

/// Rapport _____ _____ Scientifique



ELSAT2020



Nous adressons nos remerciements

A l'État et la Région Hauts-de-France qui ont co-financés le projet ELSAT2020 dans le cadre du contrat de plan État Région 2015 - 2020, ainsi qu'à l'Europe avec le Fédér - Fonds européen de développement régional



Aux partenaires :

Les établissements : Université d'Artois, Université Gustave Eiffel, Université de Lille, Université du Littoral Côte d'Opale, Université Polytechnique Hauts-de-France, Centrale Lille Institut, Institut Mines Télécom Nord Europe, Ecole National des Arts&Métiers ParisTech, Centre Hospitalier Universitaire de Lille, Junia

Les organismes : CEREMA, CNRS, INRIA, ONERA.

Les centres de développements technologiques : CRITT M2A, C3T VALUTEC.

Aux laboratoires des sciences pour l'ingénieur et des sciences et technologies de l'information et de la communication membres de la Fédération de Recherche Transports Terrestres et Mobilité CNRS 3733 : LaMcube UMR CNRS 9013, LAMIH UMR 8201, LMFL UMR 9014, IEMN UMR 8520, CRISTAL UMR 9189.

Aux laboratoires associés : IMT Nord Europe CERI MP et CERI SN, L2EP EA 2697, LGI2A EA 3926, LMCPA EA 2443, LISIC EA 4491, LSIS UMR 7296, Gustave Eiffel COSYS/LEOST-ESTAS, ONERA DMA et DAAP.

Aux laboratoires des sciences humaines et sociales :

CHRU Lille Neuromusculaire, Clersé UMR 8019, LARSH 1384, LEM UMR 9221, PSITEC EA 4072, TVES EA 4477, Gustave Eiffel SPLOTT - LVMT - DEST, CEREMA Transport Mobilités.

Sommaire

04 / ELSAT2020

Écomobilité, Logistique, Sécurité et Adaptabilité
dans les Transports à l'horizon 2020

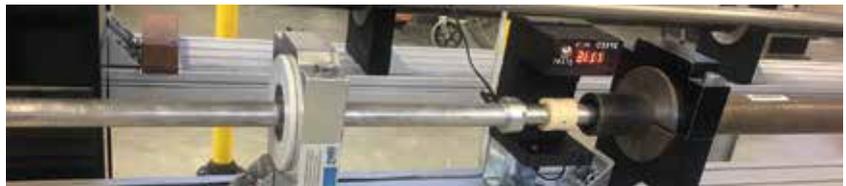
11 / L'humain dans les transports et sa mobilité



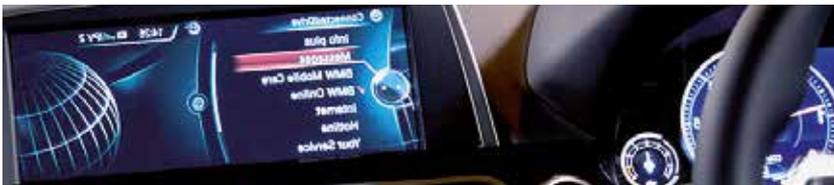
22 / Optimisation des systèmes de mobilité et logistique



33 / Nouveaux matériaux et concepts structuraux



46 / Dimensionnement et performances des fonctions véhicules



66 / Systèmes de mobilité et changements de comportements



Le projet ELSAT2020 pour Écomobilité, Logistique, Sécurité et Adaptabilité dans les Transports à l'horizon 2020 se veut un prolongement, plus large et pluridisciplinaire incluant les SHS, du CISIT, projet phare du CPER 2007-2013. Le parti pris de son élaboration a été de capitaliser sur les succès passés et la volonté de ses partenaires de rendre pérenne leur collaboration dans une structuration juridique plus forte et plus engageante. Ainsi, est née la Fédération de Recherche Transports Terrestres et Mobilité impliquant les acteurs historiques du projet. Cette FR CNRS 3733 « Transports Terrestres et Mobilité (TTM) » fédère et structure les forces de cinq unités mixtes de recherche partenaires de longue date : CRISTAL, IEMN, LamCube, LMFL Kampé de Fériet et LAMIH. Elle implique environ 300 personnels de recherche relevant principalement de 5 sections du CNRS (6, 7, 8, 9 et 10). Elle est rattachée aux instituts INS2I (principal) et INSIS. Créée le 1^{er} janvier 2016, elle constitue une brique amont importante dans le secteur des transports (secteur industriel particulièrement développé en région Hauts-de-France), dans un contexte socio-économique qui se doit d'être compétitif par l'innovation. Les objectifs de la Fédération sont de : **Fédérer** les compétences des UMR (Unité Mixte de Recherche) pour constituer une force de frappe visible et dégager un schéma plus lisible de la recherche dans les Transports Terrestres et la Mobilité, **Concentrer** les synergies multidisciplinaires pour ouvrir de nouveaux champs d'investigation qui permettent de résoudre ou d'anticiper les besoins de l'économie et de la société. A cet effet, des thèmes multidisciplinaires ont été mis en place lors de sa création en 2016 et actualisés en 2022, **Mutualiser** les moyens matériels et humains dans l'objectif de développer des plateformes scientifiques de très haut niveau.

La Fédération de Recherche Transports Terrestres et Mobilité



La FR s'appuie sur le projet ELSAT 2020 du CPER Hauts de France 2015-2020 dans lequel les 5 UMR représentent près de 2/3 des effectifs impliqués, **Développer** des partenariats public-privé et inciter ses membres à répondre aux appels à projets nationaux et internationaux, **Favoriser et faciliter les interactions**, entre les acteurs de la FR et avec les acteurs de l'écosystème et ainsi **assurer un rôle d'interlocuteur privilégié** avec l'écosystème et **développer la communication** aussi bien externe qu'interne.

Les recherches menées dans le projet ELSAT2020 répondent aux défis sociétaux ou challenges technologiques posés tant au niveau européen à travers les **feuilles de route technologiques** dictées par les besoins industriels (ACARE, ERRAC, ERTRAC..., JTI Shift2Rail, PPP Green vehicles) ou les **programmes de recherche** Horizon 2020 ainsi qu'aux **éléments clés du développement national et régional** établis dans les 34 plans de reconquête industrielle, dans les 7 ambitions de la Commission Innovation 2030, dans la SRI-SI et le Master Plan pour la Troisième Révolution Industrielle. Dans toutes ces feuilles de route, les améliorations de la mobilité et du transport de marchandises sont des axes stratégiques, dans leurs différentes dimensions : la réduction des impacts environnementaux de la fabrication et de l'usage des véhicules et outils, l'amélioration de l'efficacité et ses impacts économiques et sociaux, la diminution des inégalités face au transport, l'efficacité industrielle et les impacts en termes d'emplois directs et indirects. La somme de ces impacts a conduit l'Europe et l'État à mettre la mobilité, la logistique et les différents modes de transport au cœur de leurs stratégies d'innovation et de croissance. La reconnaissance de la présence d'un écosystème important sur les plans de l'industrie, de la recherche et de l'innovation ont propulsé ces do-

maines au rang d'axes stratégiques pour la région Hauts-de-France dans la SRI-SI (ferroviaire, automobile, logistique) et dans le Master Plan (Mobilité).

LES RETOMBÉES D'ELSAT2020

Trois types d'impacts étaient recherchés dans ELSAT2020.

- Des impacts en termes de collaborations entre académiques pour répondre ensemble à des appels à projets (ANR, H2020) mais également avec des industriels avec par exemple les laboratoires commun ou des chaires industrielles.
- Des impacts scientifiques : le développement des connaissances reste l'enjeu majeur pour les laboratoires de recherche, constituant le socle de l'innovation future.
- Des impacts en termes de structuration régionale des travaux scientifiques des laboratoires traitant de la mobilité, de la logistique et des moyens de transport pour plus d'attractivité, ainsi que de leurs moyens technologiques.

L'ensemble de ces moyens structurants, pour ne citer que les plus significatifs en termes d'investissement, associés à la mise à jour des moyens existants, constituent en région **une agrégation de moyens unique en France** certainement, rare en Europe de toute évidence, pour la recherche, le développement et le test des systèmes de mobilité et de logistique. La mise au service d'un groupement d'acteurs de la recherche très interdisciplinaire et de projets appréhendant la mobilité, la logistique, le transport dans l'ensemble de leurs dimensions, du composant au système, renforce le positionnement de la Région Hauts-de-France comme un centre français et européen de premier plan de la recherche dans les transports et l'éco-mobilité. Au-delà du projet ELSAT2020, l'appui sur le technopôle Transalley « Transports&Mobilité » pour le développement

de plateformes comme la piste d'essai Gyrovia, située au cœur du technopôle et dédiée à la recherche, la formation, la promotion et le développement de nouvelles technologies, de nouveaux véhicules et de nouveaux usages, ainsi que sur le centre d'essai ferroviaire contribuent à cette structuration. Ces équipements majeurs favorisent le renforcement des relations industrielles, la promotion de la Région à l'international et notamment dans les projets européens.

Sur le plan de la recherche et de l'innovation, la FR CNRS TTM et le consortium du projet ELSAT2020 forment un cluster académique de premier plan, dans un partenariat fort avec Railenium, pouvant porter l'excellence française et régionale dans le PPP européen Shift2Rail et là encore renforcer la visibilité et l'attractivité de la région.



Les membres de la fédération de recherche TTM CNRS 3733 et les partenaires régionaux forment consortium pour le projet ELSAT2020

DES PARTENAIRES EN MOUVEMENT

Rétrospective sur l'organisation de la recherche durant le projet

- 2022 L'université de Lille, établissement présidé par Régis Bordet, devient Établissement Public Expérimental, il réunit facultés, instituts et écoles de renom, avec deux types de membres : les composantes (les facultés, instituts, UFR et écoles) et les établissements-composantes (ENSAIT, ENSAPL, ESJ Lille et Sciences Po Lille). <https://www.univ-lille.fr/>

- 2022 L'Université Polytechnique Hauts-de-France, établissement présidé par Abdelhakim Artiba, structure ses laboratoires (hors Unités Mixtes que sont le LAMIH et IEMN site de Valenciennes) pour créer :

- ✓ Le CERAMATHS, Laboratoire de Matériaux Céramiques et de Mathématiques issu de la fusion des laboratoires en matériaux céramiques et procédés associés (LMCPA), en mathématiques et leurs applications (LAMAV) et en mathématiques pour l'ingénieur (LMI),

- ✓ Le LARSH, Laboratoire de Recherche Sociétés et Humanités, issu de la fusion des laboratoires en sciences de la société (CRISS), en sciences de l'information et de la communication (DeVisu) et en sciences des arts, lettres, langues et linguistiques (DeScripto). Il regroupe l'ensemble des chercheurs en sciences humaines et sociales. <https://www.uphf.fr/>

- 2021 L'Institut Mines Télécom Lille Douai, dirigé par Alain Schmitt devient Institut Mines Télécom Nord Europe, il compte 8 grandes écoles d'ingénieurs et de management et 2 écoles filiales et structure ses recherches en 3 thèmes majeurs : Énergie Environnement, Systèmes Numériques et Matériaux et Procédés. <https://imt-nord-europe.fr/>

- 2020 IFSTTAR devient l'Université Gustave Eiffel site de Lille, établissement présidé par Gilles Roussel, née du projet scientifique I-Site FUTURE pour penser les villes de demain. Corinne BLANQUART devient la première vice-présidente de l'Université Gustave Eiffel, précédemment Directrice de recherche, elle a dirigé à l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) un laboratoire de recherche, avant de prendre la direction d'un département. <https://www.univ-gustave-eiffel.fr/>

- 2020 Yncréa Hauts-de-France devient Junia Grande École d'Ingénieurs dirigée par Thierry Occre. <https://www.junia.com/>

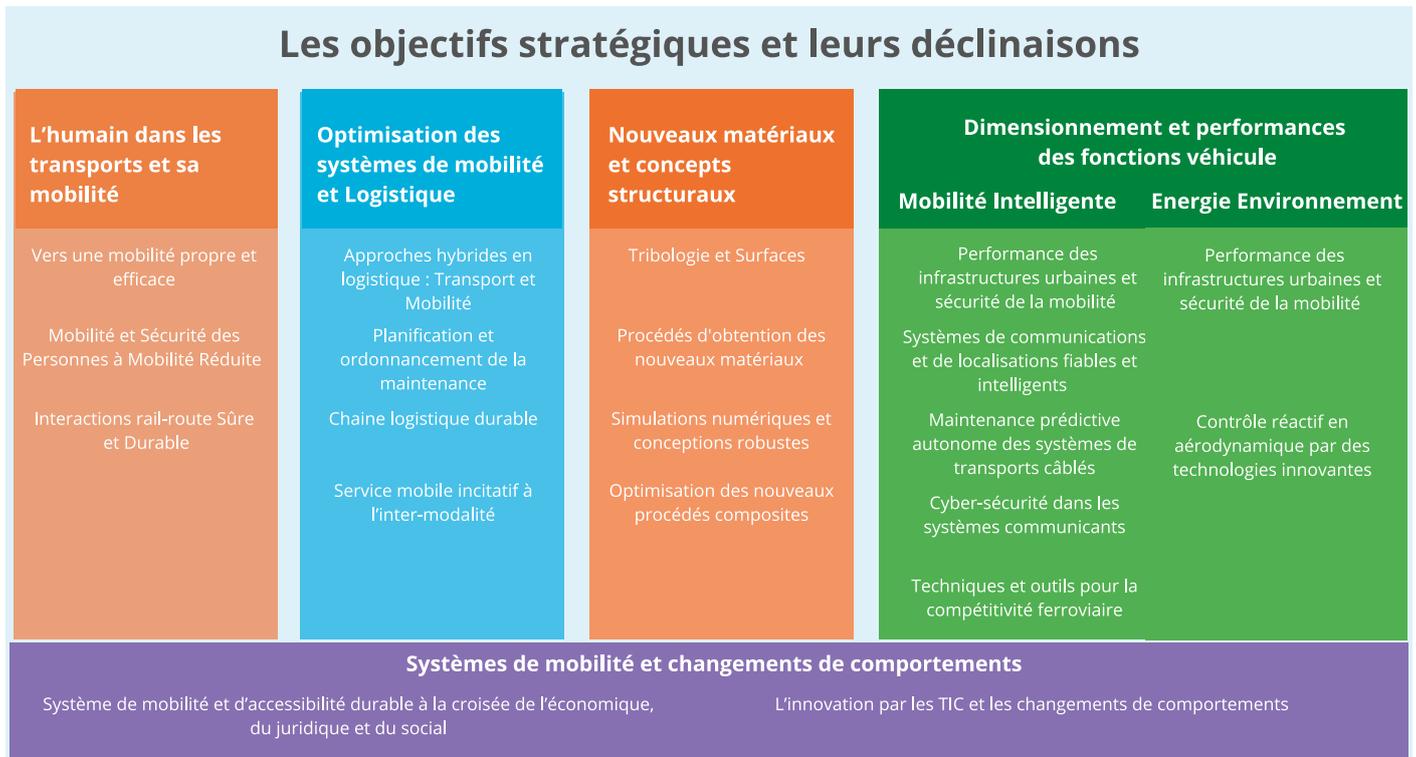
- 2019 École Centrale de Lille devient Centrale Lille Institut, dirigé par Emmanuel Duflos, l'institut compte 4 écoles d'ingénieurs en 2020 : l'École Centrale de Lille pour la formation généraliste, l'ITEEM pour la formation des ingénieurs managers entrepreneurs, l'IG2I, pour la formation des ingénieurs en génie informatique et industriel, et l'ENSCL pour la formation des ingénieurs chimistes. <https://centralelille.fr/centrale-lille/>

- 2019 La délégation régionale du CNRS Hauts-de-France est dirigée par Christophe J. Muller. Il succède à Françoise Paillous, qui occupait ces fonctions depuis 2011. <https://www.hauts-de-france.cnrs.fr>

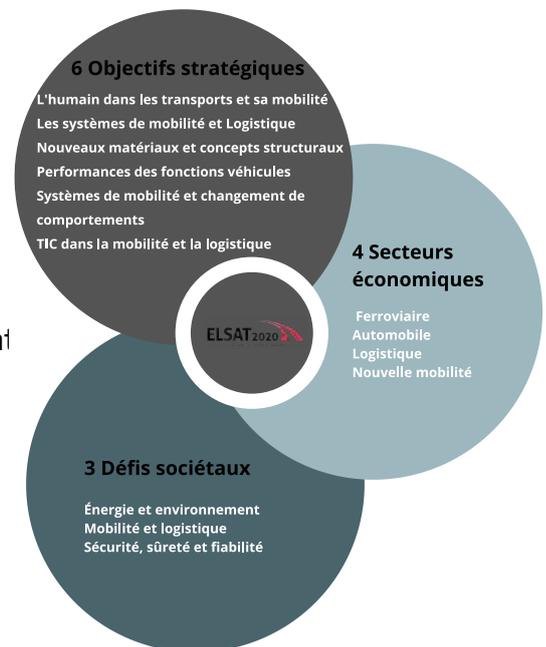
- 2018 L'ONERA dirigé par Bruno Sainjon, devient une tutelle du Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille Kampé de Fériet (LMFL) UMR CNRS 9014 né de la scission du Laboratoire Mécanique de Lille (LML) pour créer le Laboratoire de Mécanique, Multi-physique, Multi-échelle (LaMcube) UMR CNRS 9013 et le LMFL Kampé de Fériet. <https://www.onera.fr/fr/centres/lille>

L'ORGANISATION DU PROJET

Le projet ELSAT2020 dont l'acronyme signifie Écomobilité, Logistique, Sécurité et Adaptabilité dans les Transports à l'horizon 2020 se décline en 6 objectifs dont 2 objectifs transversaux, eux-mêmes déclinés en 22 projets d'applications.



Ces objectifs répondent à trois grands défis sociétaux, en parfaite cohérence avec les éléments clés du développement

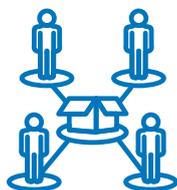


SECTEURS D'APPLICATIONS

Chacun des objectifs impactant ces défis sociétaux se décline ensuite en projets d'application dans les quatre grands secteurs économiques du transport :



Ferroviaire



Logistique



Automobile



Nouvelle mobilité

LA GOUVERNANCE DU PROJET ELSAT2020

Professeur Jean-Christophe POPIEUL

Coordinateur du projet ELSAT2020

Université Polytechnique

Hauts-de-France

LAMIH UMR CNRS 8201

Le **coordinateur**, avec le soutien de l'équipe opérationnelle renforcée, anime le consortium dans le respect de la mise en œuvre des objectifs du projet et valide l'utilisation des moyens avec le concours des membres du bureau constitué des directeurs des laboratoires ou leur représentant. Sa mission d'animateur scientifique le porte à apprécier l'avancée des travaux de recherche des parties prenantes sur la base d'indicateurs de résultats et d'avancement formels et en établir annuellement un rapport d'activités qu'il présente aux co-financeurs dans le cadre des comités de suivis institutionnels.

Le Professeur Jean-Christophe POPIEUL, assure la coordination du projet ELSAT 2020 depuis mi-2016. Il a succédé au Professeur Eric MARKIEWICZ, coordinateur pour la phase de montage et les premiers mois d'activités du projet. Ce dernier a ensuite pris la direction de la Fédération de Recherche Transports Terrestres & Mobilité officialisée en 2016 par le CNRS sous le numéro 3733. La fédération est née de la volon-



té des laboratoires unités mixtes du CNRS participant au projet de se structurer pour :

- Avoir un statut reconnu sous la bannière d'un organisme national de recherche indiscutable, le CNRS, associé aux universités phares de la région impliquées en transports et mobilité.
- Disposer d'une structure juridique légère, mais nécessaire, qui permet de mutualiser des moyens et des personnels, de renforcer le ressourcement scientifique indispensable pour développer des connaissances nouvelles et plus génériques, d'avoir un interlocuteur unique.
- Favoriser toutes les synergies possibles disciplinaires et/ou multidisciplinaires afin d'ouvrir de nouveaux champs d'investigations de la société.
- Constituer une force de frappe visible et dégager un schéma plus clair et plus lisible de la recherche dans les transports terrestres et la mobilité.

Professeur Éric MARKIEWICZ

Directeur de la Fédération de Recherche
CNRS 3733

Université Polytechnique

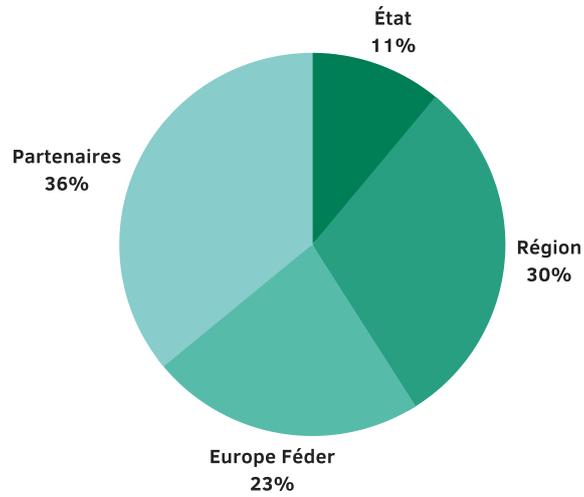
Hauts-de-France

LAMIH UMR CNRS 8201

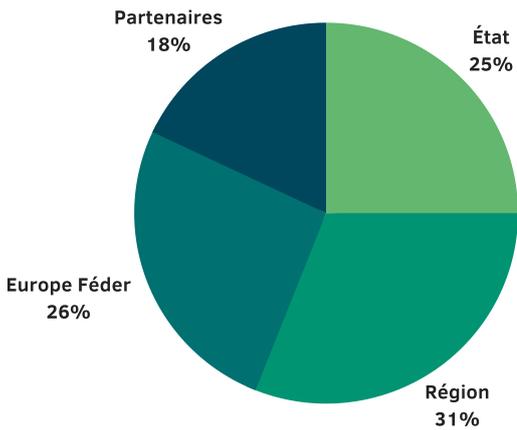


LES MOYENS DU PROJET

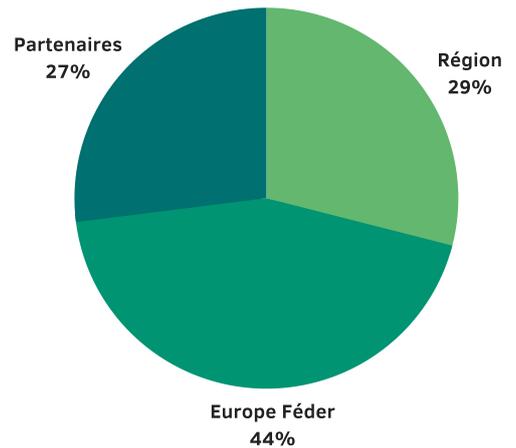
Budget alloué au projet ELSAT2020



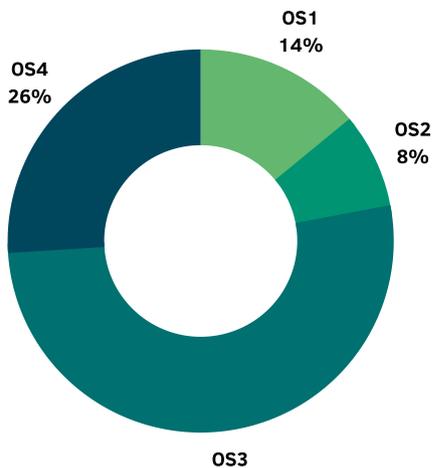
Budget alloué aux investissements



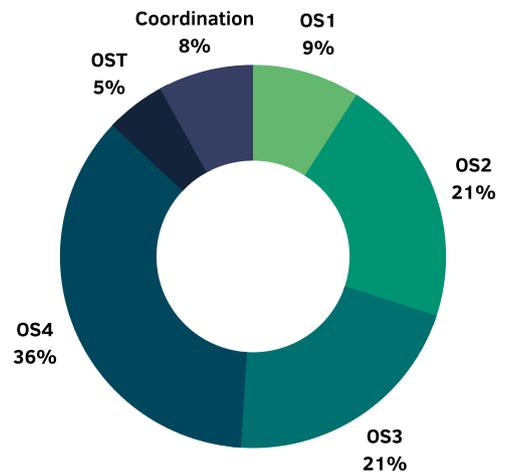
Budget alloué aux ressources humaines



Budget d'investissements dans les plateformes technologiques par Objectifs Stratégiques



Budget des ressources humaines par Objectifs Stratégiques



LES RÉSULTATS DU PROJET ELSAT2020 EN CHIFFRES



300 Enseignants chercheurs,
chercheurs, Ingénieurs de recherche et d'études

89 Projets collaboratifs



77 Thèses



485 Publications scientifiques



39 Prix et distinctions



21.5 M € BUDGET

495 Conférences
et communications



4 START-UP



11 brevets



OBJECTIF STRATÉGIQUE pour l'humain dans les transports et sa mobilité

« Tous mobiles, tous protégés » pourrait être le focus principal de cet objectif stratégique, tous comprenant les Personnes à Mobilité Réduite (PMR), incluant vieillissement et handicap. Trois sujets composent cette thématique pour répondre aux mêmes défis sociétaux de mobilité durable pour tous avec : MObilité Propre et Efficace, Mobilité et Sécurité des Personnes à Mobilité Réduite, Interactions rail-route Sûre et Durable.

Ils visent tous trois à développer une compétence forte sur le thème de la conception des systèmes d'assistance aux usagers des transports routiers ou guidés, qu'ils soient conducteurs ou passagers. La valorisation et le transfert de ces compétences s'appuient sur une infrastructure technique et humaine développée en région depuis maintenant plus de 20 ans.

LES TRAVAUX SONT CONCENTRÉS SUR TROIS QUESTIONS SCIENTIFIQUES :

- La conception et l'évaluation de systèmes d'aide à la mobilité personnalisés, et acceptés, favorisant l'autonomie de la personne, qu'elle soit ici âgée ou lourdement handicapée avec :

- a. Un système embarqué de détection et prédiction de la chute chez la personne âgée qui est un problème de santé publique : un tiers des personnes de plus de 65 ans chute au moins une fois par an,

- b. Le Fauteuil Roulant Electrique (FRE) pour les personnes présentant des déficiences motrices sévères et rencontrant des difficultés pour conduire un FRE et s'orienter.

- La sécurité dans la mobilité avec notamment la problématique du véhicule autonome et de ses usages. Proposer des assistances adaptées aux conducteurs et aux usages du véhicule nécessite de lever de nombreux verrous tels que : pouvoir classifier en temps réel les comportements des conducteurs, construire des modèles

de ces comportements en situation de conduite, modèles qui sont utilisés pour le développement de stratégies de contrôle partagé améliorant l'acceptabilité des systèmes d'assistance par une adaptation des contrôles véhicule aux besoins particuliers de chacun, développer des modèles de coopération multiniveaux (stratégique, tactique, opérationnel) entre conducteur et système d'assistance, ...

- Diminution de la consommation énergétique ferroviaire par l'amélioration de la gestion de trafic et la planification des trafics en environnements perturbés reposant entre autres sur des critères d'optimisation globale. Le développement de la plateforme de cosimulation rail-route, en interconnectant les différents simulateurs du LAMIH UMR CNRS 8201 entre le véhicule SHERPA et le simulateur ferroviaire PSCHITT via le cluster de simulation, est un des défis technologiques de ce projet.

DES OBJECTIFS DÉCLINÉS EN SOUS THÉMATIQUES :

1. Vers une mobilité propre et efficace

- ☞ Développer des véhicules propres prenant en compte la complexité des usages ;

- ☞ Adapter les assistances aux besoins particuliers de chacun ;

- ☞ Développer une plateforme originale couplant véhicule réel et simulateur en transversal avec l'objectif stratégique de concevoir, prototyper et tester des fonctions avancées sur véhicule.

Dans ce cadre ont été développées les plateformes SHERPA (simulateur dynamique de véhicule automobile) et DS7 (véhicule laboratoire pour le prototypage et l'évaluation de systèmes avancés d'aide à la conduite : ADAS). L'atout majeur de ces plateformes est qu'elles partagent la même architecture matérielle et logicielle ce qui permet de passer très facilement aux essais sur piste (Gyrovia sur le site de Transalley) dès que les systèmes sont validés sur simulateur.

2. Mobilité et sécurité des personnes à mobilité réduite

- ☞ Disposer d'infrastructures urbaines adap-

tées au partage de la mobilité.

☞ Sécuriser les usagers (PMR) dans leur mobilité urbaine.

☞ Favoriser l'intégration des PMR dans la société mobile.

Les enjeux technologiques visent à proposer un dispositif autonome et adaptatif permettant la détection et la prédiction de la chute chez la personne âgée et, pour le fauteuil, de pallier les difficultés en développant de nouveaux modes d'interaction homme-machine (contrôle partagé) par introduction de primitives de navigation automatique (détection automatique d'obstacles, passage automatique de portes, positionnement automatique du FRE pour les transferts, etc.). Les enjeux scientifiques sont d'une part, de prédire la chute en position debout ou durant la marche en temps réel, d'apporter des solutions aux problèmes liés à la commande optimale coopérative des systèmes multi-dynamiques en présence de contraintes et en prenant en compte les incertitudes et d'autre part, d'étudier les déplacements des PMR en fauteuils roulants électriques dans l'environnement urbain pour leur proposer des interfaces utilisateur sensibles au contexte, personnalisées et multimodales.

3. Interactions rail-route sûre et durable

☞ Amélioration de la sécurité des interactions rail - route (tramway-automobile, passages à niveaux),

☞ Assistance à la conduite ferroviaire pour l'économie d'énergie.

Les travaux scientifiques de ces trois projets sont associés au développement de moyens technologiques lourds sous forme de plate-formes mutualisées visibles qui assurent l'attractivité de la région sur ce thème. Uniques au niveau du monde académique national, elles permettent de remporter de nombreux projets financés par l'Etat, la région Hauts-de-France dans le cadre des contrats de plan Etat Région dont bénéficie le projet ELSAT2020 pour le programme 2015-2020 associé au PO FEDER (Fonds Européen de Développement Régional, aux côtés des tutelles des laboratoires, mais également dans le cadre

d'appels à projets de l'Agence Nationale de la Recherche, de l'Europe, ... et ont permis d'attirer de nombreux industriels désireux de collaborer.

TRAVAUX EFFECTUÉS ET RÉSULTATS

Les travaux effectués dans l'OS1 sont à l'origine de nombreux résultats qui ont d'une part été publiés dans des revues scientifiques majeures du domaine et d'autre part ont permis d'initier des collaborations avec les industriels et/ou académiques du domaine pour être transférés vers le monde socio-économique.

Projet ANR AutoConduct (Adaptation de la stratégie d'automatisation des véhicules autonomes (niveaux 3-4) aux besoins et à l'état des conducteurs en conditions réelles ; 2017-2020) piloté par l'institut VéDéCom, acteur national majeur de la thématique (VeDeCom, IRCyN, UGE, Continental Auto-motive, Stellantis, LAB).

Projet ANR CoCoVéIA (2019-2023) sur la Coopération Conducteur Véhicule Intelligent Automatisé, piloté par le LAMIH UMR CNRS 8201 (LAMIH, U Caen-COMETE, Stellantis, Continental Automotive, Valeo, SpirOps).

Projet SAMDI (Système d'Aide à la Mobilité pour les personnes présentant une Déficience Intellectuelle ; 2020-2023), projet STIMule de la région Hauts-de-France en partenariat avec l'Université Polytechnique Hauts-de-France (ex. UVHC), l'Université de Lille, l'UDAPEI et Urban Labs Technologies.

Action de Recherche Incitative du LAMIH : ARI Model'Mobil en 2018-2019

Projet QBA : projet Carnot ARTS pour la réalisation des premiers algorithmes de contrôle assurant la stabilité de l'ergomètre de la plate-forme PSCHIT-PMR en 2019.

Projet ANR CapaCities (2019-2023) traitant de la Quantification du coût biomécanique des déplacements urbains en fauteuil roulant pour l'accessibilité des villes de demain (LAMIH, ENSAM - IBHGC, IRISA, INI/CERAH)

Brevet U.S. Patent Application No. 15/432,345 Miglianico, D., Enjalbert, S., Mouchel, M., Dahyot, R.,

Moyart, L., & Vanderhaegen, F. (2017).
 Un autre résultat très important de ces travaux a été le développement de plusieurs plateformes structurantes supportant les travaux de

recherche et améliorant la visibilité régionale sur les thématiques : Plateformes SHERPA, DS7, PSCHITT-Rail et PSCHITT-PMR notamment.

L'HUMAIN DANS LES TRANSPORTS ET SA MOBILITÉ

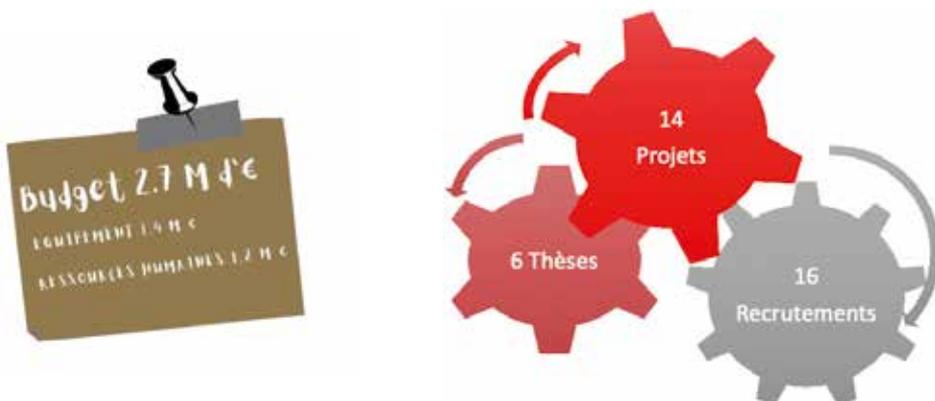
Les chiffres clés

Production scientifique

Valorisation

L'humain dans les transports et sa mobilité

Les sous projets	GLOBAL	1	2	3
● Revues à comité de lecture	18	14	2	2
● Communications conférences Internationales	22	11	9	2
● Communications conférences Vulgarisation	18	6	9	3
● Total par sous projet	58	31	20	7



Partenaires impliqués

L'humain dans les transports et sa mobilité

Tutelles				
Laboratoires				
1 Vers une mobilité propre et efficace	✓			✓
2 Mobilité et Sécurité des Personnes à Mobilité Réduite	✓	✓	✓	
3 Interactions rail-route Sûre et Durable	✓			✓

DÉCLINAISON DES TRAVAUX RÉALISÉS SELON LES SOUS PROJETS DU THÈME L'HUMAIN DANS LES TRANSPORTS ET SA MOBILITÉ

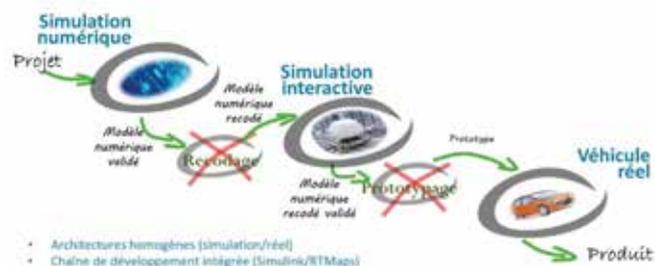
1. Vers une mobilité propre et efficace

Les principaux résultats produits sur la thématique concernent la modélisation des interactions avec le conducteur avec principalement le développement et la validation des premiers prototypes de mécanismes d'interaction qui ont été développés sur la plateforme SHERPA. Ils ont fait l'objet de tests fonctionnels de validation avec des panels de conducteurs. Plusieurs publications scientifiques ont été réalisées afin de diffuser ces premiers résultats.



Durant le déroulement de cette phase du projet, des rapprochements ont été réalisés avec l'institut Vedecom, acteur national majeur sur la thématique du véhicule autonome. Les travaux réalisés dans l'OS1-P1 ont permis à l'équipe du LAMIH d'intégrer le projet ANR AutoConduct (2017-2020), retenu pour financement par l'ANR et coordonné par l'institut Vedecom. De plus, ces travaux ont contribué à la structuration du projet CoCoVéIA (2019-2023) sur la Coopération Conducteur Véhicule Intelligent Automatisé, financé par l'ANR et piloté par le LAMIH UMR CNRS 8201.

Cette thématique de recherche nécessite des travaux de prototypage matériel et logiciel et également la réalisation de tests et expérimentations. Si le recours à la simulation est très intéressant pour



des questions pratiques, de coût et également de sécurité, le passage au véhicule réel reste néanmoins indispensable pour valider les approches proposées, via des tests sur piste d'essai.

La phase de développement du démonstrateur « Véhicule Automatisé Coopérant Auto-adaptatif » prévue dans le cadre du projet ELSAT2020 a démarré en décembre 2019. Cette phase concernait la réalisation d'un prototype « ouvert » de véhicule autonome, basé sur une architecture matérielle et logicielle compatible avec celle du simulateur SHERPA, ceci afin de faciliter le transfert des développements réalisés en simulation au monde réel. La durée nécessaire au développement d'un tel véhicule a été d'une année complète :

1. Une première phase de 6 mois a permis la recherche et l'achat du véhicule de série support, le choix des différents capteurs qui vont être ajoutés conformément au cahier des charges, et également pour le travail de « conception » du véhicule, comprenant les choix d'architecture matérielle et logicielle ainsi que l'élaboration des plans de câblage.
2. Une seconde phase d'environ 5 mois a consisté à réaliser les travaux sur le véhicule.
3. Enfin, la troisième phase de 1 mois comprenait les tests et la mise au point du véhicule ainsi que la finalisation de la documentation associée.

Ces trois phases ont été menées en partenariat avec la société FH Electronics, située à Orléans. Cette société est spécialisée dans le développement de véhicules laboratoires. Basé sur une DS7, ce véhicule d'essais dont l'instrumentation entière a été spécifiée par l'équipe du projet a été livré mi 2021.



L'ensemble des développements réalisés sur le simulateur SHERPA sont en cours d'intégration progressive, ce qui permettra de les porter facilement vers le monde < réel > pour réaliser des tests sur la piste d'essais située sur le technopole Transalley, tests qui seront réalisés dans le cadre du CPER RITMEA.



2. Mobilité et Sécurité des Personnes à Mobilité Réduite

Concernant la prévention de la chute, deux types de modèles ont été développés et une première validation a été réalisée avec des essais de marche non pathologique sur des personnes non âgées. Le premier modèle provient de l'application des lois fondamentales de la dynamique en 2D. Ce premier modèle utile pour la compréhension mais pas suffisamment exhaustif pour la commande, a été suivi d'une deuxième modé-

lisation plus fine. Le 3D étant trop lourd pour la commande, la seconde modélisation se base sur le fait que la marche est un mouvement périodique et peut se modéliser sous la forme d'une transformée de Fourier. Dans ce cas, la 3D n'est plus un problème, le seul inconvénient est que les liens existants entre les différents points constituant le modèle ne sont pas pris en compte.

A partir de ces modèles, une première solution de développement d'un système embarqué a été réalisée dans le cadre d'un projet START AIRR suivi de la création de la StartUp MediWAT incubée à la technopole Transalley. Un brevet est en cours de dépôt avec la SATT Nord et les protagonistes recherchent actuellement des moyens de financer les développements restants.

Une ontologie sur le risque de chute a également été réalisée. Cette tâche s'est avérée assez longue, en raison de l'importance accordée à la validation des étapes de modélisation par les experts (partie UML de l'ontologie), et d'autre part liée à la formalisation de l'ontologie en OWL (logiciel protégé). Une version validée et formalisée de l'ontologie des facteurs de risque de chute est disponible depuis juin 2018.

Sur la base de cette ontologie, une étude de faisabilité du moteur de raisonnement du système d'aide à la prévention des chutes à base de modèle graphique probabiliste a été réalisée. Cette étude a été réalisée en partie par la définition de plusieurs réseaux Bayésiens sur la base des données fournies par le CHU de Lille et avec une sélection des variables sur la base de l'ontologie. L'identification des variables a été faite sur la base de l'ontologie, plusieurs types de graphes ont été testés et la définition des probabilités a été faite par apprentissage sur une base de données issue du service de la chute du centre hospitalier de Lille. Les résultats de cette première étude ont conduit à une légère réorientation des objectifs de l'évaluation du risque de chute à l'évaluation des facteurs de risque de chute.

La phase d'évolution des premiers modèles graphiques probabilistes s'est ensuite poursuivie avec l'objectif d'évaluer les facteurs de risque de chutes sur la base d'un ensemble incomplet d'observations sur la personne, avec des évolutions au niveau de chaque étape de définition des modèles (identification des variables, définition du graphe et des probabilités). Ce travail de modélisation des connaissances a été soutenu par le LAMIH via une Action de Recherche Incitative, l'ARI Model'Mobil en 2018-2019. Ce soutien a notamment renforcé la qualité du travail de modélisation par des contacts avec des spécialistes de la modélisation via des ontologies et des modèles graphiques probabilistes.

En ce qui concerne le fauteuil roulant électrique, la thèse de Viet-Thuan Nguyen sur le contrôle partagé personnalisé en fauteuil roulant électrique nous a permis de proposer et de développer un nouveau mode de coopération entre l'utilisateur et un système d'aide à la navigation en fauteuil roulant électrique. Le système est basé sur une approche de commande partagée interagissant avec l'utilisateur via un joystick à retour de force. Le système d'assistance proposé cible trois objectifs principaux :

- a) Prédire l'intention de l'utilisateur à l'aide des mouvements du joystick ;
- b) Réduire l'effort de l'utilisateur pour manipuler le joystick pendant la tâche de navigation ;
- c) Aider l'utilisateur à éviter l'obstacle tout en résolvant le conflit entre la décision de l'utilisateur et l'intention du système.

Ces travaux ont produit les résultats suivants :

- Un modèle de fauteuil roulant électrique en interaction avec l'utilisateur (via le joystick) et son environnement a été développé et validé en simulation avec une interface de réalité virtuelle. Le modèle tient compte de la dynamique du contact pneu/sol, la dynamique des roues libres, le transfert de charge, le déplacement du centre

de gravité (lié aux mouvements de la personne) et la géométrie du chemin.

- Le fauteuil roulant posé sur l'ergomètre a été instrumenté pour mesurer les vitesses de rotation et les efforts au contact de manière à interagir avec l'environnement virtuel.
- Une identification des paramètres du modèle du fauteuil a été réalisée à partir des enregistrements des capteurs entrées/sorties permettant ainsi de valider le modèle dynamique proposé.
- Un algorithme de planification de trajectoire permettant le calcul des trajectoires sûres en évitant les obstacles fixes basé sur la méthode RRT (Rapid Random Tree) a été développé également.
- Une approche de commande floue de type Tagaki-Sugeno a été proposée pour le contrôle partagé du fauteuil roulant électrique qui fournit les couples d'assistance au joystick afin de réduire les efforts de l'utilisateur en tenant compte de plusieurs contraintes liées au confort de l'utilisateur (jerk, accélérations, ...), les limites physiques des actionneurs du fauteuil et la sécurité (erreur de positionnement par rapport à la trajectoire planifiée).
- Au niveau tactique, des fonctions de gestion des risques-conflits permettant de prévoir les collisions potentielles, de rechercher les trajectoires alternatives permettant d'éviter ces collisions et de les communiquer à l'utilisateur via le joystick haptique ont été développées afin d'assurer une coopération efficace entre l'utilisateur et le système d'aide à la navigation en fauteuil roulant électrique.

Le système a pu être testé et validé sur la plateforme PSCHITT-PMR grâce à l'interface développée pour le contrôle de l'ergomètre de fauteuil de la plateforme de simulation. Cette étape a nécessité à la fois une modélisation mécanique des interactions sujet/fauteuil roulant/environnement et la définition d'algorithmes de contrôle assurant la stabilité de l'ergomètre. L'aspect immersif

est assuré par l'environnement logiciel SCANer Studio (AV Simulation).

3. Interactions rail-route sûres et durables

Les objectifs de ce sous projet (Amélioration de la sécurité des interactions rail - route (tramway-automobile, passages à niveaux) et Assistance à la conduite ferroviaire pour l'économie d'énergie) nécessitaient dans un premier temps de développer la plateforme de co-simulation rail-route en interconnectant les différents simulateurs du LAMIH (PSCHITT-RAIL et SHERPA).

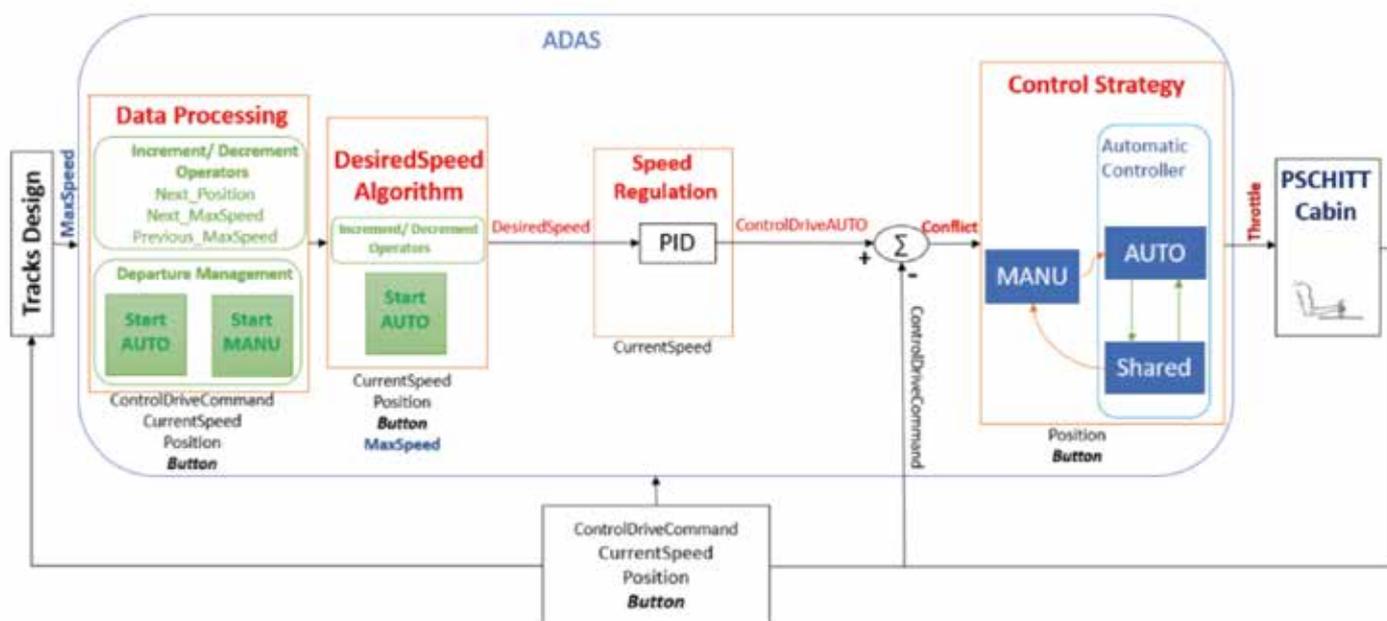
Les différentes vues ci-après depuis les simulateurs PSCHITT-RAIL et SHERPA permettent d'expliquer le fonctionnement de la co-simulation. Dans la vue depuis PSCHITT-RAIL, le véhicule contrôlé par le simulateur SHERPA est visible pour le conducteur de tramway sur sa gauche (véhicule jaune). Dans la vue depuis SHERPA, le tramway contrôlé par le simulateur PSCHITT-RAIL se situe naturellement à la droite du conducteur automobile. Il est ainsi possible d'étudier le comportement des deux conducteurs dans des situations accidentogènes impossibles à reproduire en situation réelle. Le système de co-simulation a été testé et validé courant 2021, il est maintenant disponible pour réaliser des essais.



En parallèle avec le développement du système de co-simulation, des outils mathématiques ont été mis en place pour estimer l'état mental du conducteur (hypovigilance, distraction...). La connaissance de cet état est indispensable car il conditionne la perception du risque et diminue l'évaluation des dangers possibles. Des méthodes de classification semi supervisée ont été appliquées pour aborder l'estimation de la vigilance d'un conducteur seul. Elles ont été développées et validées sur des données recueillies sur une population de conducteurs de tramway recueillies lors d'expérimentations réalisées sur le simulateur en 2016. Il convient maintenant d'aborder les situations accidentogènes impliquant plusieurs humains simultanément.

Concernant l'objectif de l'optimisation de la diminution de la consommation énergétique locale (pour un tramway) avec prise en compte des

Architecture for Tramway Driving Control



actions du conducteur, les travaux réalisés ont montré des gains potentiels non négligeables sur des approches visant à sensibiliser le conducteur à l'éco-conduite ferroviaire. Afin d'assister le conducteur à mettre en œuvre ces recommandation d'éco-conduite, des systèmes mettant en œuvre différentes stratégies de contrôle/commande ont été investiguées (assistance haptique à la traction, affichage tête haute... afin de généraliser et d'optimiser cette démarche.

PROJETS COLLABORATIFS

 CapaCITIES (Quantifier le coût biomécanique des déplacements urbains en fauteuil roulant pour l'accessibilité » des villes de demain) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (524 K€) avec l'UPHF-LAMIH, ENSAM - IBHGC, IRISA, INI/CERAH.

<https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE19-0007>

 CoCoVeIA (Coopération Conducteur-Véhicule Intelligent Autonome) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (734 K€) avec UPHF- LAMIH UMR CNRS 8201, PSA ID, CAF CONTINENTAL AUTOMOTIVE France, SPIR OPS, DAV SA DAV SA, COMETE UMR 1075 INSERM.

<https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE22-0009>

 AutoConduct (Adaptation de la stratégie d'automatisation des véhicules autonomes aux besoins et à l'état des conducteurs en conditions réelles), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (1.1 M€) avec entre autres UPHF- LAMIH UMR CNRS 8201 et l'UGE site de Lille (en lien avec l'objectif stratégique intitulé « Dimensionnement et performance de véhicule – Mobilité Intelligente)

<https://anr.fr/Project-ANR-16-CE22-0007>

 Projet structurant Co-Simulation (CoSim) dans le cadre Carnot ARTS de 2019 à 2020 d'un montant de 100k€ avec 2 Ingénieurs de Recherche. Nous avons étudié et validé la possibilité de créer une plateforme virtuelle connectant des plate-formes physiques hétéro-gènes géographiquement distribuées.

 Projet européen Shift2Rail CAR, BODY & Interiors (CARBODIN) de 2019 à 2022 d'un montant de 3500k€ avec 30 ingénieurs et chercheurs, dont 1 Ingénieur d'Etudes recruté par l'UPHF sur un budget local de 150k€. Le travail scientifique a consisté en une enquête européenne qui doit permettre de faire émerger les besoins en systèmes d'aide à la conduite pour les trains du futur.

THÈSES

 Université Polytechnique Hauts-de-France laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201 (2021), Encadrement : JC Popieul, P. Pudlo, C. Sentouh, 'Commande partagée basée modèle pour fauteuil roulant à assistance électrique avec joystick à retour d'effort'.

 IMT-Atlantique laboratoires LS2N et UPHF LAMIH (2021)

Encadrement : P. Chevrel, F. Mars, C. Sentouh 'Véhicule autonome : Conception d'une stratégie de contrôle partagé pour les transitions entre conduites manuelle et automatisée'.

 Université Artois laboratoire LGI2A (2020), Encadrement : F. Delmotte, F. Pichon, 'Régression logistique crédibiliste : application à l'étalonnage actif de classifieurs et extension choquistique'.

SHERPA

Simulateur Hybride d'Etude et de Recherche Pour l'Automobile

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/SHERPA>

Laboratoire LAMIH UMR CNRS

Le simulateur de conduite SHERPA est utilisé principalement pour des projets de recherche impliquant le développement et le prototypage de systèmes coopératifs d'aide à la conduite dans le cadre de travaux visant globalement l'amélioration de la sécurité routière et le développement de la « conduite automatisée » : projet CPER ELSAT2020, ANR CoCoVéA « Coopération Conducteur - Véhicule Automatisé », ANR AutoConduct « Adaptation de la stratégie d'automatisation du véhicule autonome aux besoins et à l'état du conducteur » et ANR CoCoVéIA pour « Coopération Conducteur - Véhicule Intelligent Autonome ». Ces travaux sont conduits par des équipes pluridisciplinaires propres à chaque projet, composées d'automaticiens, d'informaticiens, de mécaniciens et de psychologues.



PRIVAC - DS7

Démonstrateur de Véhicule Automatisé Coopérant

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/demonstrateur-de-vehicule-automatise-cooperant>

Laboratoire LAMIH UMR CNRS

Le démonstrateur de Véhicule Automatisé Coopérant est utilisé pour valider des travaux dans le domaine de la coopération homme-machine, tout particulièrement sur les aspects de partage du contrôle du véhicule entre le conducteur et les automatismes en liaison avec l'état du conducteur. Les développements sont menés en premier lieu sur le simulateur dynamique SHERPA puis transférés sur le véhicule DS7 pour des tests de validation réalisés sur piste d'essai.

Ce véhicule, acquis dans le cadre du projet ELSAT2020, est actuellement utilisé pour des travaux inscrits dans ELSAT2020 et le projet de recherche de l'Agence Nationale de la Recherche, CoCoVéIA pour « Coopération Conducteur - Véhicule Intelligent Autonome ».

Des tests en conditions réelles sont réalisés sur la piste d'essais Gyrovia du technopole Transalley jouxtant le campus universitaire de l'Université Polytechnique Hauts-de-France



PSCHITT

Plateforme de Simulation Collaborative,
Hybride, Intermodale en Transports Terrestres

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/PSCHITT>

Laboratoire LAMIH UMR CNRS

Cette plateforme constitue un support expérimental pour des recherches menées dans le cadre du transport. Sa conception modulaire lui permet de s'adapter à un large éventail d'expérimentations scientifiques et de contextes d'usage. Multimodale, cette plateforme permet, grâce à un système de cabines interchangeable, de simuler différents modes de transport. Deux ingénieurs en assurent la conception et l'exploitation.

La plateforme peut ainsi être configurée selon différentes modalités en fonction du mode de transport ciblé :

PSCHITT-Rail : conduite ferroviaire tram/train

Dans le domaine ferroviaire, de nombreuses recherches sont menées pour évaluer l'intégration de nouveaux matériels dans les postes de conduites, ou encore pour étudier le comportement des conducteurs faces à des situations accidentogènes par exemple. Le simulateur PSCHITT-Rail est un outil permettant de mener ce type d'études en toute sécurité.



PSCHITT-PMR

Déplacement en fauteuil roulant d'une
Personne à Mobilité Réduite :

Le déplacement des Personnes à Mobilité Réduite (PMR) apparaît fortement dépendant de l'environnement dans lequel elles évoluent. L'environnement urbain se révèle souvent peu ou mal adapté à ce type de population et présente des caractéristiques définies de manière générique alors que les handicaps peuvent, quant à eux, être très variés. La plate-forme PSCHITT-PMR constitue un support d'étude et d'amélioration de la mobilité et de la sécurité des PMR. Trois verrous scientifiques principaux sont à lever et portent sur : l'étude expérimentale et la modélisation des PMR, le diagnostic de l'état de l'opérateur humain appliqué aux PMR, l'assistance au déplacement des PMR.

PSCHITT-PMR est actuellement utilisée dans le cadre des projets CPER ELSAT2020 et ANR Capa-Cities

Fonctionnalités

- Immersion visuelle et sonore,
- Retour haptique selon le contexte (déplacement, pente, montée, dévers, ...),
- Calcul en temps réel des caractéristiques cinématiques du fauteuil (fonction des actions PMR et de l'environnement).



OBJECTIF STRATÉGIQUE

Optimisation des systèmes de mobilité et logistique

Cet objectif stratégique a l'ambition de positionner la région comme un des centres mondiaux leaders dans le domaine de « l'internet de la logistique des transports et des biens » permettant une maîtrise globale de l'efficacité énergétique. Deux défis prioritaires qui interfèrent de manière transversale avec les différents modes de transports terrestres ont été identifiés, en lien direct avec la révolution informationnelle Internet : Garantir la qualité d'usage des modes de transports ; Atteindre la performance logistique.

Les travaux sont concentrés sur trois questions scientifiques :

- Systèmes d'aide à la mobilité urbaine : Grâce à l'essor des nouvelles technologies (smartphones, réseaux sans fil, GPS) permettant d'accéder en temps réel à une information « universelle », de nouvelles générations de systèmes d'aide à la mobilité seront développés pour la gestion du déplacement multimodal, le développement du covoiturage personnalisé, l'aide au stationnement et l'exploitation des flottes de véhicules autonomes.
- Usage sécurisé des modes de transport : Il se traduit dans la gestion de la logistique en situation de crises par une modélisation numérique fine de la réaction face à une perturbation inattendue ; dans la maintenance prédictive des infrastructures ferroviaires par des travaux de planification des activités pour un meilleur niveau de service et une diminution des perturbations du trafic (avec l'IRT Railenium) ; dans la prise en compte des comportements décisionnels individuels et collectifs dans la définition des principes d'optimisation des systèmes, analysés à travers des retours d'expériences couplant analyse de la performance, de la sécurité et de la sûreté.

- Performance et Efficacité des chaînes logistiques globales : Les travaux viseront à permettre aux entreprises d'atteindre un niveau d'excellence dans la performance logistique en termes de coût, d'impact environnemental, d'approvisionnement (Supply Chain Management), à travers la prise en compte des défis posés par la conception de systèmes de transport massifié multimodal au service des chaînes logistiques durables ; les collaborations durables dans les chaînes logistiques de l'automobile ; la logistique urbaine ; la gestion des entrepôts, des plateformes multimodales ; la comodalité du transport fret-voyageurs.

Des objectifs déclinés en sous thématiques :

1. Approches hybrides en logistique : Transport et Mobilité

- ☞ Définir la localisation optimale des plateformes multimodales.
- ☞ Optimiser l'affectation de ressources, les taux de remplissage.
- ☞ Faciliter l'approche multimodale de la logistique.

2. Planification et ordonnancement de la maintenance

- ☞ Adapter les systèmes de transport aux évolutions des attentes des clients.
- ☞ Améliorer la disponibilité des moyens et infrastructures.
- ☞ Fiabiliser l'usage de la logistique multimodale.

3. Chaîne logistique durable

- ☞ Construire une chaîne logistique durable basée sur le concept de l'Internet Physique (collaboration pour consolider et massifier les flux).
- ☞ Construire une chaîne de valeur multimodale compétitive.
- ☞ Considérer l'impact environnemental comme un facteur clé de succès et d'innovation.
- ☞ Développer des modèles entrepreneuriaux : étendus et collaboratifs.

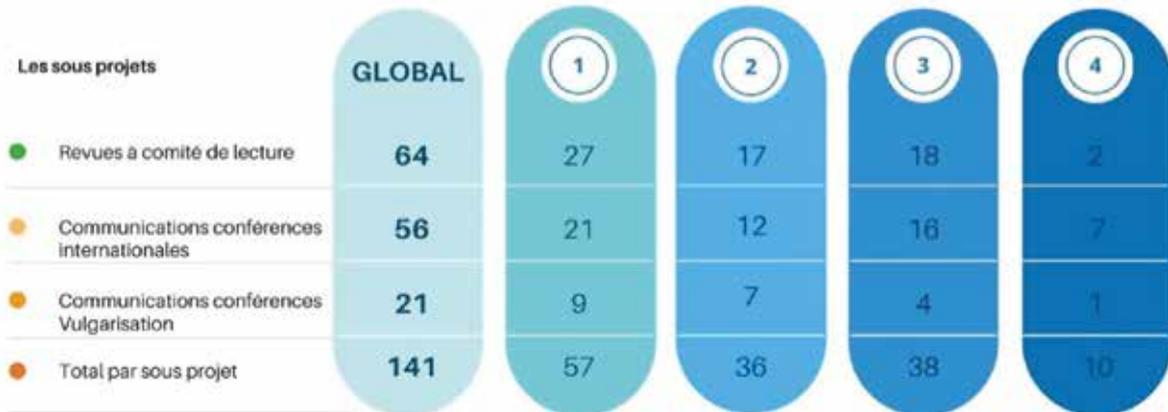
OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE MOBILITÉ ET LOGISTIQUE

Les chiffres clés

Production scientifique

Valorisation

Optimisation des systèmes de mobilité et logistique



Partenaires impliqués

Optimisation des systèmes de mobilité et logistique

Tutelles



Laboratoires



1	Approches hybrides en logistique Transport et Mobilité	✓	✓	✓	✓
2	Planification et ordonnancement de la maintenance	✓	✓	✓	
3	Chaîne logistique durable	✓		✓	
4	Service mobile incitatif à l'inter-modalité	✓	✓	✓	

DÉCLINAISON DES TRAVAUX RÉALISÉS SELON LES SOUS PROJETS DU THÈME OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE MOBILITÉ ET LOGISTIQUE

1. Approches hybrides en logistique : Transport et Mobilité

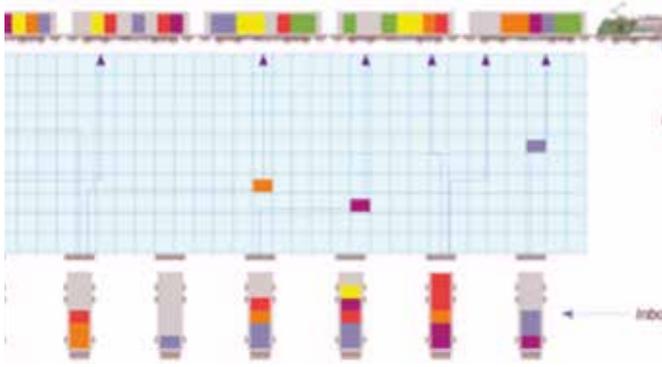
Les principaux résultats concernent la conception et le développement de nouveaux modèles et méthodes pour résoudre des problèmes existant dans la chaîne logistique (sac à dos disjonctif, localisation, routage, affectation de ressource...). Ces méthodes ont obtenu de meilleurs résultats en qualité de solution et en temps de calcul que celles couramment utilisées. En effet, les travaux ont porté sur la conception de nouvelles mathématiques (méthodes combinant programmation mathématique et heuristiques) pour résoudre efficacement les problèmes suivants : I) problème de conception de réseaux multiproduits avec coût fixe et capacité, dont le but est de minimiser le coût total permettant d'acheminer la demande associée à chaque produit depuis l'ensemble des origines jusqu'aux destinations, en respectant les contraintes de capacités de transfert; II) problème du voyageur de commerce sélectif intégrant des contraintes dites de tirant d'eau; III) problème de localisation des entrepôts qui consiste à choisir les meilleurs endroits pour localiser les entrepôts afin de minimiser conjointement les coûts d'installation des dépôts et de transport; IV) problème d'affectation dans le cross-docking dont l'objectif est de gérer les activités dans un centre de stockage afin de minimiser les coûts de transport (le cross docking est un type de gestion d'entrepôt dans la chaîne logistique qui permet de préparer les commandes sans passer par la phase de stockage des produits en entrepôt et du picking) ; Les méthodes itératives proposées combineront les relaxations (programmation linéaire, relaxation lagrangienne), problème réduit, et des heuristiques / métaheuristiques (recherche tabou probabiliste, recherche à voisinage variable,

stratégie d'oscillation, recherche dispersée, etc). Pour la plateforme démonstrateur, des réunions de réflexion (brainstorming) autour de la réalisation de cette plateforme se sont déroulées. Un cahier de charge et une simulation ont été réalisés. La plateforme FESTO MPS a été reçue le 10/06/2021. Un ingénieur d'étude avec les chercheurs impliqués ont procédé à l'installation de la station, à sa configuration et à réaliser les premiers tests de fonctionnement. Deux groupes d'étudiants masters ont été recrutés pour travailler sur des scénarios de tests de la plateforme sur différentes problématiques : l'utilisation de l'IoT, l'intégration de la blockchain. Les racks de stockage seront exploités pour expérimenter les nouvelles technologies dans les nouveaux entrepôts (traçabilité, RFID, inventaires par drone, ...).

Phasage du projet

2015-2017 : les membres du projet ont travaillé sur la conception et le développement de nouveaux modèles et méthodes pour résoudre différents problèmes intervenant dans la chaîne logistique, en particulier : (I) problème de sac à dos disjonctif II) uncapacitated r-allocation p-hub median problem; (II) problème de localisation ; (III) problème de routage ; (IV) problème d'affectation de ressources ; (V) Swap-Body Vehicle Routing Problem, (IV) problème de maintenance périodique.

2018-2020 : les travaux s'orientent sur la conception de nouvelles mathématiques pour résoudre efficacement les problèmes suivants : I) problème de conception de réseaux multiproduits avec coût fixe et capacité; II) problème du voyageur de commerce sélectif intégrant des contraintes dites de tirant d'eau; III) problème de localisation des entrepôts ; IV) problème d'affectation dans le cross-docking dont l'objectif est de gérer les activités dans un centre de stockage afin de minimiser les coûts de transport ; V) enfin, nous envisageons de proposer des approches hybrides pour résoudre des problèmes quadratiques qui sont en général plus difficile que le cas linéaire.



Optimisation des opérations logistiques dans un cross-dock

2. Planification et ordonnancement de la maintenance

L'ensemble des travaux qui ont été menés dans ce projet concernent les points suivants : i) Maintenance préventive périodique d'un équipement sensible soumis à des pannes : Il peut s'agir d'un dispositif d'aiguillage ferroviaire ou d'une grue-portique utilisée au sein d'une plate-forme multimodale pour passer d'un mode de transport à l'autre (routier, ferroviaire, fluvial). En raison de leur coût ces équipements n'existent parfois qu'en un seul exemplaire sur un site, ils sont donc fortement sollicités et toute panne est préjudiciable à l'entreprise. En raison de leur localisation et/ou de leur taille, leur maintenance exige la mise en place d'une logistique inhérente au chantier de maintenance. En outre, souvent l'ordonnancement des opérations de maintenance sur une infrastructure de transport et la gestion des pièces de rechange se font d'une façon séparée. L'intégration des deux peut engendrer une réduction des coûts d'exploitation ; II) Problèmes couplés VRP - maintenance : Que ce soit pour l'acheminement (ou le transport) de pièces ou matériels plus ou moins volumineux, ou encore pour le transport des techniciens de maintenance si l'équipe de maintenance n'est pas sur place, le couplage entre un problème de tournées de véhicules (VRP) et la maintenance est inévitable ; III) Intégration de la maintenance dans des offres de services réguliers : l'un des as-

pects primordiaux dans le transport intermodal de marchandises concerne la synchronodalité. Elle repose en partie sur la planification de services réguliers à horaires programmés, qui ne sauraient être réalistes sans prise en compte des opérations de maintenance préventive ; (IV.) Plateforme de simulation des tournées d'inspection et de maintenance d'un réseau ferroviaire. L'objectif de la plateforme est de simuler des tournées d'inspection et de maintenance dans un réseaux ferroviaire. Il s'agit d'abord d'envoyer une flotte de drones pour l'inspection des défaillances sur un réseau ferroviaire en prenant en compte les contraintes liées à la charge. Ensuite une flotte de techniciens procédera à la réalisation des tâches de maintenance sur l'ensemble des défaillances détectées. Un ensemble de contraintes est à prendre en compte ici également liées aux pièces de rechange et aux compétences des techniciens. L'organisation des tournées sont décidées à base d'algorithmes de recherche opérationnelle et d'intelligence artificielle.

Phasage du projet

2015-2020 : développement de nouvelles méthodes pour l'optimisation de la planification des activités de maintenance :

- Identification de problèmes réels en logistique de chantier et en maintenance
- Développement de nouvelles approches et algorithmes efficaces d'optimisation pour résoudre les problèmes identifiés
- Élaboration de scénarii de validation des méthodes et algorithmes développés

2020-2022 : pour valider les méthodes élaborées, nous avons décidé de procéder par une approche par simulation en développant un prototype de simulation. Ce prototype est capable de simuler des stratégies de gestion des interventions de chantier pour la maintenance d'infrastructures de transport. Des données issues de la littérature pourront être exploitées. Le pro-

type de simulation développé est couplé avec un module contenant les algorithmes développés précédemment.



Prototype de simulation des opérations d'inspection par drones et de maintenance par les techniciens dans réseau ferroviaire

3. Chaîne logistique durable

La planification de la chaîne logistique a toute son importance dans une entreprise. Elle doit faire face, à toutes les sources d'incertitude (variabilité de la demande, fluctuation des prix...). En outre, elle doit répondre aux enjeux du développement durable : économique, environnemental et social. Une entreprise ne doit pas se limiter uniquement à considérer ses propres contraintes et objectifs. Elle doit s'inscrire dans une démarche de collaboration durable. Pour optimiser ses indicateurs de performance elle doit mutualiser, consolider et massifier les flux de sa chaîne logistique, voir comment il est possible de les améliorer avec le concours d'autres chaînes logistiques. Ainsi nos travaux se sont concentrés sur la notion du PI-hub ou les hubs logistiques considérant les caractéristiques de l'internet physique (PI). Pour cette période nous nous sommes focalisés sur les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels de la planification collaborative de chaînes logistiques durables : I) Au niveau stratégique, nous nous sommes intéressés à la conception d'un réseau de distribution dédié à l'Internet Physique. En particulier, nous avons considéré le concept de localisation de hubs collaboratifs qui permet aux acteurs de chaînes logistiques participantes de

partager leurs ressources afin d'optimiser leurs coûts. L'objectif est de localiser des hubs parmi un ensemble de nœuds candidats, ainsi que de déterminer les flux depuis les nœuds non-hubs vers les hubs afin de minimiser le coût total (coûts d'ouverture, coûts de transport). L'incertitude liée au coût fixe d'établissement d'un hub collaboratif est également prise en compte dans ces travaux. Toujours dans ce niveau de décision stratégique, la conception d'un réseau de distribution dans un contexte d'Internet Physique (IP) intégrant la fonctionnalité de prédiction de la demande a été abordée. L'idée principale est de mesurer l'impact de la prédiction de la demande des clients dans un réseau de distribution compatible IP. Des techniques d'intelligence artificielle ont été utilisées pour assurer cette fonction de prédiction, et des méta-heuristique sont proposées pour optimiser la gestion des tournées de distribution ; II) Au niveau tactique, le pilotage d'une chaîne logistique par une approche DDMRP (Demand Driven Material Requirement Planning) a été étudié. L'objectif est de localiser les stocks et les dimensionner au niveau de la chaîne logistique permettant de garantir un niveau de service et une maîtrise des coûts et de l'impact environnemental. Plusieurs travaux ont été abordés dans la littérature. La plupart de ces travaux ne prennent pas en compte l'impact environnemental avec une approche DDMRP. L'approche DDMRP permet de diminuer l'impact de l'effet du « coup de fouet » sur l'ensemble des partenaires de la chaîne et ainsi réduire l'impact de l'incertitude fortement liée à la variabilité de la demande. Ce travail est mené également dans le cadre d'une collaboration avec le pôle d'excellence EURALOGISTIC ; III) Au niveau opérationnel, une nouvelle meta-heuristique (type VNS) a été proposée pour résoudre le problème d'affectation des quais aux camions avec contraintes de fenêtres de temps dans une plateforme de type cross-dock. Ce type de plateforme est nécessaire

à la structure d'un réseau logistique durable et trouve toute sa place dans le futur réseau IP. Sur la base de prévisions d'arrivées de camions entrants et de camions sortants, il s'agit d'attribuer les quais disponibles en tenant compte de fenêtres de temps. Ces travaux ont été ensuite étendus pour y intégrer l'incertitude sur les temps opératoires nécessaires aux opérations de transbordement dans le cross-dock. Nous avons proposé une stratégie centralisée collaborative pour résoudre le problème à plusieurs acteurs qui se partagent les quais d'un nœud logistique de type cross-dock. Une étude comparative entre un hub classique et PI-hub a été menée également en utilisant la simulation et dans laquelle il a été démontré l'efficacité et les performances réalisées en utilisant des PI-hubs. Les problèmes d'affectations des PI-containers depuis un train vers les portes de sorties dans un PI-hub ont été étudiés. Deux approches, active et réactive ont été proposées pour résoudre ces problèmes d'affectation. La dimension durable a été aussi abordée dans ces travaux de recherche. Ainsi la planification durable dans un Rail-Road PI-hub a été étudiée. Un modèle mathématique de programmation lexicographique multi-objectifs a été proposé, dont le but est de minimiser à la fois la consommation énergétique des PI-conveyors ainsi que le coût d'utilisation des camions. Pour prendre en compte la durabilité de la chaîne logistique d'une façon collaborative, un travail a été mené pour planifier une chaîne logistique dans le cadre de l'économie circulaire afin de réduire l'impact des déchets et augmenter la performance des acteurs impliqués dans une symbiose industrielle.

Phasage du projet

Ce projet de recherche s'articule en cinq étapes :
 2015-2016 : Modélisation de chaînes logistiques durables et collaboratives. L'idée est de s'appuyer sur les possibilités offertes conjointement par les réseaux PI, IoT.

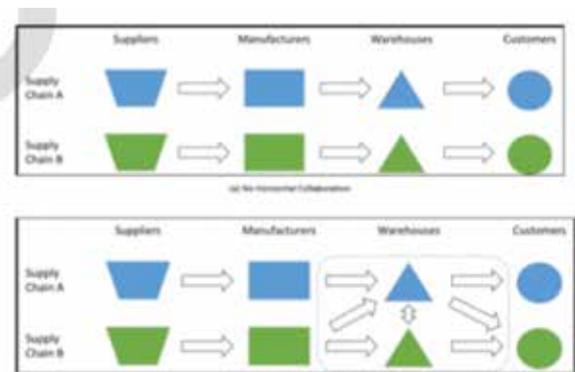
2016-2019 : Proposition et implémentation d'al-

gorithmes pour l'optimisation multicritères de la planification de chaînes logistiques durables et collaboratives au niveau stratégique, tactique et opérationnel. Deux ingénieurs de recherche ont été recrutés en 2018 pour travailler sur les deux aspects : impact environnemental et collaboration selon le concept P.I.

2020 : Développement et élaboration d'un module de simulation utilisant le concept PI.

2021 : Intégration de ces algorithmes avec un module de simulation générique dans le cadre d'un outil d'aide à la décision.

2022 : Élaboration de scénarios pour illustrer et démontrer l'intérêt de la collaboration selon le principe PI pour une logistique durable.



Chaines logistiques collaboratives

4. Service mobile incitatif à l'inter-modalité

Les travaux ont concerné la modélisation et la simulation des échanges et des interactions entre participants. Des méthodes permettant la réduction du nombre de simulations à réaliser pour effectuer un choix ont été développées et validées. Plus particulièrement l'objectif est de proposer un assistant à la mobilité capable de proposer en temps réel à un conducteur différents trajets incluant divers modes de transport (voiture, tram, bus, train, navettes autonomes, etc.) afin de l'inciter à changer de mode de transport. Grâce à cet assistant, un conducteur pourra, avant de rencontrer un embouteillage, visualiser sur son smartphone le coût (en temps, en argent ou en émissions de gaz à effet de serre) des différents trajets proposés, le but étant clairement de l'encourager à garer son véhicule et à

PRIX ET DISTINCTIONS

☞ Best paper award : SALLEZ Y., BERGER T., BONTE T., TRENTESAUX D. (2015).

‘Proposition d’une architecture de contrôle hybride pour le routage dans un hub physique de cross-docking Internet’

15^e Symposium sur les problèmes de contrôle de l’information dans la fabrication, Ottawa, Canada, pp. 2052-2057.

☞ Le lauréat du prix EURO est attribué à Raca Todosijević docteur à l’Université Polytechnique Hauts-de-France pour sa thèse intitulée ‘Contributions théoriques et pratiques sur la recherche par dispersion, la recherche par voisinage variable et les mathématiques pour les programmes à nombres entiers mixtes 0-1’

Lors de la 7^e Conférence internationale sur la modélisation et l’analyse des opérations ferroviaires Rail qui s’est tenue à Lille du 4 au 7 avril, 2017

1^{er} prix - catégorie : prix scientifique EURO Challenge 2016 organisé en collaboration avec AirLiquide.

☞ Prix de thèse 2017 de la fédération de Recherche Transports Terrestres et Mobilité CNRS 3733 attribué à Guillaume DEMESURE doctorant à l’Université Polytechnique Hauts-de-France au sein du laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201 pour sa thèse intitulée ‘Coordination et planification de systèmes multi-agents dans un environnement manufacturier.’



THÈSES

☞ Université d’Artois, laboratoire LGI2A - 2021
Encadrement : D. Mercier, F. Pichon et G. Morvan
‘Une nouvelle politique d’exécution de simulations stochastiques fondée sur des principes de partitionnement, de sélection et de clonage’.

☞ Université Polytechnique Hauts-de-France laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201- 2021
Encadrement : Abdelghani Bekrar, Yves Sallez, Abdessamad ait el Cadi.

‘Vers un modèle prédictif intelligent des demandes pour les systèmes de production et de distribution dans un contexte d’internet physique’.

☞ Centrale Lille Institut laboratoire CRISTAL UMR CNRS 9189 - 2019

Encadrement Frédéric SEMET ‘Modèles et Algorithmes pour les Problèmes de Livraison du Dernier Kilomètre avec Plusieurs Options d’Expédition’.

PROJETS COLLABORATIFS

☞ ANR-France RELANCE, projet en partenariat avec l’entreprise BRAY TRANSPORT, ‘digitalisation de la logistique’ (120K€)

☞ H2020 ‘IW-NET’ avec un consortium de 26 entreprises institutions de recherche et organisations publiques d’Autriche, Belgique, France, Allemagne, Grèce, Italie, Pays Bas, Roumanie et Espagne s’est associé afin de développer et proposer des solutions technologiques et des améliorations pour le transport fluvial. La vision pour les années à venir est la création d’un « réseau collaboratif de transport fluvial européen basé sur l’innovation. (8 302K€)

<https://www.iw-net.eu>

☞ ENCETRE 2 projet co-financé avec les Fonds Unique Interministériel et avec un consortium de 9 partenaires, ‘Energie Non Conventionnelle et Traitement des Eaux’ (4.12M d’€) <https://www.lgi2a.univ-artois.fr/spip/fr/projets/encetre>

LES PLATEFORMES TECHNOLOGIQUES

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/plateformes>

Laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201

MULTIMODE est une plateforme de logistique et de transport multimodal, qui a pour objectif de simuler le transport et la logistique dans la région Hauts-de-France (incluant le transport routier, ferroviaire et fluvial).

Le concept de l'entrepôt du futur à travers l'utilisation de l'IoT, l'intégration de la blockchain, ou notamment la traçabilité RFID, sont aussi étudiés dans MULTIMODE.

La station MPS constitue un élément important dans la plateforme MULTIMODE pour réaliser un démonstrateur de la logistique du futur. Cette station est le module de production le plus important dans la chaîne logistique. Grâce à la technologie FESTO, beaucoup d'options seront envisageables.



Plateforme multimode

ROUTING SIMULATOR

<https://www.lgi2a.univ-artois.fr/spip/fr/prototypes/routingsimulator>

Laboratoire : LGI2A UR 3926

RoutingSimulator, développé dans le cadre du projet ELSAT2020, est un outil d'aide à la décision pour l'optimisation des opérations de maintenance de l'infrastructure ferroviaire. Plus précisément, grâce à la simulation, RoutingSimulator fournit un environnement dynamique idéal pour tester et évaluer les décisions à court terme (ordonnancement des tournées, approvisionnement et management des ressources humaines et matérielles) et à long terme (acquisition et adoption des nouvelles technologies (drones), positionnement des dépôts pour les techniciens).

RoutingSimulator offre la possibilité de tester plusieurs méthodes d'optimisation de tournées incluant les dernières innovations en intelligence artificielle, et d'évaluer leurs performances et robustesse face à la nature incertain et dynamique des événements liés à la maintenance du système ferroviaire.

ENCETRE 2 projet co-financé avec les Fonds Unique Interministériel et avec un consortium de 9 partenaires, 'Energie Non Conventionnelle et Traitement des Eaux' (4.12Md'€)

<https://www.lgi2a.univ-artois.fr/spip/fr/projets/encetre>



Simulation de tournées des drones pour l'inspection de l'infrastructure ferroviaire

OBJECTIF STRATÉGIQUE

Nouveaux matériaux et concepts structuraux

L'objectif stratégique axé sur les nouveaux matériaux et les concepts structuraux vise à développer de nouvelles approches de caractérisation et d'intégration des nouvelles générations de matériaux dits plus « légers », plus « verts », plus « recyclables ». Il s'agit ici de proposer des outils permettant de comprendre le comportement de ces matériaux, l'influence de leur mode de fabrication sur le comportement, la qualité et la durée de vie des pièces mécaniques, et ainsi d'optimiser leur utilisation dans le domaine des transports.

De façon à couvrir un champ d'application le plus large possible, cet objectif stratégique a été scindé en sous-projets.

Les travaux sont scindés en quatre grands enjeux scientifiques :

- L'intérêt de la caractérisation des surfaces et des mécanismes induites par le frottement. La compréhension des couplages (entre mécanique, thermique, tribologie et physico-chimie) en surface des matériaux en frottement pour le développement de solutions de réduction de bruit et d'émissions de particules et de diminution de consommation d'énergie. Les sollicitations tribologiques extrêmes, rencontrées par exemple en freinage ou lors de l'interaction rotor/stator, comportent encore des problématiques scientifiques difficiles de par la méconnaissance des mécanismes physiques mis en jeu particulièrement au niveau des surfaces et par la difficulté d'instrumenter les contacts. Les recherches menées autour de ces problématiques se développent principalement autour d'une approche multi-physique et multi-échelle du contact frottant, rendue possible par le développement d'expérimentations de laboratoire maîtrisées, de développements d'instruments de mesure

au contact, de caractérisations morphologiques multi-échelles et par des développements de modèles pour un dialogue modèle-expérience fort. La dimension matériau, surface et interface et leurs évolutions sous sollicitations est au centre de ces couplages, ceci à différentes échelles. Le rôle de la morphologie de surface est primordial dans la physique du contact et l'aspect fort de ce projet est de se concentrer sur le rôle des surfaces associées à leurs propriétés mécaniques locales et par la suite d'élaborer des surfaces structurées permettant d'optimiser l'intégrité et la fonctionnalité de la surface en frottement.

- L'intérêt de la caractérisation des matériaux métalliques et des matériaux composites. Les objectifs sont de caractériser l'influence des procédés d'élaboration et de fabrication sur la tenue mécanique des pièces métalliques développées pour le transport terrestre. L'idée à terme est d'optimiser la durée de vie des pièces dès leur phase de conception. Pour atteindre cet objectif, différentes études sont menées pour comprendre des liens entre les procédés d'élaboration et de mise en forme et la microstructure des pièces d'une part, et entre la microstructure et la tenue mécanique et l'endommagement d'autre part.

- L'intérêt transversal du développement des outils numériques novateurs, utiles pour les différents sous-projets. L'amélioration de la prédictivité des simulations en développant des outils mathématiques alternatifs, de nature multidisciplinaire, qui intégreront des incertitudes matérielles et géométriques, mesurées notamment lors de campagnes expérimentales communes avec la compréhension des couplages en surface. En effet, la réduction des émissions acoustiques est un enjeu important auquel doivent faire face les constructeurs du domaine du transport. Dans le secteur automobile en particulier, les bruits émis par les systèmes de freinage, tel le crissement, doivent être maîtrisés. Malgré les progrès

réalisés ces dernières années, les outils de simulation du crissement demeurent insuffisants de par la nature variable du phénomène étudié.

- L'intérêt de la mise en place d'une plateforme de développement pour l'optimisation des nouveaux procédés composites, de manière à proposer à terme aux partenaires industriels concernés une plateforme d'assistance en conception/fabrication/contrôle intégrée actualisée, apte à accélérer leurs développements et permettre la pérennité de leur compétitivité.

La thématique optimisation des nouveaux procédés composites est décomposée en deux volets, l'un relevant des technologies de fabrication des composites, l'autre du comportement mécanique de structures composites à renforts textiles. Le premier volet s'attache plus particulièrement à l'optimisation des technologies de fabrication haute cadence de composites structuraux via des outils numériques de simulation. Le deuxième volet aborde quant à lui l'optimisation du dimensionnement mécanique de pièces composites sous sollicitations sévères via implémentation de modèles représentatifs de la complexité des structures et des endommagements.

Des enjeux déclinés en sous thématiques :

1. Tribologie et Surfaces

- ☞ La caractérisation et la modélisation de surfaces frottées,
- ☞ La mise en place des liens entre les matériaux et les sollicitations tribologiques,
- ☞ L'identification des mécanismes initiateurs d'émissions (de particules et sonores) dans un contact.

2. Procédés d'obtention des nouveaux matériaux

- ☞ La caractérisation de l'influence des procédés d'élaboration et de fabrication sur les microstructures et la tenue mécanique des pièces métalliques développées pour le transport terrestre, l'idée étant à terme d'accroître la durée de vie des pièces dès la phase de conception et le développement de lois de comportement à

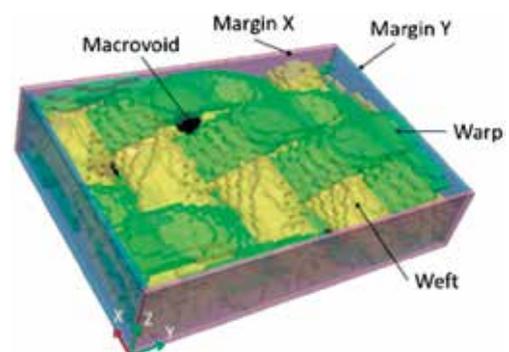
base physique afin d'améliorer la précision de modèles numériques et de quantifier l'effet des conditions de contact et de frottement sur l'intégrité de surface des pièces métalliques fabriquées pour le domaine des transports.

3. Simulations numériques et conceptions robustes

- ☞ La définition de modèles réduits pour les problèmes aux valeurs propres quadratiques,
- ☞ L'identification des topographies des surfaces réelles de plaquettes de freinage, à la quantification des incertitudes associées et à l'intégration des surfaces réelles dans les simulations numériques,
- ☞ La mise en place d'une modélisation mixte éléments finis/éléments discrets dans le but d'analyser la stabilité de systèmes frottants.

4. Optimisation des nouveaux procédés composites

- ☞ La caractérisation et l'analyse de la relation « procédé - (micro)structure - propriétés pour concilier cadences et qualité de production et optimiser les performances fonctionnelles.
- ☞ Le développement d'outils de modélisation et de simulation numérique multi-échelle et multi-physique des différents procédés de fabrication de pièces industrielles en composites à renforts textiles puis de leur comportement thermomécanique en service.



Modélisation des renforts fibreux constitutifs des composites textiles

Travaux effectués et résultats

Ce projet a permis de renforcer les collaborations multidisciplinaires entre les partenaires. Les résultats obtenus sont nombreux et concernent aussi bien la mise en place de nouvelles plateformes que les résultats scientifiques qui en découlent. Les effets leviers sont également importants avec, entre autre, la création d'un Groupe De Recherche CNRS Surf-Topo Topographie des Surfaces, la création de laboratoires communs entre académiques et des industriels : SWIT-LAB avec MG-VALDUNES, SurferLab avec BOMBARDIER Transport et Prosyst, ou encore avec ESSILOR ; le dépôt d'un projet soumis à l'Agence Nationale de la Recherche et l'amorce de nouveaux projets de recherche tel le projet BRAKE PADS avec la société Hyundai sur l'amélioration de la prédictivité des analyses de stabilité fréquentielle par la représentation de surfaces de contact réelles. Des prix et distinctions internationaux obtenus sur des projets de 2019 et 2020.

DÉCLINAISON DES TRAVAUX RÉALISÉS SELON LES SOUS PROJETS DU THÈME MATÉRIAUX ET CONCEPTS STRUCTURAUX

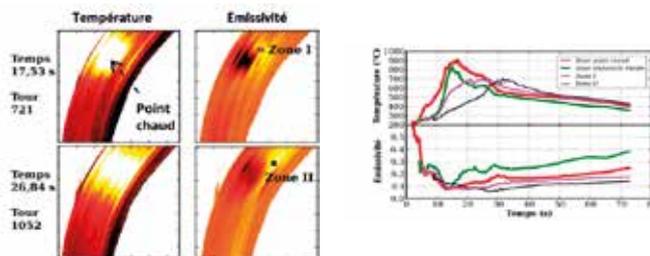
1. Tribologie et Surfaces

Ce sous projet comporte 4 thèmes :

Sur le premier thème, les actions menées concernent la caractérisation des surfaces d'une échelle nanométrique à l'échelle micrométrique avec la mise en place de la plateforme MORPHOMECA. Ces caractérisations multi-échelle permettent de discriminer et de classifier les morphologies présentes en surface, et ceci sans rupture d'échelle de mesurage.

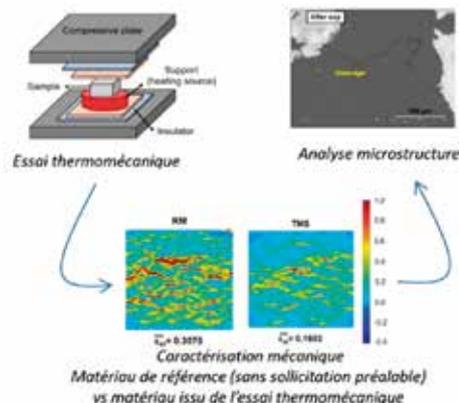
Une autre action a concerné le développement de la thermographie bichromatique, qui donne accès aux champs de température et d'émissivité simultanément. Sur les applications freinage, il permet de montrer des variations fortes d'émissivité en phase de freinage, en lien avec les phénomènes tribologiques et thermiques, et

d'accéder à des niveaux quantitatifs de température inaccessible par les caméras classiques.



Mesures bichromatiques lors d'un essai de frottement sur un tribomètre de freinage

Enfin une dernière action concerne la modélisation des surfaces suivant différentes approches (à partir des rugosités, à partir d'une géométrie multi-fractale ou à partir d'une description mathématique isogéométrique), ces approches sont complémentaires en termes d'échelles de discrétisation des surfaces et viennent renseigner les modélisations développées dans les thèmes suivants. Le second thème a permis de mettre en évidence les liens entre formulation et performances, en passant notamment par les propriétés d'usage, en considérant l'évolution du matériau avec la sollicitation. Les développements majeurs concernent : l'identification des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux de friction en lien avec la microstructure, à partir de la corrélation d'images 2D ou 3D et une modélisation éléments finis hétérogène, l'identification de l'impact de l'élaboration des matériaux sur leurs performances par une méthodologie d'étude des liens entre microstructure, propriétés et performances en usage.

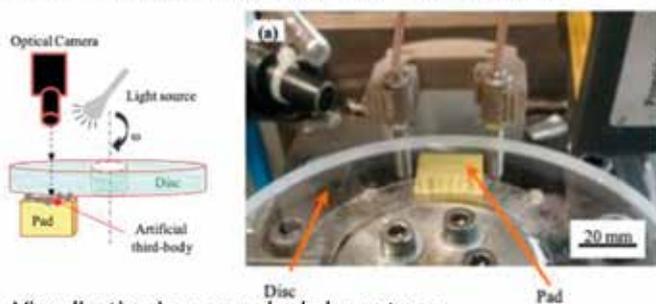


Identification des propriétés mécaniques des matériaux de friction en lien avec la microstructure sous différents chargements thermomécaniques

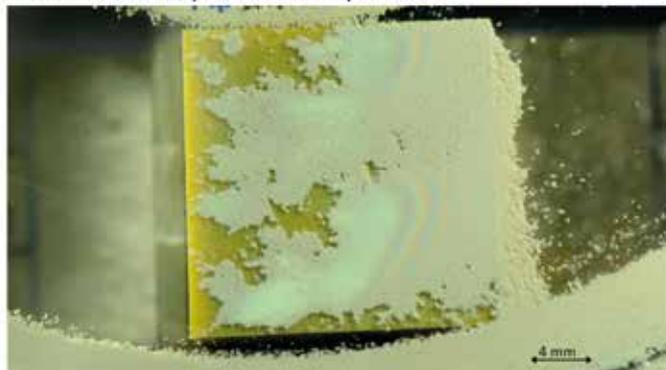
Cette méthodologie, qui concerne aussi bien la formulation que le procédé d'élaboration, a conduit à la création de la plateforme ELERION (<https://www.univ-lille.fr/recherche/identifier-une-structure-de-recherche/plateformes-et-grands-equipements>) pour l'élaboration en laboratoire de garnitures de frein à matrice organique.

Les actions menées dans le troisième thème concernent principalement le développement des configurations d'essais permettant le suivi de l'évolution des surfaces portantes en lien avec le déclenchement des vibrations et des localisations thermiques.

Essai avec disque transparent et 3^{ème} corps artificiel



Visualisation in operando de la portance



Expérience pour l'identification in-operando de la portance

Pour les applications crissement en freinage, il a pu être montré que le problème de vibrations induites par frottement est clairement un problème multi-échelle et que l'interface de contact et son évolution au cours de l'histoire de la sollicitation sont du premier ordre dans la mise en place des phénomènes vibratoires et acoustiques. Un paramètre clé de la surface agissant sur son occurrence a pu être identifié. Les conditions d'environnement ont également été étudiées permettant par exemple d'influencer le niveau d'oxydation des surfaces en contact. Ces

expériences, fortement instrumentées et couplées à des analyses approfondies des surfaces et des matériaux permettent d'élaborer des scénarios de circuit tribologique pour l'étude des mécanismes d'usure notamment. Pour les applications aube-carter dans les turboréacteurs, une étude des mécanismes responsables de la divergence a été menée. Celle-ci s'appuie sur l'étude d'essais réalisés sur une installation de laboratoire entièrement instrumentée, consistant à déplacer une seule pale plate vers un cylindre rotatif pour initier des interactions, tout en surveillant les vibrations et l'évolution de l'usure du revêtement abrasable. Deux mécanismes de synchronisation ont été identifiés comme facilitant la divergence : (i) la synchronisation entre les modes de vibration liés au mouvement horizontal et vertical de la lame ; (ii) les interactions entre la lame et le revêtement à proximité d'irrégularités périodiquement distribuées du revêtement abrasable, qui agissent comme une source d'excitation des vibrations.

Ces développements et équipements acquis ont été utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques des surfaces rugueuses en température (retenu au concours CNRS, 3 Groupes industriels intéressés), de déterminer les raideurs de contact multi-échelle et d'optimiser les conditions d'intégrités de l'embrayage (collaboration VALEO). Avec le groupe Stellantis, le lien entre la topographie microscopique et l'apparition de raies fantômes (vibration anormale des engrenages hautement nuisibles et imprévisibles) est étudié. Grâce à des techniques de réplifications (Brevet en cours de dépôt, et en relation avec la SATT Nord), des mesures topographiques de l'usure des dents d'engrenages sur l'intégralité des échelles du contact d'engrenages complexes sont réalisées. La quantification de l'usure in situ de matériaux Homogènes/Hétérogènes/Hybrides a été étudiée sur l'abrasion de systèmes frottants et un démonstrateur adaptatif fabriqué (Brevet en cours de dépôt).

Les résultats de nos travaux donnent engendrent la création de 2 Start Up :

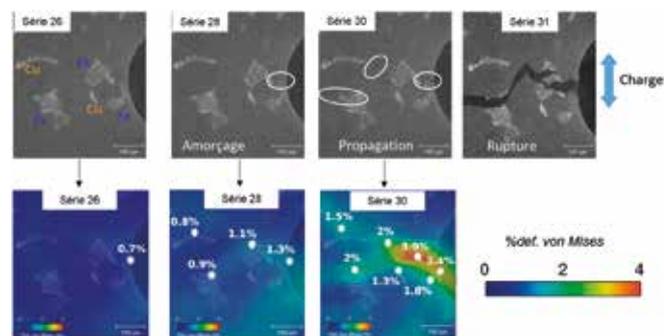
- Morpho Struc (Analyse in situ de processus tribologique le portage est en cours avec le CNRS)
- THERMOKRASIA, spécifiquement sur les mesures infrarouges.

2. Procédés d'obtention des nouveaux matériaux

Ce sous projet comporte 2 thèmes :

Les travaux de recherche du premier thème comportent 4 actions qui ont permis de mettre en évidence les fortes relations entre les procédés d'élaborations, les microstructures et le comportement mécanique dans les matériaux hétérogènes. Ils permettent la compréhension et le suivi des mécanismes de plasticité et d'endommagement grâce à des mesures de champs mécaniques locales (champs de déplacement et déformations par corrélation d'images numériques in situ en surface et/ou volumiques) à l'échelle de la microstructure. L'originalité des actions réalisées précédemment réside dans l'établissement d'un fort dialogue expérience - numérique pour enrichir davantage les modèles prédictifs physiquement fondés et les expériences plus proches de l'usage. Trois actions portent sur l'étude de matériaux et organes ferroviaires pour lesquels les procédés thermomécaniques de fabrication induisent des gradients de microstructures et de propriétés qui ont une forte influence sur les mécanismes de déformation. Dans la première action, le développement d'essais spécifiques multi-instrumentés sur éprouvettes prélevées ou élaborées ont ainsi permis d'isoler des paramètres microstructuraux influant sur les mécanismes et le comportement des constituants d'aciers ferrite-perlitiques. Dans la seconde action, le développement d'un banc d'essais échelle 1 a permis de simuler la sollicitation réelle de flexion rotative subie par un essieu ferroviaire. Ce banc peut être enrichi par une instrumentation spécifique (jauges de déformation, capteurs de déplacement, caméras etc.) permettant d'être au plus proche des phénomènes estimés

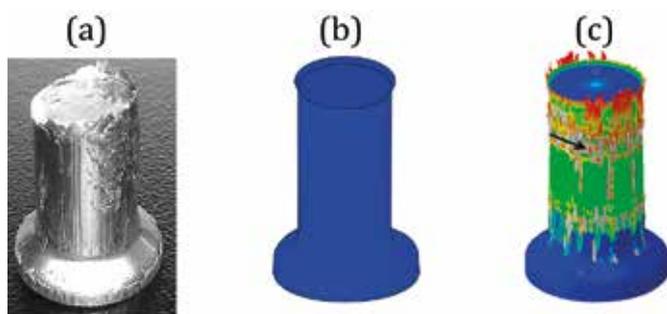
par simulation numérique. La troisième action s'intéresse à l'intégration de toute la chaîne de calcul allant du procédé à la tenue mécanique des composants (essieux et roues ferroviaires) sous sollicitations cycliques. Les simulations intègrent plusieurs comportements (écrouissages isotropes et cinématiques, contraintes résiduelles lors d'une opération de calage, gradient de contrainte...). La quatrième action porte sur des alliages d'aluminium comportant des défauts en volume (porosités et micro-retassures) induits par le procédé d'élaboration par fonderie utilisé dans l'industrie automobile. Couplés à des mesures de champs cinématiques par corrélation d'images numériques, le développement d'essais in situ sous microtomographe à rayon X couplées à des mesures de champs volumiques a permis de mettre en évidence le rôle de la microstructure et des défauts sur la compétition entre les mécanismes de plasticité et de microfissuration entre la surface et le volume.



Coupes microtomographiques d'une éprouvette avec défaut - champs de déformations de von Mises calculées à partir de la mesure par corrélation d'images volumiques à différentes étapes d'un chargement cyclique

Les travaux du deuxième thème comportent 3 actions qui ont permis le développement de lois de comportement à base physique afin d'améliorer la précision de modèles numériques et de quantifier l'effet des conditions de contact et de frottement sur l'intégrité de surface des pièces métalliques fabriquées pour le domaine des transports.

La première action a permis de développer des modèles de lois rhéologiques basée sur les propriétés métallurgiques des métaux étudiés et permettant de mieux appréhender les phénomènes de restauration et de recristallisation opérant dans les métaux lors de leur fabrication à chaud. Ces travaux ont été appliqués à différents alliages métalliques utilisés dans le domaine des transports : aciers, aluminium, cuivre. Les deux autres actions étaient liées à l'influence de la tribologie sur l'intégrité des surfaces. Elles ont été possibles grâce à l'acquisition du dispositif d'essais MT Tribolab -Universal Mechanical Tester. Le problème récurrent de grippage des alliages d'aluminium lors de leur mise en forme à froid a ainsi pu être étudié dans la deuxième action. Le résultat de cette action est constitué d'un ensemble de routines informatiques et de procédures expérimentales permettant de prédire numériquement les risques de grippage. Ce résultat se base sur l'utilisation couplée d'un modèle de lubrification et d'un modèle d'endommagement prenant en compte l'effet du cisaillement. La dernière action était quant à elle relative à la tribologie des aciers en forgeage à chaud (température jusqu'à 1200°C). Basé sur une approche multiéchelle, avec des essais à l'échelle proche du procédé et des essais à l'échelle proche des aspérités, les résultats ont mis en avant l'influence de la couche d'oxyde sur l'endommagement de surface.



Mise en évidence des arrachements de matière en surface.
 (a) pièce en aluminium forgée à froid présentant un défaut de grippage important (a), simulation numérique du procédé de forgeage, sans la prédiction du risque de grippage (b) et avec la prédiction du risque de grippage(c)

3. Simulations numériques et conceptions robustes

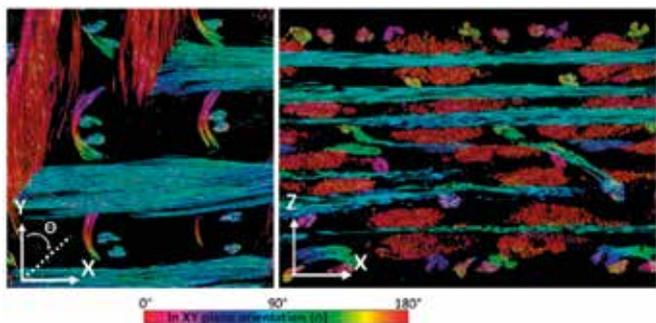
Ce sous projet comporte 4 thèmes.

Le premier jalon concerne la définition de modèles réduits pour les problèmes aux valeurs propres quadratiques, largement utilisés pour les analyses de systèmes frottants. L'objectif a été de développer un cadre numérique efficace permettant de calculer plus précisément les solutions propres complexes du système mécanique. La méthode itérative développée est basée sur une projection des équations du problème sur un sous-espace composé des modes normaux et homotopiques.

Le second thème est dédié à l'identification des topographies des surfaces réelles de plaquettes de freinage, à la quantification des incertitudes associées et à l'intégration des surfaces réelles dans les simulations numériques afin d'améliorer la prédictivité des simulations de stabilité. Plus d'une centaine de plaquettes de freinage (neuve, différents états d'usure) ont été observées expérimentalement lors d'essais mécaniques communs avec le projet 1 Tribologie et Surfaces . Ces mesures ont permis de définir une bibliothèque de topographies qui ont été étudiées à différentes échelles (formes, ondulations, rugosité). Une boîte à outils permettant de transférer ces données expérimentales en données numériques compatibles avec les simulations mécaniques via la théorie des champs aléatoires, a été développée.

Le troisième et dernier thème est relatif à la mise en place d'une modélisation mixte éléments finis/éléments discrets dans le but d'analyser la stabilité de systèmes frottants. Le modèle mixte facilite les simulations dynamiques en intégrant la variabilité et l'évolution des topographies des surfaces des plaquettes de freinage. Au préalable, une phase de calibrage de la masse volumique des particules et des liaisons cohésives du domaine discret a été nécessaire afin de mo-

délimiter au mieux le comportement mécanique de la structure étudiée.



Analyse des mécanismes d'imprégnation de composites thermoplastiques par microtomographie

4. Optimisation des nouveaux procédés composites

Des travaux amont de développement de briques d'outils de modélisation et de simulation numérique de certains procédés de mise en œuvre de composites caractérisés par un écoulement de polymère venant imprégner un renfort fibreux ont été engagés dans ce sous projet qui comporte 2 thèmes.

L'un des verrous scientifiques et technologiques dans le domaine des matériaux composites est lié à la maîtrise des procédés de mise en œuvre dans la mesure où un changement de microstructure significatif peut être induit lors de la fabrication et potentiellement conduire à une variabilité des propriétés et à la génération de défauts dans des pièces finales. Le développement d'outils de simulation numérique des procédés de fabrication des composites est par conséquent crucial pour réduire la durée du développement d'un nouveau produit et améliorer la qualité des pièces finales. Cependant, la tâche est ardue du fait des aspects multi-échelles (du micromètre au mètre) et multi-physiques (couplage thermo-hydro-mécanique).

Les travaux de recherche ont été poursuivis dans le premier thème sur la caractérisation et l'analyse de la relation « procédé - (micro)structure - propriétés » lors de la mise en œuvre des matériaux et pièces composites, en utilisant notamment les équipements lourds de fabrication de

composites structuraux acquis lors des investissements co-financés dans le cadre du CPER et PO Fédér ELSAT2020. Nous avons en particulier investigué la processabilité d'une nouvelle résine acrylique (Elium®), polymérisable in-situ, par des procédés de type Liquid Composite Moulding et optimisé sa mise en œuvre pour fabriquer des pièces en composites structuraux thermoplastiques à renforts textiles.

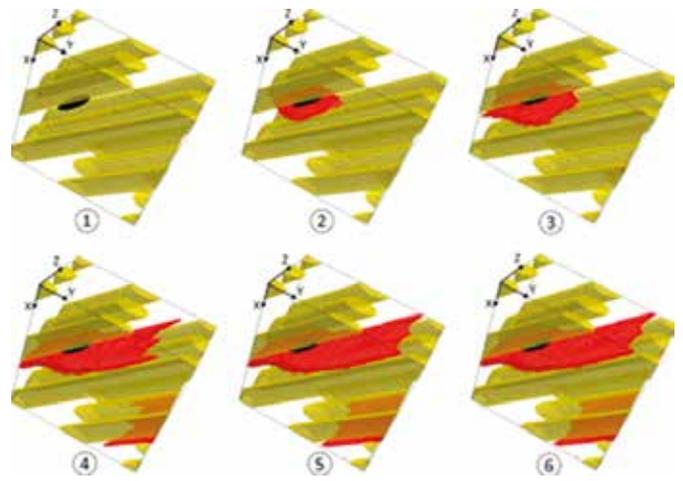


Démonstrateurs fabriqués (raidisseurs de forme T ou forme courbe en composites à renforts carbone ou verre et matrice polymère thermodurcissable ou thermoplastique)

Dans une finalité normative (ISO), est en cours en 2022 une campagne d'essais comparatifs inter-laboratoires internationaux (Round Robin Test) sur la caractérisation de la perméabilité transversale et la compressibilité des renforts fibreux. L'un des verrous techniques est la variabilité intrinsèque de l'architecture des renforts et une variation aléatoire des résultats de mesure. Dans ce cadre, des prototypes de renfort tissé ont été développés par plusieurs techniques de fabrication additive afin de choisir la meilleure méthode en termes de précision des dimensions. En particulier, l'influence de la rugosité de surface sur la précision de la mesure des perméabilités a été analysée.

En parallèle, dans le deuxième thème, ont été complétés les développements numériques relatifs à la modélisation multi-échelle du comportement complexe des renforts fibreux constitutifs des composites textiles en exploitant la méthode de transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform, FFT). L'un des atouts de cette méthode FFT est son efficacité numérique par rapport aux autres méthodes du type "éléments finis" couramment utilisées pour les modélisations de matériaux. Ainsi, il est très aisé d'effectuer des calculs parallèles et un calcul très lourd peut être réalisé sur une géométrie complexe avec un temps de calcul très réduit. Par conséquent, la méthode FFT s'adapte bien à une homogénéisation numérique sur un maillage numérique à base de voxel (e.g. micrographie d'un matériau hétérogène). Pour remédier au problème d'oscillations numériques à l'interface entre deux phases différentes, une méthode Level-Set et un algorithme de lissage interfacial (interface smoothing) ont été développés [Publi. Ma et al.]. Ensuite, cette méthode FFT a été couplé avec une méthode de champs de phase (phase field) pour modéliser l'endommagement des matériaux hétérogènes.

Enfin, de nouveaux travaux entre l'Université Polytechnique Hauts-de-France et l'ONERA ont



Propagation de fissures dans un composite à fibres continues sous des niveaux croissants de sollicitation mécanique

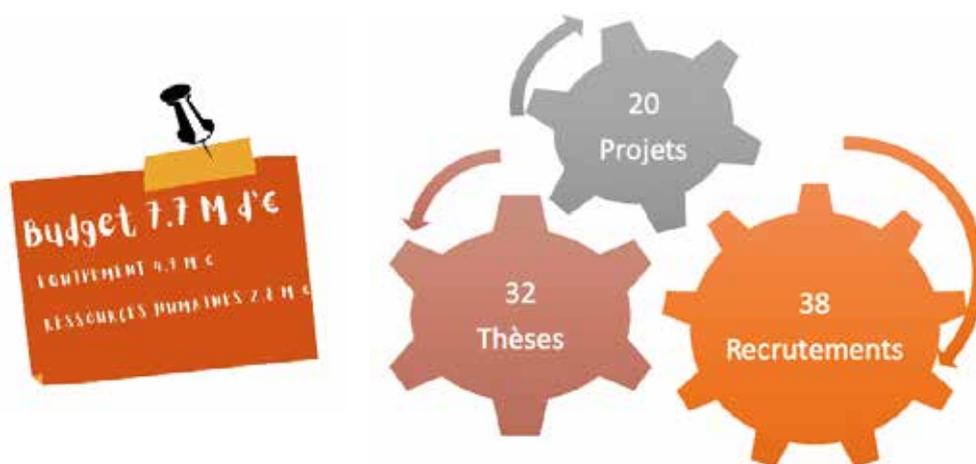
cours sur l'effet de la vitesse et de la température sur le comportement en compression des composites à matrice organique. Une large campagne expérimentale à l'ambient a d'abord été effectuée afin d'appréhender les difficultés associées à ce type de chargement fortement instable. Des règles ont été posées afin d'assurer une bonne maîtrise de l'essai. Il faut maintenant transférer ces connaissances sur des essais à chaud afin de comprendre les cinétiques d'endommagement associées.

Dans une première phase des barres de Hopkinson interrompues en compression avaient été conçues. Elles sont aujourd'hui fabriquées et des premiers essais sont en cours. Dans la suite, des barres en traction interrompues ont aussi été conçues et sont actuellement opérationnelles. Enfin des travaux sont en cours sur l'étude des variabilités de comportement liées à l'utilisation des fibres végétales dans des composites à fibres courtes.

Du point de vue numérique, un élément cohésif spécifique pour la modélisation d'assemblage collé en dynamique a été développé et fait l'objet d'un processus d'intégration de niveau TRL3 chez un industriel.

Nouveaux matériaux et concepts structuraux

Les sous projets	GLOBAL	1	2	3	4
● Revues à comité de lecture	113	69	22	1	21
● Communications conférences internationales	38	23	6	2	7
● Communications conférences Vulgarisation	93	65	11	2	15
● Total par sous projet	244	157	39	5	43



Partenaires impliqués

Nouveaux matériaux et concepts structuraux

Tutelles



Laboratoires



1	Tribologie et Surfaces	✓	✓	✓	✓	✓
2	Procédés d'obtention des nouveaux matériaux	✓			✓	
3	Simulations numériques et conceptions robustes	✓				
4	Optimisation des nouveaux procédés composites	✓	✓			✓

PRIX ET DISTINCTIONS

☞ Prix d'innovation internationaux (JEC World Innovation Awards) obtenus en 2019 pour le projet ACCUM et en 2020 pour le projet DESTINY,

☞ Prix de Thèse en cotutelle CMCU (Comité Mixte restreint de Coopération Universitaire tuniso-française),

☞ Prix Poster Tribology congress Leeds-Lyon «Wettability versus roughness : Multi-scales approach.» Tribology International, 82 (B), Pages 343–349 (2015),

☞ One of the three winners of the General Electric's Ecomagination Innovation Challenge, GEVAPORE project (University of Iceland, Université de Poitiers, UVHC), Early detection of fouling in "once through steam generators"(2017),

☞ Finalist in the competition for the Cahn Prize (USA) for the best article of the year, 'Toward an understanding of the effect of surface roughness on instrumented indentation results' (2017),

☞ Prix d'initiation à la recherche de la SF2M (Société Française de la Métallurgie et des Matériaux) "Caractérisation de l'usure de cylindres de laminage à chaud » (2015).

THÈSES

☞ IMT Nord Europe laboratoire CERIMP - (2022)

Encadrement : C.H. Park, S. Lomov Xiao Ma, 'Modelling of fibre reinforced composites based on Fast Fourier Transform,

☞ Université de Lille laboratoire LaMcube UMR CNRS 9013 - (2021)

Encadrement : P. Dufrénoy et V. Magnier 'Caractérisation et modélisation de matériaux hétérogènes,

☞ Centrale Lille Institut laboratoire LaMcube UMR CNRS 9013 - (2021)

Encadrement Y. Desplanques et E. Deletombe de

☞ l'ONERA 'Essais tribologiques béton/composite, en configuration d'atterrissage d'urgence'

☞ Centrale Lille Institut laboratoire LaMcube UMR CNRS 9013 - (2021)

Encadrement : D. Najjar, A. Tandjaoui, N. Limodin, A. El Bartali, JF Witz

'Etude des mécanismes d'endommagement de la microstructure d'un alliage d'aluminium silicium pour application automobile à partir d'éprouvette modèle à défaut contrôlé'

☞ UPHF laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201 - (2020) encadrement : F. Lauro, D. Notta-Cuvier, R. Delille, G. Haugou, E. Michau

'Caractérisation et modélisation du comportement et de la rupture de thermoplastiques pour une large gamme de vitesse de déformation et de température',

☞ UPHF laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201 - (2020) Encadrement : L. Dubar et A. Dubois,

'Approche multi physique du contact frottant en grande déformation plastique : prédiction numérique du grippage d'alliages d'aluminium en mise en forme à froid'.

PROJETS COLLABORATIFS AVEC LES SOCIÉTÉS

☞ Kremlin 'Usure et fuite' (110K€)

☞ Flertex Siter 'les vieillissements des matériaux de friction' (525k€)

☞ Magotteaux, 'Tribologie extrême' (330 K€)

☞ Réseau Transport d'Electricité 'Usure câble Haute tension', (85 K€)

☞ PSA-Stellantis 'le hot-judder ' (48K€)

☞ British steel, SNCF, 'défectologie des rails en mieux froid'

PLATEFORMES TECHNOLOGIQUES

Ces plateformes ont été développées dans le cadre du contrat de plan Etat Région en co-financement avec le programme opérationnel Fédér 2015-2020 et des partenaires académiques du projet ELSAT2020

4MAAT

<https://4maat.univ-lille.fr/>

Laboratoire LAMCUBE UMR CNRS

Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle des MATériaux et structures sous sollicitATIONS et environnement complexes (4Maat) est le plateau d'essais mécaniques de l'Université de Lille, équipée d'un parc de machines d'essais mécaniques hydrauliques, électromécaniques et triaxiales, d'un second parc d'équipements tribologiques et d'un pôle d'instrumentation). La recherche au sein de 4Maat est centrée sur la caractérisation mécanique des matériaux à de multiples échelles (microstructures jusqu'aux essieux de train échelle 1) et sous différents environnements contrôlés (température, humidité ..), sur les problématiques liées au contact frottant (vibration, crissement, usure, particules, performance ..), le tout appuyé par de fortes compétences en instrumentation avec des équipements de toutes générations (microscope - caméras IR - caméras ultrarapides - caméra bichromatique - analyse de particules).



Halle d'essais mécaniques

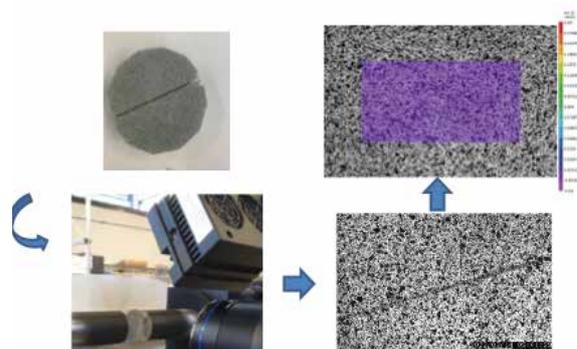
Dynamique Rapide

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/dynamiquerapide>

Laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201

La plateforme « Crash matériaux et structures » est dédiée à l'identification des propriétés mécaniques à l'échelle du matériau et à la vérification de la performance au crash à l'échelle de la structure.

A l'échelle matériau, les dispositifs d'essais permettent de caractériser les évolutions jusqu'à rupture dans la plage des vitesses de déformation couramment rencontré en situation de crash et d'impact [0.05;5000]s⁻¹. De nombreux dispositifs expérimentaux complémentaires sont mis en œuvre pour couvrir cette plage et caractériser le comportement des matériaux sur une très large gamme d'impédances mécaniques : métaux et alliages, composites et polymères, matériaux cellulaires, matériaux biologiques (en lien avec l'activité biomécanique du choc)



Travaux sur la rupture de joint en dynamique avec caméra ultra rapide

MORPHOMECA

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/morphomeca>

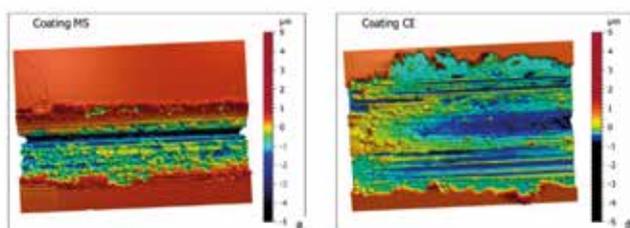
Laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201

La plateforme MORPHOMECA, est consacré à l'exploration et l'analyse morphologiques des surfaces, des échelles décimétriques aux échelles nanométriques.

L'objectif de la plateforme MORPHOMECA, référencée au CNRS et dans les instituts Carnot, est de construire des outils d'exploration morphologique de la surface, aux échelles où les phénomènes physiques, chimiques ou biologiques apparaissent (tailles des cellules en biologie, des particules abrasives en usure...), médical, sensoriel, art ...) dont le dénominateur commun est la compréhension des mécanismes physiques aux interfaces.



Cette plateforme pluridisciplinaire permet d'investiguer des champs disciplinaires variés.



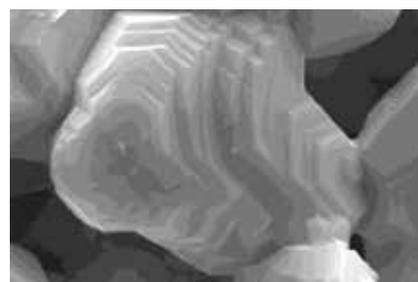
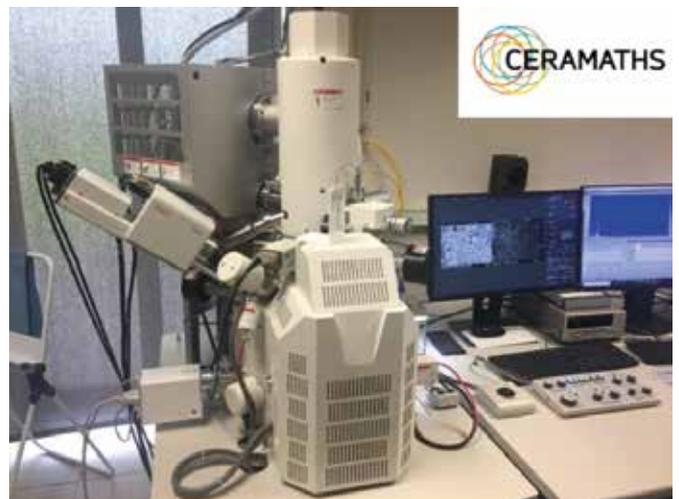
CERALAB : Plateforme de caractérisation des matériaux

<https://www.uphf.fr/lmcpa/>

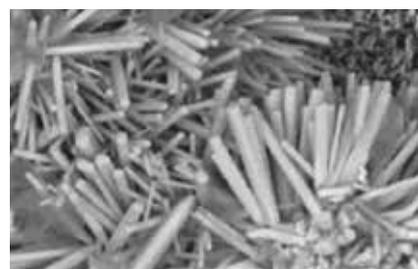
Laboratoire CERAMATHS

Le microscope électronique est un équipement en support à l'élaboration des revêtements fonctionnels céramiques ou composites.

Il est un outil analytique performant amélioré pour l'observation des nano et micro-structures. La microscopie électronique MEB-FEG est particulièrement bien adaptée pour la plupart des matériaux composites organiques/minéraux fragiles.



Nano structure céramique



Microstructure revêtement composite organo-céramique

OBJECTIF STRATÉGIQUE

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule

Tous mobiles, tous protégés » pourrait être le focus principal de cet objectif stratégique, tous comprenant les Personnes à Mobilité Réduite (PMR), incluant vieillissement et handicap.

Trois sujets scindent cette thématique pour répondre aux mêmes défis sociétaux de mobilité durable pour tous avec : une MObilité Propre et Efficace, Mobilité et Sécurité des Personnes à Mobilité Réduite, Interactions rail-route Sûre et Durable.

Ils visent tous trois à développer une compétence forte sur le thème de la conception des systèmes d'assistance aux usagers des systèmes de transports routiers ou guidés, qu'ils soient conducteurs ou passagers. La valorisation et le transfert de ces compétences s'appuient sur une infrastructure technique et humaine développée en région depuis maintenant plus de 20 ans.

A - Mobilité Intelligente

L'objectif du thème dimensionnement et performance des fonctions véhicule est le développement d'un ensemble de méthodologies, approches, voire solutions techniques et algorithmiques qui tiennent compte des contraintes spécifiques des environnements afin de lever des verrous technologiques relatifs aux nouvelles technologies pour la mobilité intelligente dans les domaines de l'automobile, des transports collectifs et du ferroviaire.

Les travaux réalisés sont répartis selon cinq sous-projets qui s'intéressent :

- À l'observation des performances des infrastructures urbaines et de la mobilité ainsi qu'à la prévention des collisions avec des personnes vulnérables à l'aide de radar opportunistes. Ce sous-projet a pour objectif le développement

de méthodes et d'équipements en vue de réduire le nombre de collisions en milieu urbain, de protéger les usagers vulnérables, d'assister la conduite et enfin, de permettre aux opérateurs de transport une analyse de niveau du service rendu ainsi que l'évaluation d'améliorations et d'adaptation de l'infrastructure urbaine. Pour atteindre cet objectif, ces travaux reposent sur un ensemble d'approches exploitant, d'une part, des signaux électromagnétiques pour la détection, la localisation et le suivi des usagers vulnérables et, d'autre part, sur des algorithmes de modélisation du réseau de transport routier urbain. Le développement de ces derniers s'appuie sur la plateforme embarquée VLAD, intégralement mise en place pour ce thème de recherche.

- Aux systèmes de communications et de localisations fiables et intelligents. L'objectif principal de ce thème est de lever des verrous scientifiques relatifs aux fonctions de communication et de positionnement sûres et intelligentes pour le contrôle-commande ferroviaire (métros, rail conventionnel, grande vitesse). Le sous-projet vise à développer conjointement des communications sans fil tout IP fondées sur la radio intelligente et résilientes à l'évolution des technologies radio, des techniques de positionnement permettant de réduire l'usage des balises au sol (GNSS ou autres techniques sans fil) en démontrant la sécurité du concept de balise virtuelle et de proposer de nouvelles architectures et nouveaux protocoles adaptatifs pour la récolte des informations issues des réseaux de capteurs et/ou objets sans fil déployés le long des infrastructures ferroviaires et à bord des trains. Ces travaux reposent sur de l'expérimentation, de la modélisation et la réalisation de prototypes de laboratoire de niveau TRL4.

- À la maintenance prédictive autonome des systèmes de transports câblés. Ce sous-projet a pour objectif l'amélioration de la disponibilité et de la fiabilité du réseau de transport et celle de la maintenance prédictive en vue de réduire les

coûts de maintenance et d'immobilisation du matériel. Il vise ainsi à développer une méthodologie et des outils permettant de suivre l'état de santé des réseaux filaires assurant le transfert de données au sein des véhicules autonomes. Ce suivi réalisé en utilisant la technologie des courants porteurs en ligne (CPL) doit permettre à terme de détecter en temps réel des défauts des câbles et de localiser la branche défaillante du réseau. Le diagnostic réalisé permettra alors d'envisager la mise en œuvre d'une politique de maintenance prédictive et/ou de reconfigurer automatiquement le protocole de communication pour garantir une conduite sûre du véhicule autonome en présence des défauts du réseau.

- À la cyber-sécurité dans les systèmes communicants. Ici l'objectif du sous-projet est l'augmentation de la sécurité et de la fiabilité des systèmes de communication et de traitement d'information à la fois dans la gestion des situations d'urgences et de crises (GSUC) et face aux risques d'attaque. Pour ce faire, les travaux ont porté, d'une part, sur la détection rapide et automatique d'accidents de la route et sur la communication rapide d'informations entre véhicules et infrastructure et, d'autre part, sur la sécurisation de ces communications pour qu'elles ne soient pas attaquées ou perturbées intentionnellement et donc rendues inopérables au moment de crise. Des analyses de susceptibilité approfondies face à certaines cyberattaques pénétrant par les couches basses du modèle OSI ont été menées ainsi que des travaux de surveillance et de détection des attaques critiques afin de contribuer à la résilience de nouveaux outils de communications véhicule à véhicule et véhicule à infrastructure.

- Aux techniques et outils pour la compétitivité ferroviaire. L'objectif de ce sujet de recherche, qui intervient dans un contexte de forte croissance de la demande de transport ferroviaire, est double. D'une part, il s'agit d'accroître la sécurité et la disponibilité du transport ferro-

viaire et de l'adapter aux attentes du marché en termes d'interopérabilité, de flexibilité et de confort. D'autre part, il s'agit de développer des techniques de fluidification et d'optimisation de trafic ferroviaire, de manière à exploiter au mieux les infrastructures existantes.

Des enjeux déclinés en sous thématiques :

1. Performance des infrastructures urbaines et sécurité de la mobilité

- ☞ La protection des personnes vulnérables à l'aide de radar opportunistes d'une part,
- ☞ L'observation des performances des infrastructures urbaines et de la mobilité d'autre part.

2. Systèmes de communications et de localisations fiables et intelligents

- ☞ La radio intelligente pour les communications train-sol ou entre objets connectés.
- ☞ La localisation sûre et intègre.

3. Maintenance prédictive autonome des systèmes de transports câblés

- ☞ Le développement d'une méthodologie et d'outils permettant de suivre l'état de santé des réseaux filaires assurant le transfert de données au sein des véhicules autonomes.

4. Cyber-sécurité dans les systèmes communicants

- ☞ Le développement d'architectures de systèmes embarqués efficaces pour le traitement d'images lors de gestion des situations d'urgences et de crises,
- ☞ Les solutions de communication V2V (véhicule à véhicule) rapides et économes pour la GSUC (gestion des situations d'urgences et de crises),
- ☞ La cyber-sécurité afin de protéger les communications et informations lors de GSUC d'éventuelles mises en défaillance volontaires.

5. Techniques et outils pour la compétitivité ferroviaire

☞ Les travaux sur l'ingénierie des exigences, avec comme application les spécifications (SRS - Software requirements specification) de l'ERTMS/ETCS,

☞ La prise en compte de nouvelles formes de fautes de manière à couvrir un plus large spectre des défaillances dans les systèmes ferroviaires réels,

☞ Le développement de techniques de fluidification et d'optimisation de la gestion de trafic ferroviaire, sous différentes contraintes.

Travaux effectués et résultats

Le renforcement des collaborations en particulier bilatérales entre partenaires sont à l'origine de plusieurs nouveaux projets collaboratifs, véritables effets de levier avec pour exemples : la création d'un Groupement d'Intérêt Scientifique CybCOM sur la CyberSécurité des communications sans fils à l'initiative des partenaires afin de poursuivre les collaborations en région autour du thème Cyber-sécurité dans les systèmes communicants (<https://cybcom.univ-gustave-eiffel.fr/>) ; le dépôt de brevets dont l'un à l'international sur les sujets « Antenne multi-mode, multiport et multistandard pour système de communication adaptable » déposé en 2020 sous la référence FR2006115, et « Method for improving the efficiency of an electrically small antenna », déposé en 2019 sous celle US Patent App. 16/311,474 ; des thèses avec, par exemple, l'utilisation d'approches « Deep Learning » pour le traitement des données radar dans le cadre de la protection des vulnérables ou encore « le développement de techniques d'apprentissage profond pour l'apprentissage et la détection de comportements piétons anormaux » ; et enfin, des projets d'envergure au niveau européen s'inscrivant dans X2RAIL-3, X2RAIL-4, X2RAIL-5, Emulradio4Rail, Gate4rail, mmW4Rail, et des projets collaboratifs dont

• le projet Confiance AI, pilier technologique du Grand Défi « Sécuriser, certifier et fiabiliser les systèmes fondés sur l'intelligence artificielle » avec la coopération de UPHF, INRIA, SystemX Thales,

• les projets Industrie du futur : ETAPLES 4.0 avec ULCO et VALEO, ou SLEMBI avec Université Gustave Eiffel, Université du Littoral Côte d'Opale et MC2 Technologies,

• le projet de l'Agence Nationale de Recherche ASTRID : DEPOSIA avec Université Gustave Eiffel, IMT Nord Europe, INRIA, société MC2 Technologies et Inodesign,

• les projets STIMULE financés par la Région Hauts-de-France : GLOCAT avec Université Gustave Eiffel, IRCICA, INRIA, Université Polytechnique Hauts-de-France / LAMIH et IMT Nord Europe, et LoRa-R avec l'Université Gustave Eiffel, IRCICA et SNCF...

Le projet a donné lieu à de nombreux résultats qui ont été publiés ainsi qu'à la mise en place de nouvelles plateformes avec la réalisation d'un banc de test de surveillance de réseau avec échantillons de défauts, et le développement de la plateforme UNIRAIL pour l'émulation de l'exploitation sous le standard européen ERTMS de contrôle/commande et de signalisation, selon différents niveaux ETCS et encore la plateforme PRETIL et le véhicule ZOE du laboratoire Université de LILLE / CRISAL mais faisant l'objet d'une mutualisation avec le partenaire IEMN notamment pour les besoins de ce véhicule robotisé à acquisition de données.

DÉCLINAISON DES TRAVAUX RÉALISÉS SELON LES SOUS PROJETS DU THÈME DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCE DES FONCTIONS VÉHICULES - MOBILITÉ INTELLIGENTE

1. Performance des infrastructures urbaines et sécurité de la mobilité

Le sous-projet OS4.1 P1 ORIO comporte deux volets : la protection des personnes vulnérables à

l'aide de radar opportunistes d'une part et l'observation des performances des infrastructures urbaines et de la mobilité d'autre part.

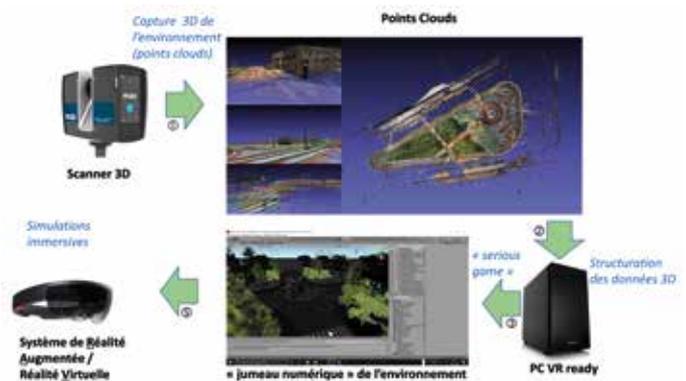
Le premier volet fait l'objet du WP3.T2 (« système de détection on-board / protection des personnes vulnérables »). Sur la période, un système radar a ainsi été conçu. Son but est d'identifier la cible, de la localiser puis de prédire sa trajectoire. Ce système est basé sur la technique Ultra Large Bande (ULB) à courte portée (« Ultra Wide Band Short Range Radar »), couplée à un algorithme de suivi pour réduire le taux de fausses alarmes. Une technique CNN (réseau profond convolutif) de reconnaissance du type « d'obstacles » (piétons et cyclistes) a été mise en œuvre à cet effet. Les résultats montrent que son utilisation dans les données radar bidimensionnelles permet de classer correctement les cibles radar ULB, notamment pour les cibles à faible Surface équivalente radar (SER) et Rapport signal bruit (RSB) comme les usagers vulnérables.

Un système de détection d'obstacles basé sur l'utilisation opportuniste de signaux radio a lui-aussi été étudié. Il permet de bénéficier des communications sans fil établies entre usagers (dont les véhicules qui se produisent soit directement à l'aide de technologies de communication ponctuelles comme IEEE 802.11p (ITS-G5 en Europe), soit indirectement au travers des infrastructures. Ces signaux peuvent être exploités afin d'extraire les informations pertinentes pour la localisation des obstacles. Le traitement repose sur la transformation de Hilbert appliquée au signal reçu et sur un « classifieur » de type Random Forest (RF). La performance moyenne du système de classification est comprise entre 97 % et de 99 % en fonction de la nature du signal traité.

Le second volet concerne WP1, WP2 et WP3.T1 qui sont relatifs à la « conception et réalisation VLAD », « l'acquisition des jeux de données », « l'apprentissage et la modélisation » et enfin,

aux « modèles de simulation, évaluation et KPIs ». Les travaux de « conception et réalisation VLAD » ont permis la poursuite du développement de la plateforme « Véhicule léger d'acquisition de données » (VLAD), qui intègre désormais quatre caméras, un LIDAR 2D, deux scanners 3D réalisant 20 acquisitions par seconde et enfin, un système de radar ULB visant à expérimenter les approches développées au premier volet pour la détection on-board des vulnérables en WP3.T2. Les données acquises sont géolocalisées à l'aide d'un GPS décimétrique. Cet ensemble est complété par un scanner B.I.M 3D permettant de « capturer » les sites d'intérêt pour la construction de « jumeaux numériques » de parties du réseau de transport.

La méthodologie mise au point débute par la numérisation de l'environnement à l'aide du scanner 3D. Puis, les « points clouds » acquis sont structurés pour servir de base au développement d'un jeu sérieux, déployé sur des systèmes de réalité virtuelle ou augmentée, donnant à ces simulations leur caractère immersif.



Méthodologie de construction de « jumeaux numériques » d'environnement.

Concernant la construction des modèles d'infrastructures basée sur l'apprentissage (travaux du WP1.T2 sur l'« acquisition des jeux de données » et du WP2.T2 sur l'« apprentissage et modélisation »), des jeux de données associés à la mesure des flux de véhicules dans la ville de Douai ont permis la définition de régresseurs performants de type « processus Gaussiens » pour

l'estimation du trafic à partir d'informations accessibles via internet (« Floating Car Data »). Des « datasets » vidéos ont par ailleurs été acquis et ont été utilisés pour affiner les approches « Deep Learning » (réseaux profonds « sémantiques » et GAN conditionnels) exploitées pour l'analyse des scènes et leur classification.

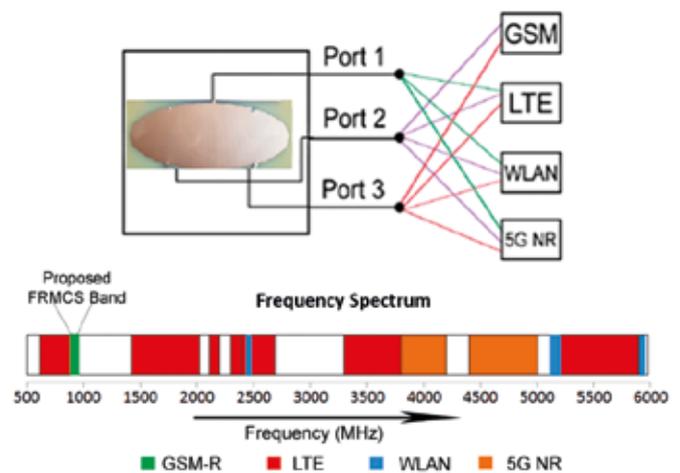
Quant à la transmission des données, l'IEMN DOAE a développé des solutions basées sur un codage vidéo linéaire associé à une modulation pseudo analogique permettant une réception sans interruption de signaux vidéo même dans le cas de canaux très perturbés. Cette linéarité a permis de modéliser de bout en bout de la chaîne de transmission la qualité de réception en fonction des paramètres de transmission. L'étude de l'influence du bruit sur l'analyse d'images via des méthodes de type « Deep Learning » est actuellement une piste explorée dans le cadre du projet.

Enfin, concernant les travaux du WP3.T1 sur les « modèles de simulation, évaluation et KPIs », afin de pouvoir profiter d'une plateforme nativement ciblée vers les réseaux de transport, la simulation a été « portée » sous l'environnement SUMO. Des algorithmes de simulation mis en place à l'aide du logiciel SUMO permettent de modéliser et de simuler l'aspect « intermodalité » des systèmes de transport. À ce volet, les travaux réalisés à l'occasion d'un nouveau projet (TRANSIMMERSIUM), issu pour une bonne part de « l'effet levier » apporté par le sous-projet, ont permis le développement d'une méthodologie de construction de « jumeaux numériques » et de mises en situation « immersives » des usagers au sein des réseaux modélisés à des fins d'analyse et « d'agentification ».

2. Systèmes de communications et de localisations fiables et intelligents

Le sous-projet OS4.1 P2 SMARTIES s'articule autour de deux paquets de travail étroitement liés. Le WP1 traite de la radio intelligente pour

les communications train-sol ou entre objets connectés. Certains des résultats 2019-2021 ont été obtenus dans le cadre de projets gagnés par effet levier. Une évaluation de modulations multiporteuses dans un contexte de grande vitesse et d'allocation de ressources radio non orthogonale a été réalisée en simulation avec comme cas d'usage la télécommande des locomotives et a donné lieu à des publications (projet TC-Rail avec Railenium). Dans le cadre du projet SIARA avec Railenium, un prototype TRL4 pour la récupération d'énergie électromagnétique et l'alimentation à distance de capteurs en milieu ferroviaire a été conçu, réalisé et testé sur site réel. Ces résultats ont été publiés et un prototype de laboratoire est disponible. Les travaux se poursuivent dans le cadre du projet X2RAIL-4 au niveau Européen, toujours avec Railenium. Dans le cadre du projet européen X2RAIL-3, une antenne multistandard innovante a été imaginée et développée. Cela a fait l'objet d'un brevet et de publications.



Antenne multistandard (brevet FR2006115)

Des premiers travaux sur l'analyse de la sûreté de fonctionnement du lien sans fil dans le cadre du couplage virtuel de deux trains ont été menés dans le projet X2RAIL-3 avec Railenium. Toujours au sein de ce projet et dans le cadre du projet Emulradio4Rail, une plateforme d'émulation radio a été développée pour permettre l'évaluation des performances de systèmes de communications en laboratoire.

Sur la période, on peut noter les travaux sur deux plateformes d'essais remarquables. Un premier sondeur de canal massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) original et unique en son genre (plateforme MIMOSA) dans la bande 6 GHz a été développé. Des essais concluants dans divers environnements (campus scientifique, forêt, etc.) ont été largement publiés. Le travail se poursuit avec la montée en fréquence du sondeur. En collaboration avec le CEATech en Région et avec un financement FEDER additionnel, un sondeur de canal MIMO 4x4 à base de cartes radio logicielle exploitant le signal LTE dans la gamme 1-6 GHz a été mis au point dans le cadre d'une thèse. Le sondeur est opérationnel. Des travaux continuent dans le cadre d'un contrat avec SNCF.

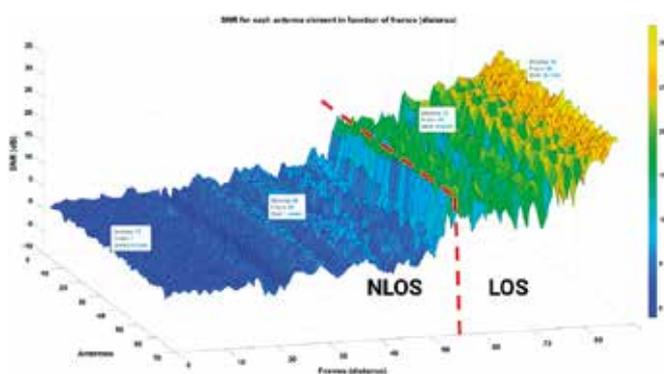


Photo du sondeur de canal Massive MIMOSA (en haut) et mesure de son ratio signal bruit en fonction de la distance Tx - Rx et de l'index de l'antenne (publié dans 15th European Conf. on Antennas and Propagation, 2021 : 1-4)

Le WP2 traite de la localisation sûre et intégrée. Nous avons proposé la modélisation des erreurs de localisation pour le positionnement satellitaire avec des outils de Machine Learning dans le Projet européen Gate4Rail. Nous avons ainsi proposé une nouvelle méthode de pondération des signaux GNSS en fonction de leur état de réception en utilisant des caméras à objectif fish-eye pour la détection des obstacles perturbant la réception des signaux GNSS. En parallèle, dans le cadre d'une thèse financée par l'Univ. Eiffel, une première analyse des effets des interférences, volontaires ou non, sur les signaux

GNSS a montré qu'il est nécessaire de développer des solutions adaptables au type d'interférence (dans le temps et en fréquence). De plus, au sein du projet européen Performing Rail une approche modulaire fondée sur le « Statistical Model Checking » a été développée pour l'analyse de conditions de sécurité opérationnelles dans le cas de la mise en place de balises virtuelles. Enfin, nous avons proposé et validé des méthodes concernant l'acceptation ou non des risques liés à l'utilisation de balises virtuelles, en particulier sur les critères qui permettent de statuer sur l'acceptabilité des risques associés.

3. Maintenance prédictive autonome des systèmes de transports câblés

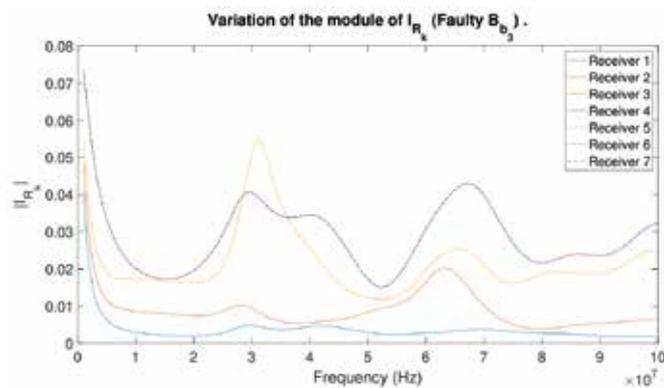
Le sous-projet OS4.1 P3 DIACA vise à développer une méthodologie et des outils permettant de suivre l'état de santé des réseaux filaires assurant le transfert de données au sein des véhicules autonomes en utilisant la technologie des courants porteurs en ligne (CPL).

Pour la période 2019-2021, nous avons développé une stratégie de surveillance des réseaux filaires arborescents de communication ou d'énergie embarqués. Cette stratégie est basée sur la surveillance en-ligne de la fonction de transfert du canal de transmission. La fonction de transfert $H(f)$ entre la source et chaque récepteur situé à l'extrémité de chacune des branches du réseau est estimée en pratique grâce à une communication CPL (courant porteur en ligne) entre les différents émetteurs/récepteurs placés aux extrémités du réseau à surveiller.

Des indicateurs de santé calculés en ligne sur une bande de fréquence adaptée ont été judicieusement définis pour être sensibles aux défauts. Les indicateurs sont estimés au niveau de chaque récepteur R_i à partir des fonctions de transfert, pour détecter et localiser la branche défectueuse du réseau complexe. Une matrice de signatures a été calculée et permet de distinguer les différents cas de défaut et ainsi de localiser

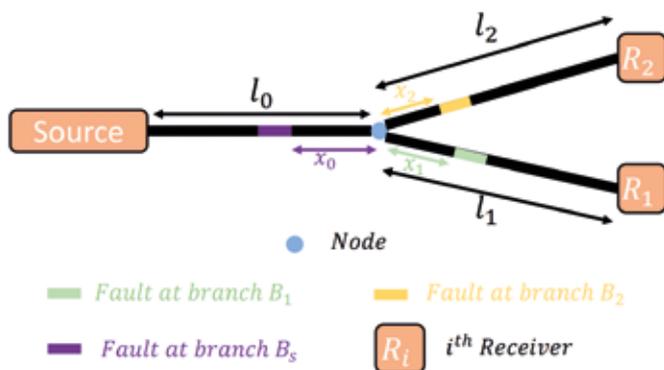
liser la branche défectueuse. Des résidus, fonctions des indicateurs de santé, sont calculés pour permettre de distinguer les signatures de défauts en présence de bruit. Les résidus expriment la distance ou la corrélation entre indicateurs.

$$I_{Ri}(f) = \frac{H_{Ri}^{Ref}(f)}{H_{Ri}^{Test}(f)} - 1$$



Exemple de fluctuation des indicateurs de santé en présence de défaut sur une branche (résultat publié dans Proceedings of the 9th Int. Conf. on Systems and Control, Caen, France, Nov. 24-26, 2021 : 119-126)

Cette stratégie de localisation de défaut initialement développée sur un réseau à trois branches (réseau de forme Y) a été généralisée sur un réseau complexe à plusieurs branches en décomposant ce réseau complexe en sous-réseaux de forme Y. De même, cette stratégie a été adaptée à tout type (bus, étoile ou hybride) de réseaux complexes.



Modèle de réseau à trois branches (publié dans 5th Conf. on Control and Fault Tolerant Systems, St Raphaël, France, Sept. 29-Oct. 1, 2021 : 103-108)

La validité de la méthode a été testée tout d'abord sur un banc de test en laboratoire composé de trois branches de câble bifilaire et d'un analyseur de réseau vectoriel. Les défauts surveillés sont des défauts non francs localisés sur le bifilaire comme une faible résistance présente entre deux points d'un des deux fils du câble bifilaire de résistance faible devant l'impédance du câble.

La méthode a aussi été testée en simulation grâce à un simulateur de réseau complexe basé sur les matrices chaîne en particulier pour le cas d'étude d'un réseau bus comprenant une source et sept récepteurs. Le simulateur de réseau nous permet ainsi de valider notre stratégie dans différents cas d'application en faisant varier le nombre de branches, les longueurs de branche, la sévérité du défaut.

Une étude de la sensibilité de la méthode en présence de bruit a été initiée, permettant ainsi d'optimiser les expressions des résidus pour isoler les cas de défauts. Les taux de détection (Detection Rate –DR) et taux de fausse localisation (False Localization Rate –FLR) ont été calculés pour différents rapport Signal à Bruit et différents types de résidus.

Concernant le véhicule automatisé, le capteur de détection de l'environnement SolidState a été intégré dans le pare-chocs du véhicule. Cette technologie innovante sur le marché des LIDARS automobiles est perçue comme la future révolution des véhicules autonomes pour la détection des obstacles et l'évaluation de la scène. Ce type de capteur émet une grosse quantité de données sur le réseau informatique du véhicule et les problèmes de connexions ou de câbles étudiés au sein du sous-projet trouvent leur application sur ce cas d'usage. Des tests de la stratégie de surveillance sur le véhicule automatisé sont en préparation.

De même, les capteurs de localisation ont permis de mettre en œuvre une première version

du jumeau numérique pour tester les problématiques de localisation des véhicules autonomes. Une radio logicielle générant des signaux I/Q similaires à ceux produits par une antenne GNSS alimente un récepteur réel. Les données de localisation et les données brutes sont ensuite récupérées et analysées en temps réel par les membres du projet pour la mise au point d'algorithmes de diagnostic tolérant aux fautes. À noter que cet achat a permis d'obtenir par effet levier le financement d'un projet ANR LOCSP visant à créer des bases de données de localisation avec présence de défauts.

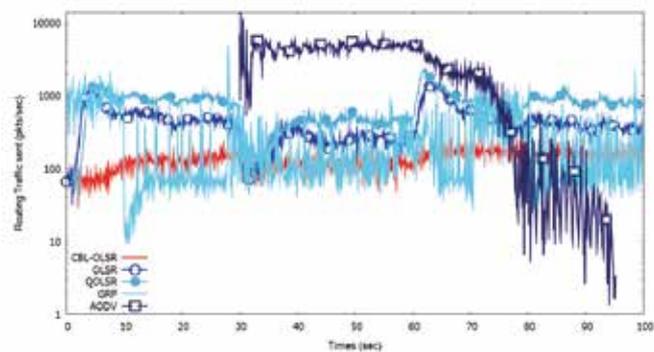
4. Cyber-sécurité dans les systèmes communicants

Le sous-projet OS4.1 P4 SECOURT s'articule autour de trois Work-Packages. Le WP1 porte sur le développement d'architectures de systèmes embarqués efficaces pour le traitement d'images lors de GSUC. Le WP2 porte sur les solutions de communication V2V rapides et économes pour la GSUC. Le WP3 porte sur la cyber-sécurité afin de protéger les communications et informations lors de GSUC d'éventuelles mises en défaillance volontaires.

Dans le WP1, ont été abordées les difficultés liées à l'intégration des composants d'intelligence artificielle (IA) dans les systèmes embarqués très fortement contraints par les ressources de calcul, de mémoire et d'énergie électrique. Nous nous sommes intéressés aux applications Machine Learning dans les tâches de classifications, de détection et de segmentation des objets au sein des vidéos par l'utilisation des réseaux de neurones à convolutions (ou CNN).

Le WP2 a porté sur l'élaboration d'un nouvel algorithme de routage CBL, « Chain-Branch-Leaf », pour les réseaux ad hoc véhicule à véhicule (V-V). Le protocole CBL a été conçu pour pallier une infrastructure absente ou défaillante (absence de communications entre les véhicules et l'infrastructure, V-I) ou la compléter. Il réa-

lise une structuration dynamique des réseaux de communication intervéhiculaires et offre à la couche application les différents liens nécessaires à une communication dans un voisinage proche comme dans un voisinage lointain. CBL a fait l'objet de nombreux tests et évaluation par modélisation, en particulier sous le simulateur à événement discret Riverbed Modeler. Ces évaluations ont aussi bien porté sur la structure de communication créée par CBL que sur sa capacité à répondre aux besoins d'applications de la voiture autonome coopérative.



Trafic de routage envoyé par CBL-OLSR comparé à celui d'autres protocoles (publié dans Telecommunication Systems 76, issue 4, avril 2021 : 525-540.)

Dans le WP3, des études de susceptibilités face à des attaques de types interférences électromagnétiques intentionnelles ou attaques protocolaires par ordre de désauthentification abusif ont été menées sur différents protocoles de communication, WiFi, LTE et LoraWan. Ces travaux ont été réalisés à travers des expérimentations ainsi que des simulations afin de comprendre précisément les mécanismes de mises en défaut propres aux différents protocoles selon les caractéristiques de leur couche physique et de leur mode d'accès à la ressource. Une autre partie des travaux a porté sur le développement de méthode de surveillance de l'activité radio-fréquence par des algorithmes de Machine learning afin de détecter d'éventuelles attaques. Des dispositifs de mesure et de surveillance ont été développés au cours du projet. Les travaux sur ces dispositifs se poursuivent dans le cadre

d'un projet ANR ASTRID afin d'exploiter les données qu'ils fournissent dans le but de géolocaliser la source d'attaque.

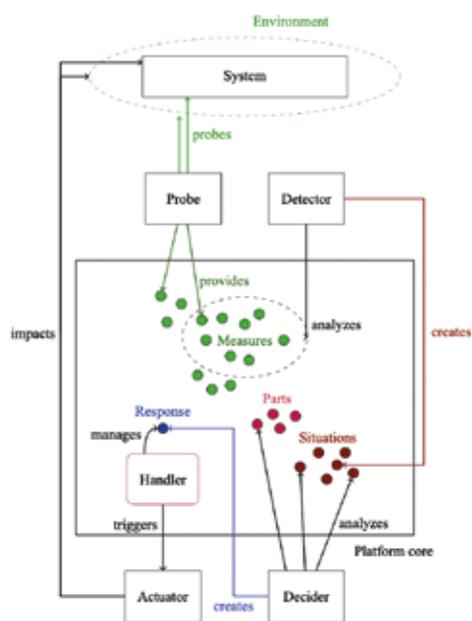


Schéma de l'architecture de détection d'attaques développée (publié dans Journal of Universal Computer Science 28, no 1, 28 janvier 2022 : 27-53).

5. Techniques et outils pour la compétitivité ferroviaire

Le sous-projet OS4.1 P5 COMPRAIL comporte trois principaux axes : l'axe 1 qui concerne la poursuite des travaux sur l'ingénierie des exigences, avec comme application les spécifications (SRS – Software requirements specification) de l'ERTMS/ETCS ; l'axe 2 relatif à la prise en compte de nouvelles formes de fautes de manière à couvrir un plus large spectre des défaillances dans les systèmes ferroviaires réels ; l'axe 3 sur le développement de techniques de fluidification et d'optimisation de la gestion de trafic ferroviaire, sous différentes contraintes.

Sur l'axe 1, les contributions ont porté sur le développement d'un modèle qui permet de transcrire la procédure de passage de frontière, procédure regroupant un ensemble d'opérations complexes qui impactent aussi bien la sécurité que l'exploitation ferroviaire. En particulier, la question de l'interopérabilité est centrale dans la procédure de passage de frontière. Une méthodologie à base de modèles a été développée

et permet d'évaluer différentes exigences d'interopérabilité sur la procédure de passage de frontière. D'autre part, le développement de la plateforme UniRail a connu un progrès important du fait de l'implémentation de protocoles émulant la communication ponctuelle à travers des balises et une communication continue en GSM-R. L'opération des trains sur la plateforme peut se faire selon deux modes : d'une part, un mode standard avec conduite des trains par des mécaniciens et le routage manuel des trains dans les nœuds ferroviaires et, d'autre part, le mode automatique où des règles prédéfinies sont suivies.



Maquette UniRAIL

Sur l'axe 2, les principales contributions ont consisté en des techniques d'analyse de la diagnosticabilité et de diagnostic en ligne qui permettent de prendre en compte des formes complexes de fautes, comme par exemple les défauts intermittents qui posent de vrais défis aux activités de diagnostic. L'originalité des résultats obtenus porte sur la mise en œuvre des méthodes formelles et des techniques algébriques pour la résolution des questions de diagnostic. Une première catégorie de nos contributions a consisté à développer des formulations de ces questions de manière à pouvoir les solutionner avec des techniques formelles, comme le model-checking. De cette manière des outils model-checkers disponibles ont pu être mis en jeu et les résultats obtenus en termes de complexité/mémoire montrent clairement la valeur ajoutée des techniques développées. La deuxième

catégorie de contributions se base sur des formulations algébriques des problèmes posés. Ces questions reformulées sous forme de problèmes d'optimisation linéaire en nombres entiers ont pu être résolues par le biais d'outils disponibles, à savoir Matlab/Fico-Xpress, avec une vraie valeur ajoutée computationnelle. En outre, des applications sur des cas d'étude de contrôle/commande ferroviaire ont pu être traités. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications dans des revues de renommée.

Sur l'axe 3, une première contribution a porté sur une étude comparative des techniques existantes qui permettraient d'analyser l'exploitation en canton mobile qui est au cœur de l'ERTMS niveau 3 et qui vise à accroître la densité ferroviaire en assurant une distance de sécurité minimale entre les trains sur une même ligne. Cet état de l'art approfondi permettra d'orienter les travaux à venir en vue de développer des techniques d'optimisation et de fluidification de trafic dans un contexte d'exploitation en ERTMS niveau 3. Une deuxième contribution a consisté à la résolution de problèmes de conflits à travers des nœuds ferroviaires par l'usage de techniques de synthèse de contrôleur. En particulier, des modèles de type réseaux de Petri ont été développés pour émuler le contrôle ferroviaire à travers les nœuds ferroviaires, ainsi que la dynamique des trains. L'approche développée privilégie l'allocation dynamique des ressources au fur et à mesure que le train traverse le nœud. L'ensemble des ressources ne sont donc pas allouées à l'entrée dans le nœud et restituées à la sortie.

B : Energie Environnement

Les objectifs du projet concernent

- La mise en place de moyen logiciel et matériel permettant d'améliorer les solutions de mobilité du point de vue de l'efficacité énergétique et environnementales. L'approche envisagée consiste à étudier les possibilités d'adaptation des algorithmes de commande des véhicules, notam-

ment hybrides et électriques, existants afin de les améliorer. L'impact de ces lois de commande sur les batteries, éléments le plus sensibles aux vieillissements, doit pouvoir aussi être testé à terme.

- Le contrôle les écoulements de manière à optimiser et mieux maîtriser les forces aérodynamiques qui s'exercent sur les véhicules terrestres, maritimes et aériens.

Les acteurs de CONTRATECH s'appuient sur un triptyque disciplinaire :

- (MFLU) la mécanique des fluides pour la modélisation et l'analyse fine de la physique des écoulements, et pour le développement de moyens expérimentaux représentatifs de conditions réelles d'utilisation et la métrologie fine associée ;

- (MNT) les micro/nano-technologies pour la conception, la réalisation et la caractérisation d'actionneurs et de capteurs dédiés, capables d'être produits à grande échelle à des conditions commerciales compétitives ;

- (CTRL) les sciences du numérique (contrôle, information) pour concevoir des algorithmes d'identification, d'estimation et de contrôle en boucle fermée (donc en temps réel), basés sur les deux items précédents.

Des enjeux déclinés en sous thématiques :

1. Vers une mobilité propre et efficace

Les principales actions ont consisté à la création des plateformes technologiques. L'objectif était de pouvoir disposer d'un support technique permettant non seulement de mesurer les paramètres d'entrées des modèles (cartographies moteurs, rendement des différents organes) mais également de valider les algorithmes proposés.

Au sein du projet, deux plateformes ont été acquises et mises en œuvre au sein de deux actions.

☞ La première concerne la mise en place d'un banc de batteries pour tester leur comportement dans le cadre de véhicules électriques par la technique de HIL (Hardware-in-the-Loop) tes-

ting. Une carte de contrôle et une source réversible programmable ont été mises en œuvre et connectées aux bancs batteries. Des premiers tests ont été réalisés.

☞ La seconde concerne le développement d'une plateforme énergétique pour le banc dynamométrique qui permet d'étudier le couplage loi de commande/matériel le plus adapté à l'usage du véhicule.

Le banc dynamométrique est complété par un robot de conduite et une plateforme énergétique. Cette plateforme va principalement permettre d'émuler la dynamique d'un véhicule en appliquant une charge aux essieux du véhicule testé. En outre, ce banc est équipé d'une alimentation DC forte puissance qui permettra d'émuler un pack de batterie constitué de cellules dont les paramètres auront été identifiés sur la plateforme « banc batterie ».

2. Contrôle réactif en aérodynamique par des technologies innovantes

Le projet ELSAT2020 accentue sa recherche au côté du LMFL, du LAMIH et de l'ONERA sur le contrôle en boucle fermée et la prévision du comportement dynamique et associe également l'IEMN pour sa compétence reconnue sur les micro-capteurs et actionneurs et l'équipe-projet Inria Non-A (commune avec CRISTAL) pour la détermination de loi de commande. Ces recherches autour de cet enjeu bien identifié par la communauté scientifique mais qui reste ouvert, sont menées que ce soit :

☞ Pour des solutions performantes en laboratoire sur le contrôle réagissant rapidement aux perturbations, robustesse vis-à-vis des conditions d'utilisation, technologiquement et énergétiquement satisfaisant,

☞ Dans la perspective encore plus ambitieuse de conditions Industrielles avec l'intégration et l'embarquement de capteurs, actionneurs, algorithmes et processeurs, sous contraintes d'encombrement et de coût.

DÉCLINAISON DES TRAVAUX RÉALISÉS SELON LES SOUS PROJETS DU THÈME DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCE DES FONCTIONS VÉHICULES - ÉNERGIE ENVIRONNEMENT

1. Vers une mobilité propre et efficace

Les premières études ont porté essentiellement sur l'optimisation du véhicule « isolé » de son environnement. L'objectif était alors, dans le cas du véhicule hybride, de proposer la meilleure répartition de puissance entre les différentes motorisations. Les outils utilisés étaient essentiellement des approches de commande optimales et de nombreux challenges (mathématique, méthodologique) en ont découlé. La validation des performances énergétiques se fait alors sur banc dynamométrique en utilisant, par exemple, un cycle de vitesse normatif (WLTC par exemple). Dans ce contexte, un des principaux problèmes est la maîtrise des expérimentations : les algorithmes testés sont désormais très performants et on cherche à gagner les derniers pourcents de consommation en litre/100km. Toute variation de la conduite entraîne des variations de consommations plus grandes que les gains que l'on souhaite évaluer. Afin de remédier à ce problème, un robot de conduite permet de conduire le véhicule installé sur le banc dynamométrique avec la plus grande reproductibilité. Le robot comprend 3 actionneurs pour les pédales du véhicule ainsi qu'un actionneur pour le levier de vitesse. Il devient alors possible d'évaluer la consommation énergétique des véhicules avec une très grande précision.

Enfin, la gestion énergétique a été abordée de manière générique. Les algorithmes développés sont ainsi applicables à un grand nombre de véhicule, navires et autres systèmes hybrides. Cependant, leur évaluation s'est toujours heurtée au manque de systèmes réels, le LAMIH ne disposant que d'un seul véhicule hybride. Afin de pouvoir valider ces algorithmes sur d'autres structures de groupe motopropulseur, une

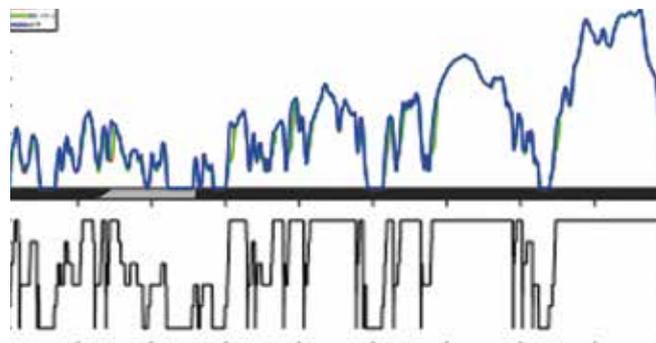
plateforme énergétique groupe motopropulseur a été acquise. Une fois installée sur le banc dynamométrique, il devient possible grâce à son architecture modulaire de tester différents types de groupe motopropulseur (architecture série d'une Nissan Note, architecture parallèle d'une Peugeot 3008 hybride, etc.).



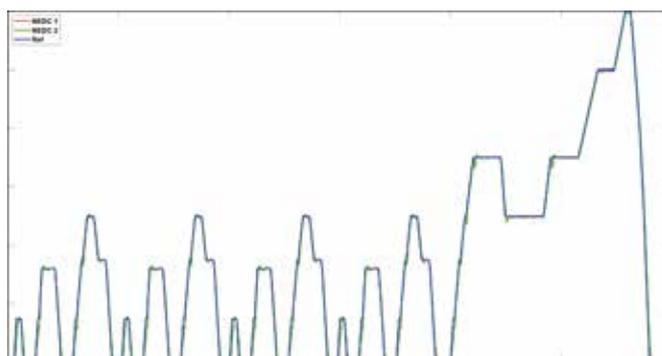
Robot de conduite

Le robot de conduite est un système complexe dont le couplage avec le banc dynamométrique a été nécessité une importante phase de mise au point. A l'issue de cette phase de déverminage, le robot de conduite a été utilisé avec succès et permet désormais l'évaluation des performances énergétiques de nos véhicules.

Afin d'illustrer la reproductibilité des résultats, les deux figures ci-dessous résument par exemple 2 essais réalisés avec le robot sur un véhicule installé sur le banc dynamométrique. La courbe bleue est la vitesse de référence, que le véhicule doit suivre. La figure du bas représente les rapports engagés. Deux essais sont présentés : le premier correspond au cycle WLTC (cycle normatif actuellement utilisé pour évaluer la consommation et les émissions « officielles » des véhicules) et cycle NEDC (ancien cycle normatif, utilisé dans les études en raison de sa simplicité) Les courbes vertes et rouges représentent deux essais différents. On remarque la quasi reproductibilité des résultats et un suivi parfait du cycle de vitesse.



Exemple de résultat obtenus avec le robot de conduite & le banc dynamométrique sur cycle WLTC



Exemple de résultat obtenus avec le robot de conduite & le banc dynamométrique sur cycle NEDC

La prise en compte des situations de conduites réelles pour l'évaluation des performances des véhicules est une réelle nécessité. La figure ci-dessous représente une comparaison entre une vue caméra (aisément compréhensible par un humain) et un nuage de point 3D (aisément manipulables par un ordinateur). Un premier résultat préliminaire a été publié dans une revue internationale avec comité de lecture. Dans cet article les performances énergétiques du véhicule ont été évaluées sur 16 000km de parcours enregistré. L'étape suivante consistera à intégrer la prise en compte de l'environnement dans la stratégie de gestion énergétique.



Enregistrement de l'environnement du véhicule avec lidar et radar

2. Contrôle réactif en aérodynamique par des technologies innovantes

Les collaborations entre les partenaires ont notamment porté sur la métrologie optique, l'analyse physique d'écoulements, la reconstruction de champs 3D, le développement de capteurs et d'actionneurs, les essais en soufflerie. Elles se sont faites au travers de nombreux projets : projets européens (AFDAR, EUHIT), projets ANR (SE-PACODE, CAMELOTT ...), de thèses et post doc co encadrées, financement direct (projet INTACOO - Carnot ONERA), etc.

Le projet ELSAT2020 accentue sa recherche sur le contrôle en boucle fermée et la prévision du comportement dynamique et associe également l'IEMN pour sa compétence reconnue sur les micro-capteurs et actionneurs et l'équipe-projet Inria Non-A (commune avec CRISTAL) pour la détermination de loi de commande. Ces recherches autour de cet enjeu bien identifié par la communauté scientifique mais qui reste ouvert, sont menées que ce soit :

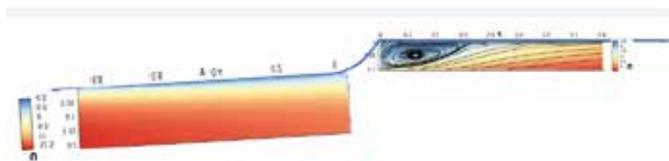
☞ Pour des solutions performantes en laboratoire ; contrôle réagissant rapidement aux perturbations, robuste vis-à-vis des conditions d'utilisation, technologiquement et énergétiquement satisfaisant,

☞ Dans la perspective encore plus ambitieuse de conditions Industrielles ; intégration et embarquement des capteurs, actionneurs, algorithmes et processeurs, sous contraintes d'encombrement et de coût.

Le fort potentiel du projet s'appuie sur le fait que toutes les compétences et les installations, au travers de la plateforme CONTRAERO, sont présentes dans la région Hauts-de-France. Les partenaires qui composent l'équipe projet ont décidé de joindre leurs compétences pour traiter cette problématique d'un point de vue interdisciplinaire, et proposer des stratégies et des technologies réellement innovantes et efficaces. Ils peuvent ensemble développer une recherche

d'excellence reconnue au plus haut niveau international. Ainsi, l'équipe devrait devenir rapidement un pôle incontournable au plan national puis international dans le domaine du contrôle réactif d'écoulement.

Depuis la mise en place du projet en 2015 les travaux ont avancé principalement sous la forme de thèses de doctorat ou de projet interne dans les différents laboratoires partenaires du projet. Pour ce qui concerne la mécanique des fluides MFLU, le LMFL, l'ONERA et le LAMIH travaillent à la compréhension de la physique des écoulements contrôlés et à contrôler et également à la physique des interactions entre l'écoulement principal et l'actionnement. Des thèses ont débuté depuis le début de la période (dont deux co-encadrées par ONERA/UPHF) sur cette thématique. Au LMFL une importante expérience collaborative impliquant les meilleures équipes mondiales dans le domaine a été réalisée sur l'étude de la couche limite soumise à gradient adverse proche de la séparation dans le cadre du projet FP7 EUHIT. Le LMFL travaille actuellement à la mise en œuvre de métrologie 3 et 4D dans les souffleries de CONTRAERO, un travail est en cours sur le développement de ces méthodes et de l'assimilation de données qui leur permet d'être efficaces. Une étude spécifique a débuté par une expérience originale de double PIV synchronisée dans la soufflerie de couche limite du LMFL pour mettre en évidence les relations entre un écoulement turbulent incident et la bulle de recirculation dans un sillage dans le but de proposer de nouvelles stratégies de contrôle.



Expérience de double PIV grands champs synchronisée.

Pour la partie micro-nano technologie MNT, une thèse ONERA/IEMN s'est achevée sur le développement et l'implantation de capteur de frotte-

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule Mobilité Intelligente

Production scientifique

Valorisation

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule
Mobilité Intelligente

Les sous projets	GLOBAL	1	2	3	4	5
● Revues à comité de lecture	157	10	100	1	33	13
● Communications conférences internationales	76	6	7	8	45	10
● Communications conférences Vulgarisation	34	5	3	3	8	15
● Total par sous projet	267	21	110	12	86	38



Partenaires impliqués

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule
Mobilité Intelligente

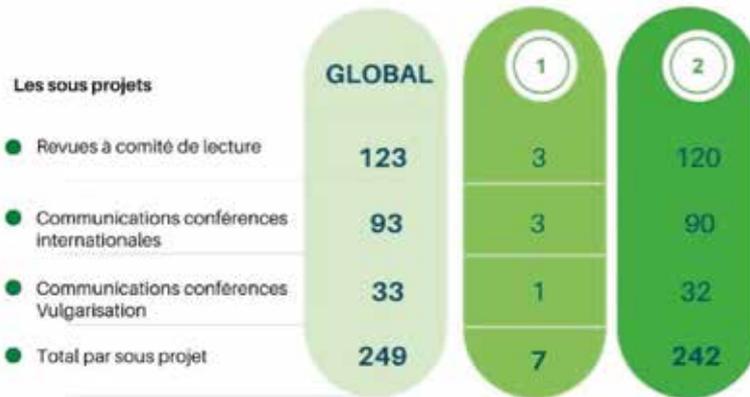
Tutelles	Université Polytechnique Nancy-Metz	CNRS	Université de Lille	centralesupelec	ulco Université de Lille	Université Gustave Eiffel	IMT Nord Europe Institut Mines-Télécom Université de Lille
Laboratoires	LAMIH	lemn	CRISTAL	ulco Université de Lille	Université Gustave Eiffel	IMT Nord Europe Institut Mines-Télécom Université de Lille	
1 Performance des infrastructures urbaines et sécurité de la mobilité	✓	✓			✓	✓	
2 Systèmes de communications et de localisations fiables et intelligents	✓	✓	✓		✓		
3 Maintenance prédictive autonome des systèmes de transports câblés		✓	✓		✓		
4 Cyber-sécurité dans les systèmes communicants	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
5 Techniques et outils pour la compétitivité ferroviaire	✓		✓		✓		

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule Energie Environnement

Production scientifique

Valorisation

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule
Energie Environnement



Partenaires impliqués

Dimensionnement et performance des fonctions véhicule
Energie Environnement



1	Mobilité propre et efficace	✓	✓	✓	✓	✓
2	Contrôle réactif d'écoulements aérodynamiques	✓	✓	✓	✓	✓

PRIX ET DISTINCTIONS

☞ Prix du réseau excellence European (NOE H2020 Hipeac : European Network on High Performance and Embedded Architecture and Compilation award,) donné à Smail NIAR (UPHF LAMIH UMR CNRS 8102) pour sa communication dans la conférence IEEE ACM Design Automation Conference 2016,

☞ Grecia Romero, STudent Awards à l'occasion de la conférence de l'URSI (URSI GASS 2017) en 2017 à Montreal, Grecia Romero a réalisé sa thèse sous la co-direction de Eric Simon (Univ. Lille : IEM UMR CNRS 8520) et Virginie DENIAU (Univ. Gustave Eiffel site de Lille). Les Young Scientist Awards sont décernés lors des assemblées générales de l'URSI et lors des conférences scientifiques de la radio de l'Atlantique de l'URSI (AT-RASC) pour reconnaître un groupe international de personnes qui ont apporté des contributions et des découvertes innovantes dans la recherche multidisciplinaire liée aux champs et aux ondes électromagnétiques,

☞ Lucas Rivoirard, Martine Wahl, Patrick Sondi, Marion Berbineau, Dominique Gruyer, CO-SYS/IFSTTAR et LIVIC/ULCO, Best paper Award for the paper «CBL: A Clustering Scheme for VANETS» presented during VEHICULAR 2017, The Sixth International Conference on Advances in Vehicular Systems, Technologies and Applications, held in Nice, France during July 22 - 23, 2017.

<https://www.iaria.org/conferences2017/AwardsVEHICULAR17.html>

☞ Prix de thèse remis à Frédéric Challita lors des journées scientifiques 2020 pour son travail intitulé 'Massive MIMO Channel Characterization and Propagation-based Antenna Selection strategies: Application to 5G and Industry 4.0'.
<https://www.ursi-france.org/ursi-france/evenements/journees-scientifiques/2020>

THÈSES

☞ Université Polytechnique Hauts-de-France laboratoire IEMN UMR CNRS 8520 (2019)
Encadrement : A Rivenq, avec C. Tatkeu (Univ. G. Eiffel site le Lille) et Y El Hillali (UPHF : IEMN) 'Etude et développement d'un dispositif routier d'anticollision basé sur un radar ultra large bande pour la détection et l'identification, notamment des usagers vulnérables',

☞ Université Gustave Eiffel site de Lille - Cosys (2019)
Encadrement – M. Berbineau avec I. Dayoub (UPHF/IEMN) 'Contributions on Radio Access Techniques for Future Railway Communications System',

☞ IMT Nord Europe (2021) laboratoire CERI NU
Encadrement : A. TALEB-AHMED et J. BOONAER avec S. AMBELLOUIS (Univ. G. Eiffel site le Lille) 'La détection d'anomalies et le suivi des objets dans le transport par la prévision future en utilisant les méthodes génératives',

☞ Université de Lille laboratoire IEMN UMR CNRS 8520 (2018)
Encadrement : Virginie Dégardin 'Réseaux d'énergie Embarqués dans les Systèmes de Transport : Communication et Diagnostic Passif par Courant Porteur en Ligne (CPL)',

☞ Université de Lille laboratoire IEMN UMR CNRS 8520 (2018)
Encadrement : S. Baranoski et L. Chakour 'Etude du suivi des wagons de fret à des fins logistiques par onde radio - Impact des interférences électromagnétiques sur le système proposé',

☞ Centrale Lille Institut laboratoire CRISAL UMR CNRS 9189 (2021)
Encadrement : A. TOGUYENI et K. MESGHOUNI 'Modélisation de bas niveau pour le routage et l'ordonnancement des trains dans les gares ferroviaires'.

PROJETS COLLABORATIFS AVEC LES SOCIÉTÉS :

👉 LOCSP projet ANR avec la collaboration de M3 Systems, Univ. Gustave Eiffel et Univ. Lille avec le laboratoire CRISTAL (669 K€)
<https://locsp.univ-gustave-eiffel.fr>

👉 SORTEDMOBILITY projet européen avec la collaboration de SNCF, Rete Ferroviaria Italiana, Bane Danmark ... (1.841M€)
<https://jpi-urbaneurope.eu>

👉 GLOCAT projet régional soutenu par le dispositif STIMuLE - Soutien aux Travaux Interdisciplinaires, Multi-établissements et Exploratoires de la région Hauts-de-France entre Univ. G. Eiffel, l'UPHF, l'Univ. Lille, l'IMT Nord Europe et l'INRIA), (200 K€)
<http://www.uphf.fr/LAMIH/fr/geolocalisation-dattaques-sur-reseaux-sans-fil>

👉 EMULRADIO4RAIL projet européen s'inscrit dans Shift2rail entre les partenaires Univ. G. Eiffel, l'Univ. Lille entre autres (750 K€)
<http://www.emulradio4rail.eu>

👉 INTERCOR projet européen avec la collaboration de MEDDE, SANEF, les universités G. Eiffel, Reims, et polytechnique Hauts-de-France, Télécom Paristech, Opentrust, Gyptis, I-TRANS, Geoloc systems (30 M d'€)
<https://intercor-project.eu/>

👉 PANDA, Projet H2020 RIA Power Advanced N-level Digital architectures for electrified vehicles ; Coordonné par Université de Lille (3.5 M€)
<https://cordis.europa.eu/project/id/824256>

👉 ISHY Implementation of Ship Hybrid, Projet INTERREG
Avec la collaboration de l'Université Polytechnique Hauts-de-France (16 M€)
<https://www.interreg2seas.eu/en/ISHY>

👉 NumERICCS Numerical and Experimental Research for Improved Control of Compressor Surge

Projet ANR avec LML/ONERA
(812k€)

<https://www.aerodynamics.fr/NumERICCS/index.php>

PLATEFORMES TECHNOLOGIQUES

Ces plateformes ont été développées dans le cadre du contrat de plan Etat Région en co-financement avec le programme opérationnel FEDER 2015-2020 et des partenaires académiques du projet ELSAT2020

PRETIL

<https://www.cristal.univ-lille.fr/pretil/>

Laboratoire CRISTAL UMR CNRS 9189

La plateforme PRETIL (Plateforme de recherche Robotique et Transports Intelligents de Lille) du laboratoire CRISTAL a pour vocation de fédérer les ressources humaines et technologiques des équipes de recherche qui l'utilisent afin de capitaliser les développements scientifiques dans ces domaines. La plateforme offre ses services sur deux principaux champs applicatifs :



- la robotique mobile incluant les véhicules autonomes, la robotique portuaire et logistique, les drones aériens et terrestres ;

- la robotique médicale avec un focus sur les aspects déformables.

Un axe sur le développement de jumeaux numériques est également fortement soutenu, ces derniers étant mis à disposition de la communauté.

PRETIL est une plateforme de l'Equipex+ TIRREX et est l'un des noeuds de l'infrastructure de recherche ROBOTEX2.0. En région, elles hébergent les équipements et projets des CPER ELSAT2020 (2007-2020), CORNELIA (2021-2027) et RITMEA (2021-2027).

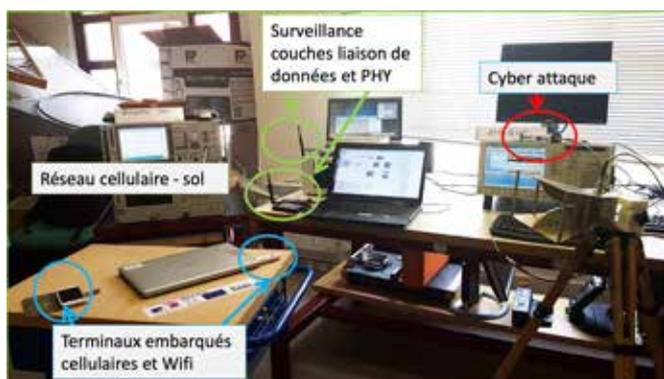
COPEFE

<https://copefe.univ-gustave-eiffel.fr>

Laboratoire Université G. Eiffel COSYS

La plateforme COPEFE (COmmunication, PERception, sûreté de Fonctionnement pour les transports terrestres et Exploitation ferroviaire) fédère un ensemble d'équipements matériels et logiciels permettant le développement de recherches autour de la mobilité intelligente dans les transports terrestres. Ceux-ci servent dans des campagnes de mesures, de tests ou encore de modélisation de nouveaux concepts, l'étude, le développement et le test de prototypes ou d'algorithmes.

- Exploitation ferroviaire et sûreté de fonctionnement : la plateforme logicielle RECIFE a été enrichie avec le simulateur RailSys ; le simulateur ERTMS dispose d'un moteur de simulation 3D permettant l'ajout d'éléments d'infrastructure.
- Communication : le simulateur Riverbed Modeler, les cartes SDR et les matériels complémentaires constituent des briques pour la cybersécurité, la mise en œuvre de nouveaux protocoles, l'étude de formes d'ondes.



Plateforme de détection de cyberattaques

Perception : elle fait appel notamment à des drones, caméras et radars.



Mesures radar et drone

BANC DYNAMOMÉTRIQUE

<https://www.uphf.fr/LAMIH/fr/plateformes/>

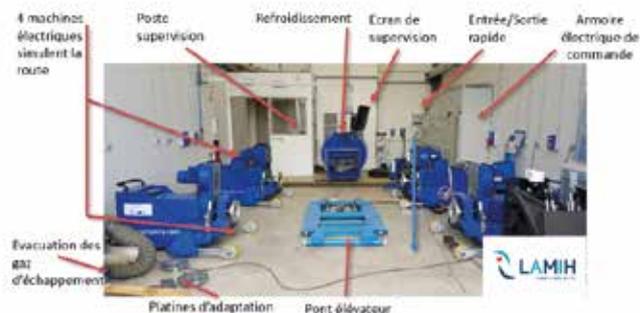
Laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201

Le banc dynamométrique permet de réaliser des roulages reproductibles sans déplacement du véhicule. Permet de mesurer précisément la consommation énergétique des véhicules électriques, hybrides et conventionnels.



Banc dynamometrique

Les équipements du banc :



VLAD

Laboratoire IMT NE

La plateforme VLAD (Véhicule Léger d'Acquisition de Données) a été conçue et réalisée au cours du projet. Il s'agit d'une plateforme mobile d'acquisition de données multimodales associées à la mobilité dont la particularité est de pouvoir collecter ces informations « in situ », aussi bien en immersion dans la circulation que de manière statique, en des points stratégiques du réseau. Les données acquises visent à la construction de modèles « pilotés par les données » d'infrastructures routières, susceptibles d'aller jusqu'à de véritables « jumeaux numériques » 3D s'appuyant sur les technologies de réalité virtuelle. VLAD intègre actuellement 4 caméras orientables à haute résolution, 2 LIDAR 3D capables de réaliser la capture de nuages de points à une cadence de 20 Hz, un LIDAR plan d'une portée effective de 80 m ainsi que 2 systèmes de radar Ultra Large Bande. Le traitement des données acquises est réalisé grâce à un cluster embarqué de 48 cœurs, épaulé par un système GPU (AGX Xavier de nVidia –Deep Learning). VLAD comprend un scanner B.I.M est des moyens de type V.R (HTC Vive) et R.A (Hololens).



① Caméra PTZ haute résolution ② LIDAR 3D Velodyne ③ Radar Ultra Large Bande

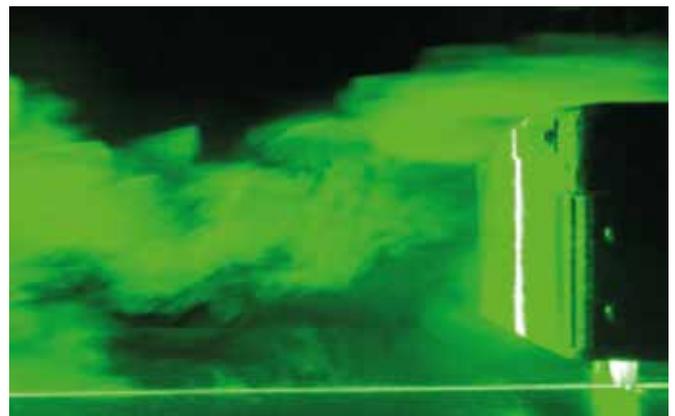
Plateforme VLAD

CONTRAERO

<http://contraero.univ-lille1.fr>

Plateforme mutualisée entre les laboratoires : LAMIH LMFL ONERA IEMN

La plateforme CONTRAERO est dédiée à l'étude du contrôle d'écoulement, depuis la compréhension physique fondamentale des écoulements concernés jusqu'au démonstrateur sur modèles réduits représentatifs, en passant par toutes les étapes intermédiaires de test sur configurations simplifiées et de validation préalable, en vue de l'amélioration des performances aérodynamiques dans le transport. Chacun des partenaires du LMFL, de l'ONERA et du LAMIH dispose actuellement d'installations dont les caractéristiques sont complémentaires depuis la soufflerie de couche limite de grandes dimensions jusqu'aux souffleries aérodynamiques permettant d'étudier des maquettes représentatives des écoulements réels. Ces souffleries sont composées d'une infrastructure qui évolue peu dans le temps, et de divers dispositifs plus spécifiques du contrôle des écoulements : parois de veine transparentes, montages mécaniques, alimentation aéraulique, équipements de mesures de débits, vitesse, pression, etc.



Tomographie Ahmed 300

OBJECTIF STRATÉGIQUE

systèmes de mobilité et changements de comportements

Les travaux se sont concentrés sur trois questions scientifiques :

- Le but du volet juridique du projet était de dresser un état des lieux des politiques se fixant comme objectif de réduire les pollutions liées aux transports, de décrypter les objectifs de ces politiques, leurs instruments, leur efficacité, leurs échecs et leurs contradictions. De manière plus globale, il s'est agi d'appréhender l'évolution du cadre juridique pour le développement d'une mobilité durable.
- Analyser les liens entre les TIC et les évolutions de la logistique et du transport de marchandises. Plus spécifiquement, il s'agit d'analyser les besoins en systèmes d'informations des chaînes logistiques, les évolutions dans la demande logistique des chargeurs du fait notamment du e-commerce, comme celles de l'offre de services des prestataires et enfin l'influence des TIC dans l'adoption de pratiques logistiques collaboratives.
- Conduire en parallèle l'étude des changements de comportement de mobilité et celle de la place du numérique dans le développement de pratiques plus durables.

La question des ressorts des pratiques de transport plus respectueuses de l'environnement est alors déterminante pour envisager les services ou les aménagement des lieux et des nœuds de transport les plus pertinents. Il s'agit donc de considérer les déterminants des changements de comportement et la manière dont ces déterminants s'articulent avec des dispositifs techniques (reposant sur les TIC). Sur cette base, il s'agira de proposer des services et des aménagements.

Des objectifs déclinés en sous thématiques :

1. Système de mobilité et d'accessibilité durable à la croisée de l'économique, du juridique et du social - Penser la mobilité durable et inclusive

Les objectifs du projet sont de :

☞ Construire des indicateurs d'accessibilité et d'inégalités d'accessibilités,

☞ Etudier les choix de modes de transports, en particulier Domicile-Travail à partir d'une base de données régionale,

☞ Tester des scénarios de politique de mobilité durable à l'aide d'une modélisation des déplacements. La question centrale est comment conjuguer durabilité des transports et inclusion.

Les travaux que nous effectuons portent sur des bases de données de grande ampleur et rarement entrepris en France malgré la mise à disposition gratuite des données de nombreuses enquêtes similaires dans les régions françaises. Ceci explique le caractère chronophage des tâches effectuées. La base de données obtenue va permettre de lancer les travaux de construction d'indicateurs d'accessibilité (et leur distribution) et les travaux économétriques sur le choix des modes de transports. Ces derniers éclaireront la part modale des modes en Hauts-de-France.

2. Innovations par les TIC et changements de comportements

S'agissant des TIC et les évolutions de la logistique et du transport de marchandises, l'ambition est d'apprécier les possibilités de mise en œuvre du fret intelligent, tout comme les conditions de production d'une logistique collaborative. Par ailleurs, la maturité des prestataires logistiques et de transport à faire face aux nouveaux enjeux pour une logistique urbaine durable a été analysée.

- Quant aux changements de mobilité des personnes, la question des changements de comportements a été envisagée à plusieurs niveaux, considérant successivement :

- A l'échelle individuelle, les déterminants des comportements de mobilité et l'influence que peuvent avoir les TIC sur les changements de comportements ;
- A l'échelle des gares, le rôle des modalités de

- conception et d'exploitation des lieux pivots de l'intermodalité dans les pratiques de mobilité;
- A l'échelle des villes, les facteurs de développement d'un urbanisme orienté vers les transports collectifs.

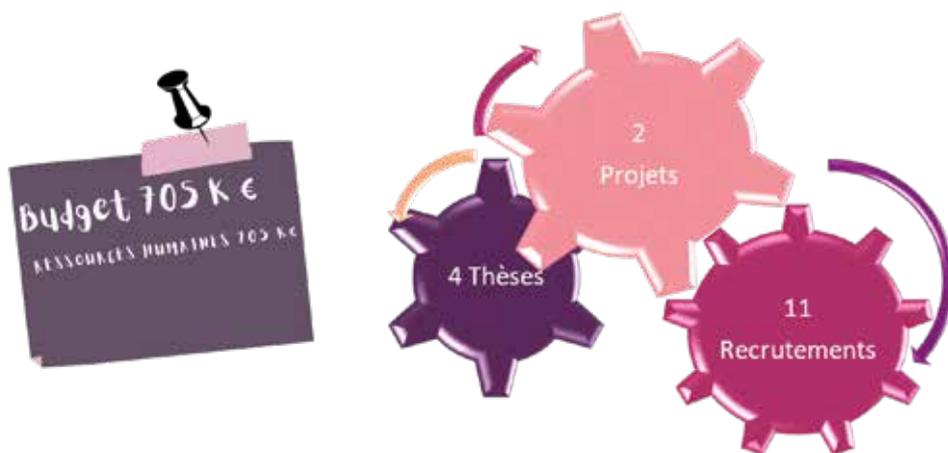
de comportements Les chiffres clés

Production scientifique

Valorisation

Systemes de mobilité et changements de comportements

Les sous projets	GLOBAL	1	2	3
● Revues à comité de lecture	10	2	6	2
● Communications conférences internationales	5		5	
● Communications conférences vulgarisation	6		3	3
● Total par sous projet	21	2	14	5



Partenaires impliqués

Systemes de mobilité et changements de comportements

Tutelles	Université Polytechnique Nord de France	Université de Lille	Université Gustave Eiffel	Cerema
1 Penser la mobilité durable et inclusive	✓	✓		
2 Comportements TIC & évolution du transport de marchandises et de la logistique		✓	✓	✓
3 Changements de mobilité des personnes, comprendre les comportements et définir les aménagements et les services		✓	✓	✓

DÉCLINAISON DES TRAVAUX RÉALISÉS SELON LES SOUS PROJETS DU THÈME OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE MOBILITÉ ET LOGISTIQUE

1. Système de mobilité et d'accessibilité durable à la croisée de l'économique, du juridique et du social - Penser la mobilité durable et inclusive

Un travail a été mené pour constituer une base de données révélant les comportements de mobilités des habitants de la Région Hauts-de-France. Pour cela nous avons utilisé l'Enquête Régionale Mobilité Déplacements de la région disponible en ligne.

La première étape a consisté à rassembler en une seule base les quatre grands fichiers de cette enquête : le fichier Personnes, celui sur les Ménages, celui sur les Déplacements et enfin celui sur les Trajets. Il a fallu affiner l'identification des communes d'origine et de destination. En effet, la base de données comprenait des codes pour avoir des origines et destinations plus précises (Lille centre, Lille est, etc.) or ces codes ne correspondent pas aux IRIS que l'on retrouve sur l'INSEE, il a donc fallu trouver les interlocuteurs adéquats qui ont pu nous fournir ces informations. Le CEREMA a fourni des cartographies des communes par enquêtes et c'est de ces cartographies que nous avons pu affiner 70% des informations. Il a donc fallu générer les centroïdes de chacun de ces quartiers.

La deuxième étape a consisté à calculer, pour les choix de déplacements déclarés, la matrice Origine-Destination (OD), avec notamment les distances et les temps de déplacement.

La troisième étape a consisté à identifier les déplacements qui passent par des étapes intermédiaires, déplacements que nous appelons « Tournée ». Il s'agit des ménages qui, par exemple, en rentrant de leur travail, passent par l'école de leurs enfants ou par un supermarché pour combiner leur retour du travail avec d'autres tâches. Cette information était implicitement dans la base mais il a fallu élaborer un script (en langage Shell Bash) pour construire une nouvelle variable « Avez-vous fait une tournée dans la

cadre de votre déplacement ? ». Cet élément qui ressort de la logistique des ménages est vu comme un facteur important du choix de mode de transport, la voiture permettant beaucoup plus facilement de développer cette logistique.

Le fruit de ces trois étapes a été présenté en juin 2018 au siège de région dans le cadre de la restitution à mi-parcours.

La quatrième étape a consisté à effectuer le même travail pour les modes de transport alternatifs qui n'ont pas été choisis par les sondés (et donc n'ont pas été déclarés par eux comme leur choix de mode) mais figuraient dans leur ensemble de choix. Le but est de pouvoir étudier les déterminants du comportement de choix du mode de transport afin, à terme, de pouvoir étudier les effets des scénarios de politique de mobilité durable et inclusive. À cette fin il était prévu initialement d'utiliser Google Maps mais ce service étant devenu payant nous nous sommes tournés vers un autre interlocuteur : le SMIRT, devenu entre-temps Hauts-de-France Mobilité (HdFM). Le processus d'élaboration d'une convention entre HdFM (Haut-de-France Mobilités) a été achevé en décembre 2018. Nous avons alors élaboré un script (en langage Python) qui a interrogé à distance le serveur PassPass de HdFM via une API pour construire ce bloc des choix de mobilité alternatifs aux choix déclarés. Ce travail a porté sur quelques 50000 trajets. Les requêtes d'itinéraires via l'accès API de Pass-Pass nécessitent les coordonnées géographiques de toutes les communes. Ainsi, il a fallu rechercher l'ensemble des coordonnées géographiques des origines et destinations déclarées dans la base de données initiale. Nous disposons donc à présent d'une base de données unique, présentant les couples Origine-Destination déclarés et alternatifs et précisant s'il y a eu des « Tournées » au sens expliqué plus haut.

Depuis septembre 2020, nous travaillons à la construction d'indicateurs de choix de mode de transports et d'accessibilité et sur la fréquence des tournées selon les zones d'origine et de destination.

Par ailleurs, parallèlement, une thèse en science économique, adossée au projet, porte sur la modélisation des déplacements Domicile-Travail dans un modèle de croissance à générations imbriquées. Les travaux théoriques mobilisant ce type de modèle sont quasiment inexistantes. La question de recherche examinée est la suivante : « Quels sont les déterminants du nombre de déplacements Domicile-Travail associés à l'offre de travail des ménages sous l'hypothèse que le travail peut être fait pour partie en entreprise et à domicile (télétravail) et sous l'hypothèse que les heures de travail en entreprises impliquent des déplacements polluants ? »

Il s'agira d'enrichir cette modélisation en ouvrant aux ménages du modèle la possibilité de choisir entre deux modes de transport, l'un moins polluant que l'autre ; ainsi nous pourrions rendre des conclusions sur deux leviers (parmi d'autres) permettant de réduire la pollution liée aux déplacements Domicile-Travail, à savoir le télétravail et un partage modal plus durable.

Des scénarios de politiques visant à rendre plus durables les déplacements Domicile-Travail pourront ainsi être étudiés.

En outre, ces modélisations donneront l'évolution des différentes valeurs du temps au cours de la dynamique transitionnelle et à long terme. Le volet juridique du projet s'est décliné en plusieurs étapes.

La première étape a consisté à constituer une bibliographie étendue sur le sujet, ne se limitant pas au seul domaine juridique, en raison de l'aspect fragmenté de celui-ci et de l'introduction du concept de « mobilité » (connu des économistes, géographes et sociologues) en droit. L'exploitation de cette bibliographie s'est, de plus, réalisée, dans un contexte mouvant, à plusieurs titres. Premièrement, la loi n°2019-1248 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (LOM) a achevé les modifications du cadre juridique interne relatif à la mobilité, notamment par une nouvelle ventilation des compétences et une rénovation des outils mais aussi par un

changement d'approche substituant la « mobilité » (actualisation du code des transports) au « transport ». Deuxièmement, le cadre européen est en pleine effervescence sous l'influence du Green Deal (déc. 2019), de la « stratégie de mobilité durable et intelligente » (déc. 2020) qui en est issue, et des déclinaisons législatives subséquentes (« Ajustement à l'objectif 55 », juil. 2021 ; « Mobilité verte », déc. 2021). Troisièmement, nombre d'ajustements restent par conséquent en chantier au niveau européen (marché du carbone pour le trafic routier, par exemple) comme au niveau national (modifications par la loi climat et résilience d'août 2021).

La deuxième étape a été la formalisation, à partir du travail bibliographique, d'un article original sur l'appréhension de la mobilité durable par le droit. L'enjeu est de discerner la conception de la mobilité durable véhiculée par les mesures juridiques, en dépit des dispositions éparses et d'une prééminence traditionnelle d'une approche privatiste des transports (contrats, assurances...). De manière transversale, il est mis en valeur une approche de la mobilité durable axée principalement sur les mobilités actives, partagées et propres, comme le montrent les réformes récentes. Il reste des angles morts, car délicats à aborder : la question des besoins de mobilité (dépassant l'approche technique et modale) ; la question de la démocratisation du secteur ; la question de la fondamentalisation d'un « droit à la mobilité durable » et la redéfinition de la liberté qu'elle peut impliquer à terme.

Une intervention a également été effectuée le 26 nov. 2021 à l'Université de Reims, à l'occasion du colloque inaugural de l'association pour l'analyse écologique du droit (AED), dans une table ronde sur le thème « Télétravail et Mobilités durables ». Ce fut une occasion de confronter certaines hypothèses et certains résultats, en présence de juristes (droit public, droit social) et de géographes, à propos d'une approche juridique de la mobilité durable ne visant pas spécifiquement la réduction des déplacements, au regard de la prise en compte très limitée du télé-

travail dans les dispositifs incitatifs mis en place récemment.

La troisième étape a été la formalisation, à partir d'une actualisation du travail bibliographique et des politiques envisagées, d'un article original sur l'approche de la mobilité durable par le droit européen, notamment dans le cadre actuel du Green Deal. Il s'agit d'abord d'une comparaison de la nouvelle stratégie émise dans ce cadre par rapport aux stratégies antérieures (depuis 1992), montrant que le Green Deal reste dans la continuité bien qu'il rehausse de manière significative les ambitions. Il s'agit ensuite d'exposer que la mobilité durable reste prioritairement abordée sous l'angle de mesures techniques (électromobilité, carburants alternatifs, développement des infrastructures) et économiques (marchés carbone à venir), ne s'aventurant pas vers d'autres « narratifs » permettant d'interroger plus profondément les besoins de mobilité et la conciliation entre les libertés de circulation et les considérations environnementales. Ces limites sont néanmoins nuancées par les contraintes inhérentes au cadre européen : aspect fédéraliste, solidarité par le marché, compétences limitées, etc.

Cette contribution a fait l'objet d'une publication mi-mars 2022 sur le site de l'Observatoire du Green Deal (OGD), impulsé par l'Université Paris-Saclay.

2. Innovations par les TIC et changements de comportements

- TIC et évolution du transport de marchandises et de la logistique.

L'enjeu était d'analyser comment les prestataires logistiques et de transport font évoluer leur offre de prestations et le rôle des TIC dans ces évolutions.

Au travers d'enquêtes, la nature des innovations dans les prestations proposées, dans leurs composantes matérielles (le transport) mais aussi relationnelles, informationnelles ou cognitives a été identifiée.

Le travail montre ainsi l'enrichissement progressif de la fonction transport et la diversité des trajectoires d'innovation. A l'origine, le TRM est essentiellement caractérisé par des opérations matérielles (M) mais, le traitement de l'information est aujourd'hui très étroitement lié à la réalisation du transport. On peut ainsi, d'un point de vue dynamique, mettre en évidence plusieurs trajectoires « servicielles » dans le transport de marchandises et la logistique. A l'origine, les entreprises du secteur ont développé des opérations uniquement matérielles, puis sous l'impulsion des besoins des clients et des stratégies des offreurs, ont innové pour intégrer des traitements davantage informationnels, relationnels puis de connaissance.

Les petites entreprises de forme artisanale se positionnent essentiellement sur la première étape et évoluent parfois vers l'intégration d'opérations de traitement de l'information. Les plus grandes unités et les groupes de transport et de logistique « délaissent » le transport à proprement parler pour s'orienter davantage sur des opérations d'organisation et de gestion de la prestation. Les options de transport intelligent interviendront alors sur ces opérations.

L'objectif de durabilité a, de même, fait évoluer l'offre de services. Ainsi, les opérations matérielles peuvent avoir recours à davantage de modes doux ou à des véhicules propres. Les opérations informationnelles ont développé l'utilisation d'outils de planification type ECR, qui autorisent une meilleure organisation des groupages entre les firmes, une optimisation des taux de remplissage, voire une réduction des déplacements. La vulgarisation des services de traçabilité modifie également ces opérations informationnelles. Les opérations en connaissance se complexifient elles aussi. L'intégration de l'objectif de durabilité se retrouve ainsi pour l'ensemble des opérations élémentaires. Des trajectoires nouvelles se mettent par ailleurs en place, en fonction de la coexistence des évolutions de ces opérations élémentaires.

Toutefois, si les options de fret intelligent peuvent accompagner l'évolution de l'offre de prestations, leur influence sur la mobilité durable va dépendre de l'adéquation de ces prestations à la demande et aux besoins des chargeurs.

Des enquêtes auprès des chargeurs ont ainsi montré que la mobilisation par les firmes de ces prestations dans le cadre de leurs stratégies logistiques dépend d'autres facteurs, parmi lesquels : (1) les contraintes tenant à l'optimisation micro-économique en termes de coûts et de temps pour la firme ; (2) les contraintes imposées au niveau méso-économique par les relations avec les autres acteurs du système productif (et notamment les clients). C'est pourquoi il existe une diversité de stratégies logistiques et de transport, qui vont appeler des besoins de services différents.

La réponse en termes d'offre technologique, de la même façon que celle en termes d'infrastructures, doit ainsi être pensée en fonction des besoins, de la demande de prestations logistiques et de transport des entreprises. Or, ces besoins apparaissent très divers, de même que la représentation de la performance « durable » du transport et de la logistique. Les systèmes de transport intelligent s'adresseront ainsi davantage aux organisations logistiques complexes. C'est donc vers la recherche de solutions dédiées aux besoins des chargeurs qu'il convient de s'orienter, et cherchant à concilier leurs visions de la performance « durable » des chaînes à l'intérêt général.

Ce volet considère également les impacts de l'introduction des TIC étudiée précédemment. L'enjeu était d'analyser comment le recours accru au numérique dans les prestations de transport peuvent être incluses dans le calcul de la performance environnementale de l'ensemble de la chaîne.

Au cours des dernières années, les efforts de recherche sur une méthode robuste, transparente et précise de calcul des émissions dans les ré-

seaux de transport et de logistique ont conduit au développement d'un certain nombre de méthodes et d'outils. La diversité de ces solutions souligne la nécessité d'une méthode unifiée et largement acceptée – prenant corps dans une norme internationale. Cette normalisation du calcul des émissions des chaînes de transport a encore progressé et actuellement une norme internationale pour la quantification et la déclaration des émissions de gaz à effet de serre résultant des opérations des chaînes de transport est en cours d'élaboration (ISO/WD 14083 2020). Parallèlement, la numérisation des transports progresse, entraînant une évolution des émissions associées à cette numérisation, émissions qui ne sont pour autant pas encore comptabilisées de manière adéquate.

La numérisation peut améliorer l'efficacité du système de transport : elle rend possible l'optimisation des systèmes de transport, elle contribue à la réduction des transports à vide en optimisant la charge et les itinéraires, etc. Toutefois, les émissions GES des TIC pour le transport doivent également être analysées en détail et être incluses dans les calculs d'émissions de la chaîne de transport.

Une première approche pour combler cette lacune et inclure les émissions des TIC directement liées à l'organisation et au suivi du transport de marchandises a été développée. Les émissions liées aux prestations de transport et logistique elles mêmes, tout comme celles associées au processus de production ou gestion de la fin de vie des infrastructures TIC, ont été calculées.

Pour le développement d'une approche pour le calcul des émissions de TIC directement liées au transport, nous suggérons dans un premier temps de faire la distinction entre les transports suivis et tracés de bout en bout, et les transports qui ne sont suivis que sur des segments spécifiques. Sont incluses les données liées aux opérations de préparation du transport, à l'opération de transport elle-même et aux processus logistiques après le transport, à savoir :

- Identification des options de transport.
- Réservation du transport.
- Élaboration des documents de transport électroniques.
- Les processus liés au dédouanement.
- Traçage et suivi du transport.
- Surveillance du transport (par exemple, contrôle de la température).
- Finalisation des documents de transport.
- Processus liés au dédouanement.

Les résultats confirment qu'avec la progression de la numérisation, en raison de l'utilisation des outils TIC et du traitement des quantités de données, l'inclusion des émissions liées aux TIC est nécessaire pour évaluer de manière complète la performance environnementale des chaînes de transport.

Par ailleurs, la mobilisation de toutes les parties prenantes est nécessaire pour tirer parti de la numérisation du transport. Autrement l'utilisation des TIC n'aboutira qu'à un changement des outils utilisés, mais pas à une véritable amélioration du système de transport et de son efficacité. L'utilisation de TIC, même très innovantes, restera alors bloquée dans un « system lock-in », dans des structures actuelles, sans amélioration ou changement des structures anciennes.

- Changements de mobilité des personnes, comprendre les comportements et définir les aménagements et les services.

La recherche s'intéresse aux changements de mobilité des personnes, à la compréhension des évolutions des comportements et à la définition des aménagements et des services les plus pertinents pour les faciliter. Le projet se décline autour de deux volets :

- Un premier volet s'intéresse à la notion de modernité tardive. Utiliser le temps de transport pour des activités non liées au transport, comme la lecture, le sommeil et plus récemment des activités liées aux technologies, qu'elles soient récréatives ou de communication permet de construire un argument en faveur d'un usage

des TC qui soit en phase avec les aspirations de nos contemporains. Reflétant l'intensité de leur usage dans la société, l'usage des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans les transports est une réalité massive. Très différent de l'expérience de la conduite d'une voiture, le temps passé dans les transports en commun permet un usage facilité des TIC. Quel rôle joue donc cette différence dans la préférence, exprimée ou potentielle, pour les transports en commun plutôt que la voiture ? Plus largement, ces tendances indiquent-elles la possibilité d'une évolution des modes de vie urbains, dans un sens plus favorable au modèle de l'urbanisme orienté vers les transports en commun (TOD Transit Oriented Development) (Cervero 1998) ? La recherche vise ici à caractériser, comprendre les mécanismes à l'œuvre et à mesurer leur impact pour l'attractivité et l'usage des modes de transport collectifs.

Le travail commence par un état de l'art sur la question. Jusqu'à présent les recherches portant sur les TIC et le transport public ont focalisé d'une part sur les nouveaux services aux voyageurs, et d'autre part sur l'évolution de l'emploi du temps (Russell 2012) et le nouvel usage du temps de transport et d'attente (Lyons et Urry 2005 ; Lyons, Jain, et Holley 2007), une thématique identifiée dès les années 2000 ; mais très peu de travaux ont étudié et pris la mesure de l'évolution des préférences pour les modes de transport liée à l'usage des TIC dans le transport.

Le travail a mobilisé des données disponibles sur l'Île de France et collecté des données spécifiques pour Lille pour définir une valeur du temps liée à la connectivité dans les transports. Les données sur l'Île de France ont été analysées et valorisées. Le travail montre une valeur du temps variable selon la qualité de la connexion dans les transports publics et le nombre de tâches réalisées ; quand la connectivité est meilleure et permet plus de tâches dans les transports publics, la valeur du temps baisse.

Les données sur Lille sont en cours de traitement.

▪ Un deuxième volet s'intéresse aux pôles d'échanges et à leur rôle dans l'intermodalité. Ces questions, abordées comme des problématiques d'aménagement des espaces de la mobilité, en particulier des pôles d'échanges en tant que pivots de l'intermodalité, font une place importante aux TIC et sont ainsi reliées à la thématique de la ville intelligente (smart city). Il s'agit ici d'étudier les évolutions des mobilités urbaines, les combinaisons de pratiques de mobilité et de nouvelles pratiques de consommation, comment les usagers intègrent leurs achats (ou récupérations des paquets commandés par internet) à leur pratiques de déplacement et d'usage des transports collectifs, privés ou partagés, et le rôle des TIC dans ces évolutions, et déterminer les conséquences pour l'aménagement des quartiers.

PROJETS COLLABORATIFS

• IMP2ULCE (Incitation à une Mobilité Propre, Impact de l'iMage sur la Perception et Usages alternatifs au sein des Collectivités publiques et des Entreprises) financé par le Conseil régional dans le cadre de son appel à projets STIMULE : expérimentation de terrain de l'effet de « nudges » sur les parts modales des déplacements Domicile-Travail en Hauts-de-France (200 K€)
Partenariat entre Université Polytechnique Hauts-de-France avec le laboratoire DeVisu, le Réseau Alliance et la start-up 2R Aventure.

<https://www.imp2ulce.fr/>

• AutoConduct projet de l'Agence Nationale de la Recherche avec un consortium entre VeDeCom, PSA Peugeot Citroën, Valeo, Continental automotive, UPHF, et IFSTTAR devenu Université G. Eiffel. Site de Lille (1.1 M d'€)

<https://autoconduct.fr/accueil/>

Mobility4EU projet européen sur la mobilité fret et logistique à horizon 2030.

<https://www.mobility4eu.eu/>

FALCON projet européen sur les déterminants des changements en matière de transport de marchandises

<https://bit.ly/3zjMQGi>

THÈSES

Université Polytechnique Hauts-de-France laboratoire LARSH (20xx)

Encadrement : Stéphane Lambrecht et de Chokri Dridi

'Mobilité et ville durables : dynamiques intergénérationnelles, hétérogénéités et risques'

Nassima Frissa

Internet physique : conditions de déploiement et intérêt au regard du développement d'une logistique durable, sous la direction de Corinne Blanquart, soutenue en décembre 2019

Elia Vanson

Entreprises de course urbaine et uberisation, sous la direction de Corinne Blanquart, soutenue en avril 2021

Dylan Moïnse

Le Transit-Oriented Development, un urbanisme orienté vers les transports en commun, revisité par les micro-mobilités émergentes. Une investigation sur les trottinettes et les vélos pliants en intermodalité, sous la direction d'Alain L'Hostis

/// Rapport _____ _____ Scientifique



ELSAT2020

CONTACT

Professeur Jean-Christophe POPIEUL

Coordinateur

jean-christophe.popieul@uphf.fr

+33 3 27 51 14 62

Site web : <http://www.elsat2020.org>

