Effets possibles de la défaillance	
			Matière / Composant *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*		**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Drains	Interface	Défaut d'interface	**Etat du composant :** - Les matériaux drainants sont souillés par les fines (dépend du type de revêtement utilisé) **Contact :** - Déformation de la dalle de voie	**Défaut de conception :** - Les drains utilisés sont inadaptés **Défaut de mise en œuvre :** - Absence de géotextile			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Traces d'humidité Obstruction des drains
	Drainage	Défaut de raccordement		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Ecoulement réduit	**Etat du composant :** - Colmatage des drains - Infiltration par les fines des tranchées drainantes	**Défaut de conception :** - Les drains utilisés sont inadaptés (diamètre, type de drains) **Défaut de mise en œuvre** : - Absence de géotextile, déchirement, pollution			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Point bas (hydraulique)		**Défaut de conception :** - Pente de la plateforme			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Fuite (hydraulique)	**Etat du composant :** - Vieillissement des composants, en particulier au niveau des interfaces				- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « caniveaux »)

Causes possibles de défaillance							Effets possibles de la défaillance	
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Caniveaux	Interface	Défaut d'interface		**Défaut de conception :** - Calepinage des joints de dilatation du revêtement **Défaut de mise en œuvre :** - Réalisation des joints de dilatation - Finitions des bordures selon le matériau utilisé (sciage, compactage, réalisation des arrêtes, etc.)				Fissuration Décollement
		Défaut de raccordement		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
	Drainage	Ecoulement réduit		**Défaut de conception :** - Maillage des équipements de drainage, notamment au niveau des traversées de plateforme et/ou des changements de type de revêtement **Défaut de mise en œuvre** : - Pente de la plateforme			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Fuite (hydraulique)	**Etat du composant :** - Vieillissement des composants, en particulier au niveau des interfaces				- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité
		Point bas (hydraulique)		**Défaut de mise en œuvre :** - Pente de la plateforme			- Risque d'infiltration d'eau dans le corps de plateforme	Eaux stagnantes Traces d'humidité

L'AMDE adaptée à la voie ferrée de tramway (composant « multitubulaire »)

Causes possibles de défaillance						Effets possibles de la défaillance	
Composant	**Bloc fonctionnel**	**Mode de défaillance**	**Matière / Composant** *Etat intrinsèque du composant*	**Méthode** *Processus de conception-fabrication-réalisation-maintenance*	**Moyen** *Dispositif matériel*	**Milieu environnant**	**Effet global** *Risque pour le système*	**Effet local** *Symptôme*
Multitubulaire / Faisceaux réseaux	Interface	Défaut d'interface	Défaut de retour d'expérience Grande variabilité des modalités d'implantation, de conception et de mise en œuvre des multitubulaires ou des faisceaux réseaux					
		Circuit ouvert (électrique)		**Défaut de mise en œuvre :** - Absence de raccordement lors de l'installation				Dysfonctionnement électrique lors des tests et essais
	Energie	Fuite (électrique)		**Défaut de mise en œuvre :** - Défaut d'isolation électrique		Milieu humide : - Mauvais drainage - Eaux stagnantes	- Risque de corrosion des masses métalliques souterraines	Courants vagabonds

