



Dossier thématique n° 10

Le système ferroviaire au cœur des transports



Mobilités

- 1 Introduction
- 2 Communiquer, naviguer et surveiller
- 3 Gestion optimale du trafic
- 4 Cybersécurité et sûreté
- 5 Géotechnique pour les infrastructures
- 6 Éco-conception des LGV
- 7 Transport de marchandises par train
- 8 Petites lignes ferroviaires
- Équipements de mesures remarquables



LE SYSTÈME FERROVIAIRE AU CŒUR DES TRANSPORTS

Par Marion Berbineau,

Directrice de Recherche et chargée de la coordination
des travaux de R&D ferroviaires pour l'Ifsttar

Depuis leur invention, les transports ferroviaires marquent les différentes périodes de l'histoire contemporaine. Souvent l'objet de grandes innovations, ils garantissent des déplacements de plus en plus rapides et sûrs, pour les personnes comme pour les marchandises. De nos jours, ce mode de transport est confronté à de nouveaux enjeux écologiques, sociétaux et numériques. Pour poursuivre l'innovation, une multiplicité d'acteurs, au sein d'un système ferroviaire, est mise à contribution.

Un mode de transport en perpétuelle évolution

Si le ferroviaire est considéré comme un mode de transport, il est aussi une industrie puissante. Or, le leadership mondial de l'industrie ferroviaire européenne est aujourd'hui remis en question¹ par l'émergence de grands acteurs industriels en Asie et particulièrement en Chine. La filière doit donc relever plusieurs grands défis au niveau européen : réduire de moitié les coûts du cycle de vie, doubler la capacité ferroviaire (le nombre de trains circulant en même temps), augmenter considérablement la fiabilité et la ponctualité, tout en maintenant le même niveau de sécurité et en réduisant les temps de mise sur le marché. Pour mieux répondre à ces défis concurrentiels, l'innovation est vitale et doit être abordée dans toute sa complexité en sollicitant l'ensemble des acteurs du système ferroviaire ainsi qu'en mobilisant tout un panel de disciplines scientifiques et de compétences techniques. Le train autonome, les concepts en rupture comme Hyperloop² ou Clip-Air³, sont des innovations majeures qui vont révolutionner le système ferroviaire dans sa globalité.

Un système ferroviaire riche mais complexe

Le système ferroviaire ne se limite pas aux trains et aux infrastructures. Il prend également en compte la signalisation, la gestion des circulations et des horaires, les télécommunications, la surveillance, la maintenance, etc.

Plus schématiquement, il représente un système complexe qui regroupe, lui-même, plusieurs sous-systèmes dans lesquels interagissent une multiplicité d'acteurs publics et privés : constructeurs, opérateurs, gestionnaires, organismes de certification et d'homologation, clients, etc. avec leurs propres systèmes de gouvernance.

La sécurité est la clef de voûte du système ferroviaire, c'est à la fois sa force et sa faiblesse. En effet, il est soumis à des méthodes et des processus de démonstration de conformité de la sécurité très exigeants qui aujourd'hui freinent l'innovation.

Enfin, le système ferroviaire, par ses infrastructures mais aussi ses gares, est inscrit dans les territoires et doit ainsi être questionné dans ses rapports à l'aménagement des territoires et des villes.

Un objet de recherche innovant

L'approche système du secteur ferroviaire favorise les échanges entre un certain nombre d'organismes et d'universités. Dans le paysage national, il convient de mentionner l'IRT Railenium, dont l'Ifsttar est l'un des fondateurs, et l'IRT SystemX⁴. Au niveau européen, le partenariat public-privé Shift2rail a été créé pour gérer et coordonner toutes les activités de recherche et d'innovation axées sur le transport ferroviaire.

L'approche système de l'Ifsttar prend en compte la complexité des territoires, des transports guidés, des grands objets d'ingénierie et d'innovation dont s'occupe l'Institut et où l'homme joue un rôle central.

Ses travaux de recherche s'articulent autour des thématiques infrastructures et ouvrages d'art, géotechnique, composants et systèmes clés (capacité ferroviaire, signalisation, sécurité, communications, cybersécurité, maintenance, fiabilité...) afin de répondre aux enjeux socio-économiques, environnementaux et d'aménagement du système ferroviaire.

Pour cela, l'Ifsttar dispose d'un large patrimoine d'équipements scientifiques et spécifiques qui lui permet de développer une recherche et une expertise de haut niveau.

1. Source <https://shift2rail.org/about-shift2rail/>

2. Le transport à hyper grande vitesse sous vide (Hyperloop) par Cédric Villani (2018)

3. Clip-Alir, l'avion modulaire pour un transport flexible.

4. « Destinés à supporter une stratégie industrielle de conquête sur des marchés porteurs, les instituts de recherche technologique (I.R.T.) sont basés sur des partenariats de long terme entre les établissements d'enseignement supérieur et de recherche et les entreprises. »

L'I.R.T. Railenium est dédié aux infrastructures ferroviaires et l'I.R.T. SystemX à l'ingénierie numérique des systèmes du futur.

Pour aller plus loin

Programme scientifique multi annuel et programme annuel Shift2rail

<https://shift2rail.org/research-development/key-documents/>

Rail2050 par the European Rail Research Advisory Council (ERRAC)

<https://errac.org/publications/rail-2050-vision-document/>



Contenus textes
réutilisables

Photo : Epictura

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>

1 COMMUNIQUER, NAVIGUER, SURVEILLER : DES FONCTIONS VITALES POUR LES TRAINS

Par **Marion Berbineau** et **Juliette Marais**,
Départements **COSYS**¹, Laboratoire **LÉOST**²

Le réseau ferroviaire doit se moderniser pour faire face aux défis sociétaux, environnementaux et technologiques qui s'annoncent. Les changements se portent notamment sur les systèmes de communications, de navigation et de surveillance. L'Ifsttar contribue, avec ses partenaires, à l'émergence et la maîtrise de ces nouvelles technologies pour permettre la circulation, en toute sécurité, des trains autonomes sans conducteur d'ici 2023³.

Des technologies de communication et de localisation embarquées à bord du train

Le réseau ferroviaire⁴ est divisé en intervalles appelés cantons. Ces portions de voie sont délimitées par des bornes aujourd'hui physiques, qui seront virtuelles demain. Ces bornes permettent de détecter l'entrée et la sortie du train dans le canton. Ce dernier assure ainsi une bulle de sécurité autour du train. Pour cela, il limite l'accès d'un canton à un seul train et permet d'éviter les collisions entre deux trains qui se suivent à des vitesses différentes.

Aujourd'hui, lorsque le train entre dans la zone, il communique avec l'infrastructure grâce à un système de radio sol-train. Une transmission radio courte portée (ou balise) lui indique également la vitesse limite ainsi que celle du canton suivant et sa position. Ce système de radio sol-train est un élément vital pour la gestion du trafic ferroviaire en sécurité.

Dans un futur très proche, il n'y aura plus ni bornes, ni balises physiques pour délimiter le canton, détecter la présence du train et transmettre les consignes de vitesse. Tout reposera sur des technologies de communication et de localisation sans fil embarquées à bord du train.

Cela permettra de réduire drastiquement les coûts de déploiement et de maintenance des infrastructures (seuls les rails seront fixés au sol). En outre, cela améliorera la flexibilité et l'efficacité de la gestion du trafic : les cantons seront de longueur variable et se déplaceront avec le train. C'est le concept du canton mobile et déformable. Pour continuer à assurer la sécurité du trafic, la position du train sera connue avec une très grande confiance et la communication radio devra être robuste dans toutes les conditions d'environnements du train.

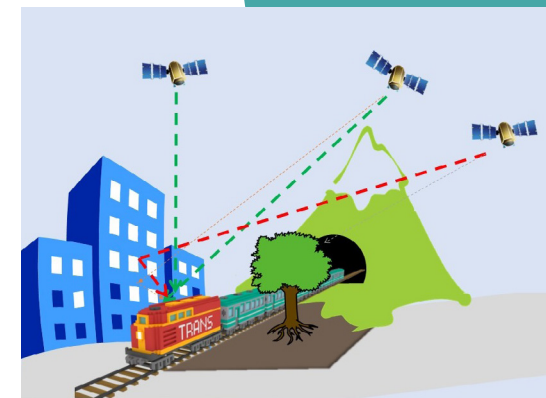
Accompagner et assurer la circulation des trains autonomes

La prochaine révolution, dès 2023, sera l'introduction sur le réseau ferré de trains autonomes sans conducteur. Comme pour l'aérien, cette étape demande la combinaison intelligente et sûre des trois fonctions vitales : communiquer, naviguer, surveiller.

Le système de communication radio devra s'adapter en temps réel en fonction des réseaux radio disponibles dans son environnement. Il évoluera de façon transparente avec les technologies émergentes comme la 5^e génération de téléphonie mobile (5G NR).

Le système de contrôle-commande de la circulation des trains doit pouvoir faire confiance à l'information de position du train quel que soit l'environnement géographique et même en présence d'interférences. Cette information reposera sur une combinaison de technologies : localisation par satellites (GNSS), systèmes inertiels, techniques radio de type Ultra Large bande (ULB) ou liées aux futurs systèmes de communications radio lors des passages dans les tunnels.

Pour assurer en sécurité la circulation des trains autonomes, le train devra être équipé (comme pour le véhicule autonome routier) de systèmes de perception courte et longue portée. Ces RADARS anticollisions, ces caméras, ces LIDARS devront fonctionner de jour comme de nuit. Ils transmettront des informations en temps réel sur la voie et l'environnement du train même à des vitesses très élevées (obstacle sur la voie, passage à niveau, etc.).



▲ La réception des signaux GNSS dans l'environnement ferroviaire dégrade les performances de localisation.

1. COSYS : Département Composants et Systèmes
2. LÉOST : Laboratoire Électronique Ondes et Signaux pour les Transports
3. Communiqué de presse SNCF « Des trains autonomes d'ici 2023 »
4. « Un réseau ferroviaire est un ensemble de lignes de chemin de fer, de gares et d'installations techniques diverses (atelier, dépôts, triages, embranchements particuliers, chantiers intermodaux...) qui permettent la circulation de convois ferroviaires ou trains dans un ensemble géographique donné ; région, pays, continent » Wikipédia

Pour aller plus loin

Marais J., Beugin J., Berbineau M., 2017, *A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 17p, DOI : 10.1109/TITS.2017.2658179.

Berbineau M., Kassab M., Gransart C., Wahl M., Cocheril Y., Masson E. ; Seetharamdoo D., Sanz D., Ghannoum H., Gatin O., *Le véhicule connecté dans les transports publics : technologies existantes et perspectives*, REE N° 4, 2014.

Berbineau M., Kassab M., Gransart C., Wahl M., Marais J., Seetharamdoo D., *IET, Clean Mobility and Intelligent Transport Systems, Chapter 3: ICT for Intelligent Public Transport Systems, state of knowledge and future trends*, 2015, ISBN 978-1-84919-895-0

À découvrir

Trajectoire
N13 juin 2017, p. 6,
J. Marais, Recherche GPS
fiable pour train autonome.



Contenus textes
réutilisables

Illustration : Ifsttar

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>





2 PLUS DE TRAINS, MOINS DE RETARDS GRÂCE À UNE GESTION OPTIMALE DU TRAFIC

Par Joaquin Rodriguez, Paola Pellegrini, Grégory Marlière,
Sonia Sobieraj-Richard et Pierre Hosteins,
Département COSYS¹

Qui n'a pas été confronté à des retards en prenant le train ? Mises à part des situations extrêmes, comme les grèves ou les pannes importantes, chacun d'entre nous garde à l'esprit une anecdote qui a déstabilisé son quotidien. La ponctualité légendaire du train doit-elle être remise en question alors qu'ils sont de plus en plus nombreux à circuler sur nos infrastructures ?

Les scientifiques de l'Ifsttar étudient les causes de ces retards et proposent des solutions innovantes pour permettre l'accroissement du nombre de trains sans dégrader la ponctualité.

▼ Passagers en gare de Londres bloqués par une panne de train.



Dans un premier temps, comprendre la cause des retards...

Bien que la ponctualité de notre système ferroviaire soit plutôt satisfaisante elle se dégrade dans certaines parties du réseau. Cette dégradation est principalement liée à l'accroissement du nombre de trains qui, mécaniquement, entraîne plus de retards.

En effet, les pannes provoquées par une sollicitation accrue de l'infrastructure et du matériel roulant (les rames, locomotives et wagons) constituent la source de retards la plus importante. Autrement dit, aujourd'hui de nombreux trains circulent sur des infrastructures à la limite de leur capacité. Dans ces conditions, même un faible retard peut s'amplifier et provoquer par effet « boule de neige » de nombreux retards en cascade.

Réduire le nombre de trains ou construire de nouvelles voies ferrées sont des solutions peu envisageables. Les coûts de nouvelles infrastructures sont prohibitifs et la demande de nouveaux services ferroviaires trop forte.

Développer de nouveaux outils pour mieux gérer le trafic

Une solution, étudiée à l'Ifsttar, consiste à développer des algorithmes d'optimisation du trafic. Cette méthode de calculs a pour vocation de gérer, en temps réel, le trafic ferroviaire afin de limiter l'impact des perturbations. Elle permet une utilisation « optimale » de la capacité disponible et donc de trouver une réponse à la question : peut-on faire rouler plus de trains sans dégrader la ponctualité ?

Ces algorithmes s'appuient sur des techniques mathématiques et informatiques issues des domaines de la recherche opérationnelle et de l'intelligence artificielle. Ils permettent d'explorer un très grand nombre de solutions alternatives face à un problème.

Il est possible de regarder d'une manière plus précise la façon dont les trains utilisent l'infrastructure. L'objectif est de mieux appréhender la manière dont les trains peuvent « cohabiter » dans l'infrastructure sans se gêner ou à défaut en se gênant le moins possible. Dans ce cas, on parle de modèle d'optimisation « microscopique ».



Contenus textes
réutilisables

Photo : Epictura

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>

PLUS DE TRAINS, MOINS DE RETARDS GRÂCE À UNE GESTION OPTIMALE DU TRAFIC (SUITE)

Ces modèles microscopiques peuvent aussi bien être mis à disposition des agents, plusieurs mois en amont, pour faciliter la programmation des horaires de circulation. Le jour J, ils contribueront à définir, en temps réel, les itinéraires et l'ordre de passage de trains en conflit afin de limiter les retards liés à l'engorgement du réseau.

Anticiper les évolutions du réseau ferroviaire

Voici plus de quinze ans, l'Ifsttar a été pionnier dans l'utilisation de modèles microscopiques pour la gestion du trafic ferroviaire. Depuis, d'autres équipes lui ont emboîté le pas et ce type de modèle commence même à être adopté par les milieux professionnels.

Aujourd'hui, la qualité des résultats obtenus, aussi bien pour réduire les retards dans des situations très perturbées que pour faire passer plus de trains dans une infrastructure, n'est plus à démontrer.

Il reste cependant de nombreux défis à relever pour permettre la coordination de plusieurs modèles microscopiques et ainsi étendre le périmètre géographique d'application.

“**L'arrivée des trains autonomes pose également de nouvelles questions liées à la gestion d'un trafic hybride, composé de trains sans conducteur et de trains à conduite manuelle.**”

Vidéo



▲ Découvrez le travail de Grégory Marlière pour le projet de fluidification du RER A parisien.

Pour aller plus loin

Arenas D., Pellegrini P., Hanafi S., and Rodriguez J. *Timetable rearrangement to cope with railway maintenance activities*. *Computers and Operations Research*, 95:123–138, 2018.

Pellegrini P., Marlière G., and Rodriguez J. *RECIFE-SAT: a MILP-based algorithm for the railway saturation problem*. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 7(1-2):19–32, 2017

Pellegrini P., Marlière G., and Rodriguez J. *Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 59C:58–80, 2014

3 EN QUÊTE DE SÉCURITÉ ET DE SÛRETÉ FACE AUX CYBERATTQUES

Par Virginie Deniau, Christophe Gransart
et El Miloudi El Koursi,
Département COSYS¹

Le système ferroviaire est en évolution constante. De nos jours, les fonctions d'automatisation, de contrôle à distance et d'aide à la conduite des trains s'appuient, avant tout, sur des technologies de communication radio (ex. GSM-R, LTE). Cependant, l'utilisation de ces technologies sans fil ouvre le réseau ferroviaire et le rend dépendant de la robustesse des communications. Pour le protéger de toute intrusion malveillante, l'Ifsttar mène des travaux spécifiques sur la sécurité² et la sûreté³ de ces systèmes.

Pour garantir la sécurité et la sûreté de nos déplacements...

La sûreté des systèmes de transports ferroviaires constitue un enjeu stratégique pour garantir des déplacements efficaces et sûrs. Des mesures de sécurité et de sûreté ont été mises en œuvre par les industriels, les opérateurs et les autorités pour améliorer l'attractivité des systèmes et continuer à répondre aux exigences fondamentales de disponibilité, d'accessibilité, de sécurité et d'ouverture des transports collectifs.

Pour répondre à ces enjeux, les nouvelles technologies et la révolution numérique sont mises en œuvre. Elles font face aux nouvelles menaces identifiées comme les cyberattaques. La problématique de la cybersécurité, quasi inexistante au début des années 2000, est omni présente aujourd'hui en raison des interconnexions hommes, terminaux et objets. Ils sont donc devenus des cibles potentielles pour des attaques malveillantes.

Les nouveaux risques doivent être identifiés

Les trains, le système de signalisation ferroviaire ou encore le système de réservation de billets de train se sont informatisés au cours des dernières décennies. De ce fait un train peut maintenant être vu comme un réseau d'ordinateurs mobiles. Comme tout système informatique, le système informatique ferroviaire peut être la cible de cyberattaques. Divers cas d'attaques ont déjà eu lieu par le passé tels que des vols d'information, du chantage en vue d'obtenir de l'argent⁴, une prise de contrôle du système d'aiguillage (cas du tram de la ville Lodz en Pologne).

Dans ce contexte, les constructeurs de matériels roulants et les opérateurs ferroviaires misent sur des innovations robustes et résilientes aux attaques. Ils déploient de nouvelles méthodes pour analyser le risque cyber ainsi que des mécanismes pour surveiller et détecter d'éventuelles actions malveillantes. Toutes les fonctions, du transport ferroviaire, sont à protéger et principalement la communication sol/bord⁵ ou encore la signalisation ferroviaire qui gère les signaux et les aiguillages.

Des solutions innovantes en matière de cybersécurité

Dans ce contexte, l'Ifsttar travaille sur la détection et la prévention de deux types de cyberattaques. Il s'agit des attaques électromagnétiques qui impactent directement les réseaux sans fil et des attaques sur les protocoles de communication. Des solutions innovantes sont ensuite proposées par les scientifiques.

Pour exemple, un double système de communication permet, lorsqu'un lien de communication est attaqué, de basculer automatiquement sur le système de sauvegarde. Cette innovation garantit la continuité de service et permet aux trains de continuer à circuler.

1. COSYS : Département Composants et systèmes
2. La sécurité permet de prévenir tout accident d'origine involontaire le plus souvent lié à des risques techniques, physiques, chimiques et environnementaux.
3. La sûreté consiste à prévenir tous les actes volontaires tels que des actions malveillantes, terroristes et autres incivilités.
4. Le 26 novembre 2016, à San Francisco, l'utilisation d'un logiciel malveillant type rançongiciel a rendu indisponible, pendant 24 heures, les distributeurs des billets de bus, métro et tram. Consultez l'article du journal lefigaro.fr
5. La communication sol/bord permet au train de recevoir des ordres de déplacement via des réseaux sans fil.

Pour aller plus loin

El Koursi E.-M., Deniau V., Ambellouis S., Ghazel M., Gransart C., Hayat S., Heddebaut M., Meurie C. et Perin M., Quels axes pour la sûreté des transports collectifs ? ; Congrès Lambda Mu 21 « Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces », Reims 16-18 Octobre 2018.

El Koursi E.-M., Bruyelle J.-L., Seddon R. and O'Neill C., "Design solutions to improve resilience of metro vehicle to blast events" Journal: Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 118, December 2018, Pages 280-291.

Beugin J. ; Legrand C. ; Marais J. ; Berbineau M. ; El Koursi E.-M. (2018) "Safety Appraisal of GNSS-Based Localization Systems Used in Train Spacing Control", IEEE ACCESS, vol. 6, pp. 9898-9916, 2018.

Security of railways against electromagnetic attacks, SECRET White paper, 2015.

Cyber Security and Resilience of Intelligent Public Transport. Good practices and recommendations, ENISA, 2016.



Contenus textes
réutilisables

Photo : Epictura

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>





4 IMAGINER L'INFRASTRUCTURE EN FONCTION DU TERRAIN NATUREL

Par Christophe Chevalier, Thierry Dubreucq et Jean-Pierre Rajot,
Département GERS¹

Savez-vous que le sol, sur lequel une ligne ferroviaire repose, doit être soigneusement sélectionné et étudié avant la mise en place de l'infrastructure ? Pour garantir la sécurité des personnes et des biens transportés, son comportement doit également être anticipé, surveillé et maintenu dans le temps. Pour cela, les scientifiques spécialisés en géotechnique étudient, entre autres, l'interaction entre le sol et les structures. L'Ifsttar développe et perfectionne ainsi des méthodes et des outils innovants pour permettre le tracé de nouvelles voies ferroviaires dans un environnement quelquefois contraignant.

Adapter et façonner l'environnement pour accueillir les infrastructures ferroviaires

Dans un environnement où la place disponible fait défaut, il est parfois nécessaire de concevoir un ouvrage géotechnique spécifique.

Par exemple, un mur de soutènement est construit ici pour permettre la juxtaposition de voies ferroviaires. Le procédé innovant « Terre Armée »² est utilisé. Il consiste à introduire, dans

un massif de sol, des bandes métalliques disposées à l'horizontal et fixées à des écaïles en béton armé qui constituent le parement. Un matériau essentiellement granulaire est ensuite répandu, sur ces bandes, puis compacté afin d'obtenir une couche dense qui résistera au cisaillement induit par les charges dynamiques notamment. L'opération est renouvelée jusqu'à obtenir un mur de soutènement résistant. À l'aide de capteurs, l'Ifsttar vérifie son bon fonctionnement dans le temps.

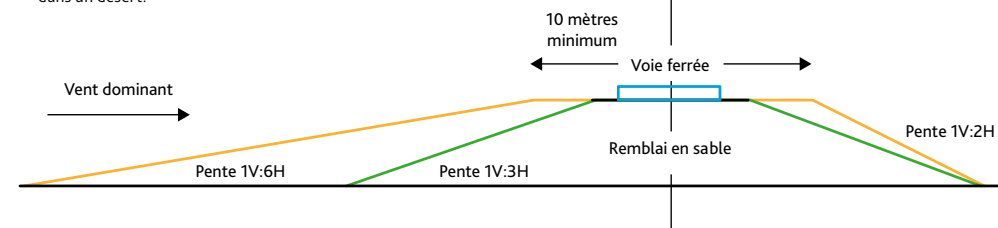


▲ Soutènement en bordure de voie



▲ Soutènement sur la LGV SEA²

▼ Profil aérodynamique d'un remblai en sable pour voie ferrée dans un désert.



Dans certaines situations, le milieu lui-même doit être façonné pour accueillir ces infrastructures. C'est notamment le défi que pose l'installation délicate d'une voie de transport ferré dans un environnement en perpétuel mouvement, comme des dunes de sable dans un désert. Sous l'action d'un vent dominant, une dune de sable prend la forme d'un croissant dans la péninsule arabe. Par expérience, plus la dune est haute, moins elle se déplace.

Pour établir ici une voie de transport ferré, il est nécessaire de relier les dunes existantes. Comme le ferait la nature, le remblai en sable doit être conçu en adoptant un profil aérodynamique qui résiste à l'envol des grains. En renfort, des écrans semi-perméables peuvent être implantés en crête pour piéger et fixer au mieux les grains de sable éoliens.

1. GERS : Département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre

2. La LGV Sud Europe Atlantique (LGV SEA), également commercialement dénommée LGV L'Océane par la SNCF depuis avril 2016, est une ligne à grande vitesse française mesurant 302 kilomètres, ainsi que 38 kilomètres de nouveaux raccordements. Sa mise en service a eu lieu le 2 juillet 2017 (Wikipédia).

Les contenus textes de cet article ne sont pas sous licence CC BY-SA 3.0.

Photos et illustration :
SNCF et Ifsttar

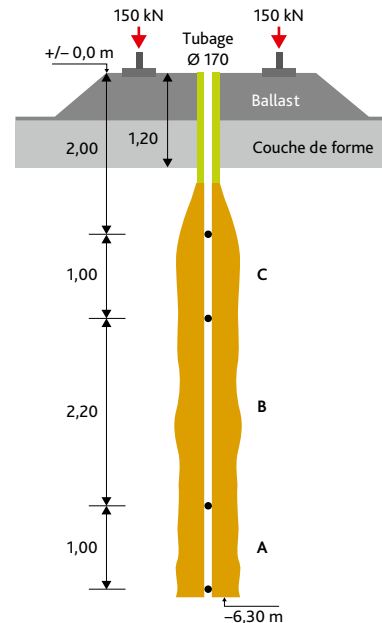
Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>

IMAGINER L'INFRASTRUCTURE EN FONCTION DU TERRAIN NATUREL (SUITE)

**Entretien et préserver les ouvrages
dits géotechniques**

Comme les ponts et les tunnels, les ouvrages géotechniques ferroviaires ont une durée de vie et des besoins d'entretien régulier. Il arrive aussi parfois que, localement, les fondations fatiguent et se tassent quelque peu sous les charges répétées (passages de trains) et les effets climatiques (pluie, sécheresse, gel).

La technique « Soil Mixing » permet ici de ralentir efficacement le tassement de la voie ferroviaire en pareil cas. Elle consiste à incorporer, dans la partie supérieure de la fondation, un coulis de ciment à l'aide d'une foreuse. Il se mélange au sol pour former des inclusions verticales, à même de reporter les charges vers un sol plus résistant en profondeur.



▼ Renforcement d'une plateforme ferroviaire grâce à la technique « Soil Mixing ».



Lors d'une crue exceptionnelle, les courants peuvent fragiliser les ponts qui enjambent une rivière. Les plus violents arrachent alors le sol autour des fondations des piles qui supportent le pont. L'affouillement des fondations est d'ailleurs la cause de ruine la plus fréquente pour ce type d'ouvrage.

Dans le cadre du projet ANR SSHEAR, en partenariat notamment avec le Cerema et SNCF Réseau, l'Ifsttar conçoit et expérimente des appareils. Ceux-ci suivent les variations d'altitude des fonds, pour permettre de mieux comprendre les phénomènes en jeu et envisager des dispositifs d'alerte pour les gestionnaires en cas d'affouillement excessif.

Pour aller plus loin

<http://terrassementnovateur.ifsttar.fr/>

Chevalier C., Larrarte F., Schmidt F., Pham-Van-Bang D., Durand E., Gondret P., de la Roque S., Cheetham M. & Hosseingholian M. (2017) Understanding and control of scour phenomena: recent advances. GEORAIL International symposium, Nov. 23-24, Champs-sur-Marne, France, 331-339



◀ Rupture des fondations du Pont Saint-Etienne sur l'île de la Réunion, suite à la crue de 2007.

Les contenus textes de cet article ne sont pas sous licence CC BY-SA 3.0.

Photos et illustration : SNCF, Cerema

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur <http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>

5 ÉCO-CONCEPTION DES LIGNES À GRANDE VITESSE

Par Pierre-Olivier Vandanjon, Agnès Jullien, Alex Coiret,
Michel Dauvergne et Tristan Lorino

Pouvons-nous rendre les trains et leurs équipements plus respectueux de l'environnement ? Pour répondre à cette question d'intérêt général, il est nécessaire de réaliser un bilan environnemental tout au long de la vie de l'infrastructure analysée. Ce travail permet aux chercheurs d'identifier les étapes qui nécessitent d'être améliorées. Des résultats de recherche innovants en faveur de l'éco-conception des lignes qui accueillent les trains à grande vitesse.

Des outils d'aide à la décision pour la mise en place des lignes à grande vitesse

Pour réaliser le bilan environnemental des infrastructures de transport, les chercheurs de l'Ifsttar utilisent la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV). Elle leur permet d'évaluer complètement le cycle de vie de l'infrastructure, de sa construction, son utilisation, jusqu'à sa maintenance.

Cette démarche préconise l'optimisation des paramètres de conception afin de limiter la consommation de ressources et les impacts environnementaux. Elle indique également que la phase d'utilisation peut avoir un impact important sur l'environnement. Son évaluation doit être suffisamment sensible par rapport

aux paramètres de conception. C'est la raison pour laquelle, les chercheurs ont développé un modèle de consommation des TGV. Il permet d'évaluer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effets de serre (GES) liés à la phase d'utilisation des lignes à grande vitesse (LGV). Ce modèle a été validé lors des essais de réception de la LGV Rhin-Rhône.

Avec l'aide de nombreux experts, d'autres modèles ont été testés sur les phases de construction et de maintenance. La méthodologie, appelée PEAM (Project Energy Assessment Method), rassemble l'ensemble de ces modèles. Utilisée sur deux tracés du projet de LGV Montpellier-Perpignan, et en interagissant avec SNCF Réseau, elle permet d'éclairer les décisions publiques avant leurs choix définitifs.

▼ TGV Rame 707 Dasye.



Optimiser la consommation d'énergie dès la phase de conception

La vitesse requise pour une ligne à grande vitesse est un paramètre de conception sensible. Un TGV ne peut supporter des virages serrés et impose un tracé avec des courbures plus amples. Pour l'adapter au paysage, des constructions sont nécessaires et de fait, entraînent une consommation d'énergie importante.

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, en phase d'utilisation, augmente de manière importante avec ce paramètre. Cependant, si la vitesse est réduite, le temps de parcours va s'accroître modifiant le service rendu à l'usager.

La consommation d'énergie peut être baissée tout en gardant des horaires compatibles. Les scientifiques proposent que les indications sur la marche du train, à destination du conducteur, incluent des objectifs d'éco-conduite. Ces conseils d'accélération, de décélération et d'arrêts doivent être pensés, dès la phase de conception, en lien avec le tracé.

La méthodologie PEAM permet ainsi d'anticiper l'énergie utilisée et l'émission de gaz à effet de serre d'un projet de ligne à grande vitesse. C'est un sujet de recherche actif qui évolue pour prendre en compte de nouveaux indicateurs environnementaux.

Contact : Pierre-Olivier Vandanjon, Département AME, Laboratoire Ease

Pour aller plus loin

Rapport : *Livrable phare du Contrat d'Objectifs et de Performances entre l'État et l'Ifsttar (2013-2016) : ACV des projets d'infrastructures route/rail à l'échelle d'un réseau avec prise en compte des paramètres d'éco-conception*

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*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 33, ELSEVIER, pp.111-124, DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.003

Bosquet R. *Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse*. Automatique / Robotique. Université de Nantes, 2015. Français.



Contenus textes
réutilisables

Photo : Frédéric Trindillière
Reportage : Cnam Pays de la Loire

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>



Vidéo



▲ Découvrez le portrait du chercheur Pierre-Olivier Vandanjon, réalisé par le Cnam Pays de la Loire.



6 COMMENT AMÉLIORER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR TRAIN ?

Par **Patrick Niérat**

Chercheur en économie des transports
Département AME¹, Laboratoire SPLOTT²

À l'heure où l'empreinte de l'homme impacte considérablement l'environnement, de grandes décisions doivent être prises pour rendre notre société plus durable. Certaines décisions concernant l'aménagement du territoire permettent de donner plus de place au ferroviaire.

Les chercheurs de l'Ifsttar analysent la production du fret ferroviaire et proposent des actions pour relancer l'activité sur le territoire.

▼ Manœuvres ferroviaires à Neuville sur Saône.



L'état des lieux du transport ferroviaire de marchandises en France

L'apogée du trafic remonte à 1974 mais le ferroviaire ne transporte aujourd'hui plus que 40 % des tonnages de l'époque. Sa part de marché est passée de 40 à 10 % des tonnes kilomètres, au bénéfice du transport routier. Le succès de la route repose largement sur sa capacité à transporter vite de petites quantités et sa réactivité vis-à-vis de demandes tardives. L'examen des modes de production ferroviaire fournit un éclairage important. On distingue trois types de situations.

➤ **Cas n° 1** - Les clients possèdent des installations ferroviaires embranchées (ITE) qui leur permettent de placer des wagons chez eux. Leur activité fournit de grands volumes de marchandises. Avec 50 % du marché (en tonnes kilomètres), ce cas est celui du train entier bien rempli au départ de l'expéditeur jusqu'au destinataire. Domaine d'excellence du ferroviaire, il autorise les meilleurs coûts et délais.

➤ **Cas n° 2** - Les clients du ferroviaire possèdent des ITE mais ils ne génèrent que de petits volumes d'activité. Ce second cas (25 %) est celui du wagon isolé. Les wagons sont chargés chez l'expéditeur et déchargés chez le destinataire quand ce dernier est raccordé au réseau. L'acheminement comprend alors au moins cinq étapes. Une desserte locale pour conduire les wagons en gare de triage. Un tri pour réunir les wagons ayant leurs destinations dans la même région. Un transport de longue distance par train entier. Puis un tri et une livraison des wagons vers chacun des destinataires. Cette organisation permet d'obtenir de bons résultats sur le parcours de longue distance mais les étapes de tri et les dessertes locales sont souvent coûteuses. La prestation devient trop chère et ce transport prend du temps.



Contenus textes
réutilisables

Photo : Ifsttar

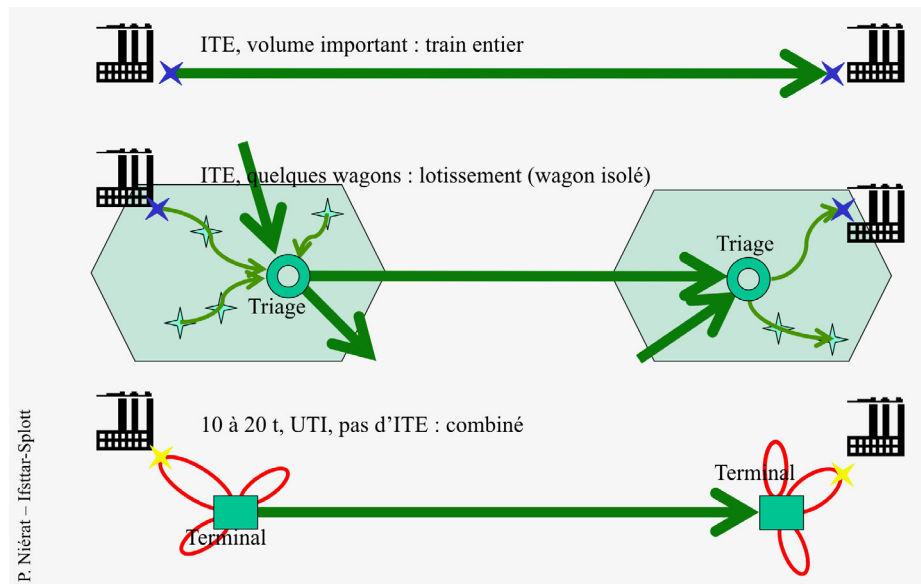
Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>

COMMENT AMÉLIORER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR TRAIN ? (SUITE)

► **Cas n° 3** - Les clients n'ont pas ou ne font pas toujours usage d'ITE.

Le troisième cas (25 %) est celui du transport rail-route. La marchandise est chargée dans une unité de transport intermodal (UTI) (conteneur, caisse mobile...) chez l'expéditeur. L'UTI est transportée par camion jusqu'à un terminal rail-route où elle est transbordée sur un wagon. Un train assure le déplacement de longue distance jusqu'à un second terminal puis l'UTI est conduite par route jusqu'au destinataire.

Cette solution n'existe aujourd'hui que sur les axes principaux là où les flux permettent d'avoir des trains bien remplis et fréquents pour obtenir un coût et un temps comparables à ceux de la route. Les dessertes routières totalisent souvent plus de la moitié du coût total. Cette formule permet en théorie le transport entre deux lieux quelconques. En pratique, elle n'est compétitive qu'entre les aires de marché des terminaux.



▲ Schéma organisationnel du ferroviaire.
ITE : installation terminale embranchée
UTI : unité de transport intermodal

Des solutions cohérentes avec les besoins du territoire

L'emploi du train entier est réservé aux flux importants des gros clients. Mais il ne répond pas à la variété des besoins d'aujourd'hui éparpillés sur le territoire et concernant de petites quantités. Pour gagner des parts de marché, il faut donc s'appuyer sur des solutions proposées dans les cas n° 2 et 3. Des leviers, concernant l'aménagement du territoire, existent pour réduire le coût des dessertes locales et améliorer la situation.

Dans le cas n° 2, il est nécessaire d'augmenter le nombre de wagons pour réduire le coût unitaire des dessertes. Pour cela, il faut implanter les entreprises, potentiellement intéressées par le ferroviaire, le long de certaines petites lignes existantes afin de concentrer le trafic et réduire les coûts.

Pour le cas n° 3, il est fondamental d'implanter les terminaux correctement par rapport au potentiel existant. Mal localisés, les terminaux ne captent pas le trafic. Il existe, sans doute, d'autres solutions techniques, mais il est nécessaire de rappeler que la localisation des clients par rapport aux infrastructures pèse lourdement sur le bilan. Une excellente technique en plein désert n'apporte rien...

1. AME : Département Aménagement, mobilités et environnement
2. SPLOTT : Laboratoire Systèmes Productifs, Logistique, Organisation des Transports, et Travail

Pour aller plus loin

Niérat P. (2011). *Report modal, un problème de réseau ou une question de service ?* Recherche - Transports - Sécurité. 27. 273-282. 10.1007/s13547-011-0024-2.

Niérat P. & F., Pierre & Knitschky, Gunnar & Lenz B. (2009). *Organisation et coût des dessertes terminales ferroviaires*. 95-126.

Niérat P. (1992). *Aire de marché des centres de transbordement rail-route : pertinence de la théorie spatiale*.

7 QUEL AVENIR POUR LES PETITES LIGNES FERROVIAIRES ?

Par **Philippe Poinso**

Chercheur en économie des transports et économie régionale
Département AME¹, Laboratoire LVM²

L'avenir des « petites lignes » ou réseau capillaire, a fait l'objet de nombreux débats suite au rapport Spinetta sur l'avenir du transport ferroviaire en France (2018). Ces débats sont souvent passionnés avec d'un côté, ceux qui considèrent ces lignes comme une dépense publique inutile et de l'autre, ceux qui les appréhendent au contraire comme une nécessité pour assurer l'égalité des territoires.

Pour éclairer les décisions publiques, les chercheurs peuvent proposer un affinement et une actualisation de la classification des lignes.

Petites lignes ferroviaires : de quoi parle-t-on ?

Chaque ligne du réseau ferroviaire français est classée selon une norme définie par l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC). Neuf groupes sont alors distingués, allant du groupe UIC 1, les

lignes ayant les trafics les plus importants, au groupe UIC 9, les lignes avec les trafics les plus faibles. Les petites lignes correspondent aux lignes classées UIC 7 à 9. Elles représentent environ 40 % du réseau avec plus de 12 000 km et transportent majoritairement du fret, mais aussi des voyageurs.



“ **Au niveau européen, le réseau ferroviaire français est celui qui compte le plus de petites lignes.** ”

Trois raisons expliquent cette spécificité française. La première est, qu'avant l'essor de l'automobile et de la route, l'objectif assigné au réseau ferré était d'assurer une desserte très fine des territoires, expliquant un réseau très développé. La deuxième est que le train relevant d'une mission de service public, et cela quel qu'en soit le prix, certaines lignes n'ont pas été fermées contrairement à nos voisins européens. Enfin, la troisième raison est que la politique de l'opérateur SNCF³ a été de concentrer les trafics sur un petit nombre d'axes et de nœuds, limitant ainsi l'usage du reste du réseau. Aujourd'hui, la situation d'une partie importante du réseau est préoccupante : voies en mauvais état, signalisations vieillissantes, etc. Plusieurs questions se posent sur les meilleurs choix à faire. Dans ce contexte, les groupes UIC constitueraient un critère à prendre en compte.

1. AME : Département Aménagement, mobilité et environnement

2. Le LVM, laboratoire pluridisciplinaire, est une unité mixte de recherche entre l'École des Ponts ParisTech, l'Ifsttar et l'UPERM. Il traite de grandes questions de société sur la ville, la mobilité et les transports.

3. La Société nationale des chemins de fer français (SNCF) est l'entreprise ferroviaire publique française, officiellement créée par convention entre l'État et les compagnies de chemin de fer préexistantes, en application du décret-loi du 31 août 1937.



Contenus textes
réutilisables

Photo : Epictura

Lire l'ensemble du dossier thématique 2019 sur
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/>





Vers une nouvelle classification des lignes

Malgré de nombreuses critiques, l'appartenance d'une ligne à tel ou tel groupe UIC a des implications fortes, notamment en termes de financement. Par exemple, le récent Contrat de performance Etat/SNCF Réseau indique que le gestionnaire d'infrastructures doit concentrer ses investissements sur les UIC 2-6, interdisant ainsi tout investissement amortissable sur les petites lignes.

Pourtant, dans le cadre de la chaire Nouvelle Approche Economique des Mobilités (LVMT/SNCF), une étude (DISLAIRE & al., 2018) a montré à quel point cette nomenclature était inadaptée

pour représenter les caractéristiques actuelles des lignes de la région Nouvelle Aquitaine⁴. Par exemple, la *Figure 1* permet de voir que derrière l'appartenance à un même groupe UIC se cache en fait une grande hétérogénéité. Afin d'éclairer les décisions publiques sur les petites lignes, l'évaluation des caractéristiques actuelles peut être complétée. Elle doit prendre en compte les potentiels, notamment en termes de demande, et les pistes pour baisser le coût global de ces petites lignes. Plusieurs études engagées récemment avec le Cerema, les Régions Normandie et Paca, ainsi que SNCF Réseau visent justement à développer des méthodes permettant une évaluation plus précise.

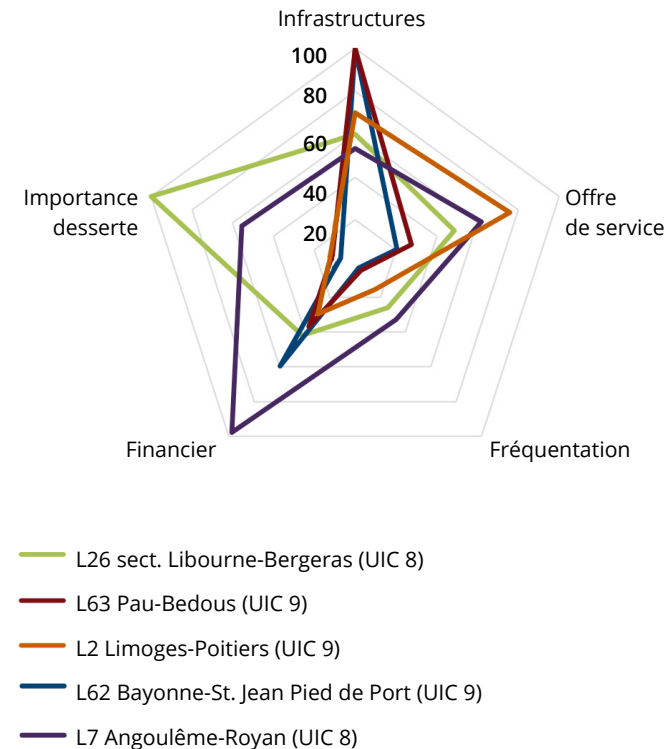
4. Pour mémoire, l'objectif initial de cette nomenclature était de faciliter la définition d'une politique de maintenance du réseau.

Pour aller plus loin

Deraëve S., Mimeur C., Poinot P., Zembri P. (2018). *Les petites lignes : de la nomenclature UIC à un classement par les enjeux et les potentiels*, Transports urbains, n° 133, pp. 3-8.

Dislaire C., Guerrinha C., Mimeur C., Poinot P., Zembri P., Deraëve S. (2018). *Qu'est-ce qu'une 'petite ligne' ferroviaire ? Une analyse à partir de la Région Nouvelle-Aquitaine*, communication aux 1^{res} Rencontres Francophones Transport Mobilité (RFTM), Lyon, 6-8 juin 2018.

Meignien B., Vernier A. (2016). *Quelles modalités d'organisation pour les petites lignes ferroviaires ? Étude de cas en régions Centre Val-de-Loire, Limousin et Bretagne*, CEREMA, 43 p.

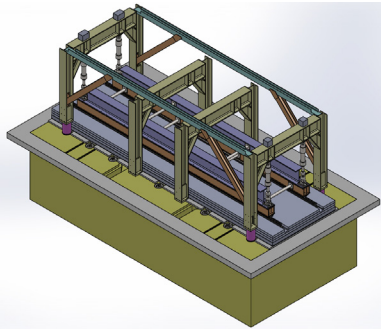


▲ Figure 1. Les cas de cinq UIC 7 à 9 de la Région Nouvelle Aquitaine
Lecture : chaque ligne du réseau ferroviaire est représentée par cinq grandes caractéristiques : infrastructure, offre de service, fréquentation, performances financières et importance de la desserte. À chaque caractéristique est affecté un score de 0 à 100 : plus ce score est élevé, plus la caractéristique de la ligne est bonne.

8 DES ÉQUIPEMENTS REMARQUABLES POUR COMPRENDRE ET TESTER

Au fil des années, l'Ifsttar a développé et maintient plusieurs plateformes logicielles et matérielles pour évaluer les performances de différents systèmes techniques. Ces outils originaux, et le plus souvent uniques, constituent des atouts indispensables pour mener à bien les recherches de l'Institut. Ils ont, en général, reçu le soutien financier de l'État, des régions dans lesquelles ils ont été développés, de l'Europe ou encore de l'Agence Nationale de la Recherche.

Plateforme SYSIFE



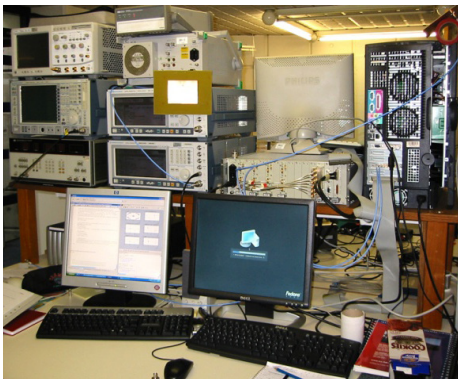
▲ Dispositif de chargement dynamique SysIFE.

- Localisation : Bouguenais site Ifsttar
- Objectif : Tester en statique et en fatigue des maquettes de structures ferroviaires innovantes jusqu'à l'échelle 1 afin d'allonger leur durée de vie.

Contact : thomas.gabet@ifsttar.fr

Article 4 - Géotechnique pour les infrastructures

Plateforme d'évaluation et de tests pour les télécommunications



▲ Équipements pour l'évaluation des performances d'un système de transmission multi-antennes.

- Localisation : Villeneuve d'Ascq site Ifsttar
- Objectif : Évaluer et tester différents systèmes de télécommunications sans fil en cours de développement.
- Exemple d'expérimentation : Les nouveaux systèmes de télécommunications pourront être évalués en laboratoire avant des expérimentations en vraie grandeur.

Pour en savoir plus -----
<http://www.emulradio4rail.eu/>

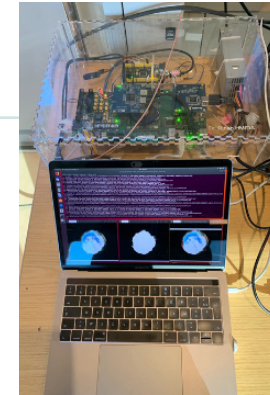
Contacts : marion.berbinau@ifsttar.fr,
fouzia.boukour@ifsttar.fr, yann.cocheril@ifsttar.fr

Article 1 - Communiquer, naviguer et surveiller

Plateforme PREDISSAT



▲ Caméra fish-eye sur le toit d'un train en expérimentation.



Pour en savoir plus

Marais J., Tay S., Flancquart A., Meurie C., *Weighting with the pre-knowledge of GNSS signal state of reception in urban areas*, ENC GNSS 2015, 9 avril 2015, Bordeaux.

Article 1 - Communiquer, naviguer et surveiller

- Localisation : Villeneuve d'Ascq site Ifsttar
- Objectif : La Plateforme PREDISSAT (Predictive software for satellite availability in the field of transport) permet la détection des obstacles à la réception des signaux GNSS à partir du traitement synchronisé d'images fish-eye à 360° et de données brutes GNSS.
- Exemple d'expérimentation : L'outil PREDISSAT permet l'amélioration des systèmes GNSS pour le ferroviaire.

Contact : juliette.marais@ifsttar.fr

Laboratoire de cybersécurité



▲ Expérimentation sur les effets de différentes attaques électromagnétiques sur le système LTE.

Article 3 - Cybersécurité et sûreté

- Localisation : Villeneuve d'Ascq site Ifsttar
- Objectif : Identifier et analyser les effets des attaques électromagnétiques sur les systèmes de communications afin de développer des systèmes de surveillance, de détection, d'alerte et de contre-mesures.

Pour en savoir plus -----
http://www.secret-project.eu/IMG/pdf/white_paper_security_of_railway-against_em_attacks.pdf

Contacts : virginie.deniau@ifsttar.fr,
jean.riault@ifsttar.fr,
christophe.gransart@ifsttar.fr



Plateforme de simulation de trafic ERTMS



▲ Équipements de la plateforme ERTMS.

➤ **Localisation :** Villeneuve d'Ascq site Ifsttar
 ➤ **Objectif :** La plateforme permet d'évaluer différents modules du système ERTMS (European Rail Traffic Management System). Elle est composée d'un simulateur de conduite de train, d'un simulateur de trafic et d'un banc de test de la signalisation ferroviaire européenne ERTMS.

Pour en savoir plus -----
<https://www.estas.ifsttar.fr/linstitut/cosys/laboratoires/estas-ifsttar/equipements/plate-forme-de-simulation-ertms/>

Contacts :
simon.collart-dutilleul@ifsttar.fr ; georges.mariano@ifsttar.fr



Article 2 - Gestion optimale du trafic

Plateforme logicielle Recife



▲ Outils de représentation graphique de solutions d'algorithmes d'optimisation du trafic ferroviaire.

➤ **Localisation :** Villeneuve d'Ascq site Ifsttar
 ➤ **Objectif :** La plateforme permet de concevoir et d'évaluer des algorithmes de gestion du trafic ferroviaire afin d'accompagner les opérateurs dans leurs prises de décisions en vue de limiter les retards.

Pour en savoir plus -----
<https://www.estas.ifsttar.fr/linstitut/cosys/laboratoires/estas-ifsttar/equipements/plate-forme-logicielle-recife/>

Contact :
gregory.marliere@ifsttar.fr



Article 2 - Gestion optimale du trafic

Equipex sense-city



▲ Sense-city la mini-ville laboratoire.

➤ **Localisation :** Marne-la-Vallée site Ifsttar
 ➤ **Objectif :** Évaluer, en vraie grandeur et dans des conditions extrêmes, le comportement de capteurs et de réseaux de capteurs qui pourront être ensuite déployés sur les infrastructures ferroviaires.

Pour en savoir plus -----
<http://sense-city.ifsttar.fr/>

Contact : anne.ruas@ifsttar.fr



Article 1 - Communiquer, naviguer et surveiller

Manège de fatigue



▲ Le manège de fatigue.

➤ **Localisation :** Bougenais site Ifsttar
 ➤ **Objectif :** Réaliser des essais accélérés de structures réelles sous l'effet de lourdes charges. Conçu initialement pour tester des infrastructures routières, il est également utilisé pour des infrastructures ferroviaires.



Article 4 - Géotechnique pour les infrastructures

Contact :
pierre.hornych@ifsttar.fr

Pour en savoir plus -----
[Plaquette du manège de fatigue](#)

L'IFSTTAR au carrefour de la SCIENCE et de la SOCIÉTÉ

Qu'apporte la science à notre société ?
Découvrez les contributions des scientifiques
dans les dossiers thématiques Ifsttar.



Espace Science et Société

www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/



Dans une logique d'ouverture à la société, nous avons choisi d'apposer à nos textes la « Licence Creative Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 non transposé » (CC BY-SA 3.0) afin qu'ils puissent être partagés librement et réutilisés selon certaines conditions.

Service promotion et partage des savoirs scientifiques et techniques

Direction scientifique Ifsttar

25, avenue François Mitterrand,

Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex

openexperience@ifsttar.fr



CE DOSSIER VOUS A PLU ?

+ de dossiers sur



Espace Science et Société

www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/



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



Photos et illustrations : Epectura, Ifsttar, SNCF,
Cerema, LVMT, Frédéric Trindillière, Cnam Pays de la Loire
Conception maquette : STDI (Charlène Pineau)
Mise en page : STDI • Impression : Ifsttar

