485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 33

Approche holistique en faveur d'un système de fret ferroviaire plus durable

par Donato Zangani, coordinateur de projets de R&D chez D'Appolonia S.p.A.(1), Clemente Fuggini, ingénieur civil chez D'Appolonia(2), Isabelle De Keyzer, UIC(3), et alii*(4)*

Le projet de R&D SUSTRAIL à confinancement EU porte sur le développement d'innovations techniques pour le fret ferroviaire en vue d'accroître sa productivité. Coordonné par le Consorzio TRAIN dans le cadre du 7e PCRD (programme-cadre de recherche et développement technologique), il a été initié en 2011 pour une durée de 4 ans et vise une « approche holistique en faveur d'un système de fret ferroviaire plus durable ». Il est piloté par un consortium pluridisciplinaire réunissant des gestionnaires d'infrastructures, opérateurs de fret, industriels et universitaires de 13 pays européens. Par une combinaison novatrice de techniques, de matériaux et de modalités de gestion, les résultats attendus sont ambitieux : abaisser les coûts de maintenance et d'exploitation des wagons de fret, atteindre une vitesse de 140 km/h ainsi qu'une efficience et une résilience accrues. Trois démonstrateurs doivent à présent être testés en Angleterre, en Espagne et en Bulgarie. Il s'agit là d'un bon exemple de recherche appliquée menée au niveau européen.

Pour être compétitive, l'économie a fondamentalement besoin d'un système de transport de marchandises durable et performant. Lancé en 2011 pour une durée de quatre ans, le projet de l'Union européenne SUSTRAIL, « The Sustainable Freight Railway », vise à définir des solutions innovantes permettant au fret ferroviaire de répondre à l'évolution de la demande à l'horizon 2020. L'approche holistique de ce projet consiste à améliorer à la fois les véhicules de fret et les composants de la voie, en formulant en outre des recommandations à l'intention des gestionnaires d'infrastructures et des opérateurs de fret en vue d'une mise en œuvre à l'échelle d'un système complet.

De nouvelles structures et de nou-

Concevoir des soutions novatrices

Le projet SUSTRAIL du 7e PCRD (www.sustrail.eu), intitulé «The Sustainable Freight Railway : Designing the freight vehicle-track system for higher delivered tonnage with improved availability at reduced cost», entre dans sa dernière année. Il est en passe de matérialiser sur le terrain les résultats des activités R&D menées jusqu'à présent pour identifier puis concevoir des solutions innovantes touchant à la fois le véhicule de fret et l'infrastructure. En effet, ces nouveaux apports seront validés au crible des scénarios de rentabilité par des essais en ligne ou au banc. On pourra ainsi garantir le niveau de fiabilité requis des éléments constitutifs du système. Parallèlement, il s'agira d'établir la faisabilité des innovations au plan commercial grâce à une étude de marché détaillée et un examen des modèles économiques envisageables. L'objectif consistera à proposer une combinaison idéale de solutions innovantes applicables au véhicule de fret et à la voie, il se traduira par une réelle valeur ajoutée en termes de durabilité, de compétitivité et de disponibilité.

485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 34

veaux matériaux légers doivent contribuer à améliorer le comportement dynamique du matériel de fret, tout en accroissant sa fiabilité et en réduisant la maintenance des composants de la voie. Un consortium multidisciplinaire constitué de 29 organisations issues de 13 pays européens a été mis en place pour mener à bien le projet. Il se compose d'un ensemble équilibré de gestionnaires d'infrastructures, d'opérateurs de fret et d'industriels, et bénéficie de la participation de grandes entreprises et de PME ainsi que du concours d'universitaires.

Le projet est découpé en plusieurs lots ou *workpackages* (WP) décrits et articulés entre eux selon la structure du projet illustrée par la figure 11 *(voir page 39)*. Les lots de travaux (WP3 Véhicules et WP4 Voie) portant sur les principales innovations visées par le projet SUSTRAIL sont décrits ci-dessous *(lire encadré p. 38 pour la description des lots 1 et 2)*.

Innovations durables dans les véhicules de fret (WP3)

❒ *Le vehicule fret SUSTRAIL*

Les auteurs fédèrent leurs efforts pour concevoir un véhicule fret innovant et durable destiné aux nouveaux marchés européens. Les études de marché ont montré que le véhicule SUSTRAIL doit circuler jusqu'à 140 km/h avec une charge par essieu de 25 t maximum. Un objectif de 50 % de réduction des efforts transversaux a été retenu.

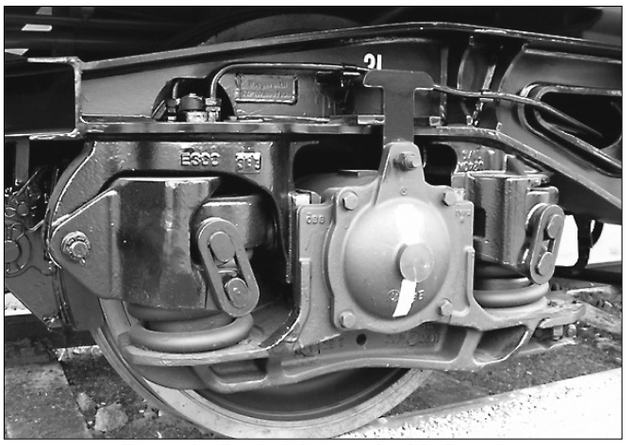


Figure 1 - Bogie à liaison double Lenoir

❒ *Innovations*

On a effectué un tour d'horizon technologique couvrant un large éventail d'innovations. Toutes celles susceptibles d'être intégrées à SUSTRAIL ont été hiérarchisées et les plus prometteuses ont été sélectionnées en vue de leur installation sur deux véhicules démonstrateurs. Le véhicule « conventionnel » bénéficie de l'optimisation d'une technique existante et un démonstrateur physique sera construit à la faveur du projet. Le véhicule « futuriste » exploite une technique qui n'a pas encore fait ses preuves dans le domaine ferroviaire mais recèle un important potentiel d'amélioration. On utilisera un démonstrateur virtuel pour illustrer l'avantage significatif apporté par ces améliorations. Les principales améliorations scientifiques et techniques visées sont les suivantes :

- Une suspension innovante fondée sur le bogie de type « Y25 » bien connu, mais équipé de doubles liaisons Lenoir, ce qui permet une plus grande flexibilité longitudinale avec des bras longitudinaux pour maîtriser la stabilité.
- Développements des systèmes de traction et de freinage pour les circulations de fret à haute vitesse et faible impact.

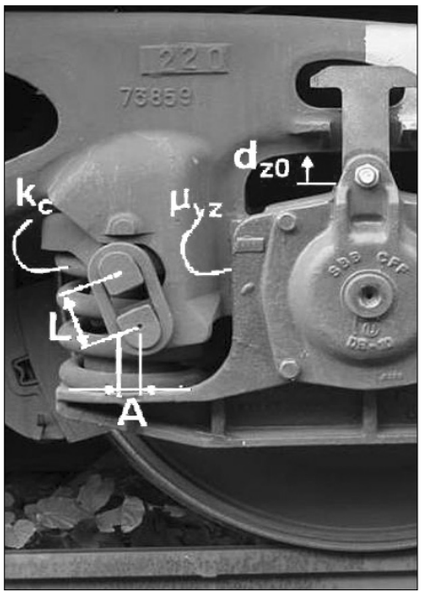


Figure 2 - La liaison Lenoir assortie des paramètres et de leurs variations

- Nouvelles conceptions et matériaux applicables à des structures de faible poids et à performances élevées.
- Techniques avancées de suivi de l'état des wagons.

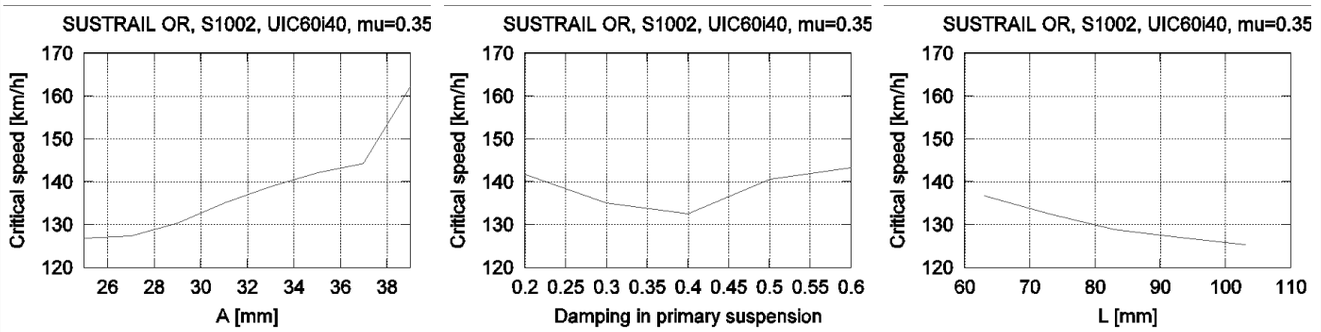
Des simulations informatiques aident à optimiser la suspension et à sélectionner des paramètres adéquats pour les différents composants. L'évaluation des résultats prend en compte la stabilité et la qualité de marche (accélérations verticales, transversales et longitudinales subies par le chargement transporté), la réduction des efforts sur la voie, de la dégradation superficielle du rail et de la détérioration des autres éléments de la voie. Le véhicule de référence possède des bogies Y25 et un fond plat ; il sera utilisé pour quantifier les avantages de la nouvelle conception.

➥ *Liaison double Lenoir*

Pour atteindre l'objectif critique de réduction des efforts transversaux de 50 %, la suspension classique de type Y25 n'a pas été retenue. Cette

485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 35

Figure 3 - Effet de l'angle formé par la liaison Lenoir, de la longueur et du coefficient de frottement sur la vitesse critique du véhicule SUSTRAIL



suspension, très répandue en Europe, présente des avantages en termes d'exploitation et d'entretien. Toutefois, elle se caractérise par un haut degré de rigidité, une fois épuisé le jeu longitudinal à hauteur de la boîte d'essieu, ce qui peut provoquer une inscription relativement difficile dans les courbes et une augmentation des efforts transversaux (Jonsson, 2002). L'utilisation de la suspension primaire à liaison double Lenoir, illustrée par la figure 1, a été analysée : elle génère une rigidité longitudinale nettement inférieure tout en utilisant des composants et des méthodes standard bien éprouvés dans le secteur ferroviaire.

Un modèle de véhicule SUSTRAIL a été défini avec une suspension à liaison double Lenoir à l'aide de l'outil de simulation informatique GENSYS (Stichel & Jendel, 2007), ce qui a aussi permis de simuler l'influence de la variation des paramètres de suspension sur la vitesse critique du wagon. Pour ce faire, on a utilisé une voie en alignement avec introduction d'un défaut transversal initial, suivie d'une voie idéale sans irrégularités. La figure 3 résume les effets des différents paramètres de suspension (affichés à la figure 2) sur la vitesse critique.

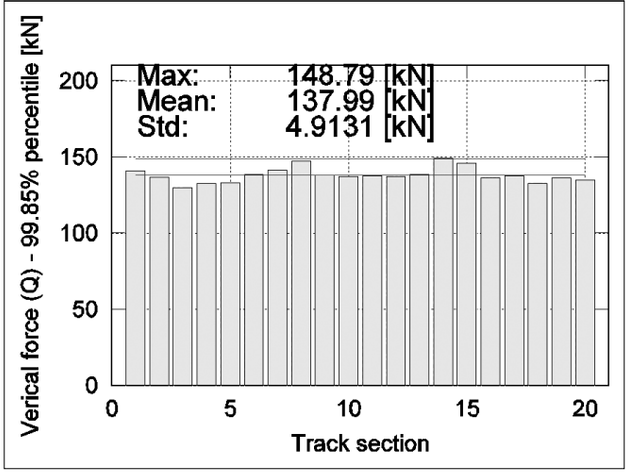
Les simulations ont été répétées à une vitesse de 120 km/h sur alignement présentant des irrégularités mesurées, sachant que l'effort vertical maximal s'exerçant sur la voie a été établi pour chaque section de voie (figure 4).

➥ *Liaisons longitudinales*

En vue d'améliorer le comportement dynamique du véhicule, on a évalué l'avantage de liaisons assurant une rigidité longitudinale entre boîtes d'essieu grâce au bras radial conçu par Herbert Scheffel (voir figure 5). Cette option a été étudiée auparavant dans le cadre du projet InfraRadial (Scholdan & Stephanides, 2007), qui portait sur le développement d'un bogie destiné aux véhicules lourds à coûts de possession réduits.

Les essais réalisés dans le cadre du projet Infraradial avec un bras radial sur quatre types différents de suspension primaire ont donné de bons résultats, mettant en évidence une stabilité de marche tout à fait satisfaisante et l'alignement des essieux montés dans les courbes. On a observé une réduction significative concomitante de l'usure des roues (Scheffel, 1974). Pour SUSTRAIL, des simulations informatiques ont été utilisées à nouveau pour optimiser la rigidité et les caractéristiques d'amortissement du bras radial. Les premiers résultats montrent que le véhicule équipé d'une suspension à liaison double Lenoir et de bras radiaux peut répondre aux exigences retenues pour le projet : stabilité à 140 km/h et réduction de 50 % des efforts transversaux sur la voie. Un prototype est en cours de construction ; il sera testé au cours de la période restante du projet.

Figure 4 - Effort exercé sur le rail par le véhicule SUSTRAIL circulant à 120km/h



485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 36

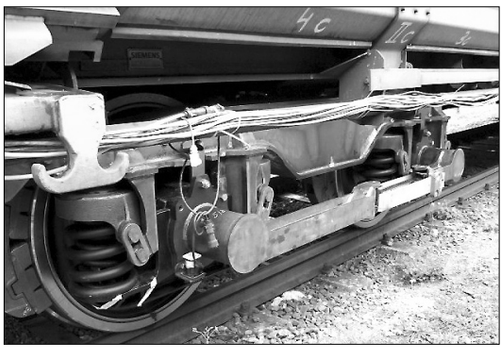


Figure 5 - Bras longitudinaux développés par le projet InfraRadial (Scheffel, 1974)

Vers une infrastructure plus résistante et intelligente (WP4)

Les innovations touchant la superstructure et l'infrastructure de la voie jouent un rôle majeur dans la recherche d'une compression significative des coûts : si l'on prend en compte les coûts d'entretien et de renouvellement d'un réseau typique, la voie et ses sous-couches peuvent représenter de 50 à 60 % des coûts totaux de l'infrastructure. Pour réaliser une infrastructure plus résiliente et intelligente, la démarche adoptée consiste à concevoir un système à partir des performances-cibles et à mettre en œuvre en appoint des outils de suivi pour surveiller certains composants critiques de l'infrastructure et de la superstructure de la voie.

Processus en cinq phases

On a recensé et hiérarchisé les défauts de voie à l'aide de l'AMDE (Analyse des modes de défaillance et de leurs effets) pour déterminer les champs d'activités majeurs *(voir figure 7)*. Ce travail a été entrepris avec les gestionnaires d'infrastructure impliqués dans le projet (Network Rail au Royaume-Uni, le gestionnaire d'infrastructures des chemins de fer bulgares et l'ADIF espagnole) pour assurer la prise en compte d'aspects critiques propres à leurs réseaux. L'AMDE permet de passer en revue et d'optimiser le processus de conception afin de réduire les défauts. Il constitue la phase initiale du processus de définition de modes de conception probabilistes (c'est-à-dire fondés sur la notion de performances recherchées). Les retombées de l'AMDE se traduisent par un ensemble de solutions innovantes qui contribuent à :

- réduire la gravité d'un défaut (nous acceptons un défaut mais réduisons son impact) ;
- réduire l'occurrence d'un défaut (nous acceptons un défaut mais planifions des actions visant à éviter sa récurrence fréquente) ;
- améliorer la détection de l'anomalie (par exemple, par la mise en œuvre de solutions pour surveiller l'état de la voie).

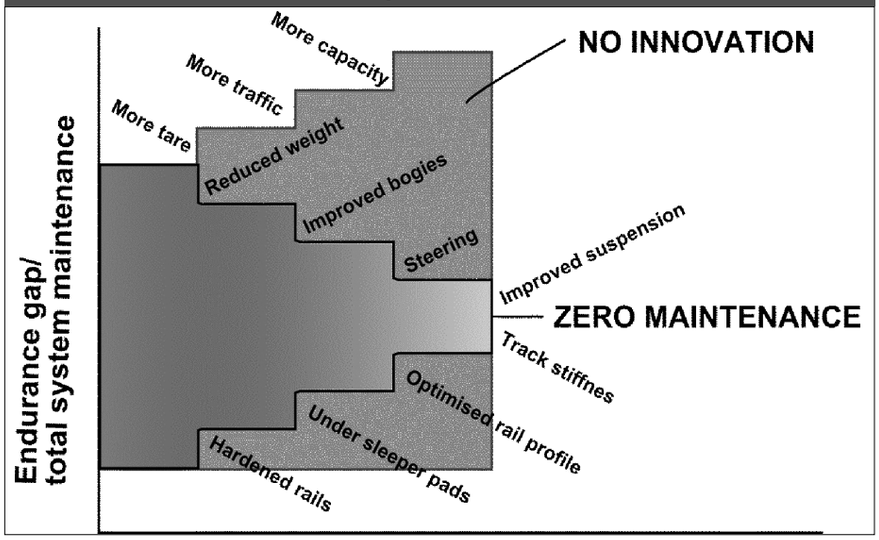
Les innovations ont ensuite été classées sur la base de l'indice de priorité des risques (IPR) qui correspond à la résultante des indices de gravité, d'occurrence et de détectabilité. Les principales innovations classées en tête sont énumérées dans le tableau de la fig. 8.

Etude économique (WP5)

Ce module du projet vise à évaluer la pertinence économique des innovations afférentes au véhicule et à la voie, et à formuler des recommandations pour la mise en œuvre d'un système complet, y compris l'introduction graduelle de nouvelles technologies et stratégies en vue d'une redistribution équitable des économies réalisées sur l'ensemble du système. La pertinence économique (« *business case* ») des innovations SUSTRAIL a été évaluée dès le démarrage du projet, parallèlement à l'étude technique. La priorisation des exigences et la sélection des innovations ont été opérées en fonction

L'étude de cas espagnole a trait à un corridor d'importance stratégique puisqu'il relie la péninsule Ibérique à la France et à la région centrale de l'UE.

Figure 6 - Vers une « zéro maintenance » par l'innovation dans le système véhicule-voie



485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 37

des coûts et avantages attendus pour les utilisateurs finaux, le secteur ferroviaire et, de manière générale, les autres acteurs, comme l'attestent les critères repris dans le *business case*.

Au cours de la phase suivante de SUSTRAIL (en cours), l'étude de la pertinence économique sera approfondie au regard des innovations retenues pour la voie et les véhicules. Les six scénarios envisagés (3x2) sont présentés en figure 10 *(voir page 39)*. L'étude de cas britannique fournit un ensemble de conclusions provisoires. Pour développer les outils d'analyse adéquats, on a défini certaines hypothèses de départ quant aux impacts des innovations SUSTRAIL côté véhicules, à savoir :

- une réduction de 5 % des redevances d'utilisation de la voie en raison d'une réduction des efforts dynamiques et d'une moindre dégradation de la voie ;
- une amélioration de 10 % de la fiabilité, exprimée en retards des trains par tonne-km ;
- une contraction de 7,5 % des coûts liés à la durée des parcours ;
- une réduction de 20 % des coûts de gazole pour une charge donnée ;
- une réduction de 10 % des coûts de maintenance des wagons et des coûts d'exploitation hors consommation de gazole ; une réduction de 20 % des émissions polluantes induites par l'abaissement de la consommation de gazole.

L'évolution des ces paramètres devrait générer certains avantages :

- Un gain net de 533 M€ pour les utilisateurs finaux (en valeur

Figure 7 - Phases du processus des activités orientées « performance »

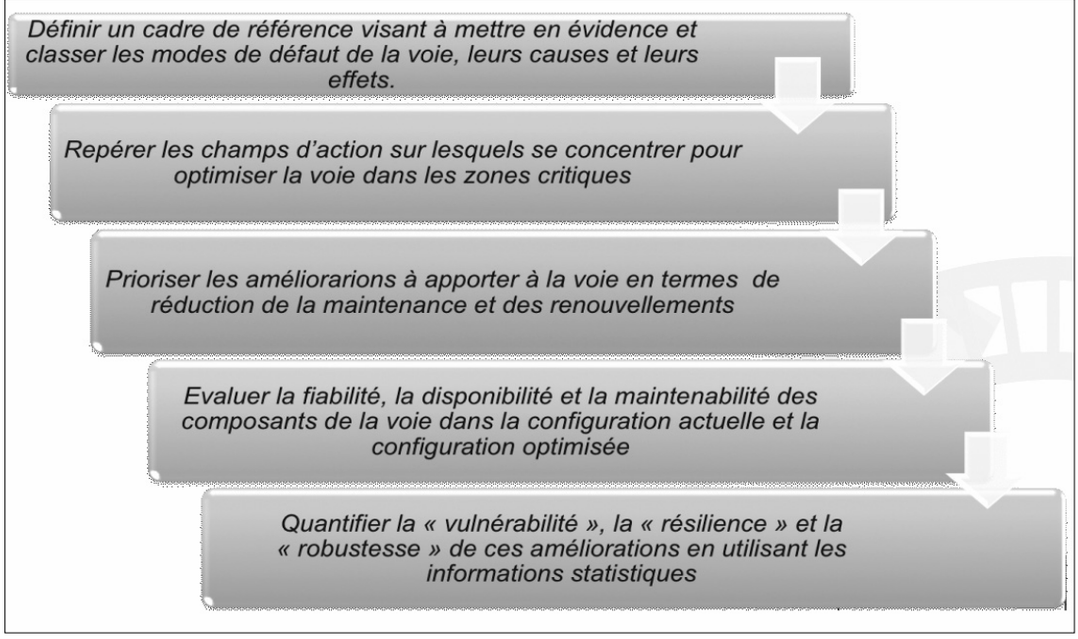


Figure 8 - Principales innovations d'infrastructures
(nb: dommages RCS = dommages dus à la fatigue de contact de roulement)

Rail	Augmentation de la section transversale du rail (réduction des occurrences). Meulage des rails (réduction de la gravité) par une meilleure prédiction des dommages RCF. Matériau amélioré (réduction des occurrences) par l'emploi d'un acier de rail premier choix.
Ouvrages en terre	Stabilisation des talus et pentes (réduction de la gravité) à l'aide de géotextiles multifonctions. Ouvrages en terre résistants (réduction de la gravité) grâce à des conceptions innovantes et/ou des techniques applicables aux sous-couches, validation des innovations antérieures dans ce secteur.
Voie	Suivi de la géométrie de la voie à une fréquence appropriée (amélioration de la détection) grâce à la mise en œuvre de techniques améliorées de surveillance de la géométrie de la voie et de prédiction de la dégradation géométrique de la voie.
Appareils de voie et croisements	Installation d'un système de lubrification (réduction de la gravité) pour un meilleur graissage des coussinets de glissement sous les rails d'appareils de voie. Essais à ultrasons (amélioration de la détection). Matériau de rail amélioré (réduction des occurrences) grâce à une flexibilité optimisée des appareils de voie.
Joints	Remédier au problème (réduction des occurrences), suivie d'un changement des attaches (amélioration de la détection).
Semelles de rail	Améliorer la durée de vie des semelles (réduction des occurrences) grâce à des spécifications et recommandations sur la géométrie, les matériaux, etc. (éventuellement conceptions nouvelles). Guides préconisant des composants appropriés en fonction des trafics, charges et vitesses (réduction de la gravité), accompagnés de directives sur l'optimisation de la rigidité de la voie.

485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 38

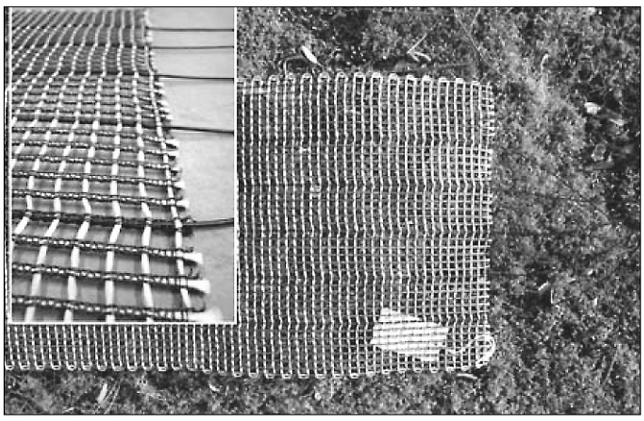


Figure 9 - Géotextiles multifonctions pour talus ferroviaires évolués

actualisée sur 30 ans, sur la base des prix et valorisations 2015 avec un taux d'actualisation sociale de 3,3 %), comprenant un gain de fiabilité, un gain en temps de parcours moyen avec des prix moins élevés pour le fret.

- Un bénéfice net de 306 M€ (valeur actualisée) imputable à la réduction des émissions de CO_2 par le secteur du fret dans son ensemble – sachant que ce montant atteindrait 665 M€ si l'on appliquait les valeurs officielles du Royaume-Uni au lieu des valeurs retenues par le projet IMPACT.
- Une augmentation de 2,5 % à 3,5 % de l'utilisation du mode ferroviaire pour le fret (en tonnes-km), avec une croissance atteignant 13 % dans le secteur de l'agro-alimentaire et des boissons.
- Une réduction de 14 % des rejets par le mode ferroviaire de polluants dans l'atmosphère à l'échelon local et régional.

L'étude en question décrit également la démarche analytique et la disponibilité des données appliquées dans les deux autres études de cas. L'étude de cas bulgare concernera un corridor présentant une proportion très élevée de transports internationaux conteneurisés, sur un axe où le rail détient une part de marché importante. A l'instar de l'étude de marché britannique, les prévisions de demande seront élaborées à l'aide d'analyses antérieures portant sur le même réseau. L'étude de cas espagnole a trait à un corridor stratégique puisqu'il relie la péninsule Ibérique à la France et à la région centrale de l'UE. Il offre en effet des opportunités de report modal de la route sur le rail à partir des ports de conteneurs d'Algesiras, Valence et Barcelone, caractérisés par le fait que la majeure partie des trafics ont la zone atlantique pour origine ou destination. On dispose de données sur la demande actuelle et les tendances, sachant que les coûts de transport par conteneurs, de consommation d'énergie et d'émissions de CO_2 sont très bien connus. Or, ceci constitue un point de départ intéressant pour élaborer des projections sur la demande à partir de méthodes centrées sur l'élasticité, analogues à celles appliqués dans l'étude de cas britannique.

L'étude de pertinence économique consiste à évaluer la mise en œuvre technique et son phasage. Les recherches bibliographiques sont en cours, l'objectif étant d'inventorier les acquis en termes de facteurs humains et d'enjeux opérationnels liés à l'intégration de systèmes véhicules-voie innovants dans l'en-

Les lots Benchmarking et Exigences du projet Sustrail

Le lot *Benchmarking* (WP1) a permis d'identifier les enjeux suivants :

Véhicules

- Les opérateurs s'intéressent prioritairement aux wagons intermodaux.
- Les wagons tombereaux à bords élevés connaissent également une large diffusion.
- L'âge des wagons présente une large amplitude de dispersion (4 à 37 ans).
- La plupart des wagons sont dotés de freins à sabots.

Infrastructure

- Les ouvrages en terre et les évacuations d'eau posent des problèmes spécifiques.
- Il en va de même pour les courbes à faible rayon, les fortes déclivités et les appareils de voie et traversées.
- Des perspectives d'amélioration se dessinent pour la conception des composants et les matériaux utilisables.

Exploitation

- Tous les itinéraires offrent un potentiel d'accroissement des capacités pour le fret.
- La contrainte première est la vitesse, or, l'accélération des circulations de fret permettrait une meilleure insertion dans les circulations de trains de voyageurs.

Le lot *Exigences* (WP2*)* définit les exigences de charge applicables aux véhicules et à la voie en vue d'améliorer substantiellement la durée de vie des constituants de la voie lorsqu'ils sont associés à des véhicules à faible impact. Ces exigences sont de plusieurs ordres :

- Exigences de charge pour les circulations de fret actuelles et futures.
- Exigences de conception de voie pour réduire la charge de maintenance et les coûts de possession grâce à des caractéristiques de véhicule optimisées.
- Priorisation des combinaisons techniques permettant de concevoir un système voie-véhicule fret adapté au transport de tonnages accrus.

485 TRS-07-(33 à 38)-SUSTRAIL-06-BAT 30/06/14 19:03 Page 39

Figure 10 - Scénarios du « Business Case »

Scénarios	Véhicule de référence (Y25)	Véhicule conventionnel amélioré	Véhicule futuriste
Voie de référence	i	ii	iii
Voie améliorée	iv	v	vi

vironnement ferroviaire existant. On consulte actuellement les parties prenantes au projet pour approfondir ces aspects ; une deuxième série de consultations est engagée depuis le début 2014, après définition complète des innovations. Ces activités se concrétiseront par plusieurs retombées :

- projection d'un échéancier pour l'introduction du nouveau véhicule dans le parc européen à partir de 2015 (part en % des véhicules UIC R/S, par an, avec indication de toute variation attendue par pays, zone, segment de marché, et de la part de fret en % profitant de l'innovation par tonne-km sur les segments de marché susmentionnés) ;
- projection d'un échéancier pour la mise en œuvre des innovations apportées à la voie sur le réseau européen à trafic mixte à partir de 2015 (% du réseau couvert par an, avec indication de toute variation attendue par pays, zone, segment de marché, et de la part de fret en % profitant de l'innovation par tonne-km sur les segments de marché susmentionnés) ;
- conclusions quant au phasage optimal sur lequel se fondent ces projections ;
- obstacles prévisibles à la mise en œuvre ;
- mesures requises pour surmonter ces obstacles, assorties d'un planning indicatif et d'un bilan des coûts, recettes et performances. ■

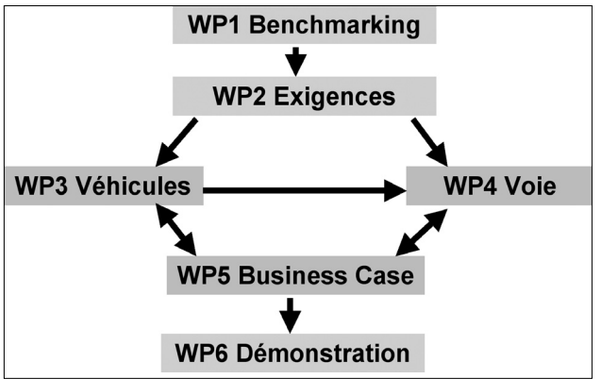


Figure 11 - La structure du projet Sustrail

(1) Donato Zangani est coordinateur du projet SUSTRAIL.

(2) Clemente Fuggini, ingénieur civil en surveillance structurale, contrôle des structures, structures et systèmes intelligents, analyse de fiabilité et modèles numérique, travaille pour D'Appolonia S.p.A. depuis 2009. Il est coordinateur adjoint du projet SUSTRAIL.

(3) Isabelle De Keyzer travaille à l'UIC depuis janvier 2008, où elle est chargée de la dissémination de projets collaboratifs de R&D cofinancés par la Commission européenne. Pour SUSTRAIL, elle est responsable du Work Package 7 : « Dissemination ».

(4) Les auteurs souhaitent remercier chaleureusement pour leur contribution active à cet article : Kevin Blacktop, Research & Development Specialist, NetworkRail ; Simon Iwnicki, Director of the Institute of Railway Research, University of Huddersfield ; Phillip Wheat, Senior Research Fellow, University of Leeds, Institute for Transport Studies.

Bibliographie

- Jonsson P.-A. (2002), « Freight wagon running gear – a review », KTH.
- Kik W., Scholdan D., Stephanides J. (2007), « Project InfraRadial – bogies for axle loads of 25 t – test and simulation » ; XXI Century Rolling Stock : Ideas, Requirements, Projects Conference, Saint-Pétersbourg.
- Scheffel H. (1974), « A new design approach for railway vehicle suspension », *Rail International*, n° 10, pp. 638-651.
- Stichel S. and Jendel T. (1998), « Running behaviour of freight wagons with three different types of running gear - simulations and tests », 4th International conference on railway bogies and running gear (Bogie'98), Budapest, septembre.