IFSTTAR
INSTITUT FRANÇAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DES RÉSEAUX

ACV des projets d'infrastructures route/rail à l'échelle d'un réseau avec prise en compte des paramètres d'éco-conception

AME\EASE

VANDANJON Pierre-Olivier

Téléphone : 33 (0)240845634
Télécopie : 33 (0)240845992
pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr

Date : 3 mars 2017

Auteurs : Pierre-Olivier VANDANJON, AME\EASE (**resp. livrable 2015/ 2016**)
Agnès JULLIEN, DAEI (**resp. livrable 2012 - 2014**)
Michel DAUVERGNE, AME\EASE
Véronique CEREZO, AME\EASE

Nomenclature d'activité : RP3
Référence sur Numéro de contrat* :
Confidentialité : Public

Rév 01/03/16

le cas échéant

Contributeurs internes à l'Ifsttar aux travaux (autres que les auteurs) :

1. **Volet Ferroviaire :**

AME\EASE
Alex Coiret, Tristan Lorino, Denis François, Bogdan Muresan, Jean-Marie Prual, Laurence Lumière, Amandine Fargier, Romain Bosquet

COSYS\GRETTIA
Hugues Chollet

COSYS\LTN
Bogdan Vulturescu, maintenant en poste à la SNCF

2. **Volet Routier :**

AME\EASE
Alex Coiret

AME\LTE
Emmanuel Vinot

SOMMAIRE

ACV des projets d'infrastructures route/rail à l'échelle d'un réseau avec prise en compte des paramètres d'éco-conception....1

1 Introduction....4

1.1 Contexte....4
1.2 Sujet développé....4
1.3 Moyens et Partenariats....6

2 Infrastructure ferroviaire....7

2.1 Verrous scientifiques....7
2.2 Évaluation de la construction....8
2.3 Évaluation de la maintenance....10
2.4 Évaluation de l'usage....11
2.5 Applications sur le projet de LGV Montpellier-Perpignan....13
2.6 Leviers pour l'écoconception....15

3 Infrastructure routière....17

3.1 Verrous scientifiques....17
3.2 Sloop : l'optimisation des Pentes....17
3.3 Résistance au roulement....21

4 Conclusion-Perspective....24

5 Bibliographie....26

6 Publications Ifsttar....28

1 Introduction

1.1 Contexte

Notre système de transport doit s'adapter à une transition numérique, écologique, économique et énergétique. Par exemple, concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES), il est confronté à une contradiction entre croissance du trafic liée à la croissance des échanges et limitation nécessaire des émissions afin d'attenuer les conséquences du changement climatique. Cette contradiction pourra être résolue par une transition de notre système de transport. En bref, notre système de transport actuel n'est pas durable. Cette contradiction entre croissance du système de transport et limitation des impacts se retrouve au niveau mondial, européen et national.

En effet selon, un rapport du Forum international sur le transport (OCDE) de 2013 : les GES émis par le secteur des transports augmentera de 30 % à 170 % entre 2010 et 2050 selon les différents scénarios de croissance envisagés. Dans le même temps, la synthèse du rapport du GIEC de 2014 indique que pour limiter le réchauffement de climatique en dessous de 2°, le secteur des transports devra maintenir ses émissions de GES entre 2010 et 2050.

Au niveau européen, le Livre blanc de la communauté européenne sur le transport (projection 2050) énonce des objectifs ambitieux pour 2050 comme diminuer de 50 % le fret routier au dessus d'une distance de 300km, tripler la longueur du réseau ferroviaire à grande vitesse. Un scénario de référence de transition pour 2050 est mis à jour régulièrement. Dans sa mise à jour de 2016, les tendances initiales sont confirmées avec une stagnation du trafic routier, mais qui reste dominant, avec une augmentation importante du trafic ferroviaire. Ce scénario repose, notamment, sur des gains substantiel (supérieurs à 30%) de l'efficacité énergétique des modes routiers et ferroviaires.

Au niveau Français, la transition du système de transport est aussi importante qu'au niveau européen. En France, nous constatons une stabilisation de l'émission des GES par le système de transport depuis 1990. Cependant, les objectifs posés par la loi de transition énergétique et sa déclinaison dans la stratégie nationale bas carbone sont ambitieux. Il s'agit, notamment, de baisser de 2/3 les émissions de gaz à effet de serre pour le transport entre 2010 et 2050.

Notre système de transport est, donc, à repenser. C'est un stimulant pour la recherche. Il existe de nombreux travaux sur les moyens de transport. La construction des infrastructures est aussi étudiée. En revanche, nous avons recensé peu de travaux avec une vision complète infrastructure et usage car cela demande une approche multidisciplinaire. La démarche danoise avec les projets Coee, Rose et sa participation aux proiets Miriam et Rosanne est, à notre connaissance, une des études qui est allée le plus loin dans la modélisation en partageant cette vision construction et usage des infrastructures. L'approche danoise se concentre sur les matériaux. Notre approche utilise aussi les leviers de la conception géométrique des infrastructures comme les pentes et les dévers.

1.2 Sujet développé

La figure suivante (Illustration 1) illustre le cadre de notre travail. Il s'agit d'optimiser les paramètres de conception afin de limiter la consommation de ressources et les impacts tout au long du cycle de vie de l'infrastructure. Une étape importante de ce travail est l'évaluation cohérente (les segments verts sur le schéma) des étapes du cycle de vie. C'est sur ce point crucial que nous avons utilisé la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV). La phase d'usage est celle ayant le plus grand impact selon le graphique ci-dessous (Illustration 2) issue d'un livrable du projet européen LCE4ROADS (Jullien et al., 2015). Dans l'exemple présenté 97 % de l'énergie et 95 % des gaz à effet de serre sont émis pendant la phase d'usage. Mais il faut des évaluations fines pour que celles-ci varient significativement en fonction de la conception. Notre approche consiste à se ramener à la dynamique des véhicules en analysant les efforts déployés entre le véhicule et l'infrastructure (Coiret et al., 2012) . Ces évaluations plus fines nous permettent d'étudier en phase de conception les impacts tout au long du cycle de vie. Une retombée inattendue de ce travail est l'utilisation de ces modèles pour une meilleure exploitation de la phase d'usage.

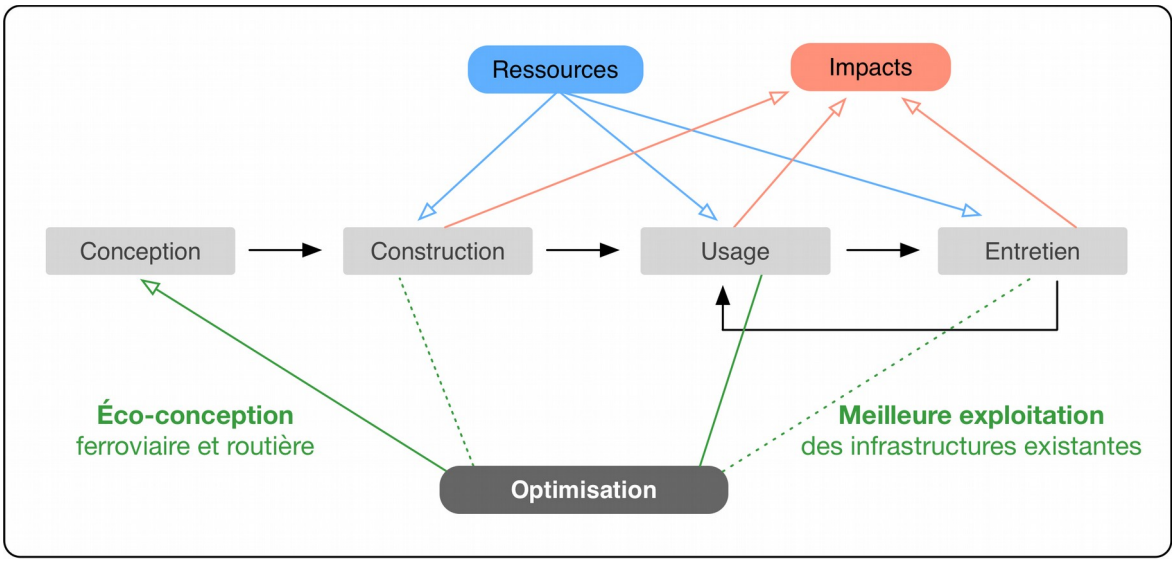


Illustration 1: Cadre général de nos travaux

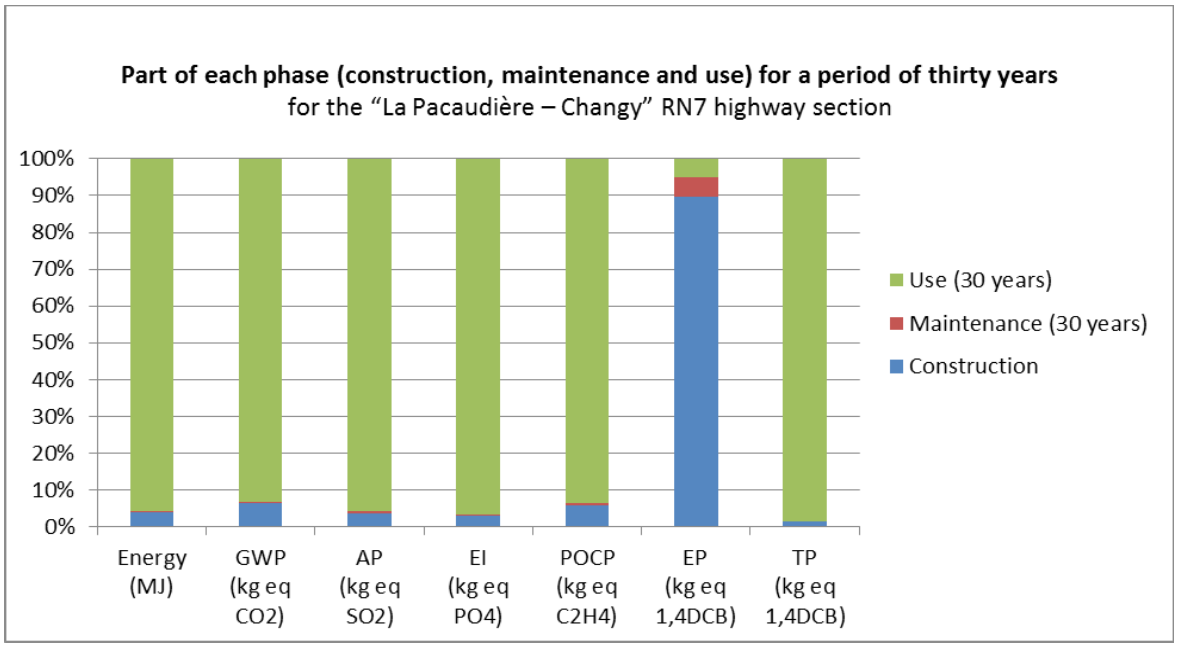


Illustration 2: Différents impacts d'une route selon les phases de construction, d'usage et de maintenance (issue du livrable D1.4 du projet européen LCE4ROADS)

Au sein de ce cadre de l'optimisation des projets d'infrastructure, nous nous sommes concentrés sur deux critères : l'énergie primaire consommée et l'émission des gaz à effet de serre. Par ailleurs, nous avons travaillé dans une optique d'évaluation de variantes, principalement de différents tracés ou différentes techniques de construction, pour un me mode mais pas pour effectuer une comparaison intermodale.

En résumé il s'est agit de :

- mettre à profit la méthodologie de l' analyse du cycle de vie (ACV) pour mettre en place une démarche systémique d'évaluation qui s'applique à l'infrastructure et à l'ensemble des sous-structures qui la constituent ;
- mettre en place une méthode de découpage du territoire qui permette d'aboutir à une évaluation générique paramétrable d'un projet à l'autre du cycle de vie de l'infrastructure pour en effectuer une approche de type éco-conception qui n'est pas une approche incluse dans l'ACV.

Ces points sont constitutifs de la méthodologie d'évaluation des projets, appelé Peam pour « Project Energy Assessment Method » que nous avons appliquée sur un projet de ligne à grande vitesse. Cette application est présentée dans ce rapport et a fait l'objet de l'article en revue (R. Bosquet et al., 2014).

1.3 Moyens et Partenariats

L'évaluation conjointe de la phase de construction et d'usage fait appel à des compétences variées. L'approche multidisciplinaire entraîne la mobilisation d'un réseau d'experts. Au sein de l'ifsttar, cette étude a bénéficié des contributions du Laboratoire Transport et Environnement (LTE), du Génie des Réseaux de Transport Terrestres et Informatique Avancée (Grettia) et du Laboratoire des Techniques Nouvelles (Ltn). Nous avons contribué à une thèse du laboratoire Évaluation des Systèmes de Transport Automatisés et de leur Sécurité (Estas).

La partie ferroviaire s'est effectuée principalement à travers un partenariat entre la SNCF réseau et l'Ifsttar pour « Améliorer l'efficacité energie-carbone des investissements » d'un montant de 670 k€. Certains résultats de ce partenariat ont été fournis dans des livrables qui sont la propriété de la SNCF réseau et qui sont donc confidentiels.

La partie routière a bénéficié de données de trafic fournies par le Cerema (DTerCE/ Lyon).

2 Infrastructure ferroviaire

Les propriétaires de ligne à grande vitesse sont sensibles à la problématique de la prise en compte de l'énergie consommée en phase d'usage notamment parce que ce sont eux, qui amènent l'électricité de traction et facturent un forfait aux entreprises ferroviaires. Ce n'est pas le même principe dans le domaine routier : c'est n'est pas le conseil départemental qui facture l'essence des véhicules empruntant son réseau. Ce contexte favorable dans le domaine ferroviaire explique pourquoi notre première étude a porté sur l'évaluation de différents tracés de lignes à grande vitesse alors que nous avions, plutôt, une culture technique dans le domaine routier.

Pour réaliser cette étude, nous avons mis au point une méthodologie appelée PEAM pour « Project Energy Assessment Method ». Elle se base sur une évaluation cohérente des phase de construction, maintenance et d'usage des infrastructures de transport. Ces différents phases sont décrites dans les différentes sous sections de cette partie. Mais en premier lieu, il a fallu débloquer des verrous scientifiques sur ces trois phases.

2.1 Verrous scientifiques

Concernant la construction, les évaluations de type Bilan Carbone ou étude ACV sont généralement réalisées à un stade du projet suffisamment avancé pour disposer d'éléments concrets nécessaires à l'évaluation. Il est par exemple utile de connaître la quantité des différents matériaux utilisés (béton, acier, chaux, ballast, enrobés…).

La phase de maintenance est souvent appréhendée à partir des retours d'expériences puis projetée sur une durée de vie ou une durée d'étude pouvant aller jusqu'à 100 ans.

Pour la phase d'usage (consommation du véhicule), l'évaluation est souvent réalisée à partir de données moyennes ou génériques sans relation directe avec l'infrastructure à construire.

Or nous souhaitons effectuer une évaluation dès la phase projet. Les principaux verrous à lever seraient donc :

- d'être capable d'évaluer une phase d'usage en lien direct avec l'infrastructure à construire ce qui suppose d'identifier les paramètres de conception influents et de les évaluer
- d'être capable d'évaluer une phase construction plus en amont d'un projet, là où certaines décisions irrémédiables n'ont pas encore été prises : par exemple en amont du choix d'un tracé. En effet, optimiser un bilan carbone lorsque le projet est défini en plan et en altitude revient à chercher à réduire l'emploi de certains matériaux (les liants hydrauliques principalement).
- d'être capable d'assembler ces deux phases et d 'optimiser l'ensemble.

L'évaluation de la phase d'usage nécessite un modèle de consommation et un modèle d'émission de GES du matériel roulant. Comme l'application visée concerne les lignes à grande vitesse en France, il nous fallait un modèle de consommation électrique d'un TGV. En effet, à partir de la consommation électrique, nous pouvons calculer la consommation en énergie primaire ainsi que l'émission de GES. Cependant, dans la littérature, les données les plus précises étaient une énergie par km (par exemple : 19 kWh/km pour un TGV). Ce ratio est le même quelque soit le tracé et pour toutes les vitesses. Cette information n'est pas assez précise pour différentier deux tracés.Il n'a pas été possible d'obtenir un modèle de consommation plus précis auprès d'Alstom, cette information étant protégée C'est la raison pour laquelle, nous avons construit un modèle adapté à nos attentes. Ce modèle dépendait de paramètres. Nous avons identifié ces paramètres sur des essais réels ce qui a aussi permis de valider le modèle et d'évaluer son pouvoir prédictif.

2.2 Évaluation de la construction

L'application de l'ACV à un système ferroviaire conduit à fractionner ce dernier en processus élémentaires (sous-système) faisant référence aux grandes étapes du cycle de la vie des véhicules et de l'infrastructure. Le fractionnement du système de transport en processus élémentaires facilite l'identification des intrants[1] (et des extrants[2].

L'ACV doit décrire l'objectif et le champ d'étude tenant notamment compte du ou des système(s) étudié(s), de l'unité fonctionnelle[3] i définissant l'objet et de la frontière du système qui détermine les processus élémentaires qui doivent figurer. Cette modélisation a fait l'objet du livrable 1.3 de la collaboration avec SNCF réseau et a été présenté dans l'article de congrès : (Vandanjon et al., 2012)

La définition du champ d'étude doit présenter

- la fonction de l'ouvrage,
- l'unité fonctionnelle servant de référence pour les flux entrants et les flux sortants. L'unité fonctionnelle représente une quantification de la fonction et doit être précise, mesurable et additive.
- la durée de vie typique de l'ouvrage (en général identique à la durée d'utilisation du projet),
- le système associé à l'ouvrage permettant d'intégrer l'ensemble des phases du cycle de vie de l'ouvrage, les systèmes proposés pour chaque ouvrage sont à adapter en intégrant le recyclage
- la décomposition de l'ouvrage en sous-ensembles, chaque étape retenue sera décrite
- les limites du système étudié.

Ainsi pour la construction d'une ligne LGV, l'unité fonctionnelle utilisée a été la suivante :

UF = 400 km de voie LGV parcourus en 1h50 par 200 trains par jour par sens pendant 50 ans.

Cette unité fonctionnelle a été découpée en unité fonctionnelle élémentaire comme suit :

- Uf1 : pour les travaux de terrassement
- Uf2 : pour la construction des ouvrages d'art
- Uf3 : pour les travaux d'assainissement
- Uf4 : pour les travaux de rétablissements de chaussées
- Uf5 : pour les travaux de construction de l'assise ferroviaires (ballast, rails, traverses...)
- Uf6 : pour les travaux de construction des équipements ferroviaires (Caténaire, signalisation…)
- Uf7 : pour la circulation des trains et l'entretien de la voie

Chacune de ces unités fonctionnelles élémentaires a fait l'objet d'une étude précise à partir de données issues de différents chantiers ou cas d'études.

Les résultats obtenus sont ensuite utilisés sous formes de valeurs élémentaires et injectés dans l'équation suivante :

$$UF = N \times Uf_{TER\cdot} + (V_{OAC} \times R_{OAC} + L_{OANC} \times R_{OANC} + L_{OS} \times R_{OS}) + L \times (R_{ASS.} + R_{RC} + R_{AF} + R_{EF}) \quad (1)$$

Avec :

N : nb de lots terrassement, $Uf_{TER\cdot}$: Evaluation de l'Uf terrassement du lot considéré

1flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire
2flux de produit, de matière ou d'énergie sortant d'un processus élémentaire
3performance quantifiée d'un système de produit destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse de cycle de vie

V_{OAC} : Volume dégagé en m3 par l'ouvrage d'art courant, R_{OAC} : Ratio par m3 dégagé

L_{OANC} : Longueur cumulée en km des ouvrages non courant, R_{OANC} : Ratio au km

L_{OS} : Longueur cumulée en km d'ouvrages souterrains, R_{OS} : Ratio au km

L : Longueur du projet, $R_{ASS.}$: Ratio au km pour l'assainissement, R_{RC} : Ratio au km pour le rétablissement de chaussée ,R_{AF} : Ratio au km pour l'assise ferroviaire ,R_{EF} : Ratio au km pour les équipements ferroviaires.

Afin d'illustrer la démarche sur un exemple concret et de montrer le nombre d'informations à collecter, nous prenons l'exemple de l'analyse du profil en travers d'une structure ferroviaire illustrée par la figure ci-dessous. Le profil en travers type d'une structure ferroviaire courante est généralement constitué (cf. Illustration 3)

- · D'un ouvrage en terre constitué du sol support, de la partie supérieure des terrassements (PST) et de la couche de forme (facultative)
- · D'une structure d'assise constituée d'une sous couche et d'une couche de ballast
- · D'un armement constitué de traverses et de rails rendus solidaires au moyen d'attaches
- · D'une superstructure essentiellement constituée d'une caténaire et de son support

A ces éléments, viennent s'ajouter des installations complémentaires nécessaires au fonctionnement et à l'exploitation de la voie comme :

- · Le système de signalisation,
- · Les systèmes d'aiguillage
- · L'amenée d'électricité avec, à espaces réguliers dépendant de la tension d'alimentation, des
- sous stations électriques…
- · Les différents systèmes de protection. Ces derniers sont installés le long de la voie en fonction des impératifs techniques ou sécuritaires rencontrés.

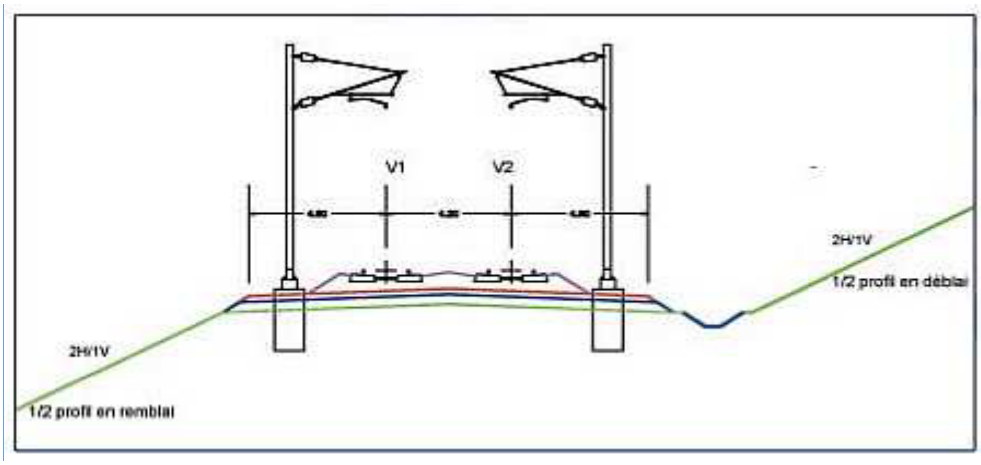


Illustration 3: Profil en travers type d'une structure ferroviaire (d'après « Liaison ferroviaire Lyon-Turin » document public RFF)

2.3 Évaluation de la maintenance

L'élément le plus vulnérable de la voie est le ballast, notamment sur les lignes LGV. Il a une tendance à se tasser sous l'effet du trafic et de ses vibrations, ce qui entraîne des défauts de nivellement qu'il faut corriger pour maintenir le niveau de service.

Les principales opérations de maintenance du ballast sont :

- le bourrage mécanique qui est une opération effectuée par une machine qui soulève l'armement et qui « re-bourre » sous la traverse le ballast de manière à retrouver l'altitude voulue (Illustration 4). 58 % d'une ligne à 300 km/h est bourrée chaque année et ce taux monte à 85 % pour une vitesse de 320 km/h.
- le relevage qui est moins fréquent que le bourrage, consiste à ramener une épaisseur de ballast neuf
- le renouvellement, qui est une opération qui consiste à remplacer le ballast dont une partie de volume variable pourra être recyclée.



Illustration 4: Bourreuse mécanique - Photo ETF

L'autre élément très surveillé est l'ensemble de l'armement dont notamment, l'état des attaches qui maintiennent la liaison rail-traverse et l'état de surface du rail. Les opérations de maintenance sur ces éléments consistent en :

- du meulage : opération qui consiste à redonner un meilleur état de surface au rail pour améliorer le contact roue-rail. Il s'agit d'une opération importante qui améliore le nivellement, le confort et limite les réparations des rails par rechargement. En outre, cette opération peut réduire les opérations de bourrage. Cette opération est effectuée, comme souvent en ferroviaire, par un train spécial à grand rendement.
- Une intervention sur le système d'attache (serrage) :
    - un renouvellement d'attaches
    - un renouvellement des traverses
    - un couponnage du rail
    - un renouvellement du rail

Ces trois dernières opérations peuvent faire l'objet d'un remplacement simultané et couplé à celui du ballast au moyen d'un train de machines complexes : la suite rapide (Illustration 5). Ces machines successives sont capables en un passage de :

- retirer le ballast usagé
- déposer les anciennes traverses

- reposer les nouvelles traverses
- remplacer le rail
- ramener du ballast neuf
- bourrer successivement, jusqu'à amener le nivellement aux cotes voulues

Compte tenu de leur coût et de leur complexité de mise en œuvre, ces machines sont peu nombreuses se déplacent par voie ferrée et nécessitent une logistique importante; ce qui est pris en compte dans l'évaluation de la maintenance.



Illustration 5: Suite rapide - http://transalp-renouvellement.fr

2.4 Évaluation de l'usage

Contrairement aux unités fonctionnelles concernant la construction et la maintenance, l'estimation de la consommation d'énergie du trafic n'est pas directement calculée à partir de ratios mais passe par une simulation d'un modèle basé sur la dynamique du matériel roulant.

Les entrées-sorties du modèle sont illustrées sur la figure suivante (Illustration 6) et sont décrites dans la suite.

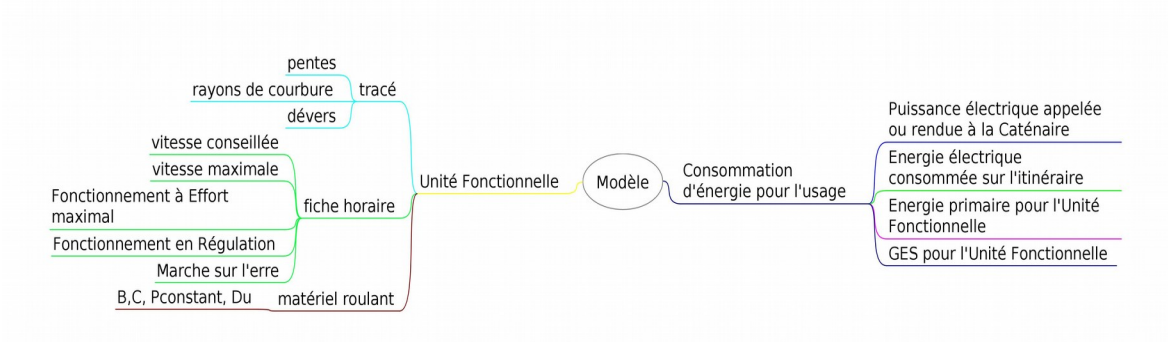


Illustration 6 : entrées-sorties du modèle de consommation d'énergie d'un train à grande vitesse, illustration construite à partir de la thèse de Romain Bosquet (Bosquet, 2015)

Les entrées nécessaires aux calculs des consommations sont les suivantes.

- Type de matériel roulant : sa masse, les paramètres mécaniques C et B liés, pour le premier, aux efforts aérodynamiques, et le second au frottement, les paramètres électriques : $P_{constant}$ modélisant les pertes liées aux auxiliaires et D_u paramètre lié à des pertes proportionnelles au courant. Sur un train à grande vitesse, les efforts aérodynamique sont, particulièrement, importants. Nous avons, notamment, étudié l'influence du vent. Cela a fait l'objet de deux articles de congrès : (Coiret et al., 2014)
- Le tracé de l'infrastructure : pentes, rayon de courbure, dévers.
- Fiche horaire pour le conducteur : pour chaque position, la vitesse conseillée et la vitesse maximale, les périodes où la force motrice doit être maximale, les marches sur l'erre correspondant aux périodes où l'effort moteur est nul, les périodes de fonctionnement en régulation autour de la vitesse conseillée.

Les sorties du modèle sont :

- La puissance électrique appelée ou rendue à la caténaire par le train.
- La consommation d'énergie électrique sur l'itinéraire qui est la valeur précédente intégrée sur un trajet
- La consommation d'énergie primaire pour le trafic défini dans l'unité fonctionnelle. Elle est calculée à partir de La valeur précédente multipliée par le trafic estimé sur la période de temps considérée.
- La masse de gaz à effet de serre en équivalent CO2

Certains paramètres du matériel roulant : B,C, Pconstant, D_u ne sont pas des valeurs publiques. Nous les avons identifiés sur les essais de réception de la ligne à grande vitesse Rhin-Rhône. Le modèle de consommation a été présentée dans deux conférences : (Bosquet et al., 2013) et dans une conférence de dynamique de véhicule dont les actes ne sont pas encore publiés.

Toutes la démarche de modélisation est d'identification fait l'objet de la thèse Cifre de Romain Bosquet (Bosquet, 2015).

Sur le graphique suivant (Illustration 7), chaque croix représente un trajet, appelé marche, du TGV lors des essais de réception. L'abscisse est la consommation d'énergie mesurée. L'ordonnée est la consommation d'énergie estimée. Ce graphique illustre la qualité de représentation du modèle. Il représente aussi l'ampleur du traitement de données : 142 marches sont représentées, correspondant à 39h00 d'essais. Il montre aussi l'intérêt de ce modèle par rapport à un simple ratio qui ne correspond qu'à une modalité (une croix).

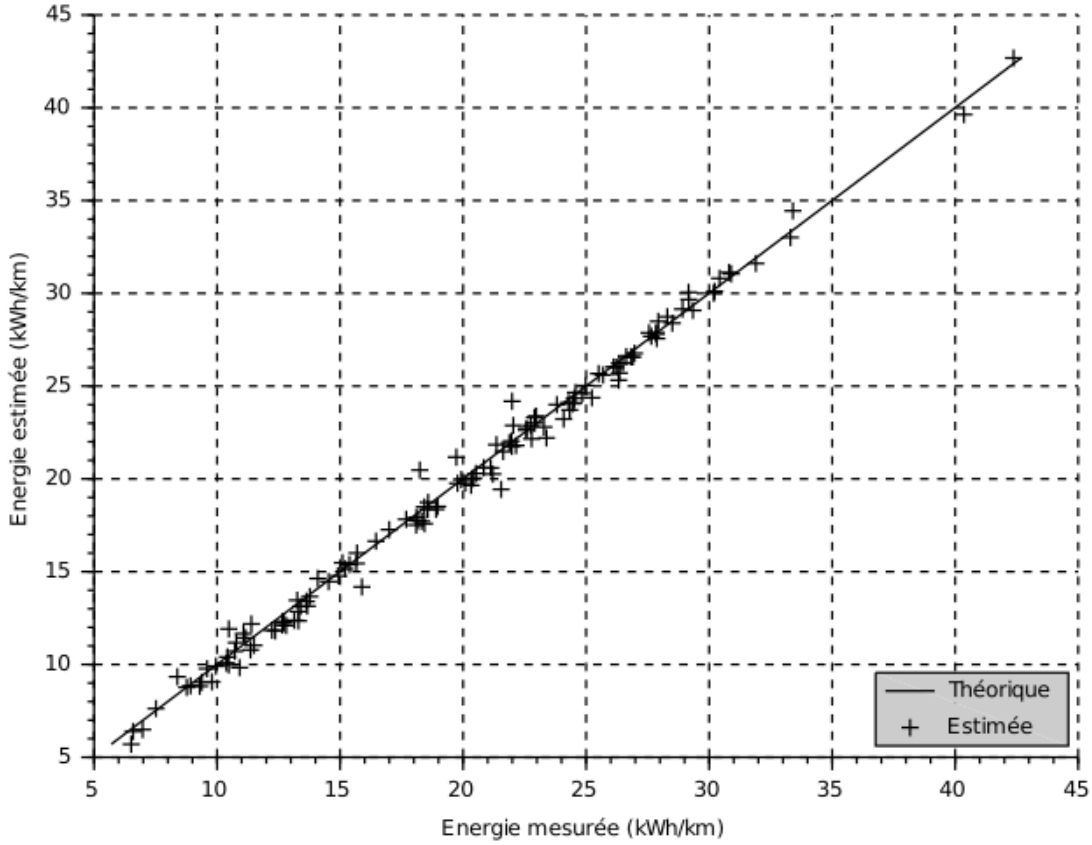


Illustration 7: Comparaison énergie mesurée et énergie estimée sur un TGV (issue de la thèse de Romain Bosquet (Bosquet, 2015))

2.5 Applications sur le projet de LGV Montpellier-Perpignan

La méthodologie a été appliquée pour évaluer des variantes de construction entre la technologie ballast, la technologie voie sur dalle et la technologie grave bitume. Elle a aussi été utilisée pour évaluer différents tracés du projet de ligne à grande vitesse entre Montpellier et Perpignan. Nous présentons dans ce rapport l'évaluation de deux tracés à l'approche de Perpignan (voir le plan ci-dessous Illustration 8 et Illustration 9). Ces deux tracés sont agrandis sur les plans suivants. Le cas était complexifié par le fait que

- le tracé occidental, celui qui passe dans l'intérieur des terres, est dédié au trafic passagers tandis que le tracé oriental est une ligne mixte passager-fret.
- une ligne classique existante reste en activité, elle peut recevoir du fret.

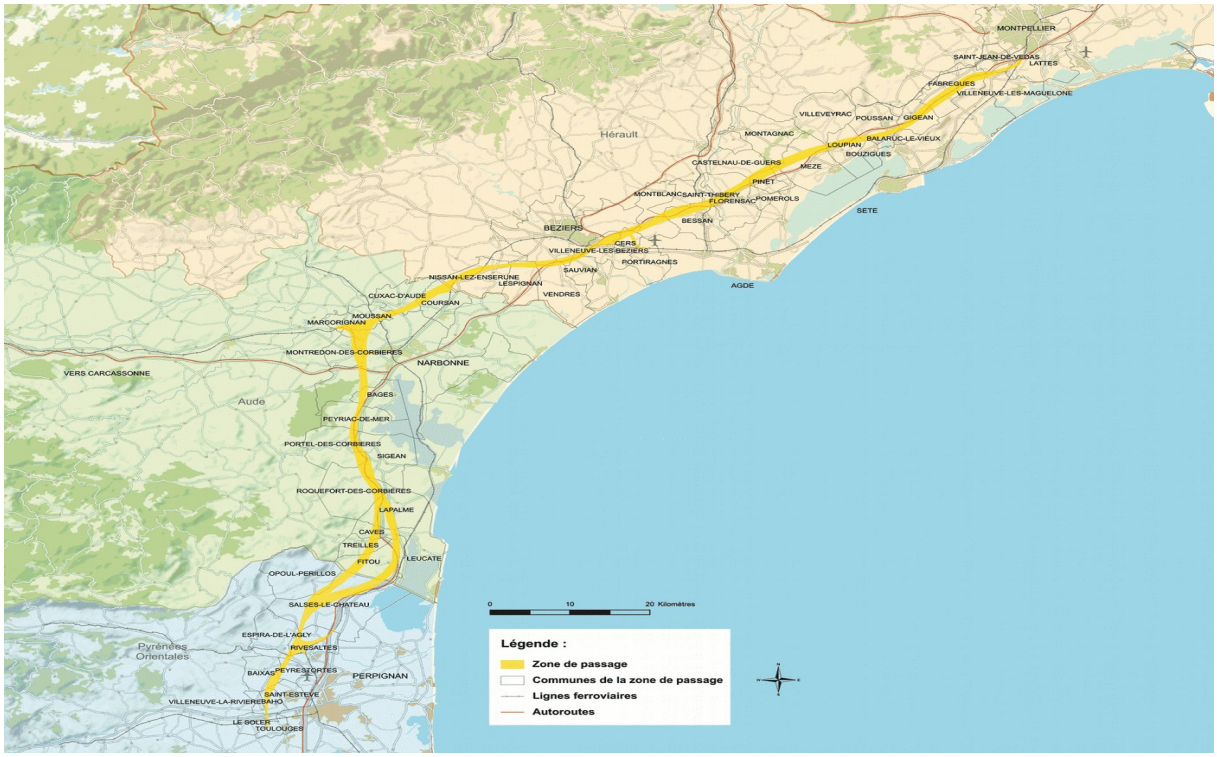


Illustration 8: le projet de ligne Montpellier-Perpignan avec la variante (image travailllée à partir de la source : www.ligne-montpellier-perpignan.com)

Illustration 9: Zoom sur la variante (image issue de la thèse de Romain Bosquet (Bosquet, 2015))

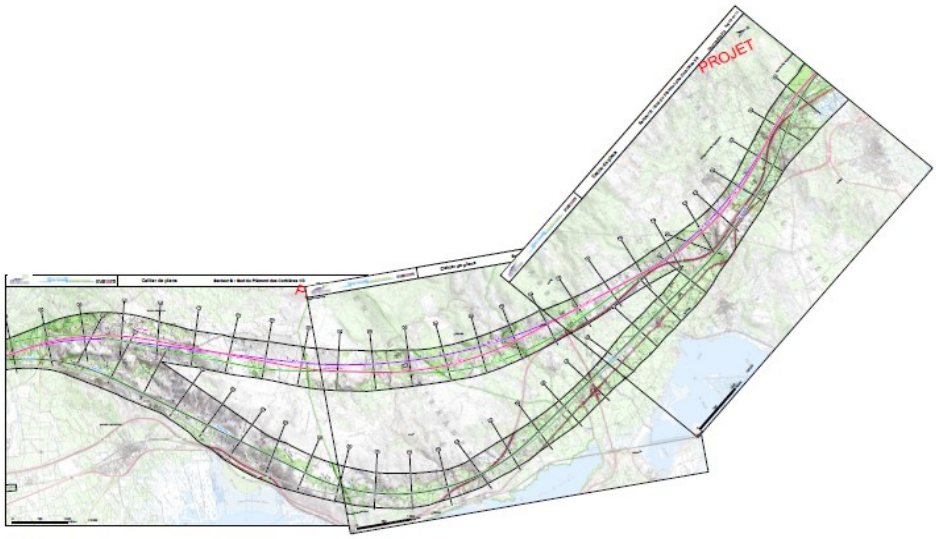


Illustration 10: comparaison des énergies consommées selon les deux variantes (NPL : ligne passagers, NML : ligne mixte) (graphique issue de l'article (R. Bosquet et al., 2014))

Le graphique précédent (Illustration 10) illustre les résultats de la méthodologie Peam appliquée à ce cas. L'acronyme NPL signifie « New Passenger Line », elle nomme la ligne occidentale. NML signifie « New Mixed Line », et représente la ligne orientale. Il est constaté que la ligne occidentale est moins énergivore que la ligne mixte.

La méthodologie Peam et son application sur le projet de ligne Montpellier-Perpignan a fait l'objet d'un article en revue : (R. Bosquet et al., 2014)

2.6 Leviers pour l'écoconception

Dans le livrable 2.4 du partenariat de recherche entre l'Ifsttar et SNCF réseau, plusieurs paramètres susceptibles d'influer sur le résultat final de la construction ont été examinés. La synthèse des paramètres étudiés, ainsi que leur influence ont été résumés dans ce livrable confidentiel. Il n'est donc pas possible d'en faire état dans ce document.

A l'origine du projet, nous pensions que l'écoconception passerait, notamment, par une gestion fine du compromis sur les pentes. Plus les pentes tolérées sont importantes, mieux le tracé s'insère dans le territoire ce qui engendre des consommations d'énergie moindres pour la construction mais supérieures pour l'usage. Même si ce raisonnement est juste, les systèmes de récupération d'énergie au freinage le rendent moins prégnant. Nous avons mis en évidence des choix conjoints de pentes, longueurs et vitesses qui permettent de ne pas aggraver l'énergie d'usage (Romain Bosquet et al., 2014).

La vitesse est un des paramètres de conception les plus sensibles. Plus la vitesse est importante, plus les rayons de courbures tolérés sont importants, moins le tracé s'insère dans le territoire ce qui engendre des consommation d'énergie plus importante pour la construction. Par ailleurs, une dissipation majeure de l'énergie des trains à grande vitesse est liée aux efforts aérodynamiques qui varient en fonction du carré de la vitesse. La consommation d'usage augmente de manière importante avec ce paramètre.

Si nous baissons la vitesse, le temps de parcours va augmenter ce qui amène à modifier l'unité fonctionnelle fondamentale. La consommation d'énergie peut aussi être baissée tout en gardant des horaires compatibles

en proposant des phases d'accélération, de décélération et de marche sur l'erre accordées sur le tracé. Concrètement, nous proposons que des fiches horaires, c'est à dire les indications sur la marche du train pour le conducteur, incluant des objectifs d'écoconduite soient produites dès la phase de conception en lien avec le tracé. Différents tracés devraient donc être accompagnées de différentes fiches horaires. Ceci nous a amené à nous rapprocher du laboratoire Estas de Cosys , nous avons contribué à leurs travaux en échangeant avec eux sur les modèles de consommations utilisés dans la construction de des fiches horaires. Cette collaboration a été valorisée dans un article de revue : (Lejeune et al., 2016).

Notre méthodologie permet d'estimer l'impact de la vitesse en étudiant différents tracés compatibles avec différentes vitesses. C'est une fonctionnalité que nous n'avons pas utilisée mais qui nous paraît prometteuse pour estimer le coût en énergie et en GES des minutes économisées sur un parcours par une vitesse importante.

3 Infrastructure routière

Dans le domaine routier, l'évaluation des phases de construction et de maintenance est, maintenant, bien établie pour comparer deux techniques différentes de construction. En revanche, la prise en compte de la phase d'usage est plus récente. Ceci est liée à des verrous scientifiques qui sont explicités dans la première sous section de cette partie. Après avoir levé en partie ces blocages, nous avons travaillé sur l'optimisation du profil longitudinal d'un projet routier afin de minimiser l'énergie consommée lors de la construction et lors de l'usage. Ceci nous a amené à proposer la méthodologie Sloop pour Slope Optimisation. La dernière sous section de cette partie traite de nos apports dans l'étude de l'influence de la texture sur la résistance au roulement.

3.1 Verrous scientifiques

Dans le domaine routier, il existe quelques outils d'évaluation des impacts environnementaux (Ecorce, etc.) mais ceux-ci se concentrent uniquement sur les phases de construction et de maintenance. La méthodologie d'évaluation utilise des unités fonctionnelles basées sur le profil en travers de la chaussée. Or, la prise en compte de la phase d'usage nécessite d'intégrer d'une part le profil en long et d'autre part les caractéristiques de trafic circulant dessus. Il faut donc modifier l'approche utilisée dans le cadre de cette évaluation. Quelques travaux ont été réalisés en ce sens (Santos et al., 2017) (Bryce et al., 2014) mais il reste de nombreux verrous scientifiques à lever. Parmi ceux-ci :

- définir des unités fonctionnelles prenant en compte le profil en long de l'infrastructure ;
- choisir/développer des modèles de consommation des véhicules légers et poids lourds prenant en compte les caractéristiques géométriques (pente, dévers, rayon de courbure) et les propriétés de surface (résistance au roulement qui a jusqu'à présent été négligée dans les évaluations alors que son impact ne l'est pas) ;
- développer/utiliser des modèles d'évolution du trafic permettant une projection réaliste à 30 ans (période pour laquelle on réalise généralement le dimensionnement des chaussées) et ce pour les différentes catégories de véhicules ;
- développer des méthodes d'optimisation du profil routier sur des critères de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre, tout en respectant les guides de conception routière.

Afin de répondre à ces verrous scientifiques, le laboratoire EASE a initié une coopération avec le LTE. Cette coopération a porté sur l'évaluation de la phase d'usage en utilisant des modèles de consommation développés par le LTE.

3.2 Sloop : l'optimisation des Pentes

Lors de la conception d'un projet routier, le dessinateur propose un profil longitudinal :

- qui respecte les règles de conception basées sur des préoccupations en sécurité routières comme la visibilité, le maintien du véhicule sur la voie, etc.
- en adéquation avec le terrain naturel, celui-ci peut-il être utilisé ? Doit-il être traité ? Doit-il être retiré ?
- qui tente d'équilibrer les remblais et les déblais afin de minimiser les transports de matériaux.

Le concepteur du tracé tient donc compte de la phase d'usage, principalement, à travers la problématique de la sécurité. Notre étude porte sur l'optimisation de profil longitudinal d'un projet routier de telle sorte que ce profil minimise l'énergie consommée ou les Gaz à effet de serre (GES) émis sur le cycle de vie de la route en tenant compte de la phase de construction mais aussi de la phase d'usage. Ce profil doit aussi être en adéquation avec les règles de conception. Nous avons appelé cette méthodologie : Sloop pour Slope Optimisation.

Dans la suite, nous nous concentrons sur l'énergie mais l'étude a bien été menée sur deux critères les GES et l'énergie. La minimisation portant soit sur les GES soit sur l'énergie mais pas sur les deux critères en même temps.

Nous présentons la méthodologie de l'évaluation de la construction puis celle de l'usage. A partir de ces deux évaluations, nous pouvons optimiser le profil longitudinal. C'est l'objet de la troisième partie. Enfin, la quatrième partie présente l'application de cette méthode sur un chantier récent de la RN7.

3.2.1 Évaluation de la construction

Nous avons montré que , sauf cas extrême, la différence entre deux profils longitudinaux pour ces deux critères provenaient de la tâche de terrassement.

L'évaluation de la tâche de terrassement se base sur la différence d'altitude entre le terrain naturel et le projet routier ainsi que sur le traitement des sols. La première étape consiste à calculer les volumes de déblais et de remblais nécessaires pour modeler le terrain naturel. C'est une étape bien connue des concepteurs.

Connaissant les volumes de remblais, V_b , et de déblais, V_c , le calcul de l'énergie, E_c, s'effectue avec les équations suivantes.

$$\begin{aligned} \mathrm{E_c} &= \mathrm{e_e} \times \mathrm{V_b} + \mathrm{e_{cnu}} \times (\mathrm{V_c} - \mathrm{V_b}) \ \text{ if } \mathrm{V_c} \geq \mathrm{V_b} \\ \mathrm{E_c} &= \mathrm{e_e} \times \mathrm{V_b} + \mathrm{E_{AddMat}} \ \text{ if } \mathrm{V_c} < \mathrm{V_b} \end{aligned} \qquad (2)$$

e_e est l'énergie consommée par m³ pour les remblais. e_{cnu} est l'énergie consommée par m³ pour les matériaux non utilisés. Ces ratios sont calculés à partir des énergies d'extraction par m³, des énergies de transports, de la distance moyenne entre les remblais et les déblais, du taux de chaux pour le traitement des remblais, etc.

E_{AddMat} est l'énergie consommée pour l'ajout de matériaux dans le cas de chantier déficitaire.

3.2.2 Évaluation de l'usage

Cette partie a été effectuée en collaboration avec le laboratoire transport et environnement (Lte) de l'Ifsttar/Bron. Nous avons défini cinq classes de véhicules :

1. poids lourd articulé, 5 essieux, 40 tonnes max. Comme les camions ne sont pas tout le temps à pleine charge, cette catégorie a été scindée en deux parties : les véhicules chargés au maximum et les véhicules chargés à 25 tonnes.
2. poids lourd rigide, 2 essieux, 19 tonnes max
3. véhicule particulier essence
4. véhicule particulier diesel
5. Véhicule utilitaire (Van) transportant entre 500 kg et 3 tonnes.

Pour chacune des classes de véhicule, nous avons utilisé un modèle de véhicule afin de simuler un aller et un retour sur le profil longitudinal du projet routier. Ces modèles et cette simulation ont été effectués avec le logiciel Vehlib du Lte. C'est un logiciel basé sur la dynamique du véhicule. Il permet une analyse très fine du comportement du véhicule par rapport à l'infrastructure. Ce modèle permet, notamment, d'estimer l'énergie primaire consommée ainsi que les GES émis.

3.2.3 Optimisation

Après avoir défini les méthodologies pour évaluer la phase d'usage et la phase de construction en fonction du profil longitudinal du projet routier, nous pouvons optimiser celui-ci de telle sorte qu'il minimise la consommation d'énergie primaire ou l'émission de GES.

Nous devons paramétriser ce profil longitudinal pour que l'algorithme d'optimisation trouve l'optimum en modulant les paramètres du profil. Nous avons choisi de rester proche des pratiques professionnelles en modélisant le profil comme une succession de segments reliés entres eux par des arc de cercle. La figure suivante (Illustration 11) illustre cette construction.

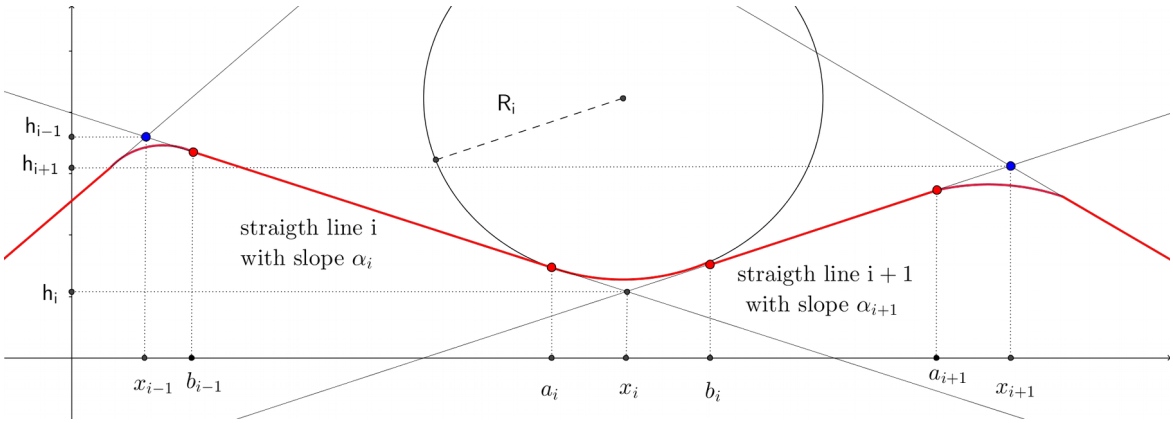


Illustration 11: Construction d'un profil longitudinal à partir de segments reliés entres eux par des arcs de cercle

L'optimisation s'écrit sous la forme suivante.

$$\underset{x_k, \alpha_k,\, R_k,\, k=1\ldots n-1\; R_0\; R_n\; \alpha_n}{\text{minimize}} \quad \mathrm{J(Ps)}$$
$$\text{subject to } \mathrm{Ps(x}_o) = \mathrm{Ps}_o,\ \mathrm{Ps(x}_f) = \mathrm{Ps}_f$$

avec x_k est l'abscisse du segment k, α_k est la pente de ce segment et R_k est le rayon du cercle qui relie le segment k au segment k+1.

Ps est le profil longitudinal construit à partir de ces paramètres. J(Ps) est l'évaluation de la phase de construction et de la phase d'usage du profil longitudinal Ps en terme d'énergie primaire ou de Gaz à effet de Serre. C'est ce critère que nous souhaitons minimiser.

3.2.4 Applications

La méthodologie Sloop a été appliquée sur une route récemment construite. Il s'agissait d'évaluer Sloop sur un cas bien documenté.

Nous avons choisi le contournement de deux villages par la RN7. Nous nous sommes limités à une portion de 8.8 km sur laquelle nous avions des données de chantier. Le trafic a été mesuré pendant plusieurs mois avec des radars qui permettent de différencier les classes de véhicule. Ainsi, nous pouvions évaluer de manière plus fine la phase de construction et la phase d'usage. Il faut noter que ce cas n'a pas été choisi en terme de potentiel de gain pour Sloop. Nous pouvons le considérer comme un chantier moyen.

L'algorithme d'optimisation nous a fourni le profil illustré par la figure suivante (Illustration 12). Cet algorithme démarre avec un profil initial qui est celui de la route existante.

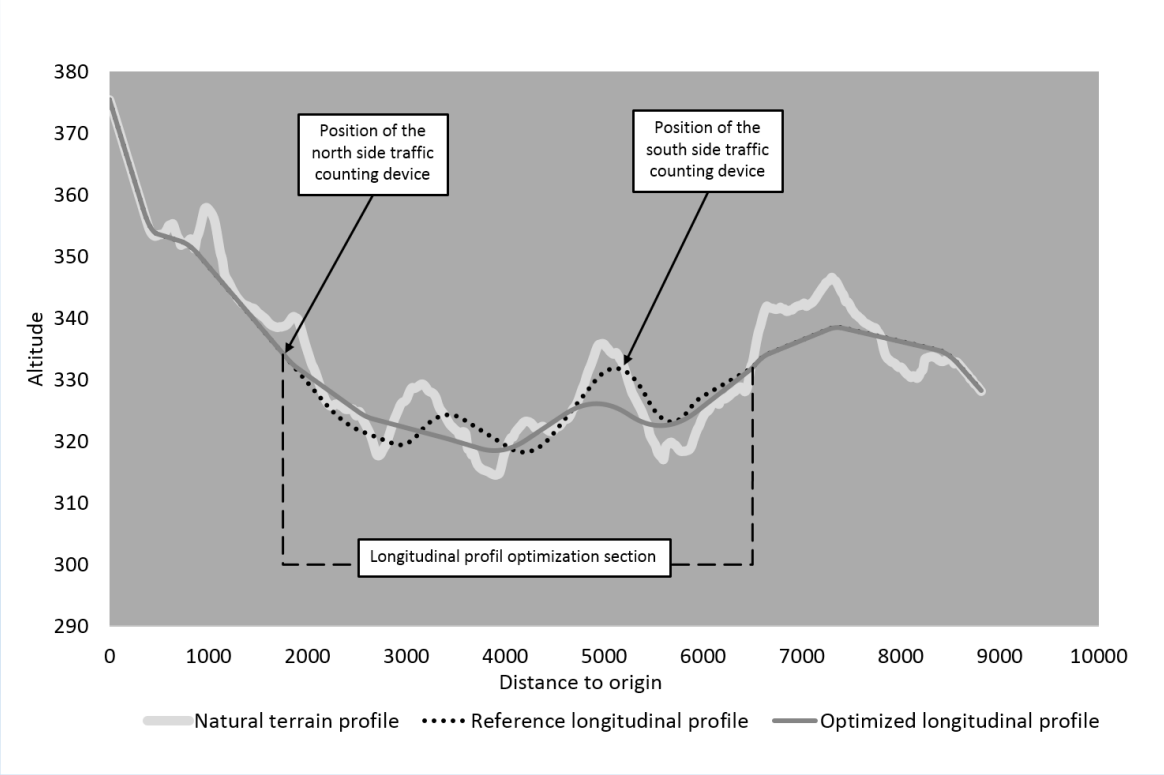


Illustration 12: Terrain naturel, profil de la route, profil optimisé

En considérant le trafic identique sur 10 ans, nous obtenons les résultats globaux dans le tableau suivant. .

	Construction	Usage	Total
Energie sur le profil initial (TJ)	34,8	476,4	511,2
Energie sur le profil optimisé (TJ)	31,0	451,3	482,3
GES sur le profil intial (tonnes eq CO2)	5950	33704	39654
GES sur le profil optimisé (tonnes eqCO2)	4506	31930	36436

Les gains sont de l'ordre de 10 % sur les gaz à effet de serre et de 5 % sur l'énergie primaire consommée. Mais surtout, les gains sur la phase d'usage représente une part importante de la construction (70 % de l'énergie et 30 % des gaz à effet de serre). De manière étonnante, l'optimisation réussit à fournir une solution qui est meilleure que le profil actuel de la route aussi bien sur la phase de construction que sur la phase d'usage. L'optimisation a été faite en considérant le critère de l'énergie. Mais partant de ce profil, l'algorithme ne trouve pas un profil meilleur pour les GES.

Dans cette étude, nous n'avons pas eu le temps d'analyser en profondeur le problème d'optimisation aussi bien en terme d'algorithme de résolution qu'en terme de formulation du problème. Cela pourrait être l'objet d'une future thèse. Ce travail a fait l'objet d'un article soumis dans une revue.

3.3 Résistance au roulement

3.3.1 Définition de la résistance au roulement

La résistance au roulement résulte de la dissipation d'énergie engendrée par une roue roulant sur une surface rugueuse de chaussée. Elle se définit comme le rapport entre la force horizontale générée à l'interface pneu/chaussée Fx et la charge verticale à la roue Fz.

La résistance au roulement est due d'une part à la déformation de la structure de chaussée et d'autre part à la déformation de la gomme du pneumatique sur la rugosité de la route (longueurs d'ondes situées dans le domaine de l'uni, de la mégatexture et de la macrotexture). Des travaux de recherche ont ainsi montré que la résistance au roulement était corrélée à ces différentes échelles de texture (Sohaney and Rasmussen, 2013), (Sandberg, 1990), (Anfosso-Lédée et al., 2016).

La résistance au roulement a un effet direct sur la consommation des véhicules et plusieurs modèles ont été développés au cours des vingt dernières années afin d'estimer cette relation. La section 3.3.2 présente brièvement les deux modèles de la littérature sélectionnés dans le cadre de ces travaux. La section 3.3.3 présente quelques évaluations de l'effet de la résistance au roulement sur la consommation d'énergie totale et sur les gaz à effet de serre dans le cadre d'une analyse de cycle de vie incluant les phases de construction, maintenance et usage.

3.3.2 Résistance au roulement et consommation des véhicules

Deux modèles de la littérature ont été utilisés dans le cadre de cette étude : Miriam (Hammarström et al., 2012) et Vehlib (Vinot et al., 2008). Le modèle Miriam est un modèle semi-analytique qui prend en compte la vitesse du véhicule, la résistance au roulement, les caractéristiques géométriques de la route (profil en long et profil en travers) et l'aérodynamique du véhicule. Un exemple de variation de la consommation d'un poids lourd en fonction de la macrotexture (PMP en mm) et de l'uni (IRI en mm/m) est fourni ci-après (Illustration 13) (Cerezo et al., 2016). On peut observer une tendance linéaire entre consommation et niveau de macrotexture, ce résultat ayant été confirmé dans le projet Rosanne (Anfosso-Lédée et al., 2016).

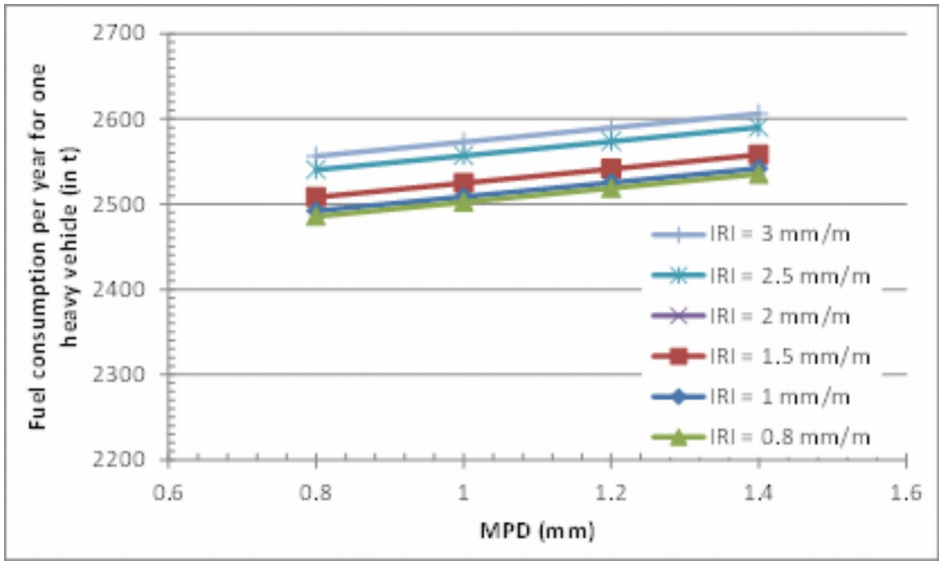


Illustration 13: Consommation annuelle d'un poids lourd en fonction de l'uni (IRI) et de la macrotexture (MPD) (Cerezo et al., 2016)

Le modèle Vehlib quant à lui est un modèle de dynamique du véhicule qui permet de prendre en compte finement la motorisation et les caractéristiques du véhicule (charge, aérodynamique). Les deux modèles ont été utilisés en parallèle lors de l'évaluation de la phase d'usage, chacun permettant de mettre en avant un aspect du problème (Miriam pour le profil en long et la résistance au roulement tandis que vehlib est plus centré sur le véhicule).

3.3.3 Effet sur la consommation et sur les GES

Une première évaluation de la consommation d'énergie et des émissions de Gaz à effet de Serre a été réalisée en considérant un cas pratique. L'objectif était de mettre en place la méthode de calcul et d'identifier les enjeux qui pouvaient exister en terme de résistance au roulement.

3.3.3.1 Description du cas d'étude

Pour ce faire, le chantier de la RN7 a été considéré dont les données ont été analysées dans (Jullien et al., 2015). Il s'agit d'une section de 8,8 km à 2x2 voies présentant des variations importantes de profil longitudinal. Le même revêtement est mis en œuvre sur toute la section. Le calcul des indicateurs d'impacts environnementaux en phase de construction et de maintenance a été réalisée avec l'outil Ecorce 2 en considérant une durée de vie de 30 ans (dimensionnement et programmation des opérations de maintenance).

Le trafic en 1998 était de 8800 veh/j. Une croissance linéaire du trafic de 4 % par an entre 1998 et 2000 puis de 1,5 %/an entre 2000 et 2020 a été considéré (*Source : MTETM, 2000 ; MTETM et DREAL, 2010*). Ainsi, un trafic moyen de 11110 veh/j dont 23 % de poids lourds a été pris en compte dans les calculs. La composition du parc était de 30 % de véhicules essence et 70 % de diesel. La vitesse de circulation maximale est de 90 km/h pour les poids lourds et 110 km/h pour les véhicules légers.

3.3.3.2 Évaluation de la phase d'usage

Tout d'abord, les calculs ont montré que quel que soit le modèle de consommation considéré, les propriétés de surface (uni et macrotexture) ont un impact très important dès lors que l'on considère l'usage sur 30 ans d'une infrastructure routière. La sur-consommation énergétique calculée en prenant comme référence une macrotexture de 0,8 mm et un uni de 0,8 m/km est multipliée par 4 en augmentant la macrotexture de 1 à 1,2 mm et l'uni de 1 à 2,5 m/km (Illustration 14). Pour mémoire, une valeur de 1 à 1,2 mm est représentative de la macrotexture d'un BBTM et l'Instruction Technique relative à l'adhérence des couches de roulement neuves du domaine routier (30/09/2015) spécifie des valeurs limites situées entre 0,30 et 0,80 mm selon la configuration su site. De même, une valeur d'IRI de 1 m/km correspond à un uni de très bonne qualité et une valeur de 2,5 m/km correspond à un uni acceptable. Du point de vue de la conception routière, il pourrait y avoir un gain appréciable en termes d'énergie consommée en limitant les valeurs de macrotexture et d'uni tout en respectant le niveau de sécurité et de confort de l'infrastructure.

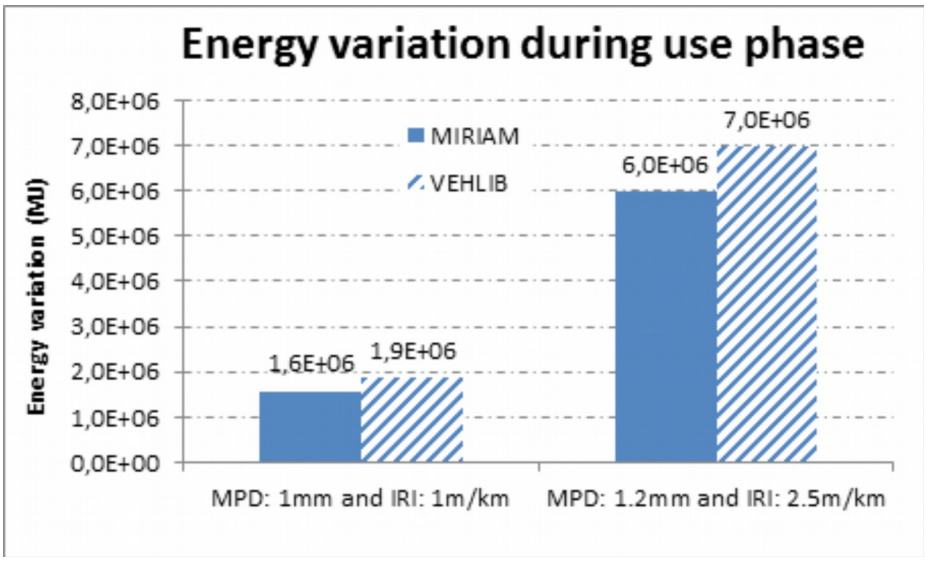


Illustration 14: Consommation d'énergie pendant la phase d'usage en fonction de la macrotexture et de l'uni (Cerezo et al., 2016)

Concernant les émissions de gaz à effet de serre, les résultats sont similaires (Illustration 15). Ces valeurs globales d'émissions ont été calculées en considérant les données issues du logiciel Copert IV

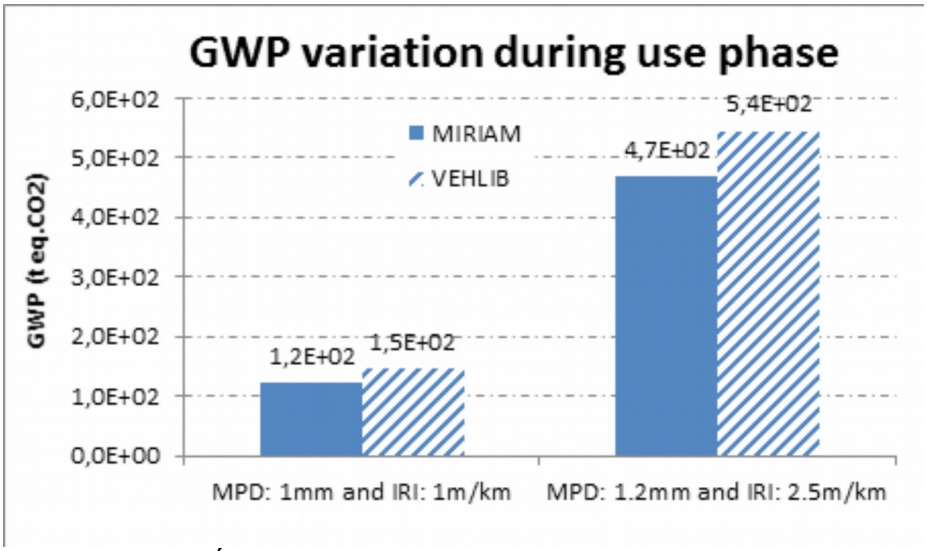


Illustration 15: Émissions de GeS pendant la phase d'usage en fonction de la macrotexture et de l'uni (Cerezo et al., 2016)

On observe ainsi qu'une baisse légère des valeurs de macrotexture (1,2 à 1,0 mm) et des valeurs d'uni (2,5 à 1 m/km) permet de diviser par 4 la surproduction d'émissions par rapport à une situation de référence à 0,8 mm en macrotexture et 0,8 m/km en uni, en considérant une utilisation sur 30 ans de l'infrastructure routière.

Ces premiers calculs montrent donc qu'une variation légère des caractéristiques de surface tout en restant à des niveaux satisfaisants de performances au regard de la sécurité et du confort permet un gain notable en termes d'énergie et de GES à l'échelle d'une flotte de véhicules.

4 Conclusion-Perspective

Le point de départ de notre recherche était la comparaison environnementale de différentes techniques de construction d'infrastructure de transport. Ce travail est matérialisé par le logiciel Ecorce. Il s'agissait de sélectionner et d'améliorer les techniques de construction pour réduire les impacts environnementaux.

Cependant, les impacts environnementaux d'une infrastructure de transport sont, pour des critères comme les GES ou l'énergie, imputables pour une grande partie à la phase d'usage. L'idée initiale de notre recherche fut donc d'évaluer et de proposer des solutions afin de limiter les impacts de la phase d'usage dès la conception du projet par l'optimisation des matériaux ou des tracés.

Aborder la phase d'usage étend considérablement les domaines à étudier. Pour arriver à des résultats concrets, nous avons restreint notre champ d'investigation à deux critères : les GES et l'énergie. Par ailleurs, nous avons travaillé en collaboration : avec la SNCF réseau sur la partie ferroviaire, avec le Laboratoire Transport et Environnement sur la partie routière.

Ainsi, dans le domaine ferroviaire, nous avons proposé une méthodologie d'évaluation appelée PEAM (Project Energy Assessment Method) que nous avons appliquée pour évaluer et comparer deux tracés sur le projet de ligne à grande vitesse Montpellier-Perpignan.

Dans le domaine ferroviaire, nous sommes allés au bout des objectifs initiaux du livrable, car nous avons aussi considéré la ligne classique existante, nous nous sommes donc situés au niveau d'un réseau.

Dans le domaine routier, nous avons proposé une méthodologie appelée Sloop (Slope optimisation) afin d'optimiser le profil longitudinal d'un tracé routier pour limiter l'énergie ou les émission de GES pendant les phases de construction, de maintenance et d'usage. Nous l'avons appliqué sur un projet récent de modification du tracé de la RN7 afin d'évaluer son potentiel. Ainsi, sur ce cas, nous avons montré que nous pouvions baisser de 10 % les émissions de GES en phase d'usage en proposant un profil longitudinal optimisé et réaliste au regard des critères de conception routière.

Nous avons également contribué à démontrer l'influence de la texture sur la consommation de carburant en étudiant l'impact de la résistance au roulement du revêtement de chaussée. Ceci ouvre des perspectives importantes concernant la gestion des réseaux d'infrastructure. En effet, certaines techniques bas coût comme les enduits ont des macrotextures importantes qui pourraient être à l'origine de surconsommation.

Alors que le domaine routier était notre domaine de prédilection, nous sommes allés moins loin que dans le domaine ferroviaire en n'atteignant pas l'échelle du réseau comme le titre initial du livrable le présuppose. Cela tient à la différence de culture entre les deux domaines. Le propriétaire de lgv tient compte explicitement de l'énergie qu'il va facturer à l'entreprise ferroviaire. Le propriétaire d'un réseau routier n'est pas dans cette situation. Il a, donc, été, pour nous, plus facile de susciter des collaborations avec des entreprises du domaine ferroviaire que dans le domaine routier. Cependant, nos résultats récents nous rendent optimistes pour nouer de nouvelles collaborations dans ce secteur.

Nous avons proposé une suite à ce travail pour le contrat d'objectif et de performance 2017-2021. Cette proposition a été validée par l'Ifsttar et ses tutelles. Nous utiliserons nos acquis concernant l'évaluation de la phase d'usage pour orienter nos travaux vers l'écoexploitation des infrastructures de transport.

Il s'agira de proposer un outil d'évaluation des impacts environnementaux qui prendra en compte la phase d'usage ce qui permettra de synthétiser nos résultats et de les proposer via un logiciel adapté à la profession. Nous travaillerons également sur la potentialité d'éco-conduite des infrastructures routières selon l'adéquation entre tracé et vitesse d'usage à travers une thèse qui a commencé fin 2016 en cotutelle avec l'université de Sarajevo. Nous continuerons à travailler sur la résistance au roulement et sur l'influence des paramètres géométrique des tracés sur la consommation au sein du projet Danois Rose. Nous avons prévu une ouverture au mode doux en étudiant l'usage des pistes cyclables en développant un appareil permettant de mesurer la « cyclabilité » des itinéraires à vélo, la « cyclabilité » étant la mesure de l'énergie d'usage.

Lors de la prise en compte de la phase d'usage, nous avons concentré nos travaux sur deux critères : les GES et l'énergie. Sans se disperser, nous nous intéresserons progressivement à d'autres indicateurs comme les émissions de particules fines.

Enfin, nous sommes, actuellement, limités dans nos évaluations par nos hypothèses simplistes sur le trafic. Nous devrons monter des collaborations afin de construire différents scénarios d'évolution permettant de fournir des évaluations plus riches tenant compte, notamment, de l'arrivée du véhicule autonome.

5 Bibliographie

Anfosso-Lédée, F., Cerezo, V., Karlsson, R., 2016. Experimental validation of the rolling resistance measurement method including updated draft standard, (No. Deliverable 3.6). Collaborative Project FP7- ROlling resistance, Skid resistance, ANd Noise Emission measurement standards for road surfaces (ROSANNE).

Bosquet, R., 2015. Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse. université de Nantes, Nantes.

Bosquet, R., Jullien, A., Vandanjon, P.-O., Dauvergne, M., Sanchez, F., 2014. Eco-design model of a railway: A method for comparing the energy consumption of two project variants. Transp. Res. Part Transp. Environ. 33, 111–124. doi:10.1016/j.trd.2014.08.003

Bosquet, R., Vandanjon, P.-O., Coiret, A., Lorino, T., 2013. Model of High-Speed Train Energy Consumption, in: International Conference on Railway Engineering and Management, World Academy of Science, Engineering and Technology (Vol 7 Nr 6). Presented at the International Conference on Railway Engineering and Management, Copenhagen, Denmark, pp. 1915–1919.

Bosquet, R., Vandanjon, P.-O., Gautier, M., Coiret, A., Cazier, O., 2014. Influence of railway gradient on energy efficiency of high speed train, in: Proc. Transport Research Arena 5th Conference. Presented at the Transport Research Arena 5th conference, Paris, France, p. 8 p.

Bryce, J., Santos, J., Flintsch, G., Katicha, S., McGhee, K., Ferreira, A., 2014. Analysis of rolling resistance models to analyse vehicle fuel consumption as a function of pavement properties, in: Proc. 12th ISAP Conference on Asphalt Pavements, Raleigh,. Presented at the 12th ISAP Conference on Asphalt Pavements, Raleigh, North Carolina, USA. doi:10.1201/b17219-39

Cerezo, V., Dauvergne, M., Delfosse, A., Vinot, E., 2016. Assessment of energy consumption due to rolling resistance, in: 8th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements (MAIREPAV8). Singapore.

Coiret, A., Vandanjon, P.-O., Bosquet, R., Jullien, A., 2012. Energy consumption induced by operation phase of railways and road infrastructures, in: Road and Rail Infrastructure I I, Proceedings of 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2012. Presented at the CETRA 2012, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure, Stjepan Lakušić, Dubrovnik, Croatia, pp. 693–699.

Coiret, A., Vandanjon, P.-O., Bosquet, R., Soubrié, T., Baty, G., 2014. Experimental assessment of wind influence on high-speed train energy consumptions, in: Proc. Transport Research Arena 5th Conference. Presented at the Transport Research Arena 5th conference, Paris, France, p. 6 p.

Hammarström, U., Eriksson, J., Karlsson, R., Yahya, M.-R., 2012. Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions (No. VTI rapport 748A). VTI - The Swedish Transport Administration, Linköping Sweden.

Jullien, A., Cerezo, V., Keijzer, E., Lòpez, A.-M., Dauvergne, M., Muresan Paslaru, B., Giezen, C., Fernando Florez, R., 2015. Deliverable D1.4: benchmarking exercise to assess the set of proposed indicators in diverse road case studies, Collaborative Project FP7 - Development of a novel ECO-LABELing EU-harmonized methodology for cost-effective, safer and greener road products and infrastructures (ECOLABEL).

Lejeune, A., Chevrier, R., Vandanjon, P.-O., Rodriguez, J., 2016. Towards eco-aware timetabling: evolutionary approach and cascading initialisation strategy for the bi-objective optimisation of train running times. IET Intell. Transp. Syst. 10, 483–494. doi:10.1049/iet-its.2014.0309

Sandberg, U., 1990. Road Macro- and Megatexture Influence on Fuel Consumption, in: Meyer, W., Reichert, J. (Eds.), Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, pp. 460-460–20. doi:10.1520/STP23382S

Santos, J., Thyagarajan, S., Keijzer, E., Fernando Florez, R., Flintsch, G., 2017. Comparison of life cycle assessment tools for road pavement infrastructures, in: Transportation Research Board 96th Annual Meeting (TRB2017). Washington, USA.

Sohaney, R.C., Rasmussen, R.O., 2013. Pavement Texture Evaluation and Relationship to Rolling Resistance at MnROAD (No. MN/RC 2013-16). Minnesota Department of Transportation, St Paul, Minnesota, USA.

Vandanjon, P.-O., Coiret, A., Muresan Paslaru, B., Fargier, A., Bosquet, R., Dauvergne, M., Jullien, A., François, D., Labarthe, F., 2012. Practical guidelines for Life Cycle Assessment applied to railways project, in: International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction – Civil Engineering and Buildings. Presented at the International Symposium Life Cycle Assessment and Construction 2012, A. Ventura and C. de la Roche, Nantes, France, pp. 144–152.

Vinot, E., Scordia, J., Trigui, R., Jeanneret, B., Badin, F., 2008. Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius. Int. J. Veh. Syst. Model. Test. 3, 139. doi:10.1504/IJVSMT.2008.023835

6 Publications Ifsttar

ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales (ISI Web of Knowledge, Google Scholar, Harzing Publish or Perish, Pub Med…)

2014

[ACL.1] JULLIEN A., DAUVERGNE M., CEREZO V. « Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA ». Transportation Research Part D: Transport and Environment. May 2014. Vol. 29, p.56-65.

[ACL.2] BOSQUET R., JULLIEN A., VANDANJON P.-O., DAUVERGNE M., SANCHEZ F. « Eco-design model of a railway: A method for comparing the energy consumption of two project variants ». Transportation Research Part D: Transport and Environment. décembre 2014. Vol. 33, p. 111-124.

ACTI : Communications avec actes dans un congrès international

2012

[C-ACTI.1]; COIRET A., VANDANJON P.-O., BOSQUET R., JULLIEN A. « Energy consumption induced by operation phase of railways and road infrastructures ». In : 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure. Dubrovnik, Croatia, 2012. p. 693-699.

[C-ACTI.2]; VANDANJON P.-O., COIRET A., MURESAN B., FARGIER A., BOSQUET R., DAUVERGNE M., JULLIEN A., FRANÇOIS D., LABARTHE F. « Principles for Life Cycle Assessment Applied to railways project ». In : Proceedings of ACV 2012. International Symposium Life Cycle Assessment and Construction 2012. Nantes, France, 2012.

2013

[C-ACTI.3]; BOSQUET R., VANDANJON P.-O., COIRET A., LORINO T. « Model of high-speed train energy consumption ». In : International Conference on Railway Engineering and Management (ICREM 2013). Copenhagen, Denmark, 2013.

[C-ACTI.4]; JULLIEN A. « Eco-design for infrastructures in all transport modes. Congrès international ». In : Congrès international ICGE'13. ICGE'13. Tunis, Tunisie, 2013.

2014

[C-ACTI.5]; BOSQUET R., VANDANJON P.-O., GAUTIER M., COIRET A., CAZIER P.-O. « Influence of railway gradient on energy efficiency of high-speed train ». In : Transport Research Arena (TRA). Paris, France, 2014.

[C-ACTI.6]; COIRET A., VANDANJON P.-O., BOSQUET R., JULLIEN A. « Comparative wind influence on use phase energy consumption of roads and railway ». In : 3rd International Conference on Road and rail Infrastructure (CETRA 2014). Zagreb, Croatia, 2014.

[C-ACTI.7]; COIRET A., VANDANJON P.-O., BOSQUET R., SOUBRIÉ T., BATY G. « Experimental assessment of wind influence on high-speed train energy consumption ». In : Transport Research Arena (TRA). Paris, France, 2014.

[C-ACTI.8]; FREITAS SALGUEIREDO C., ORFILA O., SAINT PIERRE G., COIRET A., VANDANJON P.-O., DOUBLET P., DONCIEUX S., GLASER S. « Overview of strategies for reducing CO2 emissions during the use phase of passenger cars ». In : Transport Research Arena (TRA), Paris, 2014.

2016

[C-ACTI.9]; CEREZO V., DAUVERGNE M., DELFOSSE A., VINOT E. « Assessment of energy consumption due to rolling resistance ». In : 8th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements (MAIREPAV8). Singapore, 2016.

[C-ACTI.10]; COIRET A., VANDANJON P.-O., TUERO CUERVO A.-M. « Ecodriving potentiality assessment of road infrastructures according to the adequacy between infrastructure slopes and speeds limits ». In : 4rd International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2016). Sibenik, Croatia : [s.n.], 2016. p. 589-595.

RAPPORT - Rapport final sur Convention et Contrats

2010

[RAP.1]. FARGIER A. FRANÇOIS D., DAUVERGNE M. Optimisation du bilan énergie/carbone sur le cycle de vie par la conception. LCPC Nantes, 86 pages, 2010 (Contrat RFF/LCPC «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Tâche 1.1. Livrable 1.1.a Etat des connaissances sur l'analyse du cycle de vie des voies ferrées).

[RAP.2]. FARGIER A., JULLIEN A., FRANÇOIS D. Rail et route : impacts environnementaux – Etat de l'art. Direction Scientifique du LCPC, 2010.

2011

[RAP.3]. BOSQUET R., VANDANJON P.-O., COIRET A. Analyse documentaire sur les techniques et l'énergétique des transports ferroviaires. LCPC Nantes, 62 pages, 2011 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 1 de l'avenant au contrat RFF-IFSTTAR).

[RAP.4]. BOSQUET R., VANDANJON P.-O., COIRET A., LORINO T. Bibliographie sur le couple énergie/géométrie, 47 pages, 2011 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 1.2).

[RAP.5]. BOSQUET R., VANDANJON P.-O., COIRET A. Synthèse du travail sur l'énergétique ferroviaire LCPC Nantes, 23 pages, 2011 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 2 de l'avenant au contrat RFF/IFSTTAR).

[RAP.6]. DAUVERGNE M., JULLIEN A. Recueil de données et typologie de cas à évaluer, 43 pages, 2011 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» – Tâche 1.1 Définition d'une bibliothèque de cas d'étude – Livrable 2.1).

[RAP.7]. DAUVERGNE M., ROPERT C., BAUDRU Y., FARGIER A., FRANÇOIS D., JULLIEN A., Evaluation environnementale des chantiers via fiches remplies (Flux entrants de la phase construction de l'infrastructure), 2011. (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» – Tâches 2.1, 2.2, 2.3 : Evaluation environnementale des travaux, des ouvrages de franchissements et des autres éléments de supersturcture – Livrable 2.2).

[RAP.8]. JULLIEN A., DAUVERGNE M., FRANÇOIS D., GINOT A. Mode de discrétisation environnementale de LGV en phase avant-projet. LCPC Nantes, 33 pages, 2011 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» – Tâche 2.1 Discrétisation de l'infrastructure pour l'évaluation environnementale – Livrable 1.3).

[RAP.9]. LORINO T., BOSQUET R., COIRET A., PRUAL J.-M., VANDANJON P.-O., Plan d'expérience sur la LGV. LCPC Nantes, 47 pages, 2011 (Contrat RFF/LCPC «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» – Tâche 2.2 Conception d'un plan d'expérience (matériels roulants) – Livrable 1.5).

2012

[RAP.10]. DAUVERGNE M., LORINO T., JULLIEN A. Analyse de sensibilité des impacts en fonction du système, en vue d'une optimisation, 51 pages, 2012 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Tâches 2.4 : Optimisation - Livrable 2.4).

[RAP.11]. JULLIEN A., BAUDRU Y., DAUVERGNE M., FARGIER A., ROPERT C. Optimisation du bilan énergie/carbone sur le cycle de vie par la construction, 2012 (Contrat RFF-IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Mission 2 - Tâche 2.1, 2.2 et 2.3 : Evaluation environnementale des travaux ; des ouvrages de franchissement ; des autres éléments de superstructure, Evaluation environnementale d'un itinéraire - Livrable 2.3).

[RAP.12]. ROPERT C., LUMIÈRE L., FARGIER A., FRANÇOIS D. Rendu cartographique avec exploitation de l'impact transport, 2012 (Contrat RFF-IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 1.4).

[RAP.13]. VANDANJON P.-O., COIRET A., BOSQUET R., JULLIEN A. Compte rendu des expérimentations sur la LGV Rhin-Rhône, 123 pages, 2012 (Contrat RFF-IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 1.6).

2013

[RAP.14]. DAUVERGNE M., BOSQUET R., JULLIEN A. Optimisation du bilan énergie/carbone sur le cycle de vie par la conception - Rapport sur les sections à enjeux du projet retenu, 2013 (Contrat RFF/IFSTTAR «Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 1.8).

[RAP.15]. VANDANJON P.-O., BOSQUET R., COIRET A., LORINO T. Présentation du modèle global sélectionné et sa confrontation avec les expérimentations, 53 pages, 2013 (Contrat RFF/IFSTTAR « Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements» - Livrable 1.7).

2014

[RAP.16]. JULLIEN A., DAUVERGNE M., VANDANJON P.-O., FRANÇOIS D., COIRET A. Synthèse Finale: Méthodologie d'écoconception des voies ferroviaires, 60 pages, 2014 (Contrat RFF/IFSTTAR « Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements »).

2015

[RAP.17]. Jullien A., Cerezo V., Keijzer E., Lopez A.-M., Dauvergne M., Muresan B., Giezen C., Fernando Florez R. Deliverable D1.4: benchmarking exercise to assess the set of proposed indicators in diverse road case studies, Collaborative Project FP7 - Development of a novel ECO-LABELing EU-harmonized methodology for cost-effective, safer and greener road products and infrastructures (ECOLABEL), 106 pages, February 2015.

2016

[RAP.18]. Anfosso-Lédée, Fabienne, Véronique Cerezo, et Rune Karlsson. « Deliverable 3.6: "Experimental validation of the rolling resistance measurement method including updated draft standard" ». Collaborative Project FP7- ROlling resistance, Skid resistance, ANd Noise Emission measurement standards for road surfaces (ROSANNE), novembre 2016.

AP : Autres productions : Bases de données, logiciels enregistres, rapports de fouilles, guides techniques, catalogues d'exposition, rapports intermédiaires de grands projets internationaux, etc

2012

[AP.1]. TLIJA A. Modélisation de l'énergie liée à la phase d'usage des infrastructures routières et de leur trafic. Stage de Fin d'Etudes ingénieur, École supérieure de la statistique et de l'analyse de l'information (Tunisie), 74 p, 2012.

2013

[AP.2]. SHARMA A. Estimation embarquée de la résistance au roulement à l'aide d'un capteur logiciel. Ifsttar Nantes, France, Stage Master 2 : Ecole Centrale de Nantes, co-encadrement IFSTTAR/ IRCCyN, 2013.

[AP.3]. TOYNAN F. Eco-conception routière - Etude de l'impact de la géométrie routière sur la consommation d'énergie des véhicules, Stage master 2 génie civil : Université du Havre, 65 pages, 2013.

[AP.4]. YANG K. Identification de tronçons homogènes sur un parcours acquis par GPS et centrale inertielle. Ifsttar Nantes, France, Stage Master 2 : Ecole des Mines de Nantes, 33 pages, 2013.