

---

# COSYS

## Profil et Faits marquants 2013-2018

Frédéric Bourquin et al.

# Table des matières

1	ADN, Enjeux, Stratégie, Ecosystème	4
1.1	ADN et profil du département	4
1.2	Un département au coeur des défis sociétaux	7
1.3	Politique scientifique et d'innovation	8
1.4	Écosystème du département	21
2	Bilan global	27
2.1	Faits marquants	27
2.2	Thématique « Systèmes de transport de nouvelle génération »	47
2.3	Thématique « Monitoring généralisé des territoires »	57
2.4	Thématique « Sécurité et sûreté »	67
2.5	Thématique « Solutions énergie et climat »	68

### Glossaire

COSYS	département Composants et Systèmes
R5G	Route de 5ème génération
COP	Contrat d'Objectifs et de Performance
FUTURE	«French UniversiTy for Urban Research and Education»
VAC	Véhicules Automatisés et Connectés
SNTEDD	Stratégie Nationale de Transition Ecologique vers un Développement Durable
LUNA	Laboratoire des Usages de la Nouvelle Aquitaine
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport System
AMP	Cellule IFSTTAR d'aide au montage de projets
ESTAS	Évaluation des Systèmes de Transports Automatisés et de leur Sécurité
GRETTIA	Génie des Réseaux de Transports Terrestres et Informatique Avancée
LEOST	Laboratoire Électronique Ondes et Signaux pour les Transports
LEPSIS	Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations
LICIT	Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports
LIVIC	Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs
LISIS	Laboratoire Instrumentation, Simulation et Informatique Scientifique
TEMA	Technologies pour une Électro-Mobilité Avancée
MACSI	Matériaux, assemblages, composites, structures instrumentées
SII	Structure et instrumentation intégrée
SATIE	Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie
ERENA	Équipe de Recherche en Émergence Nouveaux usages et pratiques de la mobilité en Nouvelle Aquitaine
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
SPI	« Sciences pour l'ingénieur »
STIC	« Sciences de l'information et de la communication »
SHS	« Sciences de l'homme et de la société »
LIA	« Laboratoire International Associé »
LIAs	« Laboratoires Internationaux Associés »
LEA	« Laboratoire Européen Associé »
LEAs	« Laboratoires Européens Associés »
PIA	« Programme Investissement d'Avenir »

# Chapitre 1

## ADN, Enjeux, Stratégie, Ecosystème

### 1.1 ADN et profil du département

Le département Composants et Systèmes ([COSYS](#))<sup>1</sup> est un département pluridisciplinaire à l'interface entre les mondes physique et numérique, avec une forte assise expérimentale. Nourri par cette culture phygitale, il s'est donné pour ambition de développer les concepts et outils nécessaires à l'amélioration des connaissances de base, des méthodes, des technologies et des systèmes opérationnels destinés à une intelligence renouvelée de la mobilité, des réseaux d'infrastructures et des grands systèmes urbains. Il vise ainsi une maîtrise accrue de leur efficacité, de leur sécurité, de leur empreinte carbone et de leurs impacts sur l'environnement et la santé. Contribuer à l'efficacité, à la sobriété et à la résilience des villes et des systèmes de transport qui jouent un rôle vital au service de l'économie tout entière, offrir des services à haute valeur ajoutée pour l'attractivité des territoires, l'implantation d'activité et le bien-vivre, telles sont les cibles visées par le département. Ces orientations sous-tendent la feuille de route de la Route de 5ème génération ([R5G](#)) que COSYS pilote.

La production de connaissances à la frontière des pratiques, leur transformation en produits utiles et en corps de doctrine en appui des politiques publiques et l'évaluation des transformations induites par les innovations dans ces champs d'activité forment l'ADN du département, qui le prédispose donc à couvrir toute la palette de TRL, de sujets très à l'amont jusqu'à la vente de logiciels via des licenciés ou à l'expertise au bénéfice des territoires.

Les Objectifs du Développement Durable récemment revisités par les nations unies (voir notamment la conférence Habitat III) constituent la base étendue des défis sociétaux auxquels la RID du département tente de répondre.

Le département Composants et Systèmes ([COSYS](#)) a été créé au 1er Janvier 2013, comme l'un des cinq départements de l'IFSTTAR. La recherche du département relève du domaine des sciences et technologies de l'information et de la communication et des sciences pour l'ingénieur. Le département réunit 11 structures de recherche réparties sur 7 sites principaux. Il offre ainsi un large éventail de disciplines scientifiques, principalement :

- Modélisation, calcul scientifique, physique numérique
- Informatique et génie logiciel, automatique
- Traitement d'images, perception
- Traitement de l'information (hors images)
- Électronique, matériaux et composants
- Sciences et ingénierie de l'expérimental.

---

1. [www.cosys.ifsttar.fr](http://www.cosys.ifsttar.fr)

## 1.1. ADN ET PROFIL DU DÉPARTEMENT

---

De plus, deux laboratoires du département (LEPSIS et GRETTIA) mènent des recherches qui couplent les SPI et les sciences humaines (SHS) avec des activités en psychologie cognitive et psycho-ergonomie (CNU 16 et 69), afin de mieux comprendre les facteurs humains des nouvelles mobilités, tels que le comportement de l'homme au milieu des robots, l'éblouissement et l'inconfort associé, l'éclairage dynamique ou le rôle de l'information voyageur.

Depuis 2013, le département a créé une équipe en Nouvelle Aquitaine et le GIS DURSI sur les matériaux composites. Il participe à I4S (Inférence Statistique pour la Surveillance et la Sécurité des Structures), équipe projet commune avec INRIA Rennes, Bretagne Atlantique.

Fort de bourses européennes prestigieuses (ERC Magnum, CIG Smart-Walk), de records du monde en nanotechnologies et d'articles à très forte visibilité (Article le plus cité de la décennie en computer vision...), le département se trouve très impliqué dans l'action européenne et internationale au sein des réseaux d'excellence Eurnex, Nearctis, SAPPART, Urban Europe, qu'il pilote, en relation pérenne avec des instituts étrangers à travers des LEAs/LIAs en préparation (Naples, Bologne, Brisbane) ou sur le mode projet à travers le leadership de projets H2020. COSYS participe aussi fortement au « Programme Investissement d'Avenir » (PIA) : IRT Railenium, SystemX et Jules Verne, ITE VEDECOM et Efficacity, Equipex Sense-City qu'il coordonne, SATT Paris-Saclay pour la maturation de start-ups. On estime que cette participation importante aux instituts du PIA contribue à la visibilité, à la performance et à l'utilité du département.

Il s'implique de façon volontariste dans la relation industrielle avec des entreprises de toutes les tailles dans le secteur des transports, des infrastructures, de l'énergie et des télécommunications. Il a créé environ 80 emplois pendant la période sous revue.

Force d'innovation ouverte, COSYS est récipiendaire de nombreux prix dont un prix européen de l'innovation sur l'IoT pour les systèmes ferroviaires critiques, avec la société STIMIO. L'activité de transfert technologique joue un rôle structurant pour le département.

L'Appui aux Politiques Publiques, de poids croissant, confirme le positionnement stratégique de l'institut et du département sur deux thèmes majeurs pour la société, le véhicule automatisé et le ville durable, remise à l'honneur en 2016 par l'ONU (Habitat III, Quito).

Un premier contrat quadriennal (2013-2016) a permis la construction de COSYS autour de 13 équipes de recherche, de quatre thématiques et de quatre projets phares. Le second quinquennat a démarré en janvier 2017 (2017-2021 mais période d'évaluation 2013-30 juin 2018) et s'est inscrit dans un processus d'amélioration continue du département : animation scientifique avec la mise en place de piliers et de macro-sujets qui facilitent la mobilisation en synergie des laboratoires sur les enjeux majeurs, veille scientifique, renforcement de l'appui aux politiques publiques, effort vers l'innovation ouverte avec le monde économique, y compris par la création de start-ups, ont jusqu'ici dominé l'agenda.

Les recherches du département s'inscrivent dans chacun des trois axes scientifiques du Contrat d'Objectifs et de Performance (COP) 2017-2021 entre l'État et l'IFSTTAR. Ceci confirme la vocation transversale du département, c'est-à-dire la capacité des thématiques et des compétences développées à COSYS à irriguer une partie importante de l'institut.

COSYS comporte aujourd'hui 10 laboratoires et une équipe en émergence (figure 1.1) :

- Équipe de Recherche en Émergence Nouveaux usages et pratiques de la mobilité en Nouvelle Aquitaine (ERENA)
- Évaluation des Systèmes de Transports Automatisés et de leur Sécurité (ESTAS)
- Génie des Réseaux de Transports Terrestres et Informatique Avancée (GRETTIA)
- Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations (LEPSIS)
- Laboratoire Électronique Ondes et Signaux pour les Transports (LEOST)
- Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT)
- Laboratoire Instrumentation, Simulation et Informatique Scientifique (LISIS)

## 1.1. ADN ET PROFIL DU DÉPARTEMENT

- Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs (**LIVIC**)
- Matériaux, assemblages, composites, structures instrumentées (**MACSI**)
- Structure et instrumentation intégrée (**SII**) dont I4S
- SATIE/TEMA! (SATIE/TEMA!)

Le LICIT est une Unité Mixte de Recherche avec l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (**ENTPE**). Il fait aussi partie de la fédération de recherche en Ingénierie de Lyon - Saint-Étienne («Inge'Lyse» FR CNRS 3411).

L'équipe TEMA, ex LTN - Laboratoire des Technologies Nouvelles, qui fait aussi partie de la fédération de recherche FCLAB («Fuel Cell Lab.» FR CNRS 3539), constitue la composante IFSTTAR de l'UMR Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie (**SATIE**). Le SATIE est un laboratoire de recherche en sciences appliquées, qui se consacre aux systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie. Unité mixte de recherche du CNRS comptant 200 personnes, ses tutelles sont le CNRS, l'ENS Paris-Saclay, l'ENS Rennes, le CNAM Paris, l'Université de Cergy Pontoise, l'Université de Paris-Sud et l'IFSTTAR. Le champ scientifique de ses recherches s'étend de l'électrical engineering à la physique appliquée en passant par la physique des systèmes et des biomicrosystèmes.

L'équipe projet commune INRIA-IFSTTAR I4S (Inference for structures) fait entièrement partie du laboratoire SII. Son activité très visible internationalement porte sur le contrôle de santé des structures de génie civil ou aéronautiques.

Le département COSYS a également fondé les équipes communes NACRE (NAnocapteurs pour des Cités Respectueuses de l'Environnement) avec l'École Polytechnique et le CNRS (LISIS, LPICM, LMS) et l'équipe CARMIN (Capteurs Répartis pour le Monitoring des Infrastructures) avec le CEA (principalement le LETI).

Le département a fondé et dirige le GIS DURSI (DURabilité des matériaux composites Structuraux Intelligents), avec l'Université de Rennes 1, l'Université de Bretagne Sud (Lorient) et l'École nationale supérieure d'arts et métiers ParisTech à Angers.

Les laboratoires et équipes sont répartis sur cinq sites principaux (Champs-sur-Marne, Versailles, Villeneuve d'Ascq, Nantes, Lyon-Bron) et avec une présence à Palaiseau (NACRE), Belfort (FCLAB), Salon de Provence (LEPSIS), Bordeaux (ERENA) et Rennes (I4S).

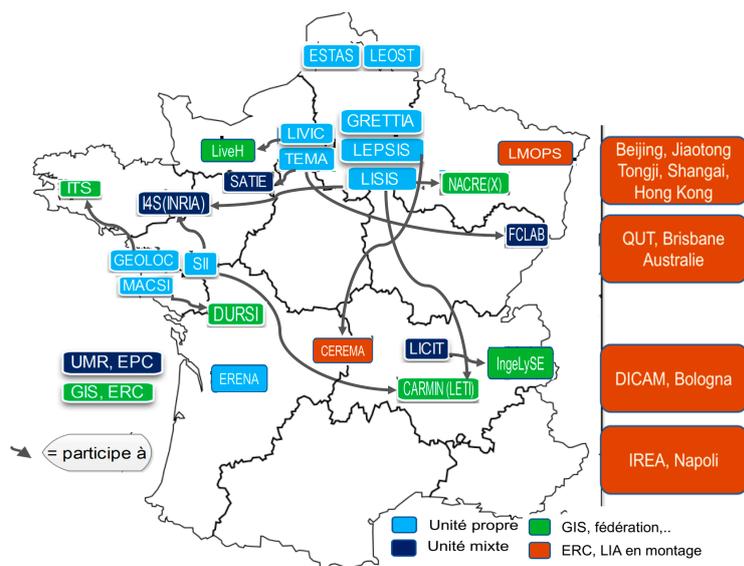


Figure 1.1 – Structures de recherche de COSYS

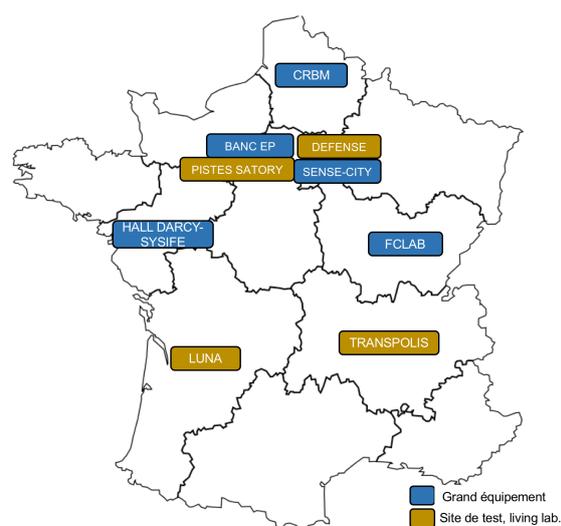


Figure 1.2 – Grands équipements, plate-formes et living Labs auxquels s'adosse COSYS.

### 1.2 Un département au coeur des défis sociétaux

Fortement contributeurs au bilan carbone de la plupart des pays du monde, les secteurs de la mobilité et de la ville deviennent de plus en plus critiques pour notre pays, son attractivité, sa qualité de vie et la santé de ses habitants, à l'instar de la totalité des pays du monde, aucun ne se trouvant plus épargné par une congestion endémique très chronophage ni par la menace d'une mortalité très nettement accrue par les externalités du transport lui-même. Aux États-Unis, le temps perdu dans la circulation représentait 0,7% du PIB en 2012. Parallèlement, d'ici 2035, on estime que le nombre de véhicules automobiles légers atteindra 1,6 milliard. Le transport est un moteur de l'activité économique et des relations sociales, mais planifier en fonction des transports motorisés individuels plutôt que sur l'accessibilité a augmenté le nombre de voyageurs-kilomètres annuels parcourus par tête et a créé un cercle vicieux où, dans un effort de résoudre les problèmes d'embouteillage, le nombre croissant de véhicules motorisés privés semble entraîner la construction de davantage de routes et d'infrastructures.

La mobilité convoque les dirigeants à une réflexion sur une nouvelle gestion de l'espace public. La transformation des autoroutes en boulevards urbains, l'hybridation des espaces, l'augmentation des fonctionnalités assurées par les infrastructures pour faciliter une mobilité différente, partagée, électrique, cycliste, autonome, centrée sur l'accessibilité et moins sur les flux, constituent autant de réponses à cette urgence d'accompagner la transformation du secteur. Aujourd'hui en effet la smart city est reconnue comme contributrice à l'amélioration des indicateurs du développement durable, en permettant une mobilité plus efficace, plus flexible, moins consommatrice d'espace public, plus écologique, à condition d'en maîtriser le comportement global.

La stratégie nationale pour le développement des véhicules automatisés répond à un enjeu majeur de souveraineté industrielle mais aussi aux enjeux du désenclavement des territoires. La singularité française en la matière réside dans le parti pris d'inviter l'infrastructure à collaborer très fortement à l'automatisation.

Ainsi se profilent de nouveaux besoins en termes d'infrastructures de nouvelle génération, que l'on désigne sous le vocable R5G dans ce dossier, également vertueuses du point de vue de leur contribution au bilan carbone ou de l'adaptation au changement climatique, le climat d'aujourd'hui sollicitant déjà fortement la capacité des réseaux.

Ces éléments se trouvent développés dans l'annexe 5.

#### 1.2.1 Opportunités

S'appuyer sur des technologies à fort pouvoir transformant (transformational technologies) pour couvrir un ensemble d'enjeux des transports et de la ville offre une voie intéressante que l'on a empruntée. L'IoT, la collecte intelligente de données fiables à toutes les échelles (du satellite au capteur noyé en passant par les drones), les communications agiles et fiables, le traitement massif des données, la perception, la géolocalisation, la modélisation et la régulation à toutes les échelles, l'ingénierie sûre des systèmes, la cybersécurité, la gestion de l'énergie constituent des piliers scientifiques sur lesquels on a décidé d'investir, en réponse aux défis du véhicule automatisé et de la ville durable.

A titre d'exemple, Sense-City se trouve cité dans la SNR qui explique que le bon positionnement en micro et nanotechnologies doit servir de tremplin pour le développement de produits tirant profit des innovations technologiques dans ce domaine. Ex : nouvelles générations de magnétomètres, accéléromètres combinés à de la fusion de données permettent de développer des produits couplant localisation et données liées à l'état de la personne.

Plus globalement, il s'agit d'offrir à tous les citoyens les opportunités des territoires numérisés

à leur échelle. Ces questions d'échelle sous-tendent la mobilisation de technologies capacitanes comme les nano-technologies au service d'un déploiement massif de la mesure sur de vastes territoires.

### 1.3 Politique scientifique et d'innovation

#### 1.3.1 Orientations

Contribuer à l'efficacité, à la sobriété et à la résilience des villes et des systèmes de transport qui jouent un rôle vital au service de l'économie tout entière, offrir des services à haute valeur ajoutée pour l'attractivité des territoires, l'implantation d'activité et le bien-vivre, tels sont les moteurs de nos propositions en matière de compétences majeures du département qu'il nous semble important de consolider à un horizon de dix ans et qui s'articulent en quatre domaines principaux en réponse à ces forts enjeux sociétaux et économiques.

Porté par ses succès récents (MAGnum, Sense-City ...) et le contexte actuel de la mobilité, COSYS met l'accent sur la transition numérique et écologique dans les transports.

Depuis 5 ans, le département favorise un alignement croissant des thématiques avec les enjeux sociétaux auxquels l'IFSTTAR répond. Il vise notamment le traitement de questions de fond en soutien au déploiement du véhicule automatisé et des nouveaux services de mobilité, les solutions énergie-climat, l'articulation ville transport et santé, la sûreté pour les transports et la ville exploitant l'IoT, la simulation, le génie logiciel et l'automatique.

Ces orientations scientifiques accompagnent et encadrent l'effort de recentrage plus fort que jusqu'ici de nos activités sur un socle d'excellence et d'utilité. La mutualisation croissante des équipements va de pair avec l'adossement accru de nos recherches à ceux-ci, notamment TRANSPOLIS et Sense-City, conformément aux recommandations de l'HCERES. Le département a ainsi participé à la création de living labs tels que celui de la Nouvelle Aquitaine et la rénovation du RD199 à Marne-la-Vallée.

Concerné par l'ensemble du COP, le département confirme par ailleurs sa vocation à jouer un rôle cœur d'institut. Sa gouvernance reflète le pilotage de trois actions phares impliquant une grande partie de l'IFSTTAR, la R5G, l'urbain et le ferroviaire.

Enfin l'évolution de la stratégie se traduit par un plan d'action en matière d'innovation et de transfert technologique avec la consolidation d'une offre, la tenue d'Innov'Days, l'articulation forte aux PME et start-ups de l'IFSTTAR ou soutenues par l'institut.

#### 1.3.2 Pilotage de la recherche

##### 1.3.2.1 Croisement des enjeux et des compétences

La direction de COSYS favorise l'excellence, le travail en réseau, la relation au monde économique (recherche-innovation-développement), à travers un cadrage lisible propre à simplifier la génération des concepts et outils qui formeront la production du département.

La direction du département fixe les orientations, s'implique dans le pilotage des thématiques et des piliers scientifiques. Il interagit avec la direction des laboratoires pour aider à l'alignement de l'action des laboratoires sur la stratégie globale.

Le schéma 1.3 illustre l'articulation enjeux - compétences majeures du département.

La structuration de COSYS repose sur quatre grandes thématiques (macro-sujets) : Systèmes de Transport de Nouvelle Génération (STNG), Monitoring Généralisé des Territoires (MGdT), Sécurité et Sûreté (SeSu) Solutions Synergie & Climat (SEC).

La figure 1.4 détaille le socle de compétences majeures du département :

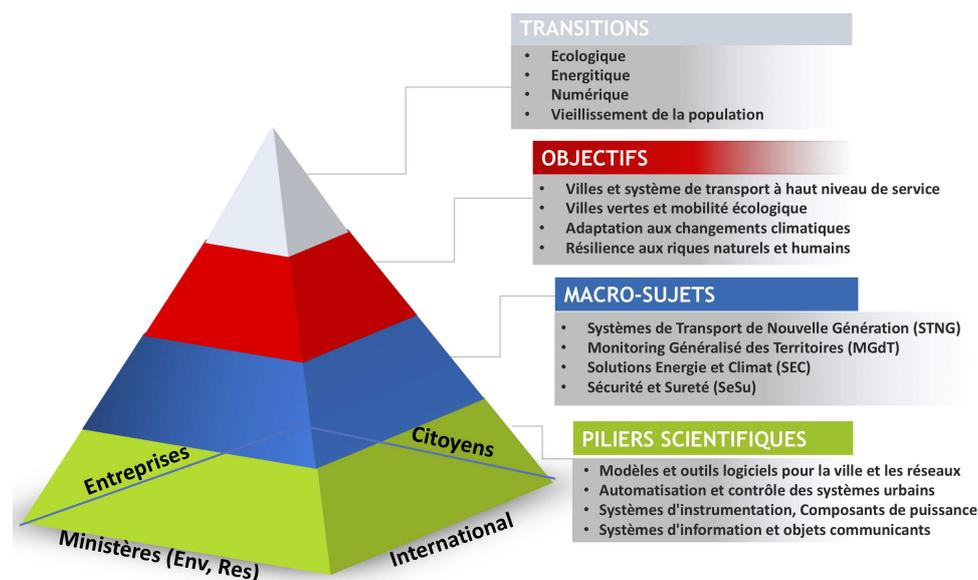


Figure 1.3 – Pyramide de la recherche utile : émergence de l'utilité à partir des questions scientifiques et technologies clefs.

- Pilier 1 - Modèles et outils logiciels, ville, transport et Réseaux : Modèles de trafic multi-échelles et régulation des systèmes de transport ; Simulation et simulateurs de déplacements ; Calcul des ouvrages, pilotage des procédés de construction.
- Pilier 2 - Automatisation, contrôle, optimisation des systèmes urbains et de transport : Sûreté de fonctionnement des systèmes d'information et des automatismes, cyber-sécurité ; Ingénierie des systèmes de contrôle-commande critiques pour le transport de masse et les flottes ; Smart grids et territoire
- Pilier 3 - Systèmes d'instrumentation, Composants de puissance : Capteurs innovants (photonique nanotechnologies...) et leur fiabilité ; Matériaux multifonctionnels et Structures intelligentes : composites durcis, routes, éoliennes et voies de nouvelle génération ; Composants de puissance, de stockage et de production décentralisée.
- Pilier 4 - Systèmes d'information et objets communicants : Big data, Inférence statistique, modélisation inverse ; Localisation indoor-outdoor, infrastructure digitale pour le véhicule automatisé ; Radio intelligente ; Systèmes de vision humaine et artificielle.

Une mention spéciale pour l'expertise, la certification, l'innovation. Le projet nouveau insistera davantage sur la recherche-action et les living labs.

Tous les piliers scientifiques se voient dotés de leaders de niveau DR, de chercheurs et de techniciens lorsque c'est nécessaire. Il en est de même des thématiques.

L'activité de recherche est menée par les laboratoires, autour des projets scientifiques qu'ils ont définis en lien avec la direction du département, avec des évolutions liées aux avancées scientifiques et aux recrutements de chercheurs pendant le quinquennat. Chaque laboratoire s'implique dans un nombre limité de thématiques en mobilisant ses compétences disciplinaires selon le tableau 1.5.

Avant de décrire plus finement les thématiques, il semble important d'en préciser aujourd'hui l'articulation avec les piliers scientifiques (matrice 1.6).

Les cases vides indiquent clairement des pistes de progrès potentielles. A titre d'exemple, aborder les questions de sécurité par le biais de simulation à grande échelle du trafic ou des réseaux d'eau potable constitue probablement une bonne idée à explorer. A titre d'exemple, la feuille de route du code de calcul CESAR met désormais l'accent sur le changement climatique,

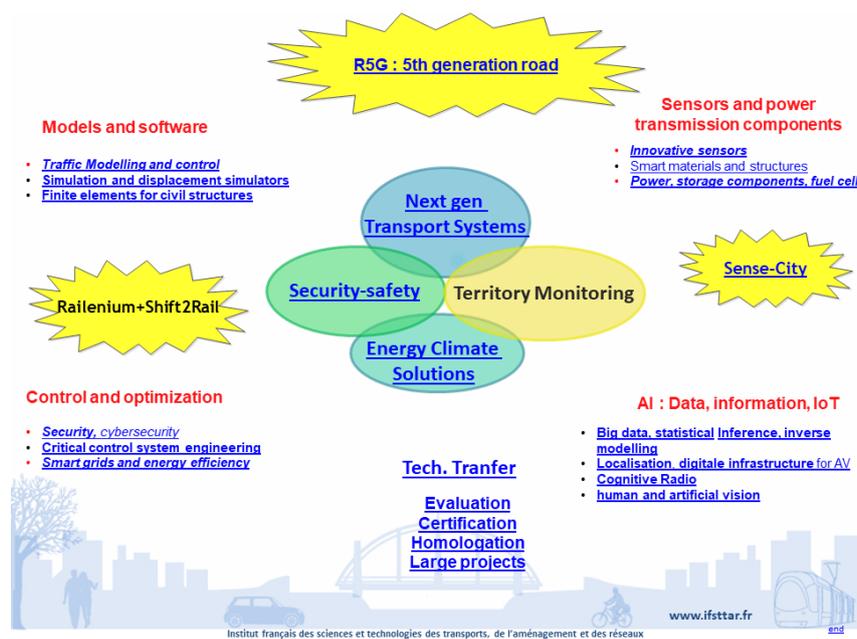


Figure 1.4 – Piliers et thématiques : étages profonds de la pyramide de la recherche utile

LABORATOIRES ET STRUCTURES DE RECHERCHE	THÉMATIQUES			
	STNG	MGdT	SeSu	SEC
ERENA : Équipe de Recherche en Émergence Nouveaux usages et pratiques de la mobilité en nouvelle Aquitaine	x	x		
ESTAS : Évaluation des Systèmes de Transports Automatisés et de leur Sécurité	x	x	x	
GRETTIA : Génie des Réseaux de Transports Terrestres et Informatique Avancée	x	x		
LEOST : Laboratoire Électronique Ondes et Signaux pour les Transports	x		x	
LEPSIS : Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations	x			
LICIT : Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports	x	x		x
LIVIC : Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs	x			x
LISIS : Laboratoire Instrumentation, Simulation et Informatique Scientifique		x	x	x
TEMA : Technologies pour une Electro-Mobilité Avancée	x			x
MACSI : Matériaux, assemblages, composites, structures instrumentées		x	x	x
SII : Structure et instrumentation intégrée	x	x		x

Figure 1.5 – Implication des laboratoires dans les thématiques.

PILIER THÉMATICO-DISCIPLINAIRES	THÉMATIQUES			
	STNG	MGdT	SeSu	SEC
PILIER 1 – Modèles et outils logiciels pour la ville, transports et réseaux	x	x		
PILIER 2 – Automatisation, contrôle, optimisation des systèmes urbains et de transports	x		x	x
PILIER 3 – Systèmes d'instrumentation et composants de puissance		x		x
PILIER 4 – Systèmes d'information et objets communicants	x	x	x	x

Figure 1.6 – Croisement piliers versus thématiques de COSYS.

qu'il s'agisse de la vulnérabilité des ouvrages ou de stratégies d'adaptation. Cette orientation nouvelle est clairement apparue à la lueur de la case vide (pilier 1, SEC).

Le département consacre une part importante de sa programmation scientifique aux grands équipements (moyens d'essais, sites en milieu contrôlés, sites ouverts ...) et à l'adossement de ses activités de recherche à ses équipements majeurs comme Transpolis et Sense-City, de classe mondiale (voir figure 1.2). Cet adossement constitue un élément moteur pour placer le département au meilleur niveau international et renforcer les partenariats de recherche avec le secteur socio-économique. Le Laboratoire des Usages de Nouvelle-Aquitaine promu par COSYS commence à exploiter Transpolis et le Living Lab de la Défense piloté par Efficacity va mettre au point une partie de son IoT sur Sense-City.

### 1.3.3 Thématiques

#### 1.3.3.1 Systèmes de transport de nouvelle génération - STNG

L'offre technologique ne servira que si l'usage se crée. Le projet fédérateur «voyageur virtuel» de l'IFSTTAR, que COSYS co-anime avec TS2, interroge les individus, usagers des transports et acteurs de leur mobilité, dans leur manière de choisir les nouveaux modes de déplacement, de s'y adapter et de les transformer. Ce projet positionne l'humain qui se déplace au coeur de la problématique, en souhaitant appréhender les attitudes et les comportements face aux nouveaux systèmes de transports. Il anticipe des réponses virtuelles dans des situations précises et ambitionne d'obtenir une vision globale des évolutions. En particulier il s'agit d'anticiper les nouveaux modes de déplacement avec le déploiement des véhicules automatisés, des modes alternatifs de déplacement et leur impact sur l'aménagement urbain et les comportements.

La thématique Systèmes de Transport de nouvelle génération aborde bien sûr la modélisation multi-échelle, multi-physique et multimodale du trafic, la gestion et la régulation des flux, les infrastructures de nouvelle génération, e.g. Route du futur ou Route de 5ème génération (R5G), propices au déploiement de la mobilité coopérative, du véhicule et du train autonomes, de l'électromobilité et de l'intégration au smart-grid énergétique.

Ces sujets suscitent un intérêt grandissant, notamment face à la généralisation des moyens de localisation et au changement d'échelle dans les flux considérés et avec le déploiement de la communication véhicule-véhicule ou véhicule-infrastructure.

S'il est actuellement admis que les véhicules automatisés routiers utilisant les technologies d'aujourd'hui ne pourraient circuler que la moitié du temps aux USA à cause des conditions météorologiques, les progrès sur les différentes technologies clefs font appel à de la science de base à laquelle on continuera à apporter des contributions significatives. Il en est ainsi de la perception tout temps, du positionnement par GNSS augmenté, de l'hybridation des protocoles de communication du type ITS/G5 LTE-5G. Les Techniques et algorithmes pour la radio intelligente et sobre en énergie pour des transports plus sûrs, plus efficaces et connectés permettront d'adapter de façon autonome le système de communication aux besoins et aux contextes (fréquences disponibles, débit nécessaire, économie d'énergie) et de partager les infrastructures existantes. Ces questions valent aussi pour le train autonome.

L'évaluation in-situ des performances des systèmes de mobilité coopérative comme le GLOSA fait intégralement partie du projet.

La question des marquages routiers ou amers de nouvelle génération pour le guidage et de leur évaluation sobre in-situ constitue un noeud central au coeur des compétences et des attributions de l'IFSTTAR. Idéalement, on souhaiterait valider la faisabilité des niveaux d'automatisation du véhicule en termes d'état limite de service de la route à partir de données issues de capteurs embarqués dans les véhicules et de campagnes d'auscultation dédiées.

Plus généralement, Comme l'indique le comité consultatif ERTRAC, le véhicule automatisé ne pourra dépasser le niveau 3 sans une aide très spécifique de l'infrastructure. On propose donc un nouveau concept de route support du véhicule à conduite déléguée (VA), qui répond à la question du niveau de qualité et de fiabilité des équipements que l'infrastructure doit offrir pour soutenir efficacement la conduite déléguée à chaque niveau. Ce concept facilitera la mobilité décarbonée à travers le développement d'outils et concepts capacitants pour le déploiement progressif du Véhicule Automatisé (ou à conduite déléguée).

Ainsi, la conception virtuelle des systèmes de transport et des véhicules grâce au développement de Plateformes de simulation comme eco-SiVIC, IMPACT 3D pour le prototypage, le test et l'évaluation des systèmes automatisés ou communicants permettra l'étude, entre autres, des applications de délégation de la conduite, des systèmes coopératifs et communicants. L'originalité de notre approche réside dans la prise en compte des différentes échelles : l'égo-véhicule et différents acteurs de la scène, mais aussi le trafic incluant une part croissante de véhicules connectés et/ou automatisés, avec une régulation hybride locale et globale. Grâce à une capitalisation logicielle déjà en cours avec SymuCAT, il s'agira in fine d'aider à la mise au point de services de transport de nouvelle génération, à la demande, automatisés, partagés, fiables, peu coûteux.

### 1.3.3.2 Monitoring généralisé des territoires - MGdT

Lorsque le projet actuel a été soumis courant 2016, cette thématique s'appelait Métabolisme urbain, réseaux et santé, dans l'espoir que l'I-Site FUTURE inclurait la composante santé portée par l'UPEC. Depuis on a préféré la rendre moins spécifique, plus intégratrice à l'image de Sense-City, bien alignée sur le programme de RID "Territoires instrumentés" d'Efficacity et réciproquement.

La thématique Monitoring généralisé des territoires vise le développement des méthodes d'instrumentation, d'auscultation et de monitoring à fort rendement et à faible coût des infrastructures qu'elles soient de transport et d'énergie.

Elle englobe l'instrumentation par des capteurs connectés afin d'en faciliter la maintenance et la surveillance. Les nouvelles technologies d'instrumentation intelligente et répartie utilisent les nano-technologies, les fibres optiques, déploient l'auscultation non destructive et les contrôles à faible impact, non intrusifs, la télésurveillance et l'autodiagnostic. Des stratégies décisionnelles de surveillance et de maintenance fondées sur des indices de risque, seront établies (Structural Prognosis / Health Monitoring).

#### 1.3.3.2.1 Monitoring urbain et santé

En lien avec UPE et en écho direct à l'ISITE FUTURE, on propose ici un schéma de pensée qui articule monitoring, «design thinking» et centre de ressource technologique pour les capteurs. Ce schéma constitue l'extension naturelle du projet Sense-City.

Le monitoring urbain pour la santé publique (figure 1.7) renvoie ici aux potentialités du calcul, de la mesure et de l'action (cleaning) en ubiquité en vue d'une cartographie rapide des polluants pour évaluer les expositions dans la durée, ou détecter rapidement des situations anormales en vue d'aider à cibler les interventions en temps utile dans l'intérêt des citoyens. On visera les expositions combinées (agents biologiques pathogènes, niveaux ambiants électromagnétiques et acoustiques, composés organiques volatils, particules), la qualité de l'eau, de l'air et du sol, l'évolution à court terme des concentrations de polluants, leur propagation et rétro-propagation pour détecter et caractériser des situations inattendues comme des fuites soudaines ou des sources de divers types de pollutions.

Le centre de ressource technologique pour les capteurs et actionneurs dédiés se concentrera

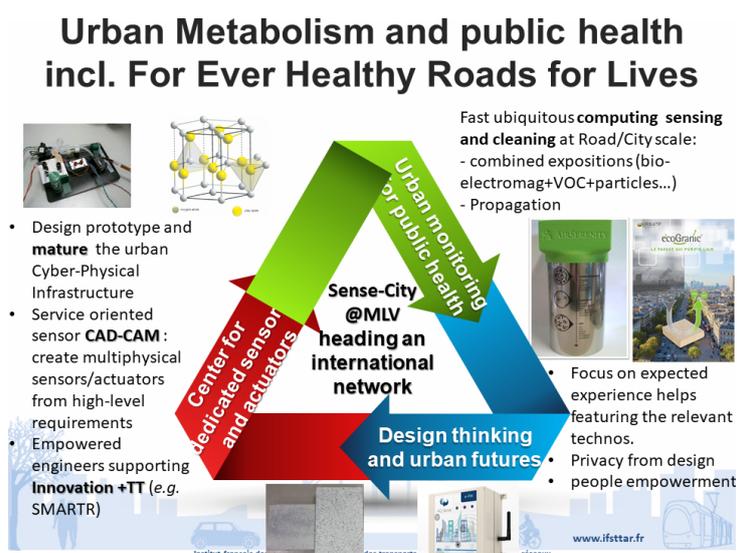


Figure 1.7 – Programme visant à mieux maîtriser le Métabolisme urbain et ses impacts sur la santé.

sur La conception, le prototypage et la maturation (en vue de la création d'emplois) de l'Infrastructure Cyber-physique des futures villes intelligentes, le développement des concepts et des capacités de CAD-CAM (conception assistée par ordinateur et fabrication) dédié à la conception rapide et efficace des capteurs orientés Service, c'est-à-dire la capacité de créer des capteurs multiphysiques en fonction des exigences de haut niveau, tout en mettant l'accent sur les besoins fonctionnels. On tentera de soutenir l'empouvoirement d'ingénieurs qualifiés (à identifier) qui soutiendront l'innovation et le transfert de technologie, à l'image de l'aventure SmartR et de la start-up Altaroad, sur la base des explorations fondamentales menées à l'IFSTTAR au sein d'une collaboration internationale, conduisant à un concept breveté de films piézorésistifs minces qui sont à la fois compatibles avec les matériaux de construction et en mesure de délivrer une pesée en marche à coût réduit, une composante clé des systèmes de transport intelligents.

Le «design thinking» aide à se focaliser sur l'expérience attendue afin de proposer des technologies pertinentes que les utilisateurs finaux devraient entériner. Le concept de «privacy by design» pour promouvoir d'empouvoirement<sup>2</sup> des personnes en découle.

Enfin, dans cette optique, le laboratoire d'innovation urbaine Sense-City devient un noeud d'un réseau international d'équipements de grande envergure dédiés aux villes futures.

#### 1.3.3.2.2 Rue dépolluante

Le secteur du transport menace ses employés, ses clients et l'ensemble de la population urbaine d'une mortalité nettement accrue par les émissions de particules et autres pollutions comme les NOx qui à leur tour se transforment en particules fines, responsables de maladies cardio-vasculaires, entre autres. Par ailleurs, de nombreux matériaux catalysent la dégradation des NOx, certains se trouvent déjà intégrés dans les matériaux de construction, réduisant ainsi la pollution très localement. L'innovation sur les couches minces et les alliages de type ZnO, spécialité d'UPE, en a montré le potentiel pour une future utilisation en surface des infrastructures de transport.

De nouveaux concepts de routes ou voies ferrées alliant matériaux dépolluants optimalement disposés, aspiration au bon endroit, monitoring en continu de la qualité de l'air et de l'ambiance aérodynamique tenant compte de la météo et du passage des véhicules, lois d'émission de gaz et de

2. Traduction proposée par le Conseil National du Numérique au terme anglosaxon de l'«empowerment».

particules et pilotage de l'aspiration en temps réel, sur des échelles spatiales en rapport avec la densité locale des voyageurs, tel est le programme ambitieux de la rue dépolluante qui se construit actuellement au sein de FUTURE en relation avec Eiffage.

### 1.3.3.2.3 Monitoring des infrastructures de transport

En matière de contrôle de santé, les objectifs évoluent de la durée de vie au contrôle en opération. Ainsi le contrôle d'équipements critiques pour la sécurité ferroviaire avec SNCF-RESEAU vise à rendre communicants et intelligents des composants ferroviaires à forte criticité : Compteur d'Essieux, Passage à Niveau, Moteurs d'Aiguille...

Dans le même esprit, le contrôle de santé par interrogation optique dynamique déployé sur un tronçon de voie ferrée béton entre Gisors et Cerqueux vise à évaluer la charge cumulée et l'état de fissuration sur site. Il s'agit aujourd'hui d'apprécier la capacité du système à déclencher une maintenance sur événement.

De plus, on vise la mise au point d'une méthode de monitoring et d'analyse rapide fondée sur les vibrations ambiantes et la sensibilité des modes propres pour détecter les affouillements de façon précoce. Le nombre croissant de capteurs différents, la mesure distribuée par fibre optique ou l'imagerie en continu posent un défi considérable aux méthodes par ailleurs très pertinentes fondées sur l'inférence statistique. Pour y faire face, l'étude d'algorithmes adaptatifs tels que le filtre de Kalman et les filtres particulaires est une voie prometteuse.

Progressivement, la thématique du monitoring devrait intégrer d'autres dimensions comme la viabilité estivale, l'aide au guidage des véhicules automatisés, le contrôle d'intégrité des futurs composants de recharge électrique en continu, la récupération d'énergie solaire ou la détection d'incidents.

### 1.3.3.2.4 Monitoring des infrastructures de production ou de transport d'énergie

La filière éolienne doit diminuer son OPEX (coût d'exploitation). A terme le monitoring sans capteur à demeure, si cette question trouve une réponse positive, pourra devenir une technique à privilégier principalement pour les fermes d'éoliennes off-shore, en vue de la diminution des coûts liés à la maintenance.

L'insertion de fibres optiques au coeur des très grandes pales en composites de nouvelle génération offre une voie sans électronique exposée, à explorer.

En parallèle, il convient de mettre au point des algorithmes prenant en compte les mouvements tournants de la structure et les effets thermiques. A St Hilaire de Chaléons une éolienne réelle en fonctionnement et instrumentée permettra de valider ces approches.

Le pré-dimensionnement d'amortisseurs de vibrations à courants de Foucault à l'aide de simulations avec des modèles d'amortissement non linéaire pourra également déboucher sur des systèmes innovants pour les grandes éoliennes off-shore. Cette voie intéresse des composantes du SATIE hors équipe TEMA.

Toujours dans le domaine éolien, la capacité des gros câbles à transmettre la puissance électrique des fermes dépend de leur état de santé. Le monitoring des câbles de puissance pour en caractériser les éventuelles fissures, voire pour en contrôler la pose, recèle donc un potentiel évident de valorisation économique.

Il en va de même de l'aide à la gestion de crise par une méthode de détection et de localisation précise d'incidents.

### 1.3.3.2.5 Monitoring des usages : mobilité, eau, énergie

Enfin, le sous-sol des territoires comme leur surface abrite de très grands réseaux d'importance vitale pour la population et l'économie, transport de marchandises et de personnes, eau,

gaz, électricité. Equipés de compteurs intelligents ou de capteurs additionnels, ces réseaux livreront de plus en plus des données cruciales pour comprendre les usages, orienter les nouveaux investissements ou la maintenance ou calculer le juste prix du service, grâce à la science des données.

Bien ancrée dans la pyramide de la recherche utile, la thématique "Monitoring généralisé des Territoires" mobilise les 4 piliers "Systèmes d'instrumentation", "Systèmes d'information", "Modèles" et "Contrôle".

### 1.3.3.3 Sécurité et sûreté - SeSu

Cette thématique traite de l'interface entre la sécurité et la sûreté avec pour champs d'application l'intersection Route/Rail et les transports guidés urbains. En effet, les analyses et les évaluations de la sûreté/sécurité sont fondamentales dans le cycle de vie d'un système. Il s'agit de développer les approches globales pour conduire les études de sécurité en intégrant les dimensions sûreté.

Les transports guidés sont des systèmes ouverts et présentent un risque important d'insécurité lié aux actes de malveillance. Il devient de plus en plus évident à l'échelle européenne et mondiale qu'il faut prendre en compte la dimension sûreté dans la conception et la gestion de la sécurité des systèmes de transport. Le département COSYS possède les atouts et l'expérience dans les analyses de sécurité pour intégrer les exigences de sûreté.

Au-delà de méthodologies pour détecter et contrer des attaques électromagnétiques sur les systèmes de critiques pour les transports guidés ou non, ou pour détecter des gaz toxiques dans des gares ou Espaces Ferroviaires Souterrains, des événements suspects dans les trains (cliquetis ou cris étouffés par exemple), la question se pose de concepts de gares intrinsèquement résilientes ou résistantes aux attaques terroristes. L'architecture et la fonctionnalisation des accès constituent deux voies possibles.

Par ailleurs, on se propose de chercher à garantir un niveau de sécurité maximal dans les transports terrestres, sans contraindre les voyageurs à des contrôles trop chronophages et en assurant une gestion optimale des flux de voyageurs. Cette action s'appuie sur le suivi, l'identification et la ré-identification des personnes au sein d'une foule dans les réseaux. Elle mobilise des réseaux de caméras intelligentes pour la détection de bagages abandonnés, de comportements anormaux, d'émotions, de suspects, pour le comptage, le comportement d'une foule, la localisation précise des problèmes.

L'usage facilité des drones et les technologies nouvelles de détections permettent d'envisager des progrès importants, à visées duales sécurité-sûreté.

Enfin, la sûreté de fonctionnement des systèmes, l'analyse de sécurité des systèmes, l'ingénierie des systèmes critiques, le transfert des acquis du ferroviaire au routier pour accompagner le déploiement du véhicule automatisé font partie de cette thématique.

### 1.3.3.4 Solutions Énergie-Climat - SEC

La thématique Énergie-Climat s'intéresse à l'interrelation étroite entre l'énergie, y compris renouvelable, l'adaptation des infrastructures au changement climatique, la gestion intelligente des réseaux, le changement de comportement des usagers. Ces préoccupations sont au cœur de l'enjeu climatique qui exige que le secteur des transports réduise ses émissions de gaz à effet de serre.

#### 1.3.3.4.1 Motorisations alternatives et usages

Dans le domaine de l'électromobilité, on approfondira la compréhension des matériaux dits "grand gap" qui joueront nécessairement un rôle clef dans la montée en puissance des flottes électriques, puisque le rendement devient un élément clef de conception. Développer un protocole de caractérisation représentatif de la vie réelle de composants fondés sur la technologie Ga-N, pour que l'industrie automobile puisse les intégrer dans des produits innovants constitue un objectif majeur à l'horizon 2020.

On continuera par ailleurs d'étudier la fiabilité de la pile à combustible et son évaluation en ligne, le vecteur hydrogène offrant une ressource renouvelable grâce aux éoliennes aux heures creuses et une puissance sans émission.

L'évaluation en situation de trafic réaliste de motorisations aux carburants alternatifs comme le GNV ainsi que le placement optimal des infrastructures de recharge tenant compte des déplacements font partie de la thématique.

L'éco-conduite comme effet induit de l'automatisation des véhicules et l'éclairage public adaptatif constituent des leviers de transition énergétique importants qu'il s'agit de pouvoir concevoir ou tester, notamment dans la perspective de la robot-mobilité.

Une Mobilité électrique sobre à longue autonomie pourrait passer par une recharge en continu, mais aussi par des concepts disruptifs comme la pile à hydrogène rechargeable, que l'on se propose d'explorer et la noria électrique (récupération de l'énergie de freinage par l'infrastructure et réalimentation locale).

#### 1.3.3.4.2 Gestion énergétique intégrée des systèmes de transport

On souhaiterait développer les fondements scientifiques de la gestion énergétique intégrée des systèmes de transport. On abordera en particulier les concepts de route solaire hybride en relation énergétique avec des bâtiments voisins qui sont eux-mêmes producteurs ou consommateurs d'énergie (serres, chauffage urbain, incinération...). Il pourra s'agir d'une rue géothermale et communicante, d'un linéaire de route, d'une piste aéroportuaire, d'un corridor de transport de marchandises ou de voie de VAL pour la viabilité hivernale-estivale aidée par des systèmes énergétiques intégrés mobilisant du pilotage fin, des ENR, des matériaux à changement de phase, du stockage d'énergie. L'infrastructure captera, stockera, échangera avec le quartier environnant et restituera calories et frigories, échangera des informations de qualité de l'air avec le quartier, alimentera les véhicules. La conception optimale du système, de la régulation et du monitoring, l'évaluation globale de la performance concernent COSYS, GERS et MAST et mobilisent les 4 piliers scientifiques du département. Une fraction du parc technologique existe déjà à l'IFSTTAR, à Nantes (NeoVAL chauffant). On pourrait facilement installer d'autres composantes évoquées plus haut. La rue géothermale fait partie du programme de Sense-City et pourrait intéresser l'ITE Efficacy, au titre des nouveaux systèmes énergétiques du paysage urbain. Il s'agit en réalité de préfigurer des smart grids dont l'infrastructure de transport constituerait un composant essentiel.

La conception fiabiliste de smart grids généralisés mobilisant un mix énergétique étendu (ENR, gaz, géothermie) constitue un projet fédérant les forces de plusieurs laboratoires ainsi qu'un programme d'Efficacy.

La comparaison, démonstrateurs à l'appui, de routes électriques permettant la recharge des véhicules électriques par induction (projet européen FABRIC) et grâce à l'alimentation par le sol (avec Alstom) serait opportune. L'art (matériaux, procédés, contrôle de santé à cœur) d'intégrer la recharge électrique en continu dans des infrastructures existantes demeure une question de longue haleine et figure la feuille de route d'ERTRAC sur l'électrification.

La préfiguration par simulation de l'allocation optimale des ressources électriques le long d'un corridor à l'échelle européenne et l'évaluation a priori des performances mettrait l'IFSTTAR en bonne position dans cette rupture technologique.

## 1.3. POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET D'INNOVATION

### 1.3.3.4.3 Changement climatique Atténuation, Adaptation

Dans la mouvance d'ITS4Climate on poursuivra la diffusion des connaissances sur les ITS pour réduire les émissions de GES et sur les moyens d'évaluer ces stratégies. Ce sujet se nourrira de nouveaux moyens d'investigation comme les micro-capteurs d'émissions embarqués.

Les systèmes énergétiques intégrés cités plus haut visant à réguler la température des infrastructures de transport contribuent fortement à l'adaptation au changement climatique en vue d'offrir une résilience des réseaux et donc un service fiable pour le transport de personnes et la logistique. Une connaissance temps réel de l'état exact du réseau et du climat local, dans une optique d'hypervision déclinée plus haut, permettra d'envisager une gestion intelligente temps réel des réseaux de transport.

Des réseaux denses de capteurs aideront également à mieux comprendre le développement des ICU et de mieux concevoir des actions de régulation, à une époque où la climatisation individuelle envahit nos villes, accroissant la fracture sociale et aggravant le phénomène.

La thématique vise donc l'adaptation des infrastructures au changement climatique via une capacité augmentée de viabilité estivale ou hivernale, l'atténuation par le soutien aux motorisations électriques et à la production d'énergies décarbonées, la disponibilité des infrastructures de transport, le haut niveau de service, la baisse du coût global des transports, l'attractivité des transports en commun et des centre-villes.

### 1.3.4 Projets phares

Enfin, le département pilote pour le compte de l'institut trois grands projets phares qui se veulent fédérateurs, la Route de 5ème génération (R5G), le ferroviaire et Sense-City.

#### 1.3.4.1 Route de 5ème génération

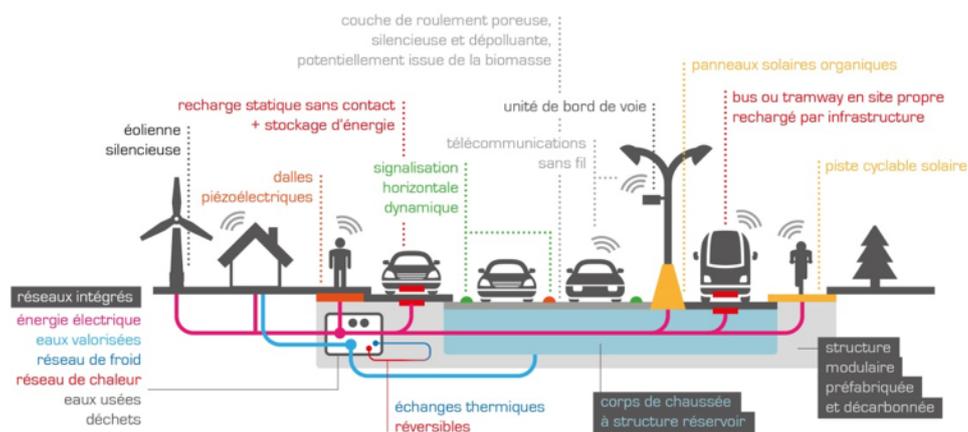


Figure 1.8 – Concept R5G

Afin de favoriser l'innovation routière, l'Ifsttar a lancé la démarche Route de 5ème génération (R5G). La première phase a consisté à labelliser des briques techniques en situation contrôlée (TRL 1 à 5). La deuxième phase consiste à démontrer un sous-ensemble de ces innovations en situation réelle (TRL 6 à 7) (figure 1.8). La troisième phase consistera à concevoir les outils de politiques publiques permettant de déployer les solutions pertinentes (TRL 8 à 9). Ce projet transversal à l'ensemble de l'institut, vise à concevoir, réaliser, gérer et valoriser des démonstrateurs de recherche de route de nouvelle génération. Ce projet, qui a pour ambition de relancer l'innovation routière, est inscrit dans le COP de l'IFSTTAR.

### 1.3. POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET D'INNOVATION

---

Ce concept de R5G peut être considéré comme un objet-frontière. R5G a en effet permis la traduction des problématiques routières entre le monde social des politiques publiques relatives aux infrastructures, typiquement le rapport Mobilité 21, et la recherche dans le secteur, typiquement le projet FOR. Celui-ci étant mené de façon ouverte avec l'ensemble des acteurs du secteur mais aussi d'autres secteurs d'activités, il a permis, suivant la théorie de l'innovation ouverte, d'intégrer de nouveaux acteurs. De façon analogue, l'objet-frontière R5G a permis d'intéresser les politiques publiques thématiques, notamment celles relatives à l'énergie, aux politiques sectorielles relatives aux infrastructures.

#### 1.3.4.2 Ferroviaire

Le ferroviaire constitue une part importante des activités de quatre départements de l'IFSTTAR et en particulier du département COSYS. C'est une activité fortement transversale que nous menons notamment dans le cadre de plusieurs projets européens, de contrats directs avec l'industrie ferroviaire, CERTIFER, l'EPSF (Établissement Public de Sécurité Ferroviaire) et de plus en plus en lien avec l'IRT Railenium dont l'IFSTTAR est membre fondateur. L'IRT porte l'ambition globale de mettre l'innovation et les fonctionnements collaboratifs au service de la stratégie de filière ferroviaire. Il contribue à promouvoir des systèmes ferroviaires plus économes, avec des performances de capacité, vitesse, sécurité, régularité supérieures, à l'empreinte environnementale réduite et ouverts sur l'espace européen. Les objectifs scientifiques du département COSYS trouvent naturellement leur place dans l'IRT. Sa nouvelle feuille de route se concentre sur trois programmes de recherche et innovation, sur les infrastructures et le matériel roulant : le centre d'essai ferroviaire, le train autonome qui prépare l'avenir du ferroviaire en changeant radicalement de niveau de performance et de qualité de service, la modélisation et prévision ferroviaire qui développe les outils numériques capables d'accroître la maîtrise technico-économique des composants ferroviaires, et de maintenir ainsi l'avance technologique de la filière française.

En collaboration avec Railenium, le DLR et le CEIT (Centre de recherche Espagnol), le département COSYS a préparé en 2014 la candidature de l'IFSTTAR à l'appel pour devenir Membre Associé de l'entreprise commune européenne Shift2rail, organe de la Commission Européenne qui pilote tous les programmes de R& D ferroviaires dans le cadre de H2020. Le consortium SmartRacon (Railenium, DLR, CEIT, NSL) a été constitué pour s'intégrer dans des projets H2020 du programme d'innovation «Advanced Traffic Management and Control Systems» de 2016 à 2022 (projets X2RAIL-1-2-3).

l'IFSTTAR s'est engagé à mettre à disposition auprès de l'IRT environ 20 personnes-mois par an jusqu'en 2022. Le département COSYS se trouve aujourd'hui impliqué majoritairement dans le programme train autonome, dans les projets X2RAIL et TCRAIL.

#### 1.3.4.3 Sense-City

Sense-City est un projet «Équipement d'Excellence» du PIA, courant sur la période 2011-2019 et doté de 9M€. Ce programme rassemble l'Ifsttar, ESIEE-Paris, le LPICM (École Polytechnique et CNRS), le CSTB, l'UPEM et INRIA. Sense-City offre une chaîne d'équipements de prototypage et d'évaluation des performances des micro- et nano capteurs pour la ville.

Implanté au cœur du Campus de la Cité Descartes à Marne-la-Vallée, l'équipement principal composé d'une halle climatique capable de simuler des conditions climatiques variées et d'une mini-ville reconfigurable de 400 m<sup>2</sup> se positionne comme un démonstrateur réaliste d'innovations urbaines, fournissant un terrain d'expérimentation à la fois bien plus riche et plus complexe que la salle blanche traditionnelle, mais aussi mieux contrôlé et plus reproductible

### 1.3. POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET D'INNOVATION

---

que l'environnement urbain. L'objectif est d'étudier aussi bien la pollution de l'air que la canicule ou le comportement des matériaux. ouverte tant aux académiques qu'aux industriels et aux collectivités, Sense-City participe au positionnement de l'Ifsttar et de la Cité Descartes comme un pôle tertiaire phare pour la ville du futur. C'est un formidable outil pour favoriser les coopérations au sein de l'institut et bien au-delà.



Figure 1.9 – Chambre climatique de la plate-forme Sense-City

Le projet accueille en conditions environnementales contrôlées des scénarii urbains réalistes incluant les principales composantes de la ville, telles que bâtiments, infrastructures, réseaux de distribution et sols. La chambre climatique a été réceptionnée en 2017 et la première mini-ville climatique en avril 2018. Sense-City constitue ainsi un espace dédié à l'évaluation des innovations technologiques pour la ville durable.

Comme on le verra dans les faits marquants, la dynamique créée à la faveur de cet Equipex a donné lieu à d'importants succès (records du cmonde, start-ups).

#### 1.3.5 Pilotage de l'innovation et des relations avec le monde économique

L'Ifsttar a nommé un directeur chargé du renforcement des relations avec les partenaires économiques qui chapeaute une cellule d'aide au montage de projets et qui s'appuie sur une sous-direction en charge de la valorisation, de l'innovation et du transfert de technologies. Le département COSYS œuvre en étroite collaboration avec ces entités. Conforme à la stratégie de l'Institut, la stratégie du département COSYS vise à stabiliser des partenariats avec différents acteurs socio-économiques et des équipes de recherche homologues pour atteindre des masses critiques sur des sujets importants. Elle vise par là même à transférer un maximum d'acquis aux secteurs professionnels de référence.

La création de partenariats bilatéraux durables tels que les laboratoires communs publics-privés constitue un objectif fort de l'institut et du département COSYS, conformément au COP. Cette dernière déclinaison est la plus appropriée pour construire sur le long terme un processus gagnant-gagnant d'échanges entre l'innovation, sa contextualisation, son industrialisation et son exploitation.

La mise en œuvre de cet objectif se décline concrètement pour COSYS par

- la consolidation de partenariats directs avec des entreprises, souvent attestée par des accords-cadres qui facilitent notamment les thèses cifre : les exemples offerts par la collaboration créée avec Mitsubishi, ESI, la SNCF, la RATP, ALSTOM, VALEO ou CERTIFER confirment le bon niveau d'activité atteint dans cette optique de fidélisation.
- La gestion de chaires internationales d'innovation comme la chaire Abertis.
- La création par des agents du département de start-ups ou filiales pour mettre sur le marché des innovations en termes de produits ou de service (4 créations en 2015/2017).

- La participation aux initiatives structurantes de partenariats public/privé (IRT, ITE, etc.) tels que Vedecom, Efficacity, Railenium, Jules Verne, SystemX pour développer la recherche partenariale sectorielle et contribuer au développement de nouvelles filières associant PME, recherche académique et grandes entreprises. Cette association nous permet par exemple de participer à Shift2Rail, de contribuer à la recherche-action dans des living labs comme La Défense, de nourrir des collaborations avec NTU Singapour et tout simplement de créer une masse critique sur des sujets nouveaux ou très importants lorsque les instituts du PIA réussissent à réaliser le capacity building.
- Une participation importante à la gouvernance des pôles de compétitivité : MOV'EO, CARA, ITRANS, Advancity (transféré en 2018 à Cap Digital), EMC2, ID4CAR.
- La contribution à la plate-forme TRANSPOLIS, au top 4 mondial des villes laboratoires. Cette plate-forme d'essai unique en Europe réunit des industriels, des instituts de recherche dont l'IFSTTAR, des PME et des start-ups. Elle aborde le véhicule automatisé, notamment du point de vue de l'infrastructure et s'intéresse plus largement à toutes les problématiques de mobilité urbaine. Une filiale commune (Transpolis SAS) entre des acteurs publics (Ifsttar) et privés a été créée pour la mise en œuvre de cette plate-forme. Voir une description en annexe.
- L'accueil de chercheurs du domaine privé dans les locaux de l'institut pour les recherches qui le justifient afin de renforcer les synergies par simple effet de proximité (hébergement des équipes Railenium à Villeneuve d'Ascq,...).
- L'implication du département dans différentes structures régionales : CISIT (NPdC), LIRGEC (PdL), GIS ITS, GIS DURSI, PRI Atrium (Le Mans), etc.
- La participation à la structuration d'une nouvelle filière industrielle de capteurs de la qualité de l'air bas coût exploitant les nanotechnologies (SMARTY).
- Le lobbying pour la création simultanée d'un PIA R5G route à énergie positive et d'une filière industrielle dédiée à la Transition énergétique des infrastructures de transport qui a conduit à l'AMI ADEME Route du Futur. L'IFSTTAR participe au projet I-Street.
- noter enfin que l'équipe NACRE a été généreusement dotée au titre d'une chaire industrielle pour accélérer l'innovation sur les capteurs pour la ville. Elle fait l'objet d'un comité de pilotage conjoint Ecole Polytechnique et IFSTTAR.

Par ailleurs, le département COSYS soutient l'incubateur Greentech verte et l'IGNFAB.

L'Ifsttar considère que «la valorisation des résultats de la recherche» par les jeunes entreprises innovantes (JEI) est une mission prioritaire et a créé une charte à cet effet ainsi que des documents sur le mode opératoire. L'un des 15 objectifs du COP 2017-2021 entre l'Etat et l'Ifsttar est «d'amplifier les contributions de l'institut à l'innovation» et pour cela d'être «acteur de la mise sur le marché d'innovations, notamment en développant des spin off».

Le département COSYS contribue de façon significative à l'activité de transfert de technologie de l'Ifsttar, fruit d'une politique volontariste. Il assure 50 % du volume total des dépôts de brevets de l'Ifsttar, dépose chaque année en moyenne 5 brevets. Il est à l'origine de 80 % des brevets aujourd'hui maintenus par l'IFSTTAR, soit environ 70.

En termes d'impact, Renault a choisi d'utiliser nos logiciels de perception pour le programme KAIROS, action d'innovation visant l'automatisation du véhicule électrique Zoe. Une lettre de félicitations a été adressée à l'Ifsttar pour l'excellence de la prestation.

Globalement, le département a créé directement, par transfert technologique, près de 80 emplois dans le privé dont 45 pour une seule start-up, sans compter les emplois induits. Il a créé 3 start-ups et soutenu fortement 6 PME. On décrira plus bas, au titre des éléments marquants, les start-ups ou spin-off créées dans la période sous revue.

### 1.4 Écosystème du département

Le département évolue dans un écosystème à plusieurs échelles spatiales, figure ??, que l'on décrira ci-dessous. Voir également une version détaillée en annexe.

Les 3 niveaux identifiés (régional, national, international) jouent un rôle capital dans le développement de l'activité qui parfois met en synergie les différentes échelles. L'écosystème de l'innovation a été décrit plus haut. On se focalisera davantage sur la recherche et la recherche-action.

#### 1.4.1 Échelle régionale

Le rôle accru des territoires dans la recherche et l'innovation (Transpolis, Laboratoires des usages, CEA-TECH, Idex, I-Site) ainsi que la raréfaction des moyens issus des tutelles incitent à en tirer le meilleur profit, par croissance externe, équipes mixtes (Railenium et VEDECOM) ou participation à des «living labs» de taille significative. L'IFSTTAR bénéficie d'un ancrage régional de longue date, salué par tous les acteurs. Cet atout offre un levier intéressant de développement à terme. L'IFSTTAR s'appuie en effet sur des pôles régionaux (Île de France, Lyon, Nantes, Lille, Aix-Marseille) pour déployer et valoriser sa politique nationale. Ce développement régional favorise les relations avec les universités, les écoles et les organismes de recherche qui se traduisent notamment par la mise en place de structures de recherche collaboratives. Le département COSYS est particulièrement moteur dans cette structuration :

L'entrée du LTN dans le SATIE en 2015 en offre un exemple. L'ERC CARMIN avec le CEA-LETI en Région Rhône-Alpes, l'ERC NACRE avec l'École Polytechnique et le CNRS (LPICM) qui portent sur la conception de capteurs innovants aux échelles micro ou nano, pour les infrastructures de transport et la ville respectueuse de l'environnement respectivement donnent accès au meilleur de la ressource qui manquait à l'institut pour aborder ces questions. Ces partenariats précèdent ou concrétisent la dynamique structurante du projet Sense-city. La création de l'EPC I4S à Rennes et Nantes entre le laboratoire SII et INRIA sur le monitoring s'inscrit dans la même logique.

Le département COSYS contribue activement à la vie scientifique des cinq régions où il est principalement implanté : Hauts de France, Ile de France, Pays de la Loire, Auvergne Rhone-Alpes et Nouvelle Aquitaine. Il a fortement bénéficié des derniers CPER (figure ??) et s'implique dans la construction des CPER à venir avec une participation aux SRI SI (Stratégie Régionale d'Innovation pour une Spécialisation Intelligente).

En Hauts de France, la recherche Transport est soutenue par les différentes instances régionales et elle s'est organisée et structurée depuis longtemps autour d'un regroupement de laboratoires sous le nom de CISIT (Campus International de Sécurité et d'Intermodalité des Transports), projet phare du CPER 2007-2013 qui a élaboré pour la période 2014-2020 le programme ELSAT 2020 (Écomobilité, Logistique, Sécurité et Adaptabilité dans les Transports à l'horizon 2020) qui a permis d'embaucher 15 postdoctorants. Le département COSYS participe au projet SUNRISE du CPER, qui offre des synergies intéressantes avec Sense-City.

En Ile-de-France, à Marne La Vallée, le département COSYS bénéficie du cluster sur la ville durable auquel il contribue très activement à l'aide de l'Equipex Sense-City, en relation avec les autres départements. Le projet Urbaclim a reçu 1.5M€ du CPER pour augmenter la plate-forme Sense-City. l'I-Site FUTURE constitue déjà un catalyseur d'activité scientifique avec le lancement de projets de recherche collaboratifs au sein du consortium. FUTURE a aussi déclenché une relation renouvelée aux entreprises à travers une recherche action portant sur l'éco-quartier La-Vallée construit par Eiffage. Cette entreprise, leader du gros projet I-Street sur la route du futur nous implique ipso facto dans le démonstrateur R5G@MLV à Champs-Sur-

## 1.4. ÉCOSYSTÈME DU DÉPARTEMENT

---

Marne qui vise à reconvertir le RD199 en boulevard urbain. Eiffage soutient fortement FUTURE, qui pourra donc flécher des crédits dédiés à un ressourcement amont. Cet exemple illustre un cercle vertueux qui articule dynamiquement l'innovation ouverte lancée par l'entreprise sur la base d'une feuille de route nationale (R5G) que l'on a écrite et d'un financement PIA, le territoire comme terreau des innovations bienvenues pour changer drastiquement la mobilité et la gestion de l'espace public, le PIA et l'Université pour initier une action de recherche destinée à préparer les futures générations d'innovation territoriale.

Par ailleurs COSYS participe au Labex FUTURS Urbains et au Labex MMCD. Le Labex Charmmat a également financé plusieurs actions de prématuration, via notre équipe NACRE.

L'effervescence actuelle autour de la ville durable et de la mobilité automatisée ou coopérative place COSYS au coeur d'une action de communication permanente avec les médias, la société civile, les entreprises, les collectivités, les élus.

Enfin, COSYS participe à la fédération francilienne LIVEH aux côtés du Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) et du Centre de Robotique (CAOR) de Mines-ParisTech, et, à Lyon, au labex « Intelligence des Mondes Urbains », à la fédération d'ingénierie Lyon Saint-Etienne (Inge'LySE) et à l'institut Convergences « École Urbaine de Lyon - EUL », voir ???. A Belfort, COSYS participe de la fédération CNRS FCLAB, avec 3 chercheurs sur site.

### 1.4.2 Positionnement par rapport aux stratégies nationales

Les thématiques abordées par le département COSYS font largement écho à la stratégie nationale de recherche (SNR) décrite dans l'agenda stratégique « France Europe 2020 ». Le département COSYS se trouve concerné par les défis Une énergie, propre, sûre et efficace, Mobilité et systèmes urbains durables, Société de l'information et de la communication.

L'agenda stratégique insiste sur le renforcement des capacités de recherche technologique, à travers le CEA-TECH, avec qui COSYS commence à collaborer sur plusieurs thèmes à Nantes (contrôle de santé des éoliennes et des câbles haute tension) et à Villeneuve d'Ascq (radio Intelligente pour le ferroviaire).

De plus, le projet COSYS s'inscrit en cohérence avec la Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) : en témoignent la route de 5ème génération à contribution environnementale positive et faisant appel aux NTIC, la logistique et la gestion de flux, notamment urbaine, s'appuyant sur des véhicules propres ou décarbonés et sur le report modal, le développement des réseaux intelligents, l'augmentation des capacités de stockage de l'électricité, par des solutions émergentes (piles à combustible), l'instrumentation des réseaux et le suivi des données collectées en temps réel favorisant la détection précoce des fuites.

Enfin, le projet du département fait largement écho à la Stratégie Nationale pour le Développement du Véhicule Automatisé, à laquelle on a d'ailleurs contribué. Le chapitre 5 explique le poids de cette thématique dans le projet de COSYS.

### 1.4.3 Échelle européenne et internationale

La coopération internationale, bilatérale avec des centres et des équipes d'excellence en cohérence avec la politique de l'Institut en matière de coopération européenne et internationale, cible les régions du monde jugées stratégiques. Les relations européennes et internationales aident à positionner le département parmi ses homologues dans le monde. Une première ébauche de parangonnage international se trouve en annexe.

La stratégie des relations Europe et International développée par Cosys a entre autres pour objectif la mise en exergue des piliers scientifiques du Département au sein de Laboratoires

## 1.4. ÉCOSYSTÈME DU DÉPARTEMENT

---

Internationaux Associés (LIA) avec des partenaires scientifiques de premier plan. A l'heure actuelle, 3 LIA sont en construction, voir les faits marquants chapitre 3.

Hors Europe, Singapour, Ville laboratoire acculée à l'innovation sous contrainte d'espace déploie rapidement des innovations et attire les entreprises françaises, PSA, Renault, Bolloré (partenaires de NTU et d'IFSTTAR) ainsi qu'EdF, Engie, Systra ... SystemX et Efficacity envisagent d'installer une antenne à Singapour et sollicitent l'IFSTTAR pour accompagner leur démarche. Les thèmes de R& D d'intérêt partagé avec COSYS incluent les technologies durables de construction, les véhicules automatisés, l'électromobilité. L'implantation de l'IFSTTAR avec les projets Sense-City, Route solaire et Monitoring énergétique pourraient avoir un impact positif pour les entreprises françaises.

COSYS nourrit des relations avec des universités chinoises prestigieuses dont Polytechnique de Hong Kong et Tongji à Shanghai. Le collège d'ingénierie du transport de cette dernière université se compose de 5 départements (route et air; rail; ingénierie du transport; train rapide et logistique; données de trafic). Il est situé sur le campus de Jiading, dans la ville internationale de l'automobile d'Anting à Shanghai. où le projet Superlab devrait voir le jour : Projet de transformation de la ville d'Anting en site expérimental pour le véhicule automatisé. Vis-à-vis de la Chine, l'IFSTTAR adopte une curiosité et une ouverture prudentes.

### 1.4.4 Laboratoire des usages «LUNA»

Dans la continuité du congrès mondial des ITS de Bordeaux en 2015, l'IFSTTAR (et plus particulièrement COSYS) fait partie des initiateurs du laboratoire régional des usages sur la mobilité intelligente (Laboratoire des Usages de la Nouvelle Aquitaine (LUNA)). Ce laboratoire associant des acteurs publics et privés est désormais inscrit dans les orientations stratégiques dans le domaine de la mobilité au sein du schéma régional de développement économique, d'innovation et d'internationalisation (SRDEII) de la région Nouvelle Aquitaine. Il devra prendre son essor fin 2018 en complémentarité avec TRANSPOLIS, vise à doper le développement économique dont la filière ITS et à contribuer à l'aménagement du territoire et à la réduction des impacts environnementaux. Cette ambition se concrétisera par le test en grandeur nature de services, outils ou usages nouveaux de la mobilité intelligente, en coopération avec les entreprises, des laboratoires de recherche, les collectivités locales et les utilisateurs, dans une optique d'innovation ouverte.

Le laboratoire accompagne les territoires dans la mise en œuvre de solutions innovantes pour la mobilité et la création de zones à haut niveau de service pour la conduite d'expérimentations relatives aux nouvelles mobilités, notamment connectées/automatisés.

Incarnant l'engagement de l'IFSTTAR dans le LUNA, COSYS a été chargé par la DG d'instruire la création d'une équipe en émergence à Bordeaux dont une mission est de mieux adosser les recherches de l'institut au LUNA. C'est ainsi que COSYS s'est enrichi récemment d'une nouvelle structure de recherche, dénommée «Équipe de Recherche en Émergence Nouveaux usages et pratiques de la mobilité en Nouvelle Aquitaine - ERENA).

### 1.4.5 Programme d'Investissement d'Avenir «PIA», hors Sense-City

Le département participe fortement au PIA. Outre le pilotage et la gestion de l'Equipe Sense-City, le département est actif dans les IRT Railenium (l'IFSTTAR est membre fondateur), SystemX, Jules Verne, les ITE Efficacity et VEDECOM, les labex MMCD, IMU, Charmat et Futurs Urbains, les I-sites NEXT et ULNE, l'Idex de Lyon. Le département bénéficie enfin de crédits substantiels de la SATT Paris-Saclay pour la maturation de deux start-ups.

Avec près de 25 personnes en MaD dans les différents IRT et ITE auxquels l'IFSTTAR participe, le département COSYS représente à lui seul la très grosse majorité du temps passé

## 1.4. ÉCOSYSTÈME DU DÉPARTEMENT

dans les instituts du PIA. Dans Railenium, l'IFSTTAR représente plus de la moitié de l'effort académique total et COSYS 85% de l'IFSTTAR. Cette présence représente beaucoup plus que tout le reste de l'Université Gustave Eiffel. Le PIA offre également plus de 10 thèses.

Les crédits reçus au titre des MaD alimentent la marge du département. On les réinvestit dans des équipements scientifiques ou l'accueil de post-doctorants ou de doctorants.

Si l'on pilote Sense-City, on pilote aussi des programmes chez Vedecom et Efficacity : le programme véhicule autonome chez VEDECOM et le programme Territoires Instrumentés chez Efficacity. Cet effort consenti reflète les axes forts de la stratégie du département. System-X propose aussi un élargissement des sujets à traiter en collaboration. Ainsi l'alignement des stratégies, de mise pour éviter la dispersion, a bien lieu. Plus avant, Sense-City fait aujourd'hui partie des plates-formes sur lesquelles Efficacity s'appuie.

Enfin, la préparation active de l'AMI ADEME Route du Futur (PIA) aux côtés de la DGITM du MTES s'est appuyée sur la feuille de route de la R5G, à l'instar de l'appel européen Infra-variation qui s'inspire des feuilles de route de FOR, auxquelles on a fortement contribué.

Certes le caractère technologique du département prédispose sans doute à une forte exposition au PIA mais l'effort de focalisation stratégique et l'adéquation avec les valeurs même du PIA, à savoir "faire de la recherche autrement, soutenir excellence et compétitivité", expliquent probablement autant le "profil PIA" du département COSYS.

### 1.4.5.1 I-Site «FUTURE»

L'IFSTTAR a contribué au succès du projet I-Site «FUTURE» qui vise à faire émerger un pôle universitaire majeur à caractère national et fortement ancré dans l'Est parisien, principalement dédié à la ville de demain. FUTURE relève trois défis : Ville économe en ressources, Ville sûre et résiliente, Ville intelligente. Ce projet a pour ambition de créer l'un des 10 pôles reconnus au niveau international sur ces sujets, incarné dans la future Université Gustave Eiffel, à vocation nationale et pluridisciplinaire, centrée sur la ville et les transports.



Figure 1.10 – Alignement COSYS sur FUTURE

Il nous revient donc de contribuer à construire une vision globale et holistique de la ville du 21ème siècle avec l'humain au centre. Cette ambition se décline en axes stratégiques et actions concrètes répondant aux valeurs nommées excellence, interdisciplinarité, internationalisation, expérimentation et efficacité. L'IFSTTAR, au cœur de cette ambition, œuvre à faciliter l'intégration des plates-formes de test ou plateaux techniques de chacun de ses sites dans l'initiative FUTURE ainsi que la recherche-action. L'innovation territoriale, la RID exploitant la richesse scientifique et technologique du territoire font aussi partie de la stratégie scientifique de l'Université Gustave Eiffel.

## 1.4. ÉCOSYSTÈME DU DÉPARTEMENT

---

Les thématiques du département font écho aux trois défis de l'I-Site FUTURE sur lesquels on s'est mobilisé en conséquence, d'où sa participation à des projets structurants comme "Eco-quartier Sobre Smart et Secure" (E3S) qui vise à créer un écoquartier en lieu et place de l'Ecole Centrale (projet LaVallée à Chatenay-Malabry). Monté par le directeur du département avec Eiffage, E3S sera doté de 2M€ dont 1M€ d'Eiffage.

Le département copilote également 4 projets Impulsion (Nano4Water, CAPTEUR, Western, Urban Vision) et participe au projet tremplin Crisis Lab.

Enfin, le souhait partagé d'une coopération renforcée avec des groupes UPEM et ESIEE (ESYCOM et MSME) autour de la simulation ab initio des nano-capteurs et de la photocatalyse augure d'une structuration à renforcer sur la Cité Descartes en symbiose avec l'équipe de recherche commune NACRE impliquant le LISIS, le LPICM et le LMS.

### 1.4.5.2 IDEX de LYON

Le département est impliqué dans l>IDEX de Lyon. Il a co-initié le programme "transport et mobilité" impliquant un ensemble de d'acteurs de la mobilité du site Lyon Saint-Étienne, réunis dans le cadre d'une structure informelle, l'ITMU (Institut des transports et de la mobilité urbaine) associant le pôle de compétitivité CARA.

### 1.4.5.3 IRT RAILENIUM : Voir 1.3.4.2

### 1.4.5.4 IRT SYSTEM-X

Dans le cadre de l'accord de partenariat signé en 2013 entre SystemX et l'Ifsttar, le département COSYS apporte ses compétences en modélisation du trafic, sécurité-sûreté, électromagnétisme, imagerie, génie électrique, big data et sciences humaines et sociales dans l'IRT SystemX. Cet engagement se concrétise par la direction de thèses, et des mises à disposition (MàD) : 3 agents à 20% de leur temps de 2015 à 2018. L'implantation récente de SystemX à Lyon mobilise le LICIT avec 3 agents en MAD à 20%. On y travaille sur l'information voyageur, la modélisation des grands réseaux, l'analyse des données massives issues des réseaux électriques.

### 1.4.5.5 ITE EFFICACITY

On joue un rôle important dans Efficacity à travers la codirection du programme Pôle Gare et la direction du lot "gare comme hub énergétique". COSYS contribue aussi au programme dédié à la production décentralisée d'énergie. Les premiers résultats, très encourageants, sont décrits dans le bilan de la thématique "Solutions Energie-Climat".

Ils ont déclenché l'intérêt de la RATP pour une mise en œuvre progressive des outils de pilotage énergétique proposés dans le programme. L'alignement de notre thématique Monitoring des Territoires avec la feuille de route efficacy et vice-versa procure un effet de levier croisé important. On pilote depuis 2018 le programme Territoires instrumentés d'Efficacity qui mobilise une partie de COSYS et on participe au living Lab de La Défense sur le monitoring des ambiances et de la mobilité, le pilotage d'un smart grid. Efficacity mobilise 9 personnes de COSYS mises à disposition à 5, 10 ou 20% du temps.

### 1.4.5.6 ITE VEDECOM

l'Ifsttar est membre fondateur de VEDECOM. Trois agents du département COSYS ont été fortement impliqués dans l'ITE entre 2015 et 2017 dans le cadre de mises à disposition (2 à 80% et 1 à 100%). Le département COSYS s'implique aussi dans l'ITE dans le cadre d'encadrement de doctorants et post-doctorants recrutés par VEDECOM, de mise à disposition

#### 1.4. ÉCOSYSTÈME DU DÉPARTEMENT

---

d'équipements/logiciels, de prestations de R&D. On a piloté le projet Véhicule Autonome sur la base des acquis des projets MIL et ABV, mais aussi le projet européen Fabric qui a débouché sur un démonstrateur de recharge en continu par induction sur un linéaire de 100m.

## Chapitre 2

# Bilan global

Porté par ses succès récents (Equipex Sense-City, ERC MAGnUM,...) et le contexte actuel de la mobilité, le département met l'accent sur la transition digitale et écologique dans les transports. Il soutient le déploiement du véhicule et du train automatisés et des nouveaux services de mobilité avec la simulation des déplacements à toutes les échelles (effets des nouveaux véhicules sur le trafic et sa régulation, interactions entre les usagers, les véhicules et leur environnement), l'usage intelligent des grandes masses de données, le pilotage de la mobilité qui peut en résulter mais aussi les solutions énergie-climat-sûreté pour les transports et la ville exploitant l'IoT, la simulation, le génie logiciel et l'automatique.

Les connaissances aujourd'hui accumulées, d'un niveau international avéré, permettent de mieux exploiter les infrastructures de transport, de mieux évaluer les pollutions liées au trafic ou à l'activité urbaine, de préparer la transition vers une mobilité écologique et des territoires à énergie positive, de favoriser la mobilité active des personnes de tous âges. Les acteurs du ferroviaire, du routier et de la construction requièrent notre capacité d'étude et d'expertise, de simulation et de traitement des données, les équipementiers automobiles nos avancées sur la vision. L'état et les collectivités territoriales sollicitent de plus en plus notre expertise et l'appui aux politiques publiques, de nature à influencer sur la vie quotidienne de nos concitoyens, a pris une place importante dans l'activité du département, aux côtés de l'activité internationale et de l'implication très forte dans le PIA.

Ce qui suit développe les principaux résultats ou leurs impacts.

### 2.1 Faits marquants

Les rapports des thématiques mentionnent des résultats scientifiques remarquables obtenus lors du dernier contrat. On souligne ici quelques faits marquants de COSYS qui mettent en lumière quelques-uns des faits scientifiques détaillés dans les sections ??.

#### 2.1.1 Contributions à l'Espace Européen de la Recherche

##### 2.1.1.1 ERC consolidator Grant MAGnUM (Ludovic Leclercq)

MAGNUM (Multiscale and multimodal traffic modelling approach for sustainable management of urban mobility) vise une gestion multi-modale plus efficace des réseaux de transport urbains grâce à une modélisation dynamique des déplacements à l'échelle des métropoles et le développement de stratégies de régulation innovantes fondées sur un ciblage fin des usagers : l'utilisation de jeux sérieux et multijoueurs simulant les déplacements permet de mieux appréhender le comportement et les choix des usagers pour ensuite mettre au point des stratégies de

## 2.1. FAITS MARQUANTS

régulation efficaces et à faible empreinte environnementale.

En termes de résultats majeurs pour la première moitié du projet, il faut citer outre les sessions de Simulation Game, la mise au point d'une méthode originale de caractérisation de la congestion à l'échelle urbaine : les cartes de congestion 3D. Par clustering on met en évidence une régularité des motifs de congestion à l'échelle urbaine sur l'ensemble de la journée. Cette régularité permet d'établir une banque parcimonieuse de motifs caractéristiques. Une première application originale, développée avec TU-Delft, a été la prévision des temps de parcours en temps réel appliqué à la ville d'Amsterdam. Un autre résultat majeur est le développement d'un simulateur dynamique agrégé fondé sur la méthode des réservoirs (MFD) et la mise au point de méthodes de changement d'échelle spatiale permettant de passer d'un réseau routier réel à un réseau agrégé et simplifié.

### 2.1.1.2 Marie Slodowska Curie Career Integration Grant Smart Walk (Valérie Renaudin)

Smart Walk a permis de concevoir un algorithme de calcul des angles d'attitude d'un portable dans la main par modélisation en quaternion des dérives de gyromètre et utilisation les gradients de champ magnétique. La modélisation des erreurs du gyromètre sous forme d'un biais additif dans l'espace des quaternions a été proposée afin de limiter la propagation d'erreur sur l'estimation temps réel des angles d'attitude, due à la non-linéarité des équations de propagation d'état dans le filtre de Kalman. Dérivation mathématique et simulation montrent que cette nouvelle modélisation est suffisante pour englober toutes les erreurs non déterministes du gyromètre. Grâce à ces travaux, une erreur inférieure à 10 degrés sur le calcul du cap de marche est obtenue au bout 1 km parcouru avec une centrale inertielle dans la main. Cette erreur est bien inférieure à l'état de l'art.

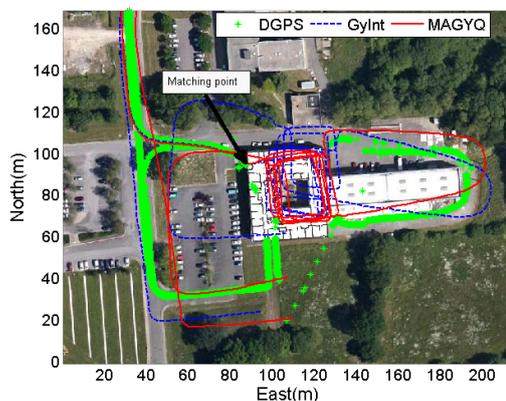


Figure 2.1 – Traces calculées sur 1 km de marche. Solution de référence GPS différentielle précision 10 cm (vert). Intégration brute des vitesses angulaires (bleu). Nouvelle solution exploitant les gradients de champ magnétique (rouge).



Figure 2.2 – Équipement GNSS et IMU développé sur mesure pour les recherches en navigation multimodale du voyageur avec batterie et mémoire intégrées.

Les travaux ont aussi montré expérimentalement que porter un petit Objet Communicant détruit la symétrie de la marche, ce qui laisse espérer une nouvelle capacité d'observation fine de la marche. La prise en compte des mouvements 3D et une métrologie fine montrent que la marche réelle s'écarte notablement de celle d'un modèle de robot bipède 2D.

La bourse a enfin conduit à la conception et l'acquisition d'équipements de référence pour la trajectographie des piétons, ULISS et Persy, débouchant sur des investigations très riche

## 2.1. FAITS MARQUANTS

d'enseignements en particulier grâce à un échantillonnage à 200hz qui donne accès à toute la cinématique de la marche.

### 2.1.1.3 Leadership de projets européens

En plus des bourses d'excellence Magnum et Smart walk, on a coordonné les projets SECRET, PROTEUS, OPTIMUM et SAPPART qui relèvent respectivement des thématiques sécurité-sûreté, Monitoring des Territoires, Systèmes de transport de nouvelle génération.

2.1.1.3.1 OPTIMUM - Optimised ITS-based Tools for Intelligent Urban Mobility OPTIMUM, projet IRSES «Marie Curie Action for International Research Staff Exchange Scheme» avec l'EPFL et (Queensland University of Technology à Brisbane), visait Le développement de solutions innovantes pour la mobilité urbaine. On a élaboré des méthodes pour prédire le temps de parcours à court terme pour différents modes et réseaux et modélisé sa variabilité. Ces méthodes sont actuellement utilisées opérationnellement par les gestionnaires d'infrastructures. Pour la gestion coopérative du trafic on a développé des algorithmes innovants de contrôle d'accès et de régulation dynamique de vitesse. On simulé le trafic pour évaluer de l'impact de la communication inter-véhiculaires sur la qualité de l'écoulement.

#### 2.1.1.3.2 SECRET (SECurity of Railways against Electromagnetic aTtacks)

Le projet SECRET du 7ème PCRD avec le Fraunhofer Institute IAIS, Politecnico di Torino, University of Liege- Institut Montefiore, University of the Basque Country, ZANASI Alessandro Srl, ALSTOM TRANSPORT, TRIALOG, SNCF, UIC visait la protection du réseau ferroviaire vis-à-vis des attaques électromagnétiques.

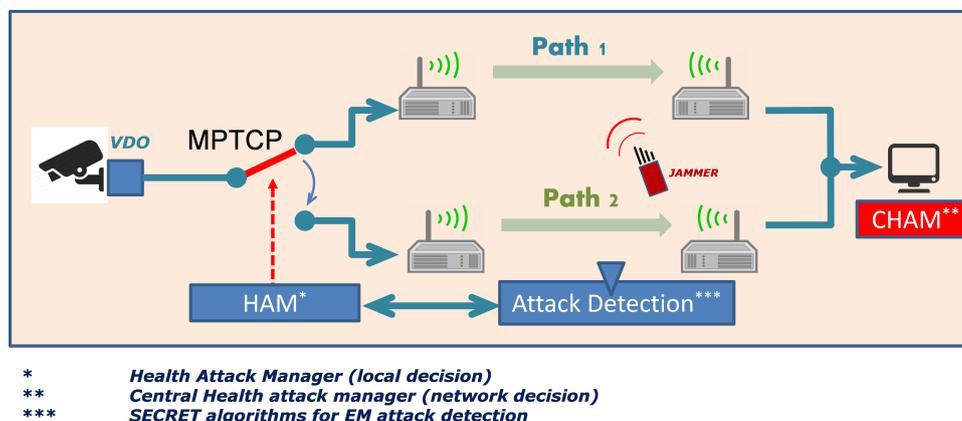


Figure 2.3 – SECRET : architecture résiliente

L'infrastructure ferroviaire est une cible attractive pour les attaques EM en raison de son étendue, de sa facilité d'accès et des conséquences économiques, sociales et sécuritaires d'une attaque. SECRET a permis de mener des analyses de risque, d'étudier des solutions technologiques pour détecter ces attaques et permettre de réagir pour assurer la transmission des informations critiques pour la circulation des trains. Ces travaux ont contribué à l'émergence de recommandations techniques et à l'évolution de la standardisation afin de renforcer la résilience du système ferroviaire. Ils ont été suivis d'expertises pour le compte de la DSUT du Ministère des Transports.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

### 2.1.1.3.3 SAPPART

Cette action COST répondait à une sollicitation des autorités européennes. On a conçu un modèle d'erreur de calcul de position du véhicule en ville par signaux satellitaires GNSS. Il répond à l'exigence normative européenne élaborée par le groupe CEN-CENELEC/TC5. Ce modèle d'erreur paramétrique a été validé en collaboration avec les industriels GMV et QFREE.

Le Handbook «Assessment of positioning performance in ITS applications» consacre la fin de l'action COST Sappart qui a permis de mettre au point une référence en matière d'évaluation des performances des systèmes de positionnement, d'importance majeure pour le déploiement du Véhicule à conduite déléguée.

La reconnaissance des experts GNSS du département a conduit l'institut à devenir centre d'homologation des chaînes de collecte et de contrôle du système Ecotaxe, dimensionné pour rapporter une taxe annuelle de 1 300 M€ sur les poids lourds empruntant le réseau national. Le département a aussi contribué à la rédaction du plan satellitaire au niveau national.

### 2.1.1.3.4 PROTEUS - H2020, pilier «Industrial leadership»

Bâti sur l'expertise développée autour de Sense-City, PROTEUS regroupe des acteurs complémentaires de la chaîne de valeur des capteurs (organismes de recherche, PME, exploitants) : IFSTTAR, ESIEE-Paris, Easy Global Market SAS et PONSEL MESURE SAS, UNINOVA, SMAS Almada et Unparallel Innovation, WINGS ICT Solution et l'Université de Perugia. Proteus répond une demande croissante de sondes de suivi de la qualité de l'eau multiparamètres compactes et peu coûteuses. Le projet a produit un capteur intelligent pour le suivi de la qualité de l'eau dans les réseaux d'eau potable et d'assainissement. Il mesure différents paramètres chimiques et rhéologiques grâce à l'utilisation de capteurs microfluidiques et de capteurs à nanotubes de carbone. Des nanotubes de carbone fonctionnalisés par de nouveaux polymères de façon non-covalente permettent de suivre simultanément pH, chlore, chlorure et calcium avec une seule puce d'échelle centimétrique d'une sensibilité 10 fois meilleure que les capteurs usuels. La détection se fonde sur les variations de résistance du réseau de nanotubes lors du changement des concentrations chimiques dans l'eau. Autonome en énergie, il est également capable d'ajuster dynamiquement son fonctionnement à un changement de son environnement. Le projet couvre toutes les étapes de prototypage capteur depuis l'analyse de marchés jusqu'aux essais terrain. Il a montré la manufacturabilité, la fiabilité et la maturité applicative des objets développés. On maîtrise aujourd'hui la fabrication et l'intégration dans une chaîne IoT. La validation dans la boucle d'eau de Sense-City a permis de monter en TRL.

Une start-up est en cours de maturation (nom de code MICAD'O), sur financement de la SATT Paris-Saclay.

### 2.1.1.4 Alliances, JTU, VCE

Anne Ruas assure le pilotage de l'UERA (Urban Europe research Alliance). Cette alliance devrait aider à la circulation des chercheurs en Europe et en particulier à l'attractivité de Sense-City pour de jeunes chercheurs européens. Elle facilitera aussi la formation de nos jeunes chercheurs sur les questions de ville à travers des écoles d'été en Europe par exemple.

COSYS, au travers de Marion Berbineau est impliqué à bon niveau dans la JTU S2R. Voir plus bas le paragraphe "Ferroviaire".

Enfin, notons de COSYS pilote ou co-pilote 3 «Virtual Centre of Excellence - VCE», émanation des centres d'Excellence Européens : EURNEX, NEARCTIS, HYCON.II

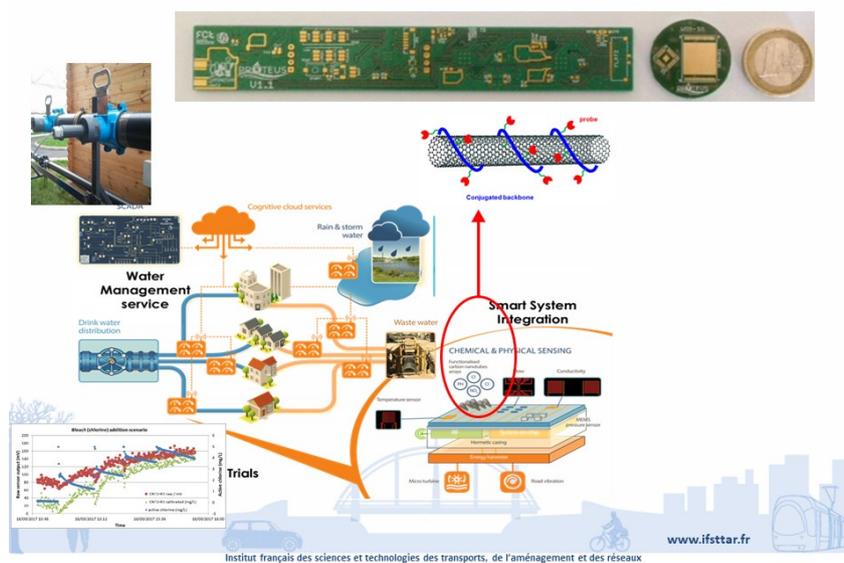


Figure 2.4 – PROTEUS : laboratoire sur puce validé dans la boucle d'eau Sense-City

### 2.1.1.5 Laboratoires Européens Associés (LEA)

La création de Laboratoires Européens Associé (LEA) devrait conférer un statut et une dynamique plus forte à des collaborations déjà anciennes avec plusieurs instituts : l'IREA (CNR Naples et Milan, sur le monitoring électromagnétique des infrastructures de transport ou de l'énergie), le DICAM (Université de Bologne, sur les simulateurs), le département ABC (Poli Milano, sur le SHM, les géosciences, les composites).

#### 2.1.1.5.1 ASTI

Le projet de LEA le plus avancé est ASTI (Advanced sensing for Transport Infrastructures) entre l'IFSTTAR, Inria, le CNR italien avec les instituts IREA et IMAA qui sont instituts de référence pour l'ESA. ASTI se fonde sur les succès du projet européen Istimes dont les résultats font désormais des 60 technologies clefs du GMES. ASTI abordera la fusion de données issues de nombreuses sources à toutes les échelles territoriales, comme les satellites (INSAR, Sentinel), les images d'interférométrie radar sur drones, les capteurs de type radar ou fibres optiques au sol. Par contraste avec la logique des projets européens, ASTI se focalisera sur les TRL bas et favorisera la soumission d'un projet d'ERC Synergy Grant.

#### 2.1.1.5.2 Bologne

La collaboration entre l'Université de Bologne et le département CoSys de l'Ifsttar a été initiée lors d'un séminaire d'échange dans le cadre du montage d'un projet H2020. D'autres montages de projets européens ont nourri une connaissance mutuelle croissante et une compréhension plus profonde de nos complémentarités scientifiques sur le thème de l'observation des comportements des usagers de la route et de la rue en interaction avec l'infrastructure pour améliorer leur mobilité. D'où l'accueil de plusieurs doctorantes et stagiaires de Master de Bologne, puis le cofinancement d'une thèse en co-tutelle. Ces activités communes ont conduit à la signature d'un accord cadre en 2015. Des professeurs de L'Université de Bologne séjournent régulièrement à l'IFSTTAR et participent à nos doctoriales.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

La collaboration entre CoSys et UniBo s'appuie sur la complémentarité entre les thématiques et les moyens de recherche pour créer une synergie sur un nombre croissant de sujets. Notre participation à l'ITN Safer-Up illustre cette synergie. La ville de Bologne s'offre comme terrain d'expérimentation pour les recherches sur la sécurité et la mobilité, UniBo exploite des moyens expérimentaux qui permettent de collecter des données en situations réelles de déplacement. l'Ifsttar développe et exploite des plateformes de simulation immersives qui permettent de collecter des données en situations virtuelles, sur des cas d'étude dangereux ou futuristes impossibles à tester sur le terrain.

Le LIA proposé vise à renforcer et pérenniser la collaboration sur deux axes principaux (simulation et vision) et deux axes prospectifs (comportements et trafic).

### 2.1.1.6 Feuilles de routes européennes

Le projet Forever Open Road est fondé sur trois éléments initialement proposés dans l'agenda de recherche stratégique du FEHRL (SERRP V 2011-2016), dont la Route de 5e Génération se veut la déclinaison nationale. La route évolutive vise une route plus flexible, capable de s'adapter à moindre coût aux nouvelles demandes de mobilité. La route coopérative intègre les technologies du numérique et soutient les ITS coopératifs et des véhicules automatisés. Enfin, la route résiliente est capable de faire face aux défis du changement climatique. Les trois feuilles de route initiales ont été publiées début 2013 et font système. L'agenda proposé court de 2010 à 2025 et comporte deux jalons intermédiaires en 2015 et 2020. Cet agenda stratégique de recherche du FEHRL a été révisé en 2017 (SERRP VI 2017-2020). Outre les trois éléments précédents, une quatrième dimension autour de l'intégration multi-modale et trans-modale a été intégrée. L'accent a également mis sur l'innovation et le déploiement. Dans ce cadre, COSYS pilote notamment la feuille de route consacrée à la route automatisée au côté de l'administration fédérale des routes américaine (FHWA) et a également contribué au développement du volet multi-modal et trans-modal dans le cadre des projets européens (CSA) FOX et USE-iT (2015-2017).

### 2.1.2 International hors Europe

#### 2.1.2.1 Collaboration AASHTO - US DOT & TRB

La collaboration avec l'AASHTO/US DoT /TRB, dont l'existence même montre à quel point la France jouit d'une aura particulière, s'inscrit dans le cadre de la coopération entre DGITM/IFSTTAR et l'USDOT/AASHTO/TRB, résultat de la table ronde FR/US au congrès mondial sur les ITS à Bordeaux en 2015 sur le thème des véhicules connectés et automatisés. Depuis cet événement fondateur, les deux délégations se réunissent chaque année au TRB annual meeting pour échanger sur les trois thèmes : Policy, Déploiement, Recherche.

Les deux premiers axes sont pilotés par la DGITM côté Français alors que le dernier axe est piloté par COSYS. Nous organisons régulièrement des «peer exchange workshops » avec permettre des échanges d'expériences et de bonnes pratiques sur des problématiques spécifiques du véhicule connecté et automatisé, en particulier sur le thème des méthodes d'évaluation multicritères. Depuis 2015, nos partenaires américains ont entre autres lancé plusieurs projets de déploiement de mobilité coopérative sur les sites NYC –urbain, Tampa –périurbain, Wyoming – interurbain avec problématiques fret et viabilité hivernale.

Ces trois projets font partie de l'appel d'offre « CV deployment Pilot Program » (budget global 42M\$) lancé par l'USDOT (ITS JPO) en 2015. COSYS est invité, représentant du seul groupe non américain, à échanger sur les approches et méthodes d'évaluation d'impact des cas d'usages déployés à partir des premiers résultats.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

### 2.1.2.2 Laboratoire International Associé (LIA) avec QUT

Le projet de LIA avec QUT Brisbane s'inscrit dans la ligne de résultats très prometteurs sur l'estimation d'une bulle de sécurité spatio-temporelle autour des véhicules connectés et à conduite partiellement déléguée. Afin de permettre l'anticipation des situations à risque et le développement de copilotes pour la délégation et l'automatisation de la conduite, le CARRS-Q, l'IFSTTAR et d'autres partenaires ont étudié et mis en œuvre les moyens de communication nécessaires à la construction des cartes de perception dynamique étendue. Une étude en simulation de l'impact de l'utilisation des communications pour la réduction des collisions a permis de démontrer qu'avec un taux d'équipement de 25% des véhicules on obtient une réduction très significative des collisions. Ensuite, l'étude des communications 802.11p, en condition réelle, a fait apparaître des limitations de ce média en termes de portée et de retard de transmission. Les données collectées ont permis de produire un modèle statistique du canal de propagation. Ce modèle, intégré dans une simulation réaliste, a ensuite été utilisé pour construire une carte étendue permettant d'estimer le risque d'une situation avec plus de 7 secondes d'avance. Ce résultat évalue de façon fiable le temps donné au conducteur pour reprendre de manière sécuritaire la tâche de conduite.

Plusieurs réunions à Paris, à Brisbane et à Melbourne ont permis de définir les bases scientifiques de la collaboration ainsi que les modalités d'enrichissement de nos plates-formes de simulation et de nos véhicules d'expérimentation.

### 2.1.3 Structuration

#### 2.1.3.1 I-Site

On rappelle ici le succès de l'I-Site FUTURE. A travers l'IFSTTAR, COSYS se trouve également impliqué, comme partenaire de second rang, dans l'Idex de Lyon, l'I-Site Next et l'I-Site ULNE. L'université Gustave Eiffel créera des pôles dont on ne connaît pas aujourd'hui les contours mais dont l'impact nous paraît a priori majeur. L'articulation de cette Université avec les autres initiatives à vocation plus régionales ouvre des perspectives que l'on pressent très intéressantes mais qui restent à construire.

#### 2.1.3.2 Équipe I4S

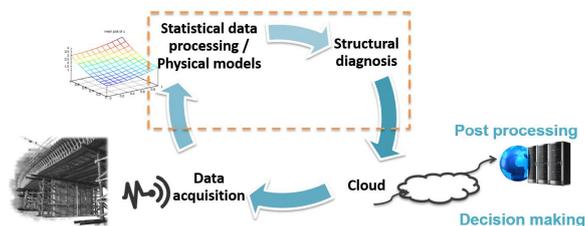


Figure 2.5 – Vue schématique des activités d'I4S

La création de l'EPC (Equipe Projet Commune) INRIA-IFSTTAR I4S (Inference for Structures) résulte d'une longue connivence avec Inria, notamment la branche Rennes-Bretagne-Atlantique dans le domaine du contrôle de santé des structures vibrantes, domaine d'excellence très ancien de l'IFSTTAR et d'INRIA sur des modalités différentes, Inria excellant à l'algorithmique, la science des données, l'IFSTTAR étant reconnu sur les capteurs (nos travaux sur les capteurs à fibres optiques dans les années 70 sont considérés comme pionniers par l'EPFL

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

et la compétence a été maintenue) et l'expérimentation terrain ou sur des plates-formes de grande taille. Le directeur de COSYS était collaborateur extérieur à Inria (Rocquencourt) et a pu jouer un rôle déterminant dans l'hybridation des savoir et la fertilisation croisée des équipes. I4S équipe développe des méthodes d'inférence statistique (identification, détection, réjection) robustes par rapport aux phénomènes physiques interagissant avec la structure (thermodynamique, aérodynamique, excitation fortement non stationnaire), voir figure 2.5. En 2017, l'équipe a été évaluée suivant la procédure HCERES dans le Thème "Optimisation et contrôle de systèmes dynamiques" au sein d'Inria et renouvelée au 1/1/2018.

### 2.1.3.3 ERENA

L'initiative de créer une équipe en émergence IFSTTAR dans le Sud-Ouest, ERENA, résulte d'une synergie de l'institut avec le milieu académique et industriel en Nouvelle-Aquitaine depuis de nombreuses années sur le thème des systèmes de transports coopératifs C-ITS, incarnée par deux agents basés à Bordeaux et nourrie par plusieurs projets européens d'envergure (SCOOP, C-Roads, C-the-difference) sur l'évaluation des C-ITS, avec la région bordelaise comme site de déploiement et d'expérimentation. Plusieurs équipes projet de l'IFSTTAR se sont fédérées autour de cet axe avec comme point central l'équipe présente en Nouvelle-Aquitaine. Il importe que ces équipes projets continuent à collaborer à travers cette dynamique initiée dans le sud-ouest et portée par l'équipe en émergence. Par ailleurs des thèses démarrent avec les laboratoires de référence dans le domaine et localisés à Bordeaux, comme le LABRI. En outre, la nécessité d'adosser les recherches menées à l'IFSTTAR (briques technologiques et solutions innovantes de la mobilité intelligente) aux terrains d'expérimentation a conduit l'institut à créer TRANS-POLIS, plate-forme qui se caractérise par son offre très large de tests de nouvelles solutions de mobilité grâce à une approche systémique. Les laboratoires des usages que constituent le démonstrateur Ecocité-II R5G@MLV (RD199) et La Défense Seine-Arche offrent d'ores et déjà de riches opportunités pour consolider l'offre technologique de l'IFSTTAR, qui compte poursuivre la même démarche dans le Laboratoire des Usages de la Nouvelle-Aquitaine (LUNA), désormais inscrit dans la stratégie de transport de la Région Nouvelle-Aquitaine.

Cette volonté du Conseil Régional de Nouvelle-Aquitaine (CRNA) de construire avec des partenaires académiques et les collectivités un laboratoire des Usages en Nouvelle-Aquitaine axé sur les nouvelles mobilités plaide en faveur de la création de l'ERENA. Cette équipe sera donc porteuse de cette initiative pour l'IFSTTAR et construira en partie ses activités à travers le LUNA pour des évaluations en conditions réelles. ERENA lancera un pont entre le LUNA et les différents laboratoires de l'IFSTTAR sur le sujet de la mobilité intelligente.

### 2.1.3.4 TEMA

Le LTN rejoint en 2015 le SATIE comme équipe TEMA.

## 2.1.4 Faits scientifiques

### 2.1.4.1 Résultats et publications

Parmi les 640 ACL et 25 brevets, il convient de mettre en avant l'article le plus influent de la décennie en computer vision, un article dans Scientific Reports (Groupe Nature) une page de Science et Avenir consacrée à Sense-City et 2 records du monde en nanotechnologies, issus de l'ERC NACRE, que l'on détaille ici :

#### 2.1.4.1.1 Mesures de déformation par nano-capteurs

## 2.1. FAITS MARQUANTS

– Record mondial sur la stabilité (F. Michelis, L. Bodelot, Y. Bonnassieux, Bérengère Le-bental : ERC NACRE).

Ces travaux débouchent sur une reproductibilité exceptionnelle et une absence d’hystérésis dans des capteurs de déformation flexibles fabriqués par impression jet d’encre de nanotubes de carbone. En raison de leur sensibilité exceptionnelle à leur environnement proche, les nanotubes de carbone ont été massivement proposés dans des capteurs innovants, en particulier les capteurs flexibles qui sont la clé de voûte de la nouvelle génération de matériaux intelligents (textiles, matériaux de construction, véhicules ...). Mais, pour atteindre le marché, il faut prouver la reproductibilité de leur fabrication, enjeu scientifique en soi quand les objets atteignent des dimensions nano-métriques.

Les études existantes sur les capteurs flexibles ou rigides se limitent à comparer, le plus souvent qualitativement, les sensibilités de 2 à 4 capteurs. Une unique étude, sur des capteurs chimiques sur substrat rigide, analyse 21 dispositifs, et annonce près de 2 ordres de grandeur de variabilité sur les performances des capteurs. Cette étude intitulée « Universal Parameters for Carbon Nanotube Network-Based Sensors : Can Nanotube Sensors Be Reproducible ? » (CS Nano) souligne les difficultés scientifiques et techniques à obtenir la reproductibilité des capteurs flexibles à nanotubes de carbone.

L’article Reproductibilité exceptionnelle et absence d’hystérésis dans des capteurs de déformation flexible fabriqués par impression jet d’encre de nanotubes de carbone, accepté en août 2015 dans le journal Carbon, montre sur une série de 8 dispositifs que la variabilité sur la sensibilité est de seulement 8% en température et de 16% en déformation. Il s’agit de l’étude la plus complète sur les capteurs flexibles à nanotubes, et de la sensibilité la plus basse reportée à ce jour parmi tous les types de capteurs à nanotubes de carbone. L’absence d’hystérésis de ces nouveaux capteurs constitue là encore une réussite rare dans la littérature des capteurs de déformation à nanotubes de carbone.

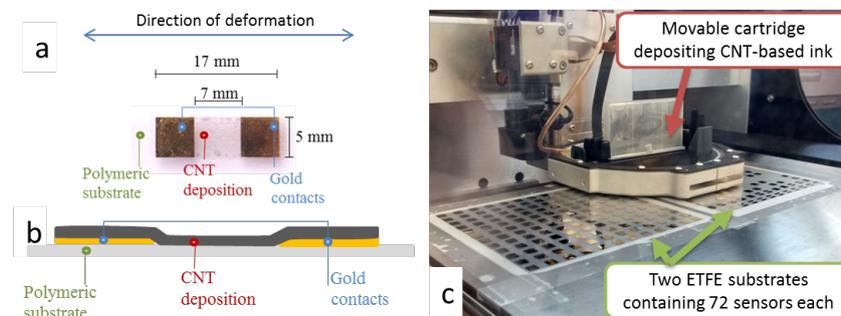


Figure 2.6 – a) Image et b) schéma correspondant d’un capteur à base de nanotubes de carbone. c) Fabrication en série de 144 capteurs par impression jet d’encre sur feuilles d’ETFE.

### 2.1.4.1.2 Qualité des transistors pour des capteurs de gaz

– Record mondial (Fatima Bouanis, Costel Sorin Cojocaru : ERC NACRE).

Les nanotubes de carbone (NTCs) passionnent la communauté scientifique. Leurs propriétés électroniques, optiques et mécaniques exceptionnelle en font l’un des matériaux les plus prometteurs des nanotechnologies. Néanmoins des problèmes liés à leur manipulation, organisation et mise en forme se posent lors de leur intégration à des dispositifs. Jusqu’à la publication de nos travaux, à notre connaissance il n’existait pas de méthode fiable permettant de produire des NTCs aux propriétés ciblées : contrôle de la chiralité et du diamètre. Cette absence de contrôle des propriétés du matériau au niveau de la production est perçue comme un verrou fondamental pour l’exploitation des NTCs pour la réalisation des dispositifs électroniques : transistors à effet

## 2.1. FAITS MARQUANTS

de champs, NEMS, capteurs...

Nous avons donc étudié une nouvelle approche fondée sur la chimie de coordination de surface (Fig. 2.7) pour obtenir un meilleur contrôle des caractéristiques (taille, composition chimique) des nanoparticules métalliques classiquement utilisées comme catalyseurs pour la croissance des NTCs par CVD sur différents substrats. L'originalité de cette approche réside dans la capacité à contrôler la densité surfacique d'un ion métallique donnée en fonction de la surface géométrique du ligand utilisé et du nombre de sites de greffage présents sur la surface. Ceci permet de contrôler la densité de nanoparticules métalliques de catalyseur sur la surface ainsi que leur diamètre, c.-à-d. d'obtenir des tapis dilués de nanotubes de carbone monoparois (SWNTs). On envisage donc des dispositifs électroniques (transistors à effet de champ, capteurs chimiques/biologiques) fondés sur cette approche avec d'excellentes caractéristiques (mobilité de porteurs, pentes sous seuil...) et issus d'un procédé de fabrication très simple. Des SWNTs (Figure I.2a) sélectifs et de très bonne qualité ont été ainsi obtenus.

D'ores et déjà les transistors réalisés à base de ces SWNTs sur des substrats de silicium avec une couche d'oxyde de 100nm détiennent le record mondial pour les transistors à base de NTCs : un courant à l'état passant ( $I_{on}$ ) élevé et un rapport entre les courants dans l'état passant ( $I_{on}$ ) et dans l'état bloqué ( $I_{off}$ ) très élevé ( $10^9$ ) (Figure 2.7). Ces résultats dépassent largement les caractéristiques obtenues avec des transistors à nanotube de carbone unique.

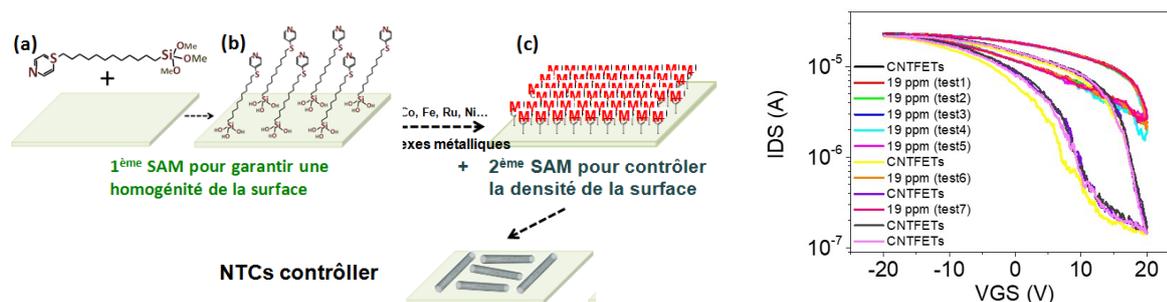


Figure 2.7 – A gauche : stratégie utilisée pour l'obtention de nanoparticules métalliques de catalyseurs de croissance à partir de films auto-assemblés de complexes métalliques; (a) silane, (b) silanisation; (c) auto-assemblé de complexes métalliques. A droite, performance des nano-tubes non-fonctionnalisés comme capteurs de gaz, la sensibilité atteint une dizaine de ppb.

La synthèse de nanotubes à chiralité connue a permis de réaliser des transistors à effet de champ sensibles aux Nox. On en améliore la sélectivité grâce à la fonctionnalisation des nanotubes par différents complexes métalliques.

### 2.1.4.2 Equipements d'envergure

#### 2.1.4.2.1 Equipex Sense-City

Équipement unique en Europe, Sense-City permet de réaliser de nombreuses expérimentations sur la ville connectée, l'IoT en milieu urbain, la qualité de l'air, l'énergétique du bâtiment et du quartier, la mobilité et les infrastructures intelligentes. Température et hygrométrie, pluie, rayonnement solaire, pollutions liquides ou gazeuses, écoulement des eaux dans le sol, végétation en ville... véritable laboratoire de la ville durable, Sense-City aide à déployer de façon optimale dans les territoires des réseaux de micro-capteurs physiques, chimiques, optiques et mécaniques, afin d'améliorer le pilotage en temps réel des écosystèmes urbains. Il permettra aussi de proposer des aménagements et matériaux de meilleure qualité environnementale. La construction de l'équipement principal est terminée.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

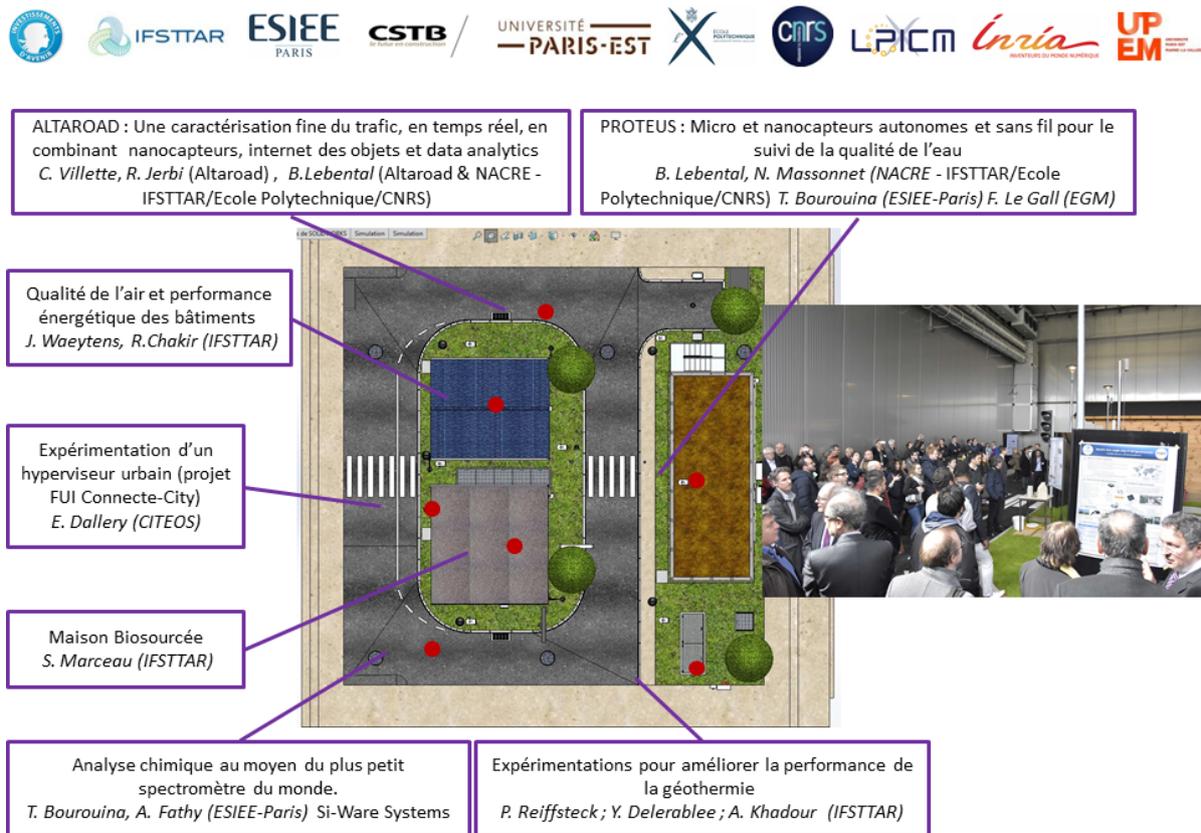


Figure 2.8 – Démonstrateurs lors de l'inauguration de Sense-City le 29/03/2018

Plusieurs projets collaboratifs ont démarré. Il s'agit de la ville connectée, projet FUI ConnectE-City mené par Vinci-Energies et impliquant Actility, la compréhension fine des performances de la géothermie urbaine avec la société ANTEA, les réseaux d'eau intelligents, projet PROTEUS dont on a parlé plus haut avec Aqualabo et d'autres entreprises, mais aussi l'évaluation de la qualité de l'air avec Ecologic Sense et Ethera, la construction en chanvre.

### 2.1.4.2.2 Transpolis

Bien que COSYS n'ait pas joué un grand rôle dans la constitution de cette plate-forme de classe mondiale (figure ??), hors participation au comité scientifique et au comité de pilotage, la plate-forme va jouer un rôle capital pour la mise au point d'offres de mobilité.

### 2.1.4.3 Impacts

Nos algorithmes de régulation de la circulation ferroviaire issus du projet On-time ont été adoptés par TU-Delft pour les travaux confiés à leurs doctorants, preuve d'un leadership européen puisque TU-Delft développe des outils concurrents. Ces nouveaux algorithmes très efficaces démontrés en situation réelle pour la gestion des perturbations modérées du trafic ferroviaire et la réingénierie des horaires en cas de perturbations importantes se trouvent aujourd'hui capitalisés dans la plate-forme RECIFE-MILP. Une partie de ces concepts et outils rentre actuellement dans les processus métier de la SNCF.

Comme rappelé figure ??, Mitsubishi est devenu l'un de nos plus gros partenaires indus-

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

triels. Suite aux premiers échanges approfondis qui ont précédé la signature de l'accord-cadre, Mitsubishi a inclus Satory dans sa carte d'Europe des centres de compétence qui comptent en composants de puissance.

Par ailleurs, la RATP a décidé de changer le rail du RER A, ce qui occasionne la coupure en août de la ligne A dans Paris intra muros, soit le segment le plus fréquenté du monde, grâce à nos travaux sur la Maintenance Prédictive.

Enfin, notre protocole, indépendant des technologies propriétaires, d'évaluation conjointe des marquages et caméras embarquées pour le Véhicule Automatisé a été adopté par le plan NFI éponyme. Original, il fait jouer un rôle symétrique au véhicule et à l'infrastructure. Il ouvre des questions difficiles comme évoqué dans le projet (Technologies Transformantes).

### 2.1.4.4 Nouvelles thématiques

On estime important de renouveler régulièrement ou de faire évoluer les thématiques de recherche. C'est ainsi que pratique COSYS. Le développement de la thématique Radio Intelligente pour les transports guidés résulte du croisement favorable d'une compétence sur la couche physique de la propagation des ondes radio et d'une compétence métier acquise de longue date grâce à un rapport étroit au terrain qui caractérise notre action.

### 2.1.4.5 Congrès

Signalons le succès de deux congrès internationaux de taille significative que l'on a organisés : EWSHM2014 avec plus de 600 participants et Rail Lille 2017 avec 350 personnes. Les deux manifestations ont suscité un enthousiasme général quant à leur qualité et leur intérêt.

### 2.1.5 Innovation

On estime que le transfert ou la co-création d'outils opératoires a permis la création de plus de 80 emplois dans le secteur privé, dont près de 45 chez Stanley Robotics uniquement.

#### 2.1.5.1 Start-ups et Joint-Venture

Le département a été à l'origine de plusieurs start-ups pendant la période sous revue.

1. ECOTROPY : La start-up ([www.ecotropy.fr/](http://www.ecotropy.fr/)) a été créée en 2016 par Alexandre Nasiosopoulos à l'issue d'une maturation au sein du département. Sa vocation est d'offrir des produits et des services pour rendre les bâtiments plus confortables et plus économes en énergie grâce aux technologies numériques et à l'exploitation des données. La société valorise des outils et méthodes développés au sein des projets MÉMOIRE (Modèles d'optimisation enrichis par capteur) et PRECCISION (Méthode d'audit et pilotage énergétique des bâtiments), à savoir le logiciel ReTrofit (REal Time state paRameter indentiFication Toolbox for building energy services) et le Brevet Buildscope (Dispositif d'audit global instrumenté de bâtiments). Le développement de Retrofit se poursuit à l'IFSTTAR, pour la route à énergie positive, la détection de défauts et le calcul sur GPGPU. Le gestionnaire de version permet d'envisager des passerelles entre la version ECOTROPY et la version IFSTTAR. On vise à terme la création d'une SCR pour co-créer le corpus de connaissances et d'outils qui permettront de renforcer le positionnement sur le marché du pilotage énergétique et de la garantie de performances.
2. Stanley Robotics : Le projet MIL avait abordé la question du stationnement automatisé et du valet de parking. A l'issue du projet, Clément Boussard et Aurélien Cord ont créé la société Stanley Robotics qui développe un service et un matériel nécessaire au valet

de parking automatisé pour aider les gestionnaires d'aéroport à exploiter des espaces qui ne reçoivent pas de public, beaucoup moins onéreux qu'un parking. L'optimisation de l'espace occupé apporte aussi un gain. La société a embauché plus de 40 personnes en moins de 3 ans et l'aéroport CDG a ouvert le service dès la 2ème année.

3. Altaroad : en 2017, le projet NANOASPHALT de route intelligente par nano-capteurs brevetés, porté par B. Lebental au sein de l'équipe NACRE, s'est concrétisé par la création de la start-up ALTAROAD, incubée chez AGORANOV et dotée d'une équipe de 6 experts. La start-up suit une approche "lean", en co-crédation avec ses premiers clients, qui lui permet d'optimiser à la fois sa technologie, ses algorithmes et ses méthodes de mise en oeuvre pour créer un service optimal permettant, par exemple, de détecter l'empreinte ou le poids d'un véhicule spécifique, de piloter une gestion du trafic dans la ville intelligente, d'identifier les zones de l'infrastructure à entretenir, ou de détecter rapidement les situations à risque (verglas, contresens, décalage de véhicule automatisé). Le pesage précis, en temps masqué et sans consommation d'espace, des camions qui entrent et sortent des chantiers urbains sous-tend une nouvelle façon prometteuse de facturer les matériaux. L'intégrabilité des tapis dans les matériaux de construction et leur compatibilité avec les procédés de construction apporteront par ailleurs une aide précieuse à la maintenance prédictive, voire à la gestion du trafic.

La CEO est issue du privé ainsi que la CPO. Le Master HEC de création d'entreprise a permis la rencontre entre scientifique et entrepreneuse. Ce modèle permet à l'instigatrice de la technologie de rester à l'IFSTTAR et de créer une autre start-up sur le même modèle. Par ailleurs, la société repose donc sur un trio entièrement féminin.

4. Luxondes : La société propose une visualisation en couleurs de l'environnement électromagnétique d'un composant, en vue de l'évaluation rapide de sa compatibilité électromagnétique. La société développe et fabrique des outils de mesure et de visualisation réalistes en temps réel de champs électromagnétiques, rendant accessible le message scientifique autour du traitement et de l'analyse des ondes électromagnétiques. Ces outils de visualisation instantanée convertissent en informations de couleur les ondes électromagnétiques dans une gamme chromatique variable selon leur intensité. Destinées aux mondes de l'industrie, de la recherche et de l'éducation, les solutions Luxondes rendent accessibles le traitement et l'analyse des ondes électromagnétiques. Bien que créée en 2011, c'est réellement en 2015 que débute la mise en visibilité et la mise en vente du produit phare, le gyroscanfield, et de sa version plate, la "dalle". Ces outils de CEM ont attiré l'intérêt industriel d'Orange et l'intérêt scientifique de l'ESPCI (Matthias Finck).
5. TACV : La jeune société co-fondée en 2016 par Gérard Coquery, DR émérite, propose des innovations sur la base de moteurs linéaires asynchrones, et ce jusqu'à leurs validations : lanceur de drone, booster et frein linéaire pour le ferroviaire, propulsion à grande vitesse, transmission par induction à grande vitesse. La société devrait s'appuyer sur la roue de Grenoble, outil expérimental exceptionnel pour la validation de beaucoup de technologies d'interfaces sol-mobile à grande vitesse.
6. Civitech ESI : Afin de valoriser les travaux sur le développement de la plate-forme de Simulation de Véhicules, d'Infrastructures et de Capteurs (SiVIC), l'IFSTTAR a créé en 2009 la start-up CIVITEC (développement et valorisation de pro-SiVIC). SiVIC et le savoir-faire concernent la simulation numérique de capteurs et de l'environnement routier. L'offre commerciale permet la validation virtuelle des systèmes de détection et, au-delà, des systèmes intelligents d'aide à la conduite potentiellement automatisée en couplant les systèmes de détection et la dynamique du véhicule. En 2015 on a créé une joint-venture avec ESI autour de la société CIVITEC qui s'accompagne d'un contrat de

collaboration avec l'IFSTTAR ainsi que de nouveaux accords de licence. Deux agents de COSYS assurent un conseil scientifique chez ESI. La plate-forme de simulation ESI Pro-Sivic a été présentée au Consumer Electronic Show de Las Vegas en 2017.

La coopération entre ESI et l'IFSTTAR s'est aujourd'hui étendue et implique le département TS2. Si la Méthode de qualification des modèles radar de pro-SiVIC reste cruciale pour le déploiement international de Pro-siviC, l'intérêt commun porte désormais aussi sur la cognition. Enfin, la perspective d'un transfert à ESI du logiciel VOCO de dynamique ferroviaire se traduit par la formation de deux doctorants Cifre.

En sus des start-ups existantes, le département poursuit le projet de création de deux autres start-ups, SenseHydre (projet de maturation MICAD'O) et NEOVYA.

### 2.1.6 Route de 5ème génération

Le programme route de 5ème génération (R5G), qui a pour ambition de relancer l'innovation routière en lien étroit avec l'IDRRIM, est inscrit dans le Contrat d'Objectifs et de Performance de l'IFSTTAR et constitue l'un des projets transversaux porté par COSYS. Il nourrit l'ambition de relancer l'innovation routière en France, la décennie PIA ayant plutôt mis l'accent sur l'innovation des véhicules. Il a permis la traduction des problématiques routières entre le monde social des politiques publiques relatives aux infrastructures, typiquement le rapport Mobilité 21, et la recherche dans le secteur, typiquement le projet européen For Ever Open Road. Mené de façon ouverte avec l'ensemble des acteurs du secteur mais aussi d'autres secteurs d'activité, il a contribué, suivant la théorie de l'innovation ouverte, à intégrer de nouveaux acteurs. De façon analogue, l'objet-frontière R5G a permis d'intéresser les politiques publiques thématiques, notamment celles relatives à l'énergie, aux politiques sectorielles relatives aux infrastructures.

Aujourd'hui, la R5G est devenue la marque bien visible en France et en Europe de l'implication décisive de l'U-cible dans la transition énergétique et la mutation des transports. L'appel ADEME Route du Futur consacre l'appropriation du concept par tous les acteurs, en marche vers un changement d'échelle et de statut des innovations propices au déploiement de la mobilité coopérative, du véhicule automatisé, de l'électromobilité et de l'intégration au smart grid énergétique. L'implication actuelle dans le projet I-Street va permettre de consolider les acquis et de faire un pas significatif dans l'innovation territoriale, en lien avec les démonstrateurs R5G@MLV et FUTURE. Eiffage a en effet décidé de s'investir dans la rénovation urbaine innovante, d'une part à travers un projet de régénération du RD199 dont le cahier des charges a fait l'objet d'un projet Ecocité 2, R5G@MLV, d'autre part à travers un gros projet d'innovation collaboratif que l'ADEME finance à hauteur de 10 millions d'euros dans le cadre du PIA, I-Street (Innovations Systémiques au service des Transitions Ecologiques et Energétiques dans les infrastructures routières de Transport) porté par le groupe Eiffage, en partenariat exclusif avec Total Bitume, OliKrom et l'IFSTTAR. Six briques technologiques seront développées, d'une industrie routière plus écologique jusqu'à la route intelligente, instrumentée et connectée, en passant par la route préfabriquée/démontable et un marquage routier innovant et plus sûr. Le démonstrateur R5G@MLV s'appuie sur le constat d'Epamarne que «le RD 199, de par ses caractéristiques géométriques et sa situation géographique, est l'infrastructure permettant de mettre en œuvre des démonstrateurs de route innovante»; l'établissement a mis «à la disposition de l'IFSTTAR cette partie du domaine public routier départemental, pour faciliter la réalisation de démonstrateurs de route à énergie positive.»

Lors de l'Automobile Forum à Strasbourg, en présence de Jean TODT (président FIA), Pierre COPPEY, DG délégué de Vinci chargé des concessions, a annoncé qu'en coopération avec l'Ifsttar, la portion d'autoroute A355 "Grand contournement Ouest" de Strasbourg que Vinci construit sera un «Open Highway Living Lab» de type R5G.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

Une étude de l'APUR pour la DiRIF sur l'insertion urbaine des autoroutes a recommandé de transformer l'A1 en démonstrateur R5G, en appui de la candidature de Paris aux JO2024.

### 2.1.6.1 Grands comptes

Comme indiqué plus haut, la démarche d'innovation ouverte dans laquelle le département s'implique a rendu naturelle la conclusion de partenariats importants avec de grands acteurs. L'accord-cadre avec Mitsubishi se nourrit de thèses Cifre qui s'enchainent et facilitent aussi le montage de projets collaboratifs. Les thématiques incluent la 5G pour le ferroviaire et surtout les méthodologies de vieillissement des composants de puissance. On a reçu à Satory la direction de Mitsubishi Electric Japan.

Avec la SNCF et ses différents EPIC, on a renouvelé complètement un accord cadre de coopération qui porte aujourd'hui sur l'IoT pour les systèmes critiques, le guidage des parcours techniques, la gestion de la circulation ferroviaire, avec plusieurs thèses Cifre.

Dans le domaine de la mobilité autonome, la conclusion de partenariats parfois très substantiels avec Renault, Transdev, Keolis, Alstom, VALEO, entre autres, sans compter les ITE comme VEDECOM dont ces industriels sont membres fondateurs pose la question d'une cohérence d'ensemble sur laquelle la département a porté son attention, avec la direction de l'établissement. La nomination en cours d'un coordonnateur IFSTTAR pour le véhicule autonome est censée faciliter cette démarche.

La transformation digitale des métiers de la construction renouvelle par ailleurs l'intérêt des grands constructeurs comme VINCI (Sixense, Eurovia), Eiffage ou Colas pour les compétences développées dans le département COSYS qui accompagnent les acteurs dans leur transition digitale et écologique.

Plusieurs relations industrielles se trouvent protégées par des NDA, que l'on respecte scrupuleusement.

### 2.1.6.2 Prix

Le groupement IFSTTAR (COSYS/SII) / SNCF Réseau / STIMIO est lauréat du Concours Européen d'innovation Ferroviaire pour un système de télésurveillance à base de MEMS (microsystèmes associant la mécanique, l'électronique, l'électrique) et de modules sans-fil basse consommation embarqués sur les pédales électromécaniques, ce qui permet de localiser précisément l'équipement, de déclencher des actions de maintenance préventive pour se prémunir d'un incident et de collecter des données complémentaires valorisables.

Dans International Innovation A. Nassiopoulos explique comment réduire les impacts environnementaux et économiques du chauffage et de la ventilation dans les bâtiments en prédisant les conséquences sur la consommation des conditions météorologiques et du comportement des habitants. Le contrôle optimal informé de cette manière permet de gagner 30% sur le bilan carbone.

### 2.1.7 Appui aux Politiques Publiques (APP), expertises

Cette activité particulièrement abondante contribue à la visibilité de l'institut et reconnaît la valeur des équipes et des personnes qui y contribuent.

Le Handbook "Assessment of positioning performance in ITS applications" consacre la fin de l'action COST Sappart, pilotée par F. Peyret. Elle a permis de mettre au point une référence en matière d'évaluation des performances des systèmes de positionnement, d'importance majeure pour le déploiement du véhicule automatisé.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

ECOMOUV a par ailleurs confié à l'IFSTTAR/COSYS/GEOLoc le soin d'homologuer le système eco-taxe poids lourds. On a émis 23 avis d'agrément pour les laboratoires en charge des essais et 66 avis d'homologation sur les chaînes de collecte et de contrôle.

L'étude MELODIC pour la DGTIM ayant servi à alimenter la table ronde ministérielle du congrès ITSWC à Bordeaux s'est poursuivie par un workshop organisé par le CGDD (lien recherche finalisée et APP) et une participation à la gouvernance de l'initiative française ITS4Climate qui a vocation à soutenir les efforts méthodologiques dans la durée.

Le rapport sur les situations critiques de cas d'usages VP pour le Véhicule Automatisé a reçu un excellent accueil des pays leaders dans le domaine comme le Japon. La méthode, désormais appelée "the french method" a étayé la position de la France sur le Véhicule Automatisé au dernier sommet du G7 Transports en Italie (Cagliari pour le volet Transport).

Le rapport Galileo pour le VA souligne un fort besoin d'expérimentations pour que les industriels progressent dans l'innovation sur les véhicules automatisés et pour que les pouvoirs publics disposent d'un volume suffisant de données afin de légiférer sur de bonnes bases : La complémentarité des senseurs (Galileo, autres GNSS et senseurs non GNSS) pour une géolocalisation précise et robuste, la complémentarité entre une navigation qui s'appuiera sur les systèmes satellitaires, une cartographie très précise et la perception de l'environnement du véhicule constituent des questions ouvertes. Nous avons contribué aux travaux comme représentants du monde académique.

La note N° 5 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) parue en juillet 2018 était consacrée aux systèmes de transport à hypergrande vitesse sous vide (Hyperloop). Pour la constitution de ce dossier, l'équipe de Cédric Villani a sollicité notre expertise sur les aspects sécurité et les questions du cadre réglementaire de ce type de système de transport.

Dans le domaine urbain, Le Vademecum «démonstrateurs villes durables, un repère pour l'action» a été utilisé en France et jusqu'en Pologne.

L'expertise ESCO artificialisation des sols a par ailleurs mobilisé une bonne partie de l'IFSTTAR et on a contribué à la relecture critique de l'ensemble des documents.

La Société du Grand Paris a confié au CEREMA et à l'IFSTTAR une mission d'assistance technique et d'expertise structurelle pour la réalisation de la gare de la Défense, sur la ligne 15 Ouest du Grand Paris Express. Le Cerema et l'IFSTTAR ont réalisé, en complément des calculs réalisés par la maîtrise d'œuvre, une modélisation numérique du transfert de charge des poteaux de la « gare fantôme » existante vers un ensemble de fondations sur micropieux, avec le logiciel CESAR-LCPC, développé par l'IFSTTAR. Les résultats confortent ceux obtenus par le maître d'œuvre et valident la solution proposée. Ils permettent également d'étudier l'influence de certains détails géométriques, des caractéristiques de résistance des calcaires, et des efforts de précontrainte dans les butons.

Enfin, le livre blanc du Forum métropolitain du Grand Paris "Vers des mobilités durables optimisées et intelligentes à l'horizon 2030 en Île-de-France", auquel on a participé, met en exergue la R5G comme paradigme de la transformation. Cette visibilité crée en retour des opportunités partenariales à l'occasion de l'appel d'offre fondé sur le livre blanc.

### 2.1.8 Recherche-Action et Living Labs

#### 2.1.8.1 Voies ferrées en grave-bitume ou en béton

Depuis 30 ans, de nombreuses recherches sur le contrôle de santé ou les matériaux des infrastructures de transport se déroulent en partie sur les infrastructures en service. Pa exemple, la LGV Bretagne Pays de la Loire, très innovante sur le plan des matériaux de l'assise ferroviaire,

## 2.1. FAITS MARQUANTS

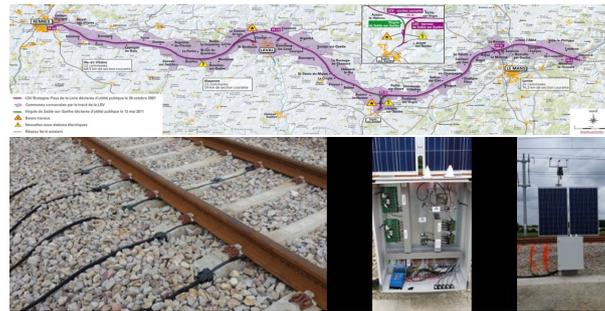


Figure 2.9 – LGV Pays de la Loire : une recherche action pour accélérer l'innovation

offre un laboratoire en action destiné à comprendre et appréhender le vrai comportement de nouveaux matériaux en place, ici de la grave-bitume. Les données récoltées au passage des trains par le biais d'une instrumentation détaillée (IFSTTAR-INRIA) alimentent une thèse au département MAST qui devrait consolider la maîtrise de ce nouveau concept d'infrastructure.



Figure 2.10 – Voie non ballastée, instrumentée à coeur par capteurs à fibres optiques et accéléromètres entre Gisors et Cerqueux. A droite les mesures de déformation au cours du temps.

Il en a été de même avec la ligne ferroviaire non ballastée déployée entre Gisors et Cerqueux au titre et à l'issue d'un projet collaboratif impliquant notamment Alstom, Railtech et Vossloh pour ce qui est des industriels. Cette voie ferrée en béton a été dotée de nombreux capteurs qui renseignent sur la capacité de la ligne à durer des décennies avant maintenance, a contrario des voies ballastées qui nécessitent de fréquentes opérations de maintenance, rendant la circulation impossible. Le concept de R5G couvre également les opérations visant à mieux comprendre, grâce à des capteurs variés, les matériaux locaux de plus en plus utilisés pour la rénovation des routes, afin de mieux programmer et concevoir les travaux suivants.

### 2.1.8.2 ERTMS pour la LGV-Est



Première du genre, on a certifié le système de signalisation TVM430/ERTMS 2 appliqué au prolongement de la LGV Est.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

### 2.1.8.3 Déploiement de la régulation d'accès coordonnée sur toutes les VRU d'IdF

Un long historique de projets avec les DIR (DIR-Nord, DIRIF...) a permis de mettre en place des dispositifs et algorithmes de régulation des systèmes de transport multimodaux sur les territoires : la gestion dynamique de l'autoroute périurbaine A25 à Lille a montré que la régulation des vitesses et des accès améliore drastiquement la fluidité du trafic, voire supprime les congestions. Elle a également fourni une preuve de concept en situation réelle que l'usage combiné des données issues des capteurs noyés dans la chaussée et des capteurs embarqués permet une prévision fine du trafic. Ces actions de longue haleine ont débuté au début des années 2000. Le déploiement sur l'ensemble des voies rapides d'Ile-de-France devrait encore durer 5 ans. La simulation détaillée du trafic et son observation sous-tendent la stratégie de régulation en termes de répartition des points de contrôle et d'algorithmes. Quoique le déploiement reste aujourd'hui partiel en Ile de France, l'amélioration enregistrée à ce jour s'avère déjà significative : les temps de trajets se trouvent diminués d'environ 10%.

### 2.1.8.4 Laboratoire des usages en Nouvelle Aquitaine

Le projet européen C-the-Difference, objet de plusieurs articles dans la presse régionale et nationale, a retenu l'attention de la Ministre des Transports en particulier pour sa fonction GLOSA («Green Light Optimised Speed Advice» - cf. paragraphe 2.5.1.4) qui permet de délivrer un conseil de vitesse optimale pour franchir les carrefours au feu vert. Ce service s'est développé en Nouvelle Aquitaine, à Bordeaux, avec les acteurs locaux comme Geoloc Systems, mais aussi à Lyon dans sa version PL. S'utilisant comme une application sur Smartphone, il a fait l'objet de milliers de téléchargements de la part des usagers au quotidien.

## 2.1.9 Ferroviaire

On a vu que l'IFSTTAR joue un rôle majeur dans l'IRT Railenium, en particulier COSYS. Les équipes de Railenium sont hébergées à Villeneuve d'Ascq. Plusieurs post-doctorants et doctorants financés directement par Railenium sont hébergés dans les laboratoires.

Le département COSYS a fortement contribué sous le chapeau de Railenium à la réponse du consortium SmartRaCon (Smart Rail Control) piloté par le DLR pour devenir membre associé de l'entreprise commune européenne Shift2Rail pour l'innovative Programme 2 - Advanced traffic management & control systems. Dans le cadre de SmartRaCon, le département est impliqué dans les projets successifs X2RAIL sur les Systèmes avancés de gestion et de contrôle du trafic coordonnés par Ansaldo. Plus de dix chercheurs de l'IFSTTAR contribuent aujourd'hui aux projets X2RAIL-1 et X2RAIL-2 sur les futurs systèmes de communication sans fil adaptatifs pour le contrôle-commande, la virtualisation des essais, la cyber-sécurité des systèmes, la localisation GNSS pour servir le concept de balise virtuelle ERTMS, le développement de nouvelles solutions technologiques embarquées pour assurer en sécurité l'intégrité du train, l'utilisation des méthodes formelles dans le processus de développement et de validation des applications critiques dans le ferroviaire, l'harmonisation de l'usage des outils de gestion de trafic afin d'optimiser l'exploitation des réseaux ferroviaires et le couplage virtuel de trains.

De nombreux autres projets Railenium se succèdent depuis le démarrage de l'IRT. MORIPAN - (MOdèle de RIisque pour les PASSages à Niveau) développe des modèles fins de l'accidentologie aux passages à niveau et Analyse l'efficacité des solutions potentielles pour améliorer la sécurité. ERTMS régional propose des outils pour spécifier le besoin des lignes ferroviaires utilisant le système de signalisation «ERTMS régional». IN2RAIL vise à proposer une architecture de capteurs et des protocoles de communication pour la surveillance de la consommation énergétique. ESTIMATE fait un état de l'art technico-économique des solutions innovantes pour les commu-

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

nications très haut débit à bord des trains, publiés dans un ouvrage chez Springer. OPTINFRA optimise la planification horaire lors de travaux de maintenance des infrastructures ferroviaires. Enfin, CERVIFER revisite la simulation numérique de la dynamique ferroviaire et de l'interaction train-voie.

Dans le cadre du programme train autonome de Railenium, un appel à manifestation d'intérêt a été lancé en 2017 vers les industriels et les académiques fondateurs de Railenium. Des propositions scientifiques ont été retenues. Un démonstrateur Fret et un démonstrateur Voyageurs sont en préparation. Le Projet TC RAIL déjà lancé porte sur la télécommande à distance d'une locomotive depuis un poste de contrôle. On y intervient sur les aspects télécommunications sans fil, cybersécurité, CEM, sûreté de fonctionnement, analyse de risques.

### 2.1.10 Appui aux Politiques Publiques & Expertise, complément

La prestation d'expertise au CGEDD et l'IGA sur les verrous liés au déploiement du Véhicule automatisé et connecté appuie la préparation des réglementations à mettre en place.

Scoop a débouché sur un cahier des charges détaillé des futurs systèmes de transport coopératifs prenant en compte des questions clés de production industrielle.

On a accompagné la DGITM du MTES dans la mise au point de la politique nationale en matière de Mobilité automatisée et connectée :

A la demande de la DGTIM, on a participé aux rencontres franco-allemandes sur la mobilité connectée et les véhicules automatisés.

Par ailleurs, une étude sur l'analyse de sécurité des transports publics automatisés et de leurs parcours a donné lieu à une réunion fin 2017 qui a lancé le développement d'une méthode qui permettrait d'effectuer une analyse de sécurité a priori du parcours des navettes, en compte les événements redoutés bien identifiés, les points singuliers de l'infrastructure sur le parcours (rond points, intersection, passage piéton...), les manœuvres, le trafic, les équipements d'infrastructure. Le travail a également conduit à interagir avec la NFI « Navettes Autonomes », en lien avec le STRMTG et VEDECOM.

A la demande de l'IGF/CGE, l'IFSTTAR a contribué, de façon interactive, à la définition d'une feuille de route pour la filière industrielle du véhicule connecté incluant les moyens d'accompagner une évolution de l'usage de l'automobile. Cette réflexion a permis de mieux cerner les enjeux du développement d'une filière économique et industrielle ainsi que les leviers d'action mobilisables par les pouvoirs publics pour encourager ou favoriser le développement de la filière.

Enfin COSYS accompagne la mission des transports intelligents (MTI) dans son travail prospectif et de parangonnage « La Vie Robomobile », dont le premier atelier national s'est tenu le 2 mai 2017 (code 3.2), mais aussi dans les réflexions du groupe de travail « Organiser un réseau des territoires d'expérimentations », action que l'institut a prise en charge.

En guise de livrable premium à une mission pilotée par le CGEDD et l'IGA, l'IFSTTAR a produit un fascicule intitulé Regards croisés sur le véhicule autonome, porté à la connaissance d'Anne-Marie Idrac qui coordonne la stratégie nationale sur le véhicule automatisé à la définition de laquelle l'IFSTTAR a contribué.

Dans le cadre des Assises de la mobilité (septembre à décembre 2017), l'Ifsttar a participé aux six ateliers (mobilités plus propres, plus connectées, plus solidaires, plus sûres (code 2.2), plus soutenables, plus intermodales), ainsi qu'à l'action sur l'innovation en produisant des éléments de contenu notamment le profil des start-ups créées ou en maturation. Cette action se poursuit en 2018 par la rédaction de notes d'appui aux politiques publiques sur des thèmes relevant des axes 1 et 3, ciblés par le projet de loi d'orientation des mobilités (LOM), dans le cadre du groupe miroir animé par la DGITM.

## 2.1. FAITS MARQUANTS

---

Cette réflexion menée aux Assises de la mobilité connaît un approfondissement : les associations Route de France, IDRRIM, ATEC et TDIE ont demandé à l'Ifsttar de réaliser une étude prospective sur l'impact des nouvelles mobilités (véhicule automatisé, électrique...) sur les infrastructures routières et leurs équipements. Celle-ci doit identifier les lieux de réflexion actuels en France sur le sujet, les communautés d'acteurs, les dénominateurs communs, avec une analyse de la place de l'infrastructure routière dans les débats. Elle donnera un état des réflexions au niveau européen en interaction éventuelle avec le niveau national et identifiera les impacts globaux ou particuliers en les hiérarchisant en termes d'échelles de temps, de réseaux et/ou de territoires.

A travers l'AIPCR, l'IFSTTAR établit des textes de référence en appui aux politiques publiques. Il assure le secrétariat francophone de la TF B1 (C-ITS : Challenges and opportunities for road design and operations) et a rédigé trois chapitres dans le rapport final sur l'usage des C-ITS pour l'information sur le trafic, les conditions météorologiques l'information sur le trafic, les conditions météorologiques et les déviations, les émissions de gaz à effet de serre, la gestion du parc d'infrastructures. l'IFSTTAR intervient aussi dans la TF B2 «Automated vehicles : challenges and opportunities for road operators and road authorities».

Par ailleurs, l'IFSTTAR participe au groupe OCDE-FIT « Policy to extend life of road assets ». Ce groupe vise à recenser les meilleures pratiques pour optimiser la durée de vie des infrastructures routières, notamment vis-à-vis du trafic de poids-lourds.

Sur le plan de la sûreté, L'étude ESTTER pour la DGITM/DSUT a permis de dresser une cartographie critique des projets de recherche dans le champ de la sûreté des transports terrestres conduits entre 2006 et 2016 en France et en Europe. Un second volet porte sur une proposition d'une feuille de route en matière de recherche et développement pour la sûreté dans les transports guidés centrée sur les thèmes de détection et de surveillance. L'étude ESTTER alimentera la réflexion du Ministère de la Transition écologique et solidaire et de ses partenaires, opérateurs notamment, en matière de prospective dans le champ de la sûreté dans les transports terrestres.

Enfin, l'IFSTTAR pilote le sous-groupe NFI Véhicule Autonome sur la signalisation horizontale. L'objectif de ce sous-groupe de travail est de proposer un protocole permettant de vérifier la bonne adéquation entre la signalisation horizontale et les futurs capteurs embarqués dans les véhicules automatisés.

Ces actions s'amplifieront suite au lancement de la stratégie nationale pour le développement du véhicule automatisé. La DGITM a invité l'IFSTTAR à participer aux groupes de travail réunis pour en instruire les différents chapitres.

L'animation d'une équipe de 6 personnes sous l'égide de Certifer a permis de conduire une inspection experte du déploiement du GSM-R dans le tunnel sous la Manche. De plus, une mission de conseil et d'assistance technique auprès d'Eurotunnel dans le cadre du déploiement d'une ligne haute tension (1000MW) dans le tunnel ferroviaire assuré par la filiale d'Eurotunnel (ElecLink) a aidé à l'évaluation des études CEM pour vérifier l'absence d'impact sur les équipements de sécurité.

Une expertise APRR sur A480 a permis de jeter les bases d'une extension et d'une transformation de cette autoroute en R5G en symbiose avec la smart city Grenoble.

Une expertise pour Thorn sur l'éblouissement des piétons par l'éclairage public a débouché sur une nouvelle méthodologie de prédiction de l'éblouissement et une aide à la conception d'un éclairage par LED, accélérateur de transition énergétique, 1ère valorisation industrielle des mesures BRDF issues de notre équipement de référence.

Ces expertises consomment une part significative des énergies disponibles mais nourrissent en retour la réflexion sur les sujets de recherche à développer tout en en garantissant la pertinence aux regard des enjeux de société.

### 2.2 Thématique « Systèmes de transport de nouvelle génération »

Cette thématique a été présentée en 1.3.3. On donne ici des résultats en complément des faits marquants.

#### 2.2.1 Modélisation et régulation multi-échelle et multimodale des réseaux

##### 2.2.1.1 Modèles de trafic et leur extensions

Un résultat majeur de la période 2013-2018 est l'unification des représentations du trafic (micro / méso / macro ) dans le cadre du modèle LWR (Lighthill-Whitham-Richards). En effet, l'application au domaine du trafic de la théorie variationnelle a permis de formuler le modèle LWR sous la forme d'un problème de contrôle optimal. Suivant l'espace dans lequel ce problème est ensuite résolu, il est possible de dériver une formulation macroscopique (flux), microscopique (centrée sur le véhicule) ou mésoscopique (localisation des véhicules en entrée et sortie des liens) qui sont complètement équivalentes. Ceci a permis d'unifier des approches qui étaient jusqu'alors perçues comme différentes. L'IFSTTAR a notamment fortement contribué sur les approches micro et méso en développant notamment un simulateur méso particulièrement adapté au calcul rapide sur les grands réseaux autoroutiers. En réponse à la transition des systèmes de transports vers une multimodalité croissante le Département développe des outils spécifiquement adaptés à cette évolution.

Le modèle LWR est concerné par les grandes "masses de trafic" et décrit la dynamique du trafic véhiculaire dans ses aspects macroscopiques et cinématiques. Le modèle GSOM («Generic Second Order Model»), développé par COSYS, est un modèle qui étend le modèle LWR en intégrant des "attributs" relatifs au comportement, à la nature ou aux propriétés des véhicules et des conducteurs, par exemple le type du véhicule (particulier, poids lourd) ou de motorisation (électrique, hybride, carburants fossiles), le service (taxi, bus, à la demande), l'information et la communication, mais aussi la charge de la batterie, la température du moteur (applications aux émissions de polluants, à la gestion du trafic), sans que cette liste soit limitative. Ces attributs rendent le modèle GSOM bien adapté à la multi-modalité routière. Ce modèle est progressivement intégré dans la plateforme MAGISTER utilisée dans des actions telles la gestion par contrôle d'accès coordonné des autoroutes de l'Ile-de-France et l'évaluation de la gestion des autoroutes péri-urbaines de l'agglomération Lilloise.

L'avancée de rupture de cette période concerne l'évolution du modèle GSOM vers la multi-modalité complète. L'idée de base est de considérer deux flux, véhicules et passagers, le flux des passagers étant subordonné à celui des véhicules. Les passagers apparaissent comme un attribut spécifique du modèle GSOM, et des attributs passagers spécifiques (itinéraire, connectivité, motif de déplacement...) peuvent leur être attachés. L'intermodalité s'exprime au niveau des noeuds du réseau. L'avantage de ce type d'approche par rapport aux approches de type automates cellulaires réside dans la calculabilité : le modèle se prête bien aux questions de gestion et de contrôle. Il décrit en natif la mixité entre l'auto-partage et le véhicule individuel et recentre la question du trafic sur la mobilité des personnes.

La modélisation des réseaux de transports à très grande échelle constitue un défi important, que ce soit dans un contexte de planification et d'études (la Région IdF, les collectivités locales sont très demandeuses) ou un contexte de gestion des systèmes de transport (l'information pourra circuler à grande échelle et instantanément dans les réseaux, et en impacter la dynamique globale). Parmi les verrous scientifiques importants, citons : (i) la complexité des réseaux, (ii) la difficulté de disposer de recueils de données suffisants (même dans un contexte de véhicules et/ou conducteurs équipés), (iii) le complexité des calculs. Par exemple, le calcul d'un équilibre dynamique sur grand réseau demande actuellement plusieurs jours (voire semaines) de temps

de calcul, un point qui fait aussi l'objet d'investigations spécifiques dans le cadre d'une thèse. Dans ce contexte et en vue d'un appui aux politiques publiques, il importe de se doter d'outils adaptés : on développe un modèle bidimensionnel de trafic : le réseau y est approché par un milieu anisotrope (en fonction de la structure du réseau) et le trafic y est approché par un fluide bidimensionnel à plusieurs composantes. Le modèle s'interface avec un modèle GSOM viaire, mis en oeuvre pour les grandes infrastructures alors que le modèle bidimensionnel décrit le trafic sur réseau de surface dense. Ce modèle a connu une première application dans le cadre du projet Trafipollu.

Ces modèles à grande échelle, en formulation multi-agent ou macroscopique, servent aussi à simuler et à tester de nouveaux services de déplacements (stationnement intelligent, autopartage et vélo-partage, covoiturage dynamique, services d'information et d'alerte communautaire, véhicules connectés, etc.). Des services aux voyageurs tels que l'information personnalisées et communautaire, le guidage multimodal en temps-réel avec prise en compte des profils et préférences sont rendus possibles grâce à ces travaux.

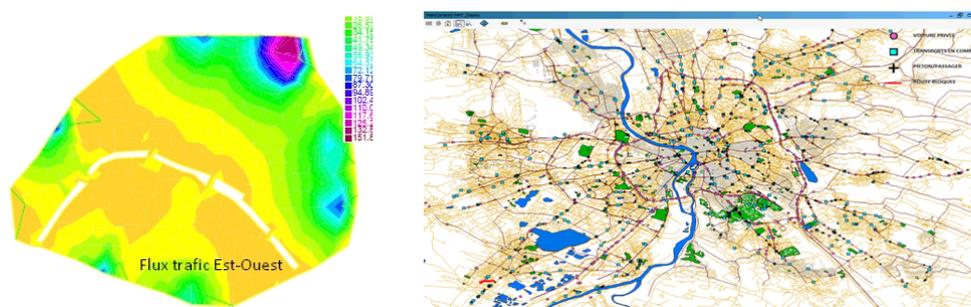


Figure 2.11 – Modélisation 2D du trafic à gauche, Plate-forme de simulation multimodale SM4T à droite

En ce qui concerne les modèles dynamiques de trafic à l'échelle des liens du réseau, plusieurs résultats sont à signaler. En ce qui concerne la modélisation des autoroutes, une limite bien connue des approches simplifiées du 1er ordre (type LWR) est la non-reproduction des chutes de capacité notamment aux niveaux des convergents (liées aux difficultés d'insertion des véhicules venant de la voie d'accès). La bonne estimation des capacités est essentielle pour une régulation efficace. Au travers d'une série de travaux analytiques consistant à intégrer le processus d'insertion microscopique et stochastique, des formules de capacité effective au niveau des convergents autoroutiers et des zones d'entrecroisement ont été proposées et validées sur des données empiriques.

### 2.2.1.2 Régulation du trafic multimodal et partage dynamique de l'espace

L'allocation dynamique de la voirie, en particulier en faveur des transports collectifs, est un autre sujet sur lequel les équipes de COSYS ont acquis une expertise ces dernière années avec le pilotage du projet ANR ADViCe visant à identifier les conditions optimales de l'allocation dynamique des voies de circulations, système qui permet d'affecter une partie du réseau routier à une classe de véhicules jugée prioritaire (TC, véhicules de secours) selon les conditions d'écoulement et les événements. La stratégie retenue ici est de réserver, lorsqu'un véhicule prioritaire est présent, une voie aux transports en commun . Un couloir de bus temporaire est alors créé. Ce système s'étend aux véhicules de secours, de police... Une expérimentation de la mise en place d'un tel couloir sur l'avenue Lacassagne à Lyon a eu lieu avec la Métropole de Lyon, le Sytral, Keolis, Eiffage et Egis. Les résultats ont montré un gain en temps de parcours ainsi qu'en ponctualité pour les bus parcourant le site.

## 2.2. THÉMATIQUE « SYSTÈMES DE TRANSPORT DE NOUVELLE GÉNÉRATION »

---

Des travaux ont également été menés sur la régulation dynamique des lignes de bus. En collaboration avec l'université GeorgiaTech (USA) une stratégie intelligente de retenue aux arrêts à partir des localisation des bus sur la ligne a été développée. Des premiers tests en simulation sur des données de la ville de Portland (USA) montre que cette stratégie est plus efficace que l'ensemble de celles proposées par ailleurs dans la littérature.

En milieu urbain, les modèles dynamiques de trafic ont été étendus pour mieux représenter des stratégies innovantes de partage de l'espace, e.g. couloir de bus dynamiques, usage mixte PL/bus des voies dédiées au transport en commun, modélisation des lignes de bus... Ces travaux portent majoritairement sur des corridors urbains et ont permis de mieux caractériser les niveaux de service à la fois pour le trafic et les transports en commun mais aussi de s'intéresser aux livraisons et de leur impact sur le trafic. Avec le CEREMA, on a rédigé un manuel des bonnes pratiques sur l'usage des modèles dynamiques, portant notamment sur le calage et la validation.

### 2.2.1.3 Modélisation bio-inspirée

La modélisation bio-inspirée pour la supervision de véhicules légers, qu'ils soient isolés ou en groupe a également été abordée avec des résultats concluants. Il s'agit de trouver des solutions innovantes au contrôle des véhicules. Les travaux réalisés sur ce sujet s'inscrivent dans le cadre d'une thèse CIFRE avec Renault et reposent sur l'utilisation du biomimétisme pour générer des concepts de véhicules décarbonés. Pour cela, la méthode de conception CK (Concept Knowledge de l'école des Mines) a été adaptée pour prendre en compte la bio-inspiration. Un concept de variation de vitesse a notamment été retenu et testé en conditions réelles. Ainsi, nous nous sommes inspirés des coureurs de demi-fond qui font varier leur vitesse en permanence afin de mieux utiliser leurs sources d'énergies aérobies et anaérobies. L'application à l'automobile a été de faire varier la vitesse lors de longues phases prévues initialement à vitesse constante. Les simulations et essais sur piste ont tous démontré qu'une légère variation cyclique de vitesse de l'ordre de 10 % permettait de réduire la consommation de carburant jusqu'à 25 % dans les meilleures conditions. On a réalisé un superviseur de véhicules automatisés inspiré, des oiseaux, des poissons ou des bactéries.

### 2.2.2 Modélisation coopérative multi-agents du trafic

Anticipant le développement et l'introduction des Véhicules Automatisés et Connectés (VAC) on part du principe que le déploiement de ces technologies connaîtra une période de transition plus au moins longue (une flotte de véhicules automatisés à 100 % ne sera pas produite avant 2045). Jusqu'à présent, les véhicules automatisés se développent de manière prédominante dans une optique centrée sur les véhicules, en mettant uniquement l'accent sur la sécurité. Leur durabilité au niveau du système, c'est-à-dire leur impact sur la congestion du trafic, est généralement ignorée par les développeurs mais intéresse beaucoup les autorités publiques. Cette question s'avère critique lors du déploiement de tous les services nouveaux de mobilité, dans la période de transition. On anticipe qu'elle se posera lorsque les véhicules automatisés co-existeront avec des véhicules à conduite humaine conventionnels dans un «trafic mixte». Par ailleurs, les Systèmes Coopératifs de Transport Intelligents (C-ITS) profitent des avancées récentes des technologies de la communication inter-véhiculaire pour permettre une optimisation de l'usage de l'infrastructure routière. De plus en plus de véhicules sont équipés de Systèmes Avancés d'Assistance à la Conduite (ADAS) et les nouveaux capteurs et périphériques communicants contribuent au développement des véhicules connectés qui s'avèrent prometteurs pour l'amélioration du flux de trafic.

C'est pourquoi on a réalisé une modélisation coopérative du trafic couplant la dynamique physique (un modèle de suivi de véhicule multi-anticipatif bilatéral qui intègre la communication

V2V), la dynamique informationnelle (communication inter-véhiculaire V2V) et la dynamique de contrôle. Les modèles développés ont été interfacés avec l’outil de simulation de trafic Symuvia sous forme d’une plate-forme, SymuCAT. Cet outil est utilisé pour évaluer les impacts des C-ITS sur le trafic, et pour dimensionner le déploiement de services coopératifs dans le cadre de plusieurs projets (e.g. SCOOP@F ; CTD ; C-ROAD, InterCor).

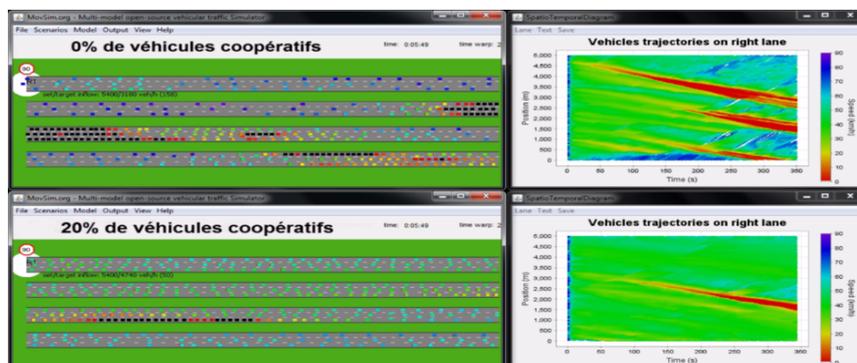


Figure 2.12 – Simulation des effets des C-ITS sur le trafic - plate-forme SymuCAT

## 2.2.3 Circulation ferroviaire

### 2.2.3.1 Planification des services ferroviaires

On a formulé en programmation linéaire mixte en nombres entiers («Mixed integer linear programming» - MILP) au sein de RECIFE-MILP le problème d’ordonnancement et de routage des circulations ferroviaires en phase opérationnelle. Le principal objectif de ces décisions est de limiter l’augmentation et la propagation de retards au sein d’une zone de contrôle qui correspond à l’ensemble des itinéraires que l’on peut commander à partir d’un poste d’aiguillage. Plus généralement, cette zone peut aussi s’étendre à plusieurs gares d’une ligne et ainsi correspondre au périmètre de contrôle d’un poste de régulation.

Le modèle RECIFE-MILP a été testé sur plusieurs types d’infrastructures avec un grand nombre de scénarios de perturbations dans le cadre du projet européen On-Time et du projet PREDIT SigiFret. Ce modèle permet d’envisager des gains de réduction de retards importants, les évaluations comparatives ont montré que ce modèle améliorait la qualité des solutions donc la réduction des retards de 10 à 80 % selon les configurations des infrastructures et les scénarios considérés. La référence utilisée pour ce parangonnage était aussi bien les règles de décision appliquée sur le terrain qu’un autre modèle d’optimisation (ROMA) développé à l’Université de Delft et qui était l’état de l’art dans ce domaine.

Plusieurs améliorations ont été développées récemment pour améliorer les performances du modèle RECIFE-MILP : meilleure calibration des paramètres de la méthode de résolution, génération d’inégalités valides qui réduisent l’espace de recherche, définition de schéma de décomposition du problème. Les expérimentations pour évaluer les performances du modèle RECIFE-MILP ont été réalisées en boucle ouverte ou en boucle fermée avec un modèle de simulation microscopique.

Le modèle RECIFE-MILP a été étendu afin d’être utilisé pour traiter deux autres problèmes de décision : l’adaptions du plan de transport pour planifier des opérations de maintenance de la voie (RECIFE-MAINT), la saturation d’une grille horaire afin d’évaluer la marge de capacité disponible pour de nouveaux services (RECIFE -SAT).

Par ailleurs, une modélisation microscopique du problème d’insertion des travaux de maintenance de l’infrastructure ferroviaire dans une grille horaire (D. Arenas) a fait l’objet d’un article

## 2.2. THÉMATIQUE « SYSTÈMES DE TRANSPORT DE NOUVELLE GÉNÉRATION »

---

classé premier parmi les dix meilleurs articles choisis par le comité scientifique de la conférence RailLille 2017. Il s'agit d'une avancée majeure pour l'exploitation et la maintenance améliorées des lignes.

### 2.2.3.2 Gestion de la capacité de l'infrastructure ferroviaire

La modélisation fine de 95km et 14 gares de la ligne Paris-Le Havre a mis en lumière les bénéfices de la régulation via des modèles microscopiques de voies ferrées : le doublement du nombre de sillons possibles, sous réserve d'accès aux données de la voie. On peut donc doubler la capacité effective de lignes de fret si on dispose des données précises des lignes ferroviaires. La ressource "capacité" est donc exploitable via des modèles microscopiques, l'accès aux données utile reste à intégrer au processus métier de l'exploitant.

### 2.2.4 Nouveaux usages et services de mobilité

#### 2.2.4.1 Réflexion sur les leviers de l'innovation dans les transports

L'évolution majeure des dix dernières années en termes de pratiques de mobilité repose, en partie, sur un changement de rapport à l'automobile qui tend vers une voiture servicielle plus qu'objet de représentation sociale. Les grandes agglomérations présentant à la fois des contraintes fortes à l'usage et à la possession d'une voiture la question de la possession d'une voiture à titre privé et de façon permanente laisse en effet peu à peu la place à la possibilité de bénéficier des avantages « à la demande ». Ainsi de nouveaux services de mobilité se sont rapidement développés dans les métropoles. le projet INNOV a opéré un parangonnage international de la création et de la croissance des entreprises sur le créneau de la mobilité. Il a interrogé l'innovation sous-tendue par le déploiement majeur de capital-risque accompagnant la naissance de start-ups dédiées aux nouveaux marchés de produits et services et visant un retour rentable des investissements financiers au travers de nouveaux produits et services, ainsi que leur transformation en licornes. Le projet a aussi interrogé l'innovation sous-tendue par les politiques publiques au travers de l'aide à la RID pour une prise en compte efficace des enjeux sociétaux et des externalités liées au transport.

#### 2.2.4.2 Vers de nouveaux services à Loos en Gohelle

Le projet Cismop (Co-conception et Innovations pour les Services de Mobilités en Péri-urbain), cofinancé par la Région Hauts de France, mené avec le département AME, vise à améliorer les transports du quotidien dans le bassin minier, sur la commune de Loos en Gohelle. Le projet a permis de construire avec la population une série d'initiatives pour une transition vers une mobilité durable visant à réduire la trop grande dépendance de ce territoire périurbain à l'automobile individuelle et, de ce fait, à contribuer à la réduction de l'exclusion sociale. L'équipe projet a été félicitée par les autorités régionales et nationales pour leur participation à l'atelier territorial des assises de la mobilité. Une suite de ce projet est prévue dans le cadre d'un projet tremplin de l'APP de l'I-SITE FUTURE.

#### 2.2.4.3 Transport à la demande

Les systèmes de transport à la demande ont le potentiel de fournir un transport public porte à porte efficace avec une grande qualité de service. On s'est intéressé à l'optimisation des itinéraires des véhicules par heuristiques et à la planification des tournées dans le cadre du transport à la demande. Deux modèles d'auto-organisation ont été proposés : spatial et spatio-temporel, permettant une meilleure couverture spatiale et temporelle du réseau par les véhicules.

Pour ce qui est de l'optimisation des tournées, un modèle d'optimisation sous contraintes a été développé dans le cadre d'une collaboration avec une PME de transport à la demande. Ce modèle optimise les temps de travail, la distance parcourue, le nombre de véhicules avec une optimisation séquentielle des priorités.

Les exploitants s'échangent des courses lorsqu'une nouvelle demande de mobilité ne peut s'insérer dans le planning prédéfini ou lorsque le coût de cette nouvelle course est prohibitif. Nous avons proposé un algorithme d'insertion de nouvelles demandes de transport dans la liste des courses déjà planifiées par les exploitants en utilisant des techniques d'optimisation.

Par ailleurs, un environnement multi-agent a été développé pour simuler l'affectation des requêtes de transport aux exploitants suivant une enchère sur la qualité de service.

L'intégration l'information du trafic pour une optimisation temps réel avec des temps de parcours prévisionnels repose sur l'exploitation des traces des véhicules sur les trois dernières années d'exploitation. Sur la base de cet historique, des méthodes d'estimation et de prévision des temps de parcours en fonction d'une typologie des journées et de la définition de plages horaires ont été développées.

### 2.2.4.4 Information multimodale

L'approche multimodale de la mobilité constitue un axe fort du département avec des travaux sur l'algorithmie des chemins multimodaux optimaux et le développement de la plate-forme open-source Tempus (<http://www.tempus-project.org/>) et d'un équipement de recherche dénommé Claire Siti (figure 2.13).



Figure 2.13 – Plate-forme d'observation et de régulation multimodale Claire-Siti instanciée à Londres, Bruxelles, Houston, Toulouse...

Les travaux sur l'algorithmie de plus courts chemins dans des réseaux multimodaux ont conduit à proposer des méthodes d'optimisation multi-objectifs avec prise en compte de contraintes complexes (points d'intérêt, localisation véhicule personnel, mouvements tournants). Ces travaux se sont ensuite orientés vers les algorithmes de plus courts chemins stochastiques avec le développement de méthodes d'accélération des algorithmes de plus court chemin intégrant l'incertitude dans les algorithmes d'étiquetage. (thèse R. Delhome).

Tempus, en tant que plateforme opensource, a été utilisé dans plusieurs acteurs dont le CEREMA pour le compte de collectivités et par la SNCF pour visualiser des données concernant les TER. Le calcul d'isochrone de Tempus a été développé dans le cadre de ce projet qui a aussi permis de tester le chargement de données OpenStreetMap à l'échelle de la France.

## 2.2.5 Voyageur dans son déplacement

### 2.2.5.1 Développement de la simulation immersive

La simulation immersive constitue la seule voie pour anticiper le comportement de l'homme en prise avec les mobilités émergentes. Cette compréhension a jusqu'ici débouché sur des recommandations concrètes pour diminuer l'accidentalité et les conséquences des accidents, pour

comprendre les enjeux psychiques du copilotage d'un véhicule autonome ou pour aider les personnes âgées à traverser les rues. C'est pourquoi le développement et l'usage des simulateurs de déplacement plates-formes mobilise fortement les départements TS2 et AME de l'institut. Plusieurs nouvelles plate-formes de réalité virtuelle ont été mises en exploitation par COSYS pour les études et les recherches de l'Ifsttar sur les interactions des divers usagers de la route et de la rue dans les systèmes de transports de demain : un simulateur de conduite à cabine complète à Salon de Provence en 2013, un mini-simulateur de navigation piétonne à Satory en 2014 et un simulateur de vélo à Marne la Vallée en 2015.



Figure 2.14 – Nouvelles plate-formes de simulation immersive.

Des simulateurs de conduite ont également été interfacés avec divers dispositifs : un écran à haute dynamique lumineuse étalonné en luminance pour les études de perception visuelle en situation nocturne, un appareil d'imagerie à résonance magnétique avec le LESCOT (TS2) et un banc moteur permettant la mesure de la consommation en carburant avec le LTE (AME).

La fidélité de dispositifs de simulation immersive permet de s'assurer que les observations faites en situation virtuelle sont cohérentes avec ce qui serait observé en situation réelle. Dans le cadre du projet FSR Profil, qui visait à étudier l'influence du profil en travers des routes secondaires sur la sécurité de la conduite des véhicules légers, nous nous sommes intéressés à l'influence des caractéristiques du dispositif de simulation utilisé (avec ou sans affichage graphique de la cabine) afin de valider la faisabilité de l'utilisation d'un simulateur de conduite bas-coût (sans cabine) dans les études d'aménagement de la route.

### 2.2.5.2 Recherches avec la simulation immersive

L'équipe simulateurs de COSYS a participé à plus de 75 expérimentations sur la période d'évaluation, notamment dans le cadre de recherches partenariales qu'elle a elle-même initiées pour concevoir et évaluer des dispositifs innovants d'aide à la conduite et d'exploitation de la route pour améliorer la sécurité et le confort des voyageurs dans leurs déplacements (FUI Yellow, ANR SERA, ANR Cyclope).

Dans le projet européen INROADS (2011-2015), nous avons mis en œuvre le dispositif d'affichage à haute dynamique lumineuse mentionné précédemment pour évaluer l'influence d'un balisage lumineux à LED autonome en énergie sur la trajectoire des véhicules légers en virage sur routes secondaires. Le dispositif est déclenché uniquement en cas de passage de véhicules. On a démontré qu'un tel balisage offre un meilleur guidage aux automobilistes que de simples marquages rétro-réfléchissants ou même que de l'éclairage public.

Dans le cadre du projet FUI Yellow, nous avons mis en œuvre notre plate-forme de simulation immersive de traversée de rue pour évaluer différentes modalités d'alerte pour améliorer la sécurité des "hommes en jaune", trop souvent victimes d'accidents sur les chantiers autoroutiers. On a ainsi établi qu'une alerte sonore est plus efficace et acceptée qu'une alerte haptique pour inciter les agents de travaux à se mettre en sécurité lorsqu'un véhicule dangereux est détecté. Le projet a été doublement primé par le CIHT (Chartered Institution of Highways & Transportation) en 2016.

## 2.2. THÉMATIQUE « SYSTÈMES DE TRANSPORT DE NOUVELLE GÉNÉRATION »

---

Dans le cadre du projet ANR A-Pied, notre mini-simulateur de navigation piétonne a permis d'évaluer un dispositif d'aide à l'orientation en milieu urbain inconnu conçu par le CEA. On a ainsi vérifié l'utilité réelle, l'utilisabilité appréciée et l'acceptabilité élevée avec l'âge.

Un autre volet de la simulation consiste à l'utiliser la technique de simulation-game, dont l'ERC MAGnUM donne un exemple, pour appréhender les comportements des usagers/conducteurs. Cette simulation incorpore les rôles à jouer par les participants et les administrateurs de jeu. Les personnes et leurs interactions (orientées vers un but) deviennent ainsi partie intégrante de la simulation. Un tel environnement crée une opportunité d'apprentissage plus fin, car les participants au jeu de simulation deviennent des participants actifs, plutôt que des observateurs passifs d'une simulation par ordinateur. Ce type de simulation a permis de modéliser le comportement de mobilités des usagers en milieu urbain et l'éco-conduite.

### 2.2.5.3 Assistance à l'apprentissage de l'éco-conduite

Dans le cadre des travaux sur l'éco-conduite, le concept clé utilisé pour la conception d'assistance à l'apprentissage de l'écoconduite est le « serious gaming » ou « ludification ». Ainsi, le conducteur, que ce soit avant, pendant ou après la conduite se retrouve impliqué dans un jeu qui vise à convertir son style de conduite. Un système d'objectifs, de récompenses, de conseil et de suivi personnalisé et géolocalisé est mis en place afin de maximiser l'acceptabilité et la durée de vie de l'application. Aussi, depuis 2012, COSYS travaille sur une plate-forme d'apprentissage ludique de l'éco-conduite en réalité virtuelle basée sur un banc de conduite, un casque de réalité virtuelle et le logiciel SiVIC. Outre l'aide au prototypage d'aides à la conduite et de capteurs pour le véhicule autonome, cette plate-forme vise à démontrer, lors d'événements à but de vulgarisation scientifique, les capacités de recherche et développement du laboratoire ainsi qu'à collecter des données de conducteur. Cette plate-forme a notamment été démontrée lors événements prestigieux tels que le mondial de l'auto à Paris en 2014 et le CES Las Vegas en 2017 en coopération avec la société ESI-Civitec.

## 2.2.6 Autres technologies-clés pour la mobilité

### 2.2.6.1 Localisation

Outre les résultats issus des travaux de SmartWalk, on s'est attaché à l'amélioration de la précision et de l'intégrité du positionnement dans des environnements complexes comme l'urbain et le ferroviaire. L'idée directrice consiste à augmenter le signal GNSS d'une information issue de cartes 3D urbaines préexistantes ou de flux vidéos issus de caméras embarquées.

L'étude INTURB (Urban Trench Method) pour la DGITM a suivi la 1ère approche. On a développé une méthode qui diminue améliore la précision du calcul de positionnement grâce à une modélisation 3D simple et compatible avec les cartes numériques embarquées d'aujourd'hui. La méthode mise en place sur des mesures réalisées à Paris et à Nantes a permis d'améliorer la précision de positionnement du véhicule de 70% en médiane en 3D. La validation de la méthode avec des mesures réalisées à Toulouse a abouti à une amélioration de 30%. On a aussi construit automatiquement la loi d'erreur de pseudo-distance des satellites en fonction des caractéristiques de l'environnement urbain et de la position du satellite par rapport à la rue. Cette recherche a débouché sur une amélioration de la précision et de l'intégrité du positionnement. Les expériences en vraie grandeur, réalisées à Nantes, Paris et Toulouse, pour une durée totale de 10 heures, permettent de garantir un risque d'intégrité de l'ordre de grandeur de  $10^{-3}$  avec une confiance à 10%.

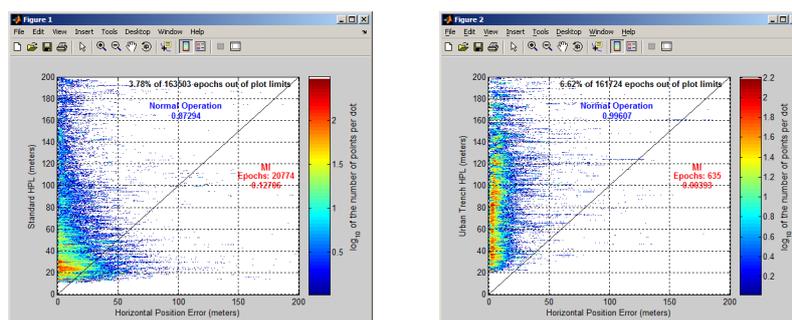


Figure 2.15 – Erreur plane effective d’un récepteur GPS automobile par rapport à une référence disponible : solution GPS standard (gauche), méthode des tranchées urbaines (droite) bien plus pertinente car l’erreur est mieux bornée qu’en standard

Les applications du GNSS dans le domaine ferroviaire et les transports publics ont bénéficié de l’autre approche. Le procédé CAPLOC repose une connaissance de l’environnement de propagation fournie par une ou plusieurs caméras et des traitements d’images capables de détecter l’état de réception des signaux satellitaires et de caractériser les perturbations causées par les obstacles environnants afin de réduire leur effet sur la localisation GNSS. Cette approche est aujourd’hui adaptée dans des systèmes embarquant des cartes numériques 3D avec des objectifs similaires. Le projet CAPLOC a ainsi permis d’améliorer la précision de la localisation. Sur la trajectoire testée, on a pu localiser le véhicule à 3m en moyenne contre 10m avec une méthode dite «classique». Le système comporte une caméra fisheye à placer verticalement sur le toit du véhicule à proximité d’une antenne GNSS, un récepteur GNSS et un ordinateur pour stocker et traiter des acquisitions. Le système se transpose à d’autres modes de transport.

### 2.2.6.2 Vision Tout temps pour le véhicule automatisé



Les technologies de «vision» (caméra, radar, lidar) embarquées sur véhicules s’avèrent fonctionnelles de jour par temps clair, mais peu fiables de nuit, sous la pluie ou dans le brouillard. Le projet AWARE porté par Safran et Valeo a débouché sur un capteur dans le visible et l’IR capable de détecter les piétons et les marquages par tous les temps et toutes les conditions. On a étendu à l’IR les algorithmes de restauration de la visibilité bien établis dans le visible et en pointe dans ce domaine. La fusion de données issues d’images dans l’IR et dans le visible permet de voir simultanément les piétons et les marquages, en chambre de brouillard. Un prototype (TRL 6) de caméra tous-temps bas-coût (moins de 250 €) à la pointe de la technologie sera industrialisé par SAFRAN (prévision de 30k unités/an).

### 2.2.6.3 Radio intelligente

Corridor est le premier projet de recherche et développement en Europe qui ouvre la voie au développement des technologies de radio Intelligente (RI) pour les applications ferroviaires. Les

objectifs du projet étaient de concevoir, de développer et d'évaluer des briques fondamentales d'un système de RI adaptées aux exigences et aux contraintes de la grande vitesse ferroviaire (grande vitesse, perturbations électromagnétiques, mauvaise couverture des systèmes dans les zones rurales ...).

Le projet s'est intéressé à trois types de transmission caractéristiques du ferroviaire (contrôle-commande, CCTV et Internet à bord) afin de proposer une meilleure offre de transport. Les besoins utilisateur ont été traduits en exigences et spécifications du système, notamment en ce qui concerne les propriétés cognitives avant la définition de l'architecture du système à développer. Les travaux se sont concentrés sur le terminal mobile intelligent, l'infrastructure fixe intelligente et la gestion de la mobilité ainsi que la coopération intelligente entre le terminal mobile et l'infrastructure.

Des essais le long d'un site d'essais à grande vitesse de la SNCF avec la rame IRIS 320 et des plates-formes OpenAirInterface ont permis l'acquisition de signaux réels à 300 km/h. Les essais à grande vitesse demandant une logistique importante et étant limités dans le temps (seulement quelques km de couverture radio), un émulateur de canal a été mis en œuvre avec ces signaux afin d'évaluer différents algorithmes en laboratoire.

Des actions de dissémination dans les revues internationales ont été réalisées durant tout le projet ainsi qu'auprès de différents acteurs ferroviaires tels que l'ERA et des industriels. La thématique Radio intelligente est un sujet prioritaire dans le JTU Shift2rail.

### 2.2.6.4 Calcul avancé des ouvrages

L'IFSTTAR développe depuis 40 ans le code de calcul par éléments finis CESAR-LCPC, commercialisé depuis 2000 via la société ITECH au terme d'un accord de licence. Aujourd'hui le code plus 400 licences se trouvent diffusées dans les milieux professionnel (Bouygues, Vinci, Total...) et académique sur 3 continents. Outre une aide ponctuelle plus pointue que celle apportée par ITECH à ses clients, COSYS veille à l'enrichissement du code à travers l'intégration des modules issus des meilleures thèses de l'institut ou des partenaires proches. Les départements COSYS, MAST et GERS assurent de plus des expertises majeures dans le monde entier (calcul du sciage du barrage de Salanfe en Suisse, calcul expert de la gare du GPE à la Défense...). Pendant la période sous revue, le code s'est enrichi de plusieurs modules.

Un nouveau modèle d'endommagement adapté à la connaissance disponible sur les tunnels en maçonnerie du métro et développé avec la RATP délivre un critère de déplacement admissible lors des travaux, indicateur clef pour piloter les chantiers en sécurité et en augmenter la performance.

De nouveaux outils de calcul dynamique des ouvrages en terre armée (avec EGIS) pour soutenir les voies TGV constituent un jalon vers l'acceptabilité par la SNCF de ces ouvrages économiques et de faible emprise, enjeu important pour l'extension ou l'exportation du TGV.

Le projet Newtun avec les entreprises chargées de creuser les tunnels du GPE dont Solé-tanche, a porté sur les tassements provoqués par le creusement des tunnels peu profonds. Il a donné naissance à de nombreuses fonctionnalités nouvelles dans CESAR dont des modèles d'interaction sol-boulons.

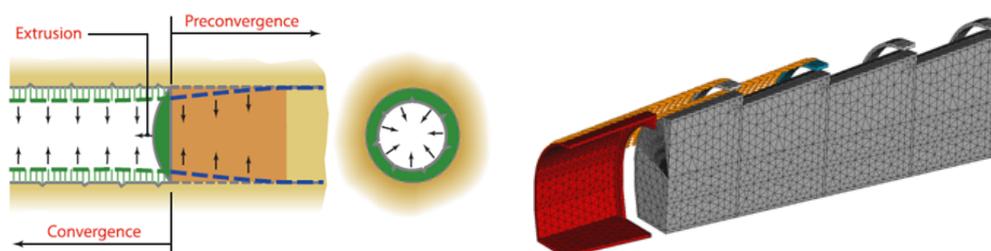


Figure 2.16 – GPE, projet Newtun : tassements provoqués par le creusement des tunnels peu profonds; modèles d'interaction sol-boulons dans CESAR

L'ensemble de ces avancées place l'IFSTTAR comme acteur de la transformation des métiers de la construction, dans le domaine du transport notamment.

### 2.2.6.5 Dispositif innovant de chargement de maquettes échelle 1 de voies ferrées

Dans le cadre du CPER Pays de La Loire, on s'est doté d'un nouveau grand équipement qui renforce les capacités d'essais ferroviaires de l'institut (projet SySife). La tranche 1 consiste en un dispositif innovant de sollicitation mécanique reproduisant le passage d'un train sur une structure de voie grâce au roulement sur la maquette ferroviaire d'une plaque sur son arête à long rayon de courbure, ce roulement étant déclenché par des vérins d'extrémité, voir figure 2.17. La tranche 2 comportera la réalisation d'une deuxième dalle d'essais mécanique, de plus grande capacité et en complément de la première, à l'horizon 2019.

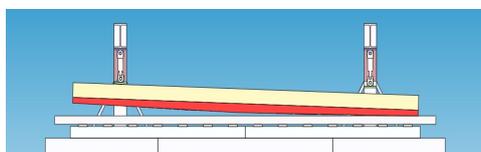


Figure 2.17 – Système de sollicitation cyclique linéaire roulant sur le rail avec les vérins aux extrémités : le "hachoir"

## 2.3 Thématique « Monitoring généralisé des territoires »

Cette thématique, présentée en 1.3.3, repose sur l'alliance de la mesure distribuée, du traitement des données et de la modélisation. Des résultats notables sur les nano-capteurs se trouvent décrits dans les faits marquants. On porte ci-dessous une attention particulière aux questions algorithmiques. Les approches développées couvrent la modélisation inverse, orientée modèles, la science des données ou big data analytics lorsque l'on n'utilise pas de modèle physique et l'inférence statistique qui combine les deux approches.

### 2.3.1 Qualité de l'air et de l'eau

#### 2.3.1.1 Qualité de l'eau potable

Les réseaux d'eau potable constituent un patrimoine important d'utilisation quotidienne par tous. Sujets à des fuites significatives ils transportent une eau contrôlée sur le lieu de production. Il convient d'améliorer la performance des réseaux aujourd'hui très peu instrumentés et de contrôler la qualité de l'eau effectivement consommée. La perspective des cycles courts de l'eau, de la réutilisation des eaux grises, ravivent l'acuité de ces questions. Dans le cadre des projets

Smart Water Networks et MICAD'EAU, on a développé des méthodes inverses rapides très spécifiques pour reconstruire les écoulements et les concentrations de chlore dans les réseaux d'eau potable. Connaître les écoulements s'avère fondamental pour détecter des fuites et simuler le transport des polluants. Les méthodes adjointes développées pour les écoulements reconstruisent les conditions aux limites et se fondent sur une vision multiéchelle associant une description simplifiée dans les portions droites des canalisations et une description tridimensionnelle convective de l'écoulement dans les jonctions, apport méthodologique jugé original qui permet d'envisager la reconstruction d'écoulements complexes dans de grands réseaux grâce à des modèles linéaires associés à des écoulements laminaires en n'utilisant une simulation convective turbulente que dans une phase de posttraitement local, au niveau des jonctions, sans aucune itération.

Pour reconstruire une cartographie de la concentration en chlore, grâce à quelques points de mesure et en supposant l'écoulement connu, on a recalé par zone dans le réseau la constante de réaction du chlore qui permet d'identifier des tuyaux présentant une forte présence de biofilm ou une anomalie due à une injection de polluant dans le réseau.

Enfin, on a proposé un outil numérique de positionnement optimal des capteurs de chlore dans un réseau. L'idée consiste à trouver le positionnement de capteurs qui maximise la zone de couverture spatiale d'observabilité, par rétro-propagation numérique de polluant injecté à l'emplacement du capteur (Figure 2.18).

Les outils relatifs à la concentration de chlore ont été développés dans le logiciel métier EPANET, outil de référence dans la profession, ce qui devrait en faciliter l'adoption.

Les méthodes développées respectent les contraintes temporelles de l'exploitation et se montrent potentiellement aptes à l'intégration dans les processus métier des exploitants.

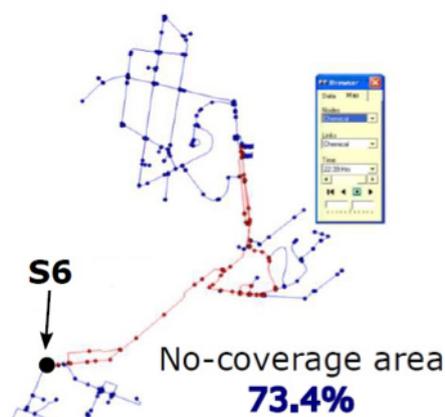


Figure 2.18 – Couverture spatiale d'un capteur de chlore positionné en S1 (à gauche) ou en S6 (à droite) – la zone bleue représente la zone non-couverte par le capteur – le capteur S1 (resp.S6) couvre environ 13% (resp.27%) du réseau

### 2.3.1.2 Assimilation rapide du transport des polluants dans l'air

Selon l'OMS, un décès sur 9 est attribuable à un défaut de qualité de l'air. Afin de mieux prévoir les expositions auxquelles sont soumises les individus, la distribution massive de capteurs bas coût associée à une modélisation fine de la ville constitue une voie privilégiée dans le programme scientifique de Sense-City. A cette fin, on a développé des outils numériques peu coûteux pour cartographier la concentration de polluants sur des quartiers entiers à partir de mesures et de modèles déterministes (EDP) qui permettent une quantification précise à l'échelle des individus. La méthode de base réduite "PBDW" a été adaptée et permet désormais de calculer en 1 sec, à l'aide d'une dizaine de capteurs, la concentration de polluants avec

une erreur inférieure à 5% sur un quartier de  $1\text{km}^2$  (figure 2.20). Elle reconstruit des champs de polluants sans requérir la reconstruction de l'aérodynamique. Elle se montre prometteuse pour reconstruire en temps réel des champs de pollution à grande échelle.

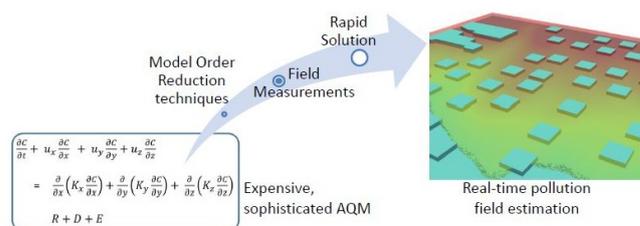


Figure 2.19 –

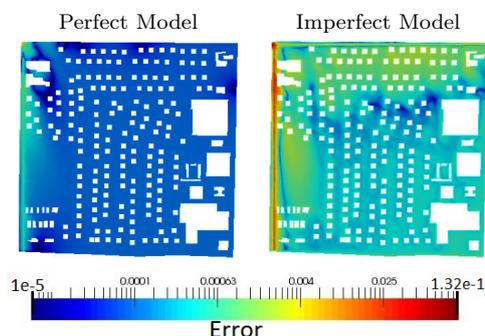


Figure 2.20 – Erreur relative de la méthode PBDW avec 5 modes et 10 capteurs, base réduite issue d'un modèle de transport sans réaction chimique. Données engendrées par un transport sans réaction (à gauche), avec réaction (à droite).

### 2.3.1.3 Contrôle de la qualité de l'air dans les bâtiments

La qualité de l'air intérieur se dégrade avec la l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments passant par la réduction de la ventilation, à tel point qu'il conviendra de la contrôler in situ dans le parc des bâtiments les plus efficaces. Or les personnes restent en moyenne 80% du temps en intérieur. Dans le cadre du projet IMMANENT et de Sense-City, on a codirigé la thèse de W. César avec D. Angelescu (ESIEE-Paris) sur le développement de microchromatographes destinés à détecter simultanément un grand nombre de composés gazeux dans les bâtiments. Le capteur fonctionne en temps réel et on a développé conjointement des méthodes numériques inverses de diffusion-transport pour cartographier les champs de concentration des composés gazeux et identifier les sources dans l'optique d'une gestion ad hoc des espaces intérieurs. Par ailleurs, le projet MIMESYS a permis d'étendre à l'air la stratégie de placement de capteurs développée pour les réseaux d'eau.

### 2.3.2 Infrastructures de transport

Le monitoring sert entre autres à calibrer les caractéristiques fondamentales des ouvrages, à évaluer les chargements pour mieux comprendre la fatigue à long terme, à détecter un endommagement, à estimer la capacité portante effective des ponts, à définir des actions en temps très court, amortissement des vibrations ou arrêt d'exploitation, ou à mieux comprendre le comportement en place des matériaux (R5G sur A10 et A63 par exemple).

#### 2.3.2.1 Estimation de la tension dans les câbles

On a mis au point une méthodologie très innovante pour déterminer la tension des câbles d'ouvrages, via la détermination des caractéristiques de tension axiale, de masse linéique et de longueur. Elle mobilise capteurs bas coût, modèle de câble géométriquement exact et méthode inverse originale exploitant la différence de données de mesure entre deux configurations statiques différentes (thèse Arnaud Pacitti). Elle a été validée sur le nouveau banc des câbles du CEREMA à Bordeaux (figure 2.21) conçu par COSYS et sur un ouvrage sur la Loire. La

calibration une fois réalisée réduit nettement l'incertitude inhérente aux méthodes classiques dont on étend ainsi le domaine d'emploi.

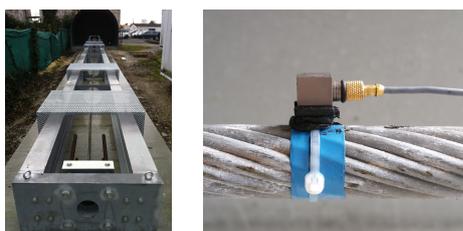


Figure 2.21 – Banc des câbles et instrumentation utile à la méthode inverse

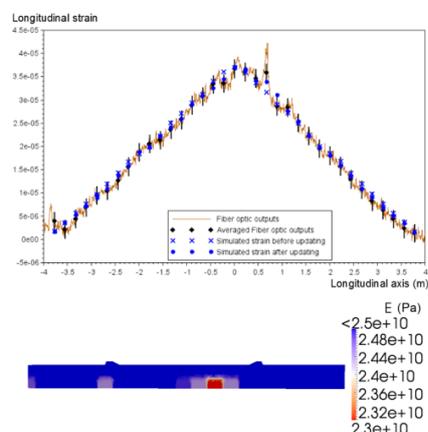


Figure 2.22 – Haut : déformation mesurée par fibre optique dans la poutre (fissure détectée à  $x=0,7\text{m}$ ) et déformation simulée (en bleu) ; Bas : module d'Young après recalage, localisation et quantification d'un endommagement (zone rouge)

### 2.3.2.2 Détection-quantification d'endommagements dans des poutres précontraintes

En vue de la détection précoce d'un endommagement structural par des méthodes inverses on cherche en général à déterminer les paramètres du modèle caractéristiques de l'endommagement, i.e. le module d'Young, afin de minimiser l'écart entre les mesures et la déformation issue de la simulation numérique, ici fondée sur l'élasticité plane. Dans le cadre du projet SIPRIS avec VINCI, on s'est intéressé aux mesures locales de déformation par fibre optique ou par jauges ponctuelles pour l'identification des paramètres du modèle par méthode adjointe. Cette stratégie a été implantée de façon non-intrusive à l'aide d'un superviseur en langage Python faisant appel au code de calcul Aster. Sur une poutre en béton précontraint de 8m de long, les méthodes inverses ont permis de détecter, de localiser et de quantifier un endommagement (zone rouge sur la Figure 2.22).

### 2.3.2.3 Détection d'affouillements

Les affouillements constituent par ailleurs une cause majeure d'effondrement ou de rupture de service des ponts. Dans le cadre du même projet SIPRIS, on a développé une modélisation directe et inverse de ponts soumis à des affouillements en vue de détecter automatiquement, en ligne, des seuils de stabilité des ouvrages en fonction de l'état réel des fondations. A cette fin, on a proposé et breveté avec VINCI un procédé alliant capteurs et modélisation inverse. L'innovation consiste à identifier le comportement intrinsèque et global des fondations de la structure sur la base de mesures cinématiques et d'une analyse de perturbation spectrale, sans avoir à mesurer, sous l'eau, la hauteur d'affouillement.

### 2.3.2.4 Identification de systèmes stochastiques et surveillance de l'endommagement

La création de l'équipe I4S a permis d'innover dans le domaine des algorithmes, avec un impact réel dans les applications industrielles. Les travaux conduits sur la quantification de

l'incertitude (meilleur papier innovant à la conférence IOMAC en 2017) et l'identification de systèmes complexes (variables dans le temps ou périodiques : cas des éoliennes) ont été poursuivis en raison de leur pertinence industrielle et de leur capacité à fertiliser d'autres thématiques de recherche. Pourtant, le nombre croissant de capteurs différents sans parler de l'importance croissante des mesures distribuées par fibre optique et des mesures plein champ par technique d'imagerie pose un défi considérable aux méthodes que nous étudions. Pour y faire face, l'étude d'algorithmes adaptatifs tels que le filtre de Kalman et les filtres  $p$  articulaires est un sujet émergent dont l'importance ne peut que croître avec des thèmes connexes comme le monitoring thermique long terme par thermographie infrarouge ou «Ultra Time Domain Thermography». Nous cherchons constamment à monter en complexité au niveau des structures surveillées tout en diminuant et optimisant le coût algorithmique et l'efficacité énergétique de nos solutions. Une illustration de nos avancées algorithmiques se retrouve dans le transfert de nos méthodes SSI, tant sur carte PEGASE en version embarquée pour preuve de concept all-in-one, que dans une optique de transfert comme chez nos partenaires «Structural Vibration Solutions - Denmark» : 3 transferts technologiques durant la période. Notre originalité au sein de la communauté du génie civil et mécanique est l'évaluation statistique des distances "Model-to-Data" pour en déduire des changements structurels, comme peu d'équipes le font en Europe (par ex. Verhaegen, en Hollande). Au cours de la période actuelle, nous avons obtenu des résultats importants sur la caractérisation des changements d'origine physique et la robustesse au bruit, en collaboration régionale (GEM à Nantes) et internationale (U. de British Columbia à Vancouver et Boston Université). La localisation des endommagements est encore un sujet émergent. Des efforts sur l'applicabilité et la robustesse restent à fournir mais notre nomination pour le meilleur article théorique à SAFEPROCESS2015 montre le caractère prometteur de notre approche théorique ainsi que le chemin qui reste à parcourir avant une application sur des structures réelles.

### 2.3.2.5 Diagnostic de défauts fondé sur la réflectométrie

La principale originalité de nos contributions aux techniques fondées sur la réflectométrie est l'utilisation de la théorie de la diffusion inverse issue de la physique mathématique. Dans le domaine du diagnostic de défaut de câble électrique, les études fondées sur des modèles mathématiques résolvent principalement des problèmes inverses avec des méthodes d'optimisation non convexes coûteuses en temps et en ressources. Nos algorithmes évitent de résoudre les problèmes d'optimisation non convexes et sont numériquement efficaces pour les applications en temps réel. Notre logiciel déposé ISTL a commencé à être utilisé par des partenaires industriels. Ces résultats fournissent des solutions efficaces pour le diagnostic des défauts correspondant aux variations d'impédance ou aux pertes ohmiques dans les câbles.

### 2.3.2.6 Systèmes d'instrumentation pour les équipements critiques des voies ferrées

On a implanté sur capteur IoT PEGASE des algorithmes de contrôle permettant de suivre la santé intrinsèque d'un réseau de compteurs d'essieux SNCF en vue de la détection précoce et temps réel des défauts internes des compteurs. De plus, l'étude de la signature électrique du capteur positionné sur la voie circulée a permis de développer une méthode de détection de défauts sur les essieux des trains. Cette solution est maintenant en cours de qualification par SNCF Réseau (CEM et Isolation galvanique) avant mise en service sur voie circulée.

Plus globalement, avec la SNCF on cherche à évaluer l'apport des solutions IoT Intelligentes pour le monitoring d'actifs ferroviaires critiques pour l'exploitation et la sécurité ferroviaires. Il s'agit de contrôler la santé des feux par suivi temps réel des profils de consommation, de mettre au point des dispositifs de suivi de l'état de santé des relais, de détecter des défauts de santé

des Pedales Electro-Mécaniques, sujet sur lequel on a obtenu un Prix européen de l'Innovation Ferroviaire.

Pour ce qui est des moteurs de Passage à Niveau, on cherche à détecter des endommagements soudains ou à bas bruit par observation et apprentissage des profils de consommation et des temps de montée/descente et de la dérivé de l'angle de la barrière (figure 2.23).

Enfin, on a établi la faisabilité d'un monitoring rapide de falaises par Infra Rouge (figure 2.24) pour une exploitation sécuritaire des voies SNCF en montagne. La capacité à mettre en lumière des signatures IR de parements fragiles augure d'une utilisation opérationnelle future par la SNCF.



Figure 2.23 – Moteurs d'aiguille électro-hydraulique et Moteur de Passage à niveau PN68



Figure 2.24 – Dispositif de monitoring IR en continu avec traitement

### 2.3.3 Infrastructures de production et transport d'énergie

#### 2.3.3.1 Localisation temps réel des impacts de foudre sur lignes électriques

Dans le cadre de 2 contrats avec la société SDEL-CC (Vinci Energie), l'objectif est de proposer un nouvel équipement (à la panoplie existante jugée peu performante météorologiquement dans la profession) permettant de détecter les impacts de Foudre ou de mise à la masse des lignes à Haute Tension des distributeurs tel EDF-RTE en France.

La solution retenue se fonde sur notre compétence à synchroniser des réseaux de capteurs. En datant précisément l'arrivée du front d'onde de courant aux 2 extrémités d'une ligne à haute tension et en insérant ces temps d'arrivées dans un modèle simple (Modèle TDOA 1D) un Superviseur restitue en temps quasi réel l'évaluation de l'abscisse X où le défaut électrique est apparu. On a amélioré le mécanisme de synchronisation implanté dans les plates-formes PEGASE : pour atteindre la précision de datation demandée (i.e. environ 50 nanosecondes), on a implanté les algorithmes sur un FPGA (latences quasi nulle). La précision de 50 nS a été tout d'abord obtenue et validée par ce principe. Dans un second temps, on a exploité les informations de correction temporelle qu'un récepteur GPS moderne est capable de délivrer et mis au point une équation de correction, post facto (1 seconde après l'événement) qui évalue et prend en compte l'erreur temps réel du quartz chargé de compter le temps. On a validé sur un banc de test que dans 99.6% des cas un même front électrique est daté par 2 systèmes PEGASE dotés de ces algorithmes avec un écart de moins de 10 nanosecondes UT. On a reçu le prix international 2017 de l'innovation au sein du groupe Vinci. Le procédé est actuellement en cours de transfert industriel. La société SDEL CC intégrera ces éléments pour faire son produit propre.

### 2.3.3.2 Eoliennes

Le monitoring des éoliennes a fait l'objet de nombreux contrats. On retient ici le projet EVEREST sur les futures très grandes pales d'éoliennes off-shore. Un démonstrateur doté de plusieurs types de capteurs (fibres optiques, capteurs ultrasoniques, QRS issus de l'IRDL) en vue des essais de fatigue a permis de comprendre finement l'interaction capteurs-renforcements-structure et de préparer des solutions techniques industrialisables. Combinant essais de fatigue et modèle éléments finis, on a trouvé un positionnement de la fibre optique qui lui permet de délivrer la déformation moyenne exacte. V. Raman a globalement prouvé la faisabilité d'une pale alliant fibre de carbone, renforcements locaux et monitoring par capteurs intégrés garantissant un fonctionnement sécurisé.

### 2.3.3.3 Câbles THT pour les fermes éoliennes

Avec NEXANS et RTE le projet EMODI qui s'inscrit dans le Domaine stratégique « Energies Marines Renouvelables » contribue à lever des verrous identifiés dans la feuille de route des EMR, tels que le raccordement des parcs EMR qui figure parmi les priorités européennes. On a créé un banc de fatigue dédié aux câbles sous tension, instrumentés par fibre optique et par nano-composites conducteurs. Les capteurs insérés à cœur servent à caler une modélisation analytique qui, à terme, permettra l'inspection avant mise en mer des câbles, sur la base d'une compréhension fine des couplages électro-thermo-mécaniques, un endommagement mécanique créant des singularités thermiques et de conductivité (figure 2.26). Le but est ainsi de localiser et de juger du caractère pénalisant des défauts préalablement à l'installation très onéreuse de ces structures, un défaut sans danger pour la santé structurelle du câble pouvant dégrader de façon très significative la capacité de ce câble à transmettre la puissance électrique.

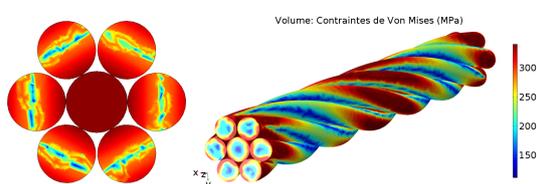


Figure 2.25 – Contrainte de Von Mises dans le conducteur en MPa dans le domaine plastique.

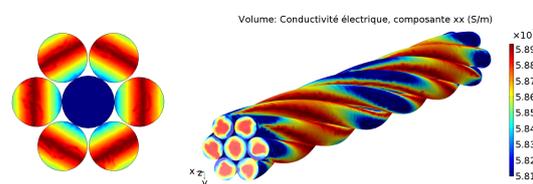


Figure 2.26 – Conductivité électrique dans le conducteur en (S/m) due à l'écroutissage du matériau.

## 2.3.4 Usages : mobilité, eau, énergie

### 2.3.4.1 Trafic routier assimilé

Les gestionnaires de réseaux routiers ont besoin d'outils d'aide à la décision qui leur permettent d'anticiper les situations critiques et, lorsqu'elles se manifestent, d'être réactif et prendre les mesures les plus appropriées. Les méthodes d'assimilation de données répondent à cette attente. Elles consistent à utiliser un modèle dynamique de trafic et à le mettre continûment à jour en fonction de données recueillies dont dispose l'exploitant. Ainsi, le gestionnaire peut à la fois disposer d'une vue complète sur les conditions de trafic actuelles sur le réseau, et tester l'impact de stratégies d'exploitations à très court terme (<1h).

Depuis 2014, des travaux de recherche sur l'assimilation de données ont été entrepris pour s'adresser à des réseaux routiers structurants (nationale ou autoroute) à large échelle (plusieurs centaines de kilomètres de linéaire).

Plusieurs verrous scientifiques ont été identifiés et levés au cours de ces dernières années : Le modèle dynamique du premier ordre (LWR) résolu sur un schéma numérique mésoscopique, dispose de propriétés très adaptées : temps de calcul réduit, schéma numérique très adapté aux observations Eulériennes et Lagrangiennes classique dans le trafic routier. Il convient par ailleurs d'estimer les incertitudes liées aux mesures sur le terrain ou au modèle de trafic et de les prendre en compte dans le schéma d'assimilation de données. Un modèle de propagation d'incertitude a été proposé. Enfin, on a proposé une méthode d'optimisation pour déployer les capteurs de trafic sur le réseau de manière optimale en vue de l'assimilation de données.

### 2.3.4.2 Traces numériques et analyse de la mobilité

Dans le domaine de la mobilité, les data permettent de mieux comprendre les pratiques de mobilité et la manière dont elles s'articulent avec les territoires. La mise à disposition des données massives urbaines pose une question essentielle : Quels apports de connaissance sur nos mobilités et nos villes ces nouvelles données offrent-elles ? Et dans quelle mesure ces données peuvent-elles compléter les enquêtes classiques ? Cette problématique a été abordée à travers deux études : les données billettiques des transports collectifs de la ville de Rennes (Projet Mobilletic, figure 2.28) et les données d'usage de systèmes de vélos en libre service en partenariat avec JC Decaux et la Mairie de Paris (figure 2.27).

Les travaux fondés principalement sur des méthodes d'apprentissage non-supervisé de type modèles de mélange à variables latentes ont débouché sur des modèles innovants.

Nous avons pu mettre en évidence, grâce au croisement des résultats de clustering avec les données socio-économiques des territoires sur lesquels les systèmes de transport sont déployés, les liens forts entre profil d'usage des stations et caractéristiques urbaines du voisinage de la station.

L'analyse des matrices Origine/Destination dynamiques dérivées des données de déplacement, a permis de caractériser la dynamique des systèmes de transport afin d'aider à leur optimisation. Nous avons exploré dans ce cadre les modèles génératifs à variables latentes et les «topic models», initialement utilisés pour la fouille de texte. Une extension de ces modèles pour l'aide au dimensionnement et au positionnement des stations VLS a été proposée.

L'extraction de routines temporelles d'usagers de transport urbain collectif (TC) à partir de données billettiques (ou données smartcard) a débouché sur un modèle génératif à deux niveaux de clustering permettant de fournir à la fois le partitionnement des usagers en groupes et une description fine du comportement de chaque groupe d'usagers à l'aide d'un profil continu en temps a été proposé. Ce travail a fait l'objet de collaboration avec l'école polytechnique de Montréal au Québec. Ces données permettent en effet de mettre en évidence des comportements de mobilité variables dans les transports en commun (selon les jours de la semaine et selon l'heure de la journée par exemple) et de s'affranchir de la vision jour moyen de mobilité qu'autorisent les enquêtes classiques. Les routines temporelles ainsi identifiées caractérisent finement la demande, et peuvent servir d'entrées aux modèles de simulation ; elles peuvent également être utilisées par les gestionnaires urbains et les opérateurs de transport pour des opérations de planification en vue d'adapter l'offre de transport à la demande. Cette connaissance fine de la demande dans l'espace et dans le temps peut être mise à profit pour offrir des services de mobilité à la demande.

L'exploitation innovante des données issues de dispositifs Bluetooth pour la gestion du trafic constitue un sujet original. Nos contributions portent sur la qualification et le traitement des données Bluetooth pour cartographier les états de trafic à l'échelle d'un réseau puis sur l'analyse spatio-temporelle des états des réseaux. La méthode dite «Latent Dirichlet allocation - LDA», a permis de détecter des motifs temporels de fonctionnement du réseau. L'utilisation des données Bluetooth pour l'estimation dynamique de matrice OD (figure 2.29) a également donné lieu à

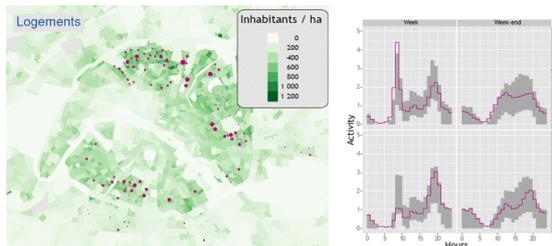


Figure 2.27 – Exemple de résultat de clustering des stations Vélib', positions des stations du cluster sur un fond relatif à la densité d'habitations à Paris et profil d'usage d'un cluster « habitations »

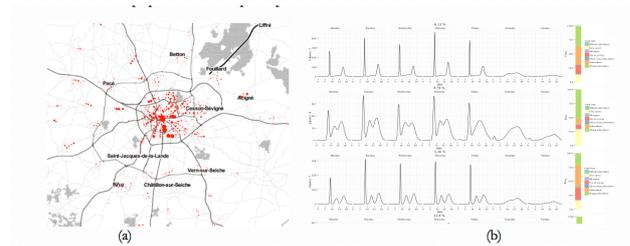


Figure 2.28 – (a) Traces numériques et territoires (organisation polycentrique de Rennes). (b) Exemple d'extraction de routines temporelles d'utilisateurs à partir de données billettiques

une thèse qui a obtenu le double prix Abertis du meilleur Master et de la meilleure thèse au niveau international.

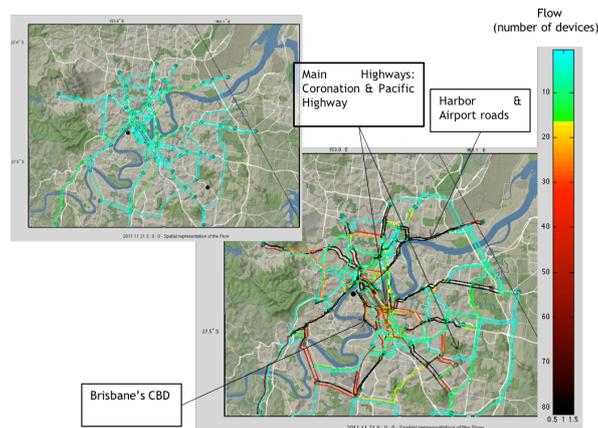


Figure 2.29 – Représentation spatiale des matrices B-OD à différentes heures le 7 novembre 2011 : (a) Matrice B-OD entre 3h-4h le matin (période creuse) (b) Matrice B-OD entre 8h-9h le matin (période de pointe).

### 2.3.4.3 Caractérisation des fonctions urbaines

La caractérisation automatique et spatio-temporelle des fonctions urbaines au travers des données massives représente l'autre sujet important sur lequel on s'est mobilisé pour la gestion des villes intelligentes. Des travaux antérieurs sur des données de téléphonie mobile ont montré l'existence de fortes corrélations entre les propriétés du tissu urbain et la demande de communication mobile associée. De même, les traces GPS des véhicules flottants contiennent des informations importantes sur la demande de transport et sur les activités humaines qui peuvent être liées aux fonctions urbaines.

La caractérisation des fonctions urbaines qui émergent utilisent ici, conjointement, des traces GPS des véhicules sondes et des données de téléphonie mobile collectées par les fournisseurs de réseau (figure 2.30).

Ces travaux sont fondés sur des techniques d'apprentissage non supervisé pour identifier les différentes classes de signatures (séries temporelles associées au trafic de téléphonie mobile et aux données GPS) caractéristiques de différentes fonctions urbaines. Ces techniques ont exploité les données réelles collectées dans des villes françaises et italiennes. Les résultats dévoilent



Figure 2.30 – Identification des fonctions urbaines à partir de données multi-sources

l'existence de signatures communes aux zones étudiées et spécifiques à certaines fonctions socio-économiques.

L'utilisation combinée des données de téléphonie mobile et des traces GPS surpasse les approches précédentes et permet de caractériser les fonctions urbaines de manière plus détaillée que dans la littérature à ce jour.

### 2.3.4.4 Réseaux urbains intelligents d'eau et d'électricité

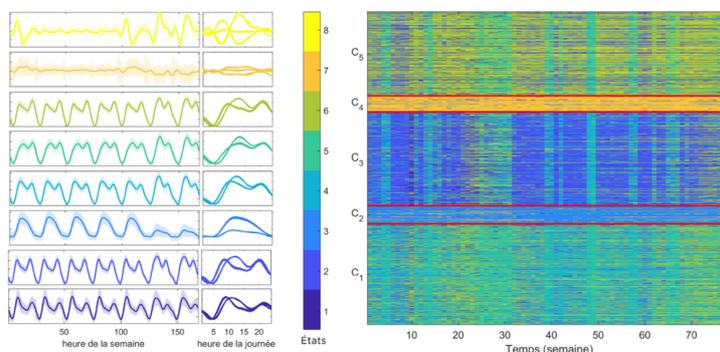


Figure 2.31 – Agrégation automatique des relevés de consommation d'eau en 8 catégories hebdomadaires (gauche), code de couleur associé aux 8 catégories (milieu) et ensemble de compteurs regroupés selon la dynamique de leurs états hebdomadaires de consommation (droite)

L'émergence des réseaux intelligents permet la remontée d'un grand nombre de données dont l'exploitation croisée aidera à la création de services à valeur ajoutée pour le collectif. Ces données aident à mieux connaître les habitudes de consommation et à les prévoir de façon précise. Elles aident aussi à détecter des anomalies au niveau des infrastructures. Pour cela, on dispose de données massives, spatiales et temporelles. On a développé des techniques adaptées d'analyse des masses de données produites pour mieux comprendre l'usage des systèmes et identifier des motifs spatio-temporels en vue ensuite de mettre au point des outils de prévision et de gestion intelligente.

Nos propositions s'appuient sur deux projets : l'un en partenariat avec VEOLIA et le Syndicat des Eaux D'Ile de France, et l'autre (projet Smart City Energy) coordonné par SystemX.

## 2.4. THÉMATIQUE « SÉCURITÉ ET SÛRETÉ »

---

Nos modèles et algorithmes permettent d'agréger de longues séries temporelles périodiques sur l'usage de l'eau et l'électricité. On obtient une représentation simplifiée des masses de données initiales, avec un pouvoir prédictif. Une optimisation stochastique a permis la classification en ligne de séries temporelles massives par estimation des paramètres.

Grâce à des modèles markoviens à variables latentes tenant compte du contexte (calendaire, météorologique) on peut prévoir les habitudes de consommation à l'échelle d'un réseau (ville, quartier)

### 2.4 Thématique « Sécurité et sûreté »

Cette thématique a donné lieu à beaucoup d'études ou d'expertises, en particulier pour l'état, les autorités de sûreté et l'organisation qui supervise le Tunnel sous la Manche, mais aussi pour les entreprises, à travers notamment plusieurs dizaines d'expertises par an que nous confie CERTIFER. On relate ci-dessous un petit nombre d'avancées issues de projets collaboratifs, au-delà de celles obtenues sur la détection des attaques électromagnétiques sur les systèmes ferroviaires, évoquées dans les faits marquants (projet SECRET).

#### 2.4.1 Détection des situations critiques temps réel

Le projet DEGIV a permis de développer un capteur IP audio/vidéo intelligent capable d'assurer des fonctions de détection d'événements anormaux tels que des agressions, des bagarres et des actes de vandalisme à partir de l'analyse combinée des signaux audio et vidéo perçus dans l'enceinte d'un véhicule ferroviaire. DéGIV a été l'occasion de faire collaborer une dizaine de grands acteurs industriels et académiques du domaine de la surveillance et de la sécurité dans les transports, de l'électronique embarquée, de l'analyse des images et du son mais également de la production d'effets numériques. Ce projet a donné l'occasion d'approfondir nos compétences en matière de modélisation supervisée de motifs sonores et de détection de personnes par analyse multi-vue. Les recherches et les développements ont menés à la mise au point d'un prototype semi-industriel qui a été évalué dans un véhicule de la RATP en exploitation sur la ligne 14. En vue d'un transfert technologique on a pu, sur marge, mobiliser un CDD pour rendre le prototype plus robuste.



Figure 2.32 – Capteur IP audio/vidéo intelligent DéGIV

#### 2.4.2 Infrastructures et systèmes intrinsèquement plus sûrs

Les études statistiques existantes sur les accidents/incidents aux passages à niveau (PN) présentent certaines limites. Les facteurs et paramètres pris en compte sont très souvent loin d'être exhaustifs. De surcroît, certains éléments qui peuvent influencer le niveau du risque ne sont pas pris en compte. L'objectif du projet MORIPAN était de mener une étude approfondie sur l'analyse de risque aux PN qui mette en évidence les différents mécanismes d'accident, pour ensuite développer une méthodologie générique qui permettrait l'évaluation du risque aux PN de manière mesurable, et de quantifier l'impact induit par des mesures de sécurisation du PN,

de façon à vérifier la pertinence des rénovations ou aménagements prévus ou d'en modifier le programme. Ce projet a permis de concevoir un modèle de risque paramétrable pour évaluer le niveau de risque global d'un PN en fonction d'un certain nombre de paramètres relatifs au PN. Il apparaît que la route qui traverse la voie ferrée joue un rôle important et jusqu'ici sous-estimé dans la sécurité des PNs. Ces résultats seront exploités par l'établissement EPSF en charge de la sécurité ferroviaire du réseau national pour faire évoluer son choix initial de PN à sécuriser.

A plus grande échelle, le projet RE(H)STRAIN vise à étudier la vulnérabilité du réseau ferré à grande vitesse (ICE, TGV) franco-allemand faisant partie de l'infrastructure critique « transports » dans le contexte de la menace terroriste et à en déduire des mesures destinées à améliorer sa résilience.

Les études sont menées dans le cadre d'une approche globale fondée sur des scénarios. Elles analysent un vaste éventail d'attentats terroristes possibles contre des cibles (trains, infrastructures, personnes) du réseau franco-allemand à grande vitesse et examinent quelles sont les mesures de sécurité susceptibles non seulement d'améliorer la prévention mais aussi d'atténuer les répercussions d'un attentat.

## 2.5 Thématique « Solutions énergie et climat »

### 2.5.1 Motorisations alternatives et usages

#### 2.5.1.1 Composants de puissance

Le dossier du SATIE rend compte de l'activité pour ce qui est de COSYS. On cite néanmoins plusieurs résultats intrinsèquement majeurs.

Dans le domaine de la traction VE et des actionneurs pour l'aéronautique, le projet MEGAN a permis de caractériser les défauts des composants HEMT à base d'hétéro-jonction GaN/AlGaIn du CEA-LETI et de les comparer aux versions commercialisées. L'étude du poids relatif entre les pièges de surface et les pièges d'oxygène dans la barrière AlGaIn des MOS-HEMT normalement en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn/GaN réalisés par le CEA-LETI et la mise en évidence d'une dégradation par électrons chauds consécutive à du vieillissement de type "power cycling" en mode DC sont originales.

Avec MERCE, on a obtenu deux résultats premiers du genre.

Afin de vérifier les règles de Palmgren-Miner sur le cumul de dégradation des modules semi-conducteurs de puissance, trois années d'expérimentation ont été nécessaires avec des modules adaptés à la séparation des modes de dégradation. On a démontré que seul l'état de dégradation comptait à un instant donné pour prévoir la durée de vie résiduelle d'un composant et qu'il n'était pas nécessaire de connaître l'historique des dégradations.

Par ailleurs, on a montré expérimentalement la pertinence de tests de durée de vie sous faible contrainte avec des cycles ultra-courts.

Ces avancées majeures présentent un fort potentiel de valorisation.

#### 2.5.1.2 Évaluation des impacts environnementaux des motorisations alternatives

Le projet Équilibre porté et financé par un groupement de transporteurs, l'ADEME et GRdF, est le premier démonstrateur de Poids lourds GNV à l'échelle européenne qui a permis d'auditer une flotte de 12 véhicules, semi-remorques de 44 tonnes et porteurs de 19 tonnes, pendant 2 ans pour évaluer la pertinence de gaz naturel par rapport au diesel en usage réel.

Le projet visait l'analyse de la consommation et émissions de polluants (CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>) de véhicules gaz et de véhicules diesel en situation réelle d'exploitation : déplacements, manœuvres, ravitaillements en carburant, pannes, déplacements à vide, démarrages à froid, etc. Il a conduit

à la mise en place d'une méthodologie pour analyser la consommation et les émissions dans une situation réelle d'exploitation, plus riche et plus complexe qu'une simple opération de déplacement. On retient les enseignements suivants :

La grande complexité d'un trajet, infrastructures routières, aménagements, profil altimétrique, poids total en charge, type de mission, conditions de trafic et conditions météorologiques, conduit à une très grande variabilité de la consommation et des émissions, dont une caractérisation simple ne peut rendre compte.

La part des trajets en zone urbaine est plus importante que celle prévue par les normes, avec des niveaux d'émissions très élevés de NOx. Les missions de distribution incluent de nombreuses traversées de petites agglomérations et les livraisons s'effectuent dans des zones d'activité situées en périphérie urbaine, pour les semi-remorques, voire en centre-ville pour les porteurs de 19 tonnes.

Les véhicules diesel présentent une grande similarité en termes de performances, ce qui n'est aujourd'hui pas le cas des véhicules au gaz.

Dans des conditions d'exploitation sévères, comme un boulevard périphérique à fort trafic, sur 21 mois de données, on observe un niveau d'émissions de NOx cinq fois plus élevé pour un véhicule diesel que pour véhicule au gaz dans des conditions similaires.

### 2.5.1.3 Placement des bornes de recharge et itinéraires électro-compatibles

Le développement de la mobilité électrique et son déploiement sont des priorités tant en France qu'en Europe. Pour contribuer à cet objectif, le département s'est mobilisé pour proposer des nouveaux outils d'aide à la décision publique destinés au déploiement de la mobilité électrique et l'optimisation de la consommation de véhicules électriques. Il convient d'abord de comprendre comment déployer les bornes de recharge de façon optimale sur le territoire. On a développé une méthodologie d'affectation optimale des stations de recharge fondée sur l'analyse de la demande de mobilité à l'aide des enquêtes ménages déplacements permettant d'identifier les zones d'intérêt. On a traduit cette demande de mobilité en demande énergétique grâce aux modèles de consommation issus de la librairie de modèles dynamiques VEHLIB développé par le laboratoire Transports et Environnement du département AME. Enfin, on a proposé un modèle d'optimisation pour l'affectation des stations de recharge avec comme contrainte la satisfaction de la demande énergétique en fonction d'hypothèses sur le taux de pénétration des véhicules électriques (VEs) et le nombre de véhicules nécessitant de recharger leurs batteries sont appelés RNV pour « Recharge-Needed Vehicles » (figure 2.33).

D'autre part, le choix d'éco-itinéraires (Green Routing) i.e. la détermination des chemins les plus sobres en termes de consommation énergétique a débouché sur un programme d'optimisation multi-objectifs afin de déterminer des itinéraires optimaux selon trois critères : l'énergie consommée, le temps de parcours et le nombre d'arrêts aux stations de recharge quand l'état de la batterie ne permet pas d'effectuer la totalité du parcours. La principale contribution de cette phase est l'intégration d'une recherche de parcours avec déviation vers les stations lorsque l'état de charge de la batterie du véhicule ne permet pas de terminer le trajet. Un prototype de calculateur d'éco-itinéraire a été développé, dénommé «e-SPP» qui permet de calculer les itinéraires tout en intégrant les résultats du modèle d'affectation de stations de recharge et les algorithmes de calcul d'itinéraire développés (figure 2.34). Cet algorithme a été validé expérimentalement en équipant deux véhicules électriques de type Citroën C-Zero/Peugeot Ion. Ces travaux ont été valorisés dans le cadre du projet européen «Crossing-Borders» visant la mise en place de services transfrontaliers d'électro-mobilité.

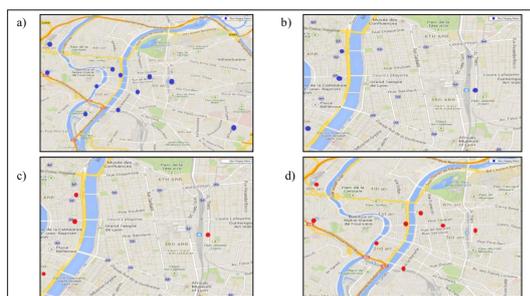


Figure 2.33 – Distribution optimale des stations de recharge à Lyon. (a) En bleu : 20% de taux d'intégration de VE et 50% de RNV, (b) En bleu : 2% de taux d'intégration de VEs et 50% de RNV, (c) En rouge : 10% de taux d'intégration de VEs et 10% de RNV, (d) En rouge : 10% de taux d'intégration de VEs et 70% de RNV.

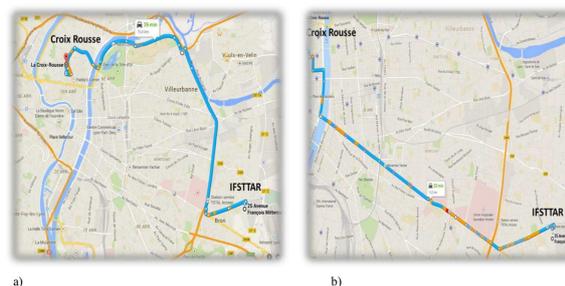


Figure 2.34 – Calcul d'itinéraire entre le centre de l'Ifsttar à Lyon et la Croix Rousse. (a) Trajet proposé par le e-SPP (via le périphérique) (b) Trajet alternatif (via le centre-ville).

### 2.5.1.4 Développement et évaluation des assistances à l'éco-conduite

2.5.1.4.1 (a) Glosa : «Green Light Optimal Speed Advice ou conseil de vitesse optimale au feu tricolore fait partie des solutions C-ITS visant à fournir des conseils au conducteur pour adapter sa conduite en fonction des infrastructures et des différents aléas de la route. A l'approche d'un feu, le service Glosa fournit en avance l'état dans lequel se trouve le feu pour chaque voie permettant ainsi à l'utilisateur d'adapter son comportement à l'approche d'intersections dotées de feux de circulation. Sur ce sujet, on a mené deux projets.

Le projet européen C-THE-DIFFERENCE (CTD) a porté sur le déploiement de cette stratégie sur la métropole de Bordeaux et son évaluation sur le trafic et sur la consommation.



Figure 2.35 – GLOSA à Bordeaux

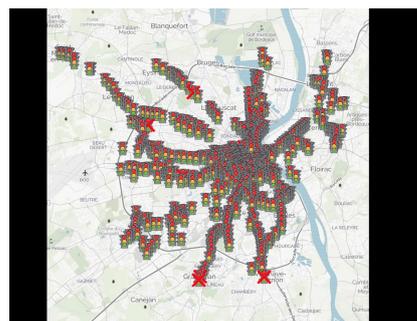


Figure 2.36 – service fourni par l'application C-The Difference

Le service fourni par l'application C-The Difference est déployé sur plus de 525 intersections dans l'agglomération bordelaise pour un total d'environ 2500 feux de signalisation. Le déploiement du service est toujours en cours aujourd'hui afin de couvrir toutes les intersections avec des feux de circulation dans la zone urbaine.

Dans le projet FUI EDIT («Efficient Distribution Truck» ), on a réalisé une étude préliminaire du problème des consignes optimales à produire par un système GLOSA vers un véhicule poids lourd de type EDIT pour optimiser la consommation énergétique lors du parcours d'un

boulevard urbain composé de plusieurs feux successifs.

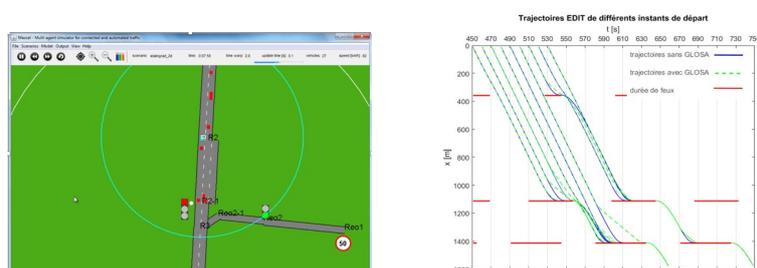


Figure 2.37 – GLOSA poids lourds

Ceci a notamment permis de lister les directives à appliquer afin de mettre en œuvre un système GLOSA efficace dans toutes les situations.

2.5.1.4.2 (b) Assistance à l'apprentissage de l'éco-conduite : L'éco-conduite est un style de conduite visant à réduire la consommation d'énergie et les émissions de polluants tout en diminuant le stress lié à la conduite et en réduisant le risque d'accident. Bien que de nombreuses études aient traité ce sujet afin d'estimer les gains globaux possibles à obtenir, les modes d'apprentissage de ce style de conduite ainsi que l'analyse détaillée de l'impact de formations à l'éco-conduite restent peu étudiés.

Au sein du projet ecoDriver, COSYS a développé une assistance à l'éco-conduite sur smartphone et l'a évaluée pendant 6 mois en conduite réelle sur un panel de 10 conducteurs. Ces essais ont montré une possible réduction de la consommation de carburant de 3 % avec une utilisation quasi quotidienne de l'application.

Depuis 2017, au sein de projet GameECAR, on a évalué une aide à l'écoconduite fondée sur le serious gaming pendant et après la conduite avec un suivi des données physiologiques des conducteurs (rythme respiratoire, rythme cardiaque), voir le paragraphe 2.2.5.3.

Les recherches se concentrent aussi sur la façon d'appliquer, par imitation, le comportement humain d'éco-conduite sur les véhicules automatisés. Des algorithmes d'optimisation multi-objectifs sont mis au point afin de contrôler le mode longitudinal du véhicule.

## 2.5.2 Gestion énergétique intégrée

### 2.5.2.1 Recharge en continu par induction

Améliorer l'efficacité de l'apport énergétique aux véhicules passe par le développement des véhicules électriques. Pour diminuer la rupture de charge ou la perte de temps liée à la recharge statique, y compris rapide, une solution potentiellement efficace est certainement de développer à grande échelle des installations de recharge dynamique, sans contact, et utilisables par tout type de véhicules : individuels, transports en commun et transports de fret. Le projet européen FABRIC (figure 2.38) a permis de réaliser un démonstrateur de recharge sans contact et en circulation (jusqu'à 80km/h) des véhicules électriques individuels, sur le site d'essai de Versailles-Satory. COSYS s'est fortement impliqué dans la question cruciale de la compatibilité électromagnétique, MAST a fourni un nouveau concept dédié à l'inclusion des inducteurs dans les chaussées.

La viabilité croissante de ce type de solution nous a conduit à renforcer cette dimension dans le projet de département à travers la thématique "Systèmes énergétiquement intégrés" en lieu et place de la thématique actuelle "Solutions énergie climat".

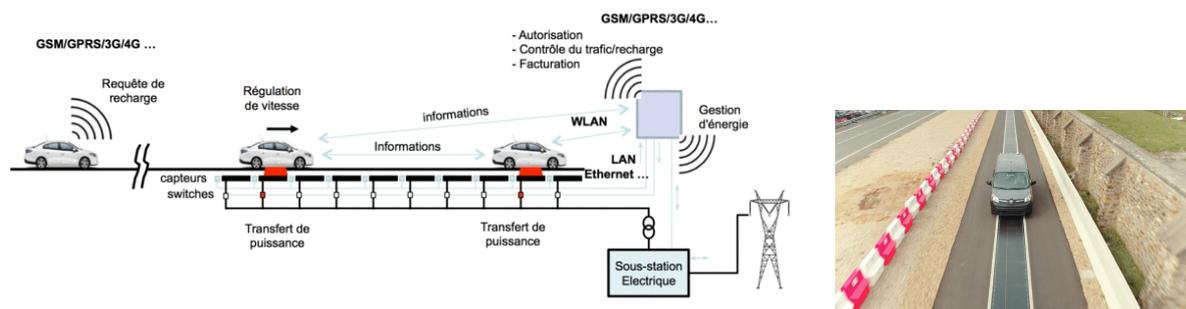


Figure 2.38 – Recharge dynamique par induction - Projet FABRIC en collaboration avec l'ITE VEDECOM (©Ifsttar)

### 2.5.2.2 Routes solaires, routes chauffantes

La route offre une surface parfaitement adaptée à la production directe d'électricité par des panneaux photovoltaïques. L'énergie ainsi produite pourrait être utilisée en « circuit court » par la route elle-même, pour les équipements de signalisation lumineuse dynamique, pour l'alimentation des systèmes de communication statiques situés en bord de voie et pour l'éclairage de points sensibles. Le principal verrou technologique est la mise au point d'un revêtement routier semi-translucide recouvrant un ensemble de cellules photovoltaïques. La faisabilité technique a été démontrée. La mise en œuvre d'un démonstrateur à échelle réelle reste cependant nécessaire pour tester l'efficacité et la robustesse du procédé. Pour aller au-delà, on a conçu une route solaire hybride (MAST-COSYS) (figure 2.39) qui a donné lieu à un démonstrateur COP21 commenté par Alain Vidalies sur le pavillon France. Elle allie récupération d'énergie photovoltaïque à travers une couche de verre recyclé et récupération de calories dans un fluide circulant au sein de la couche de chaussée, ce qui optimise le rendement PV. Une thèse en cours vise à modéliser finement le système et à l'optimiser. Le concept permet d'héberger les versions professionnelles de route solaire qui émergent.



Figure 2.39 – Route solaire hybride présentée à la COP21 et à la COP22.

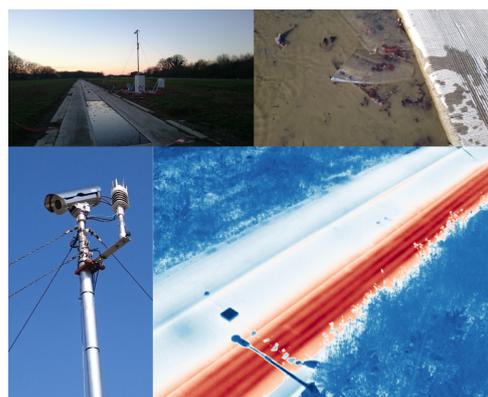


Figure 2.40 – Voie métro automatique CityVal (Siemens) sur le site de Nantes.

Par ailleurs, la nouvelle piste de référence CityVal (figure 2.40) mise en place sur le site de Nantes fait l'objet de différents travaux de recherche et développement sur des problématiques énergétiques et d'instrumentation. Ce site équipé d'une structure de voie du métro automatique CityVal développé par la Société Siemens pour étudier les bonnes façons de procéder à son dégivrage a pour vocation d'accueillir les prochains démonstrateurs pilotes du projet R5G en lien

avec l'énergie et le climat. Dès aujourd'hui on est capable de piloter le dégivrage sur événement.

### 2.5.2.3 Audit énergétique et smart grids

La rénovation énergétique du bâti tout comme le pilotage énergétique des quartiers passe utilement par une identification plus ou moins détaillée de leur comportement thermique effectif, ce qui permet de guider finement les choix de rénovation et de proposer des stratégies efficaces de chauffage ou d'effacement qui, quelle que soit la stratégie de contrôle-commande retenue ont intérêt à s'appuyer sur un comportement fidèle des composants.

2.5.2.3.1 Caractérisation des enveloppes : La modélisation inverse en thermique du bâtiment associée à des algorithmes spécifiques a débouché sur une méthode rapide et peu coûteuse pour estimer tout à la fois la conductivité de la paroi d'une enveloppe, la température en paroi et le flux de chaleur externe en conditions ambiantes, c'est-à-dire que l'on peut facilement mettre en oeuvre ce procédé in situ. Des tests en chambre climatique à l'IFSTTAR ainsi qu'une validation dans le bâtiment MARIA du CSTB dans le cadre du projet IMMANENT ont confirmé le bien-fondé de l'approche.

2.5.2.3.2 Vers l'effacement diffus des pics de chauffage électrique fondé des modèles avec garantie de confort : Dès sa création la start-up Actility nous a confié une partie importante de son plan de développement visant des technologies clés pour l'effacement énergétique dans les villes via le pilotage de smart grids fondé sur une modélisation réaliste des noeuds, typiquement les bâtiments ou ensembles. On a développé un système de gestion en temps réel des appareils de chauffage d'un quartier d'habitation sur la base d'algorithmes d'identification utilisant une instrumentation minimaliste de chaque bâtiment et une station météo mutualisée au niveau du quartier considéré, ou de la ville.

On s'est investi dans le développement de modèles pour identifier la capacité thermique d'un bâtiment, définie comme la quantité d'énergie disponible permettant un déplacement des charges de chauffage sans sortir d'une zone de confort donnée.

Le modèle multizone développé a permis de montrer l'observabilité des différents paramètres physiques utiles qui régissent l'état énergétique d'un bâtiment, y compris les sources. Grâce à une méthode à deux échelles, on est capable d'identifier tout à la fois l'état et les neuf paramètres principaux qui régissent la thermique du bâtiment, avec très peu d'information a priori. L'algorithme de descente à pas vectoriel à la base des résultats constitue un apport méthodologique original. On a également établi une stratégie de régulation fondée sur le contrôle optimal sous contrainte permettant un gain de chauffage tout en respectant des conditions prescrites de confort thermique. Ces résultats constituent des briques utiles au déploiement efficace des Smart Grids.

2.5.2.3.3 Régulation thermique informée : Le projet PRECISION et son porteur, A. Nasipoulos, ont été distingués par la revue International Innovation. Le projet a posé les bases d'une régulation thermique optimale de bâtiments fondée sur des modèles physiques calibrés par méthode inverse et une prévision météorologique sommaire à court terme. Les expérimentations sur les maisons INCA de l'INES montrent un gain énergétique de 30% par rapport à une régulation usuelle par PID.

En termes d'impact, ces avancées en partie brevetées et cristallisées dans le code de calcul RETROFIT nous ont permis de contribuer à la doctrine nationale sur la Garantie de Performance Énergétique, promue par la fondation Bâtiment Énergie. Elles sous-tendent également la création de la start-up ECOTROPY.

2.5.2.3.4 Pilotage de l'énergie au sein d'une gare, avec Efficacy : En simulation numérique, le pilotage énergétique de la ventilation ou la récupération d'énergie de freinage des métros pour réutilisation dans les gares de type RATP montrent une réduction significative et crédible de la facture énergétique de celles-ci avec un maintien sinon une amélioration du niveau de qualité de l'air. Ces travaux exploitent et approfondissent les lois de contrôle de type MPC (Model Predictive Control) et SDP (stochastic Dynamic Programming). Ils débouchent sur la preuve de concept d'un microgrid mettant à profit des régulations ou des flux énergétiques ignorés jusqu'ici. Un démonstrateur réel s'est créé à la RATP, un autre s'implante dans la mini-ville de Sense-City pour tester l'intérêt de smart grids exploitant simultanément différentes sources d'énergie (géothermie, route solaire ...).

### 2.5.3 Changement climatique : résilience des réseaux de transport et leur adaptation

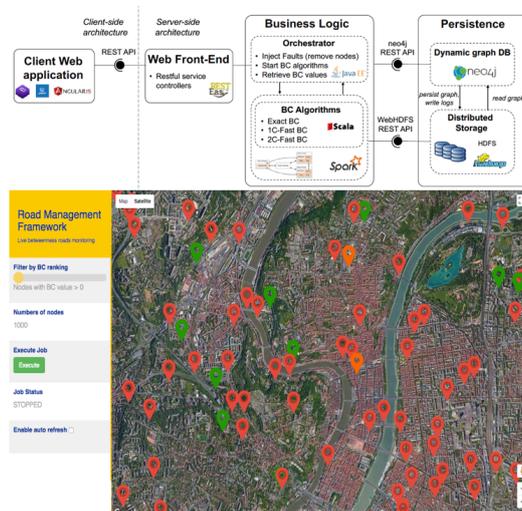


Figure 2.41 – Plate-forme pour le monitoring de la vulnérabilité des réseaux - Exemple de l'agglomération Lyonnaise.

La résilience constitue une propriété clé pour rendre plus intelligentes, durables et sûres les villes du futur. La centralité d'intermédiarité, ou Betweenness Centrality (BC), est une métrique souvent utilisée dans le domaine du transport pour quantifier la résilience d'un réseau ou sa vulnérabilité. Cependant, le calcul de cette métrique sur des grands réseaux reste très complexe, difficile à traiter dans des temps raisonnables, en particulier dans les régions métropolitaines qui contiennent un nombre considérable de liens et d'intersections.

Des travaux récents menés à COSYS ont proposé un algorithme adaptatif pour calculer des valeurs approximatives de centralité d'intermédiarité qui permet un très bon compromis entre la précision du calcul et le temps d'exécution. L'algorithme vise à réduire le nombre de calculs en exploitant les propriétés topologiques des graphes et des clusters.

Sur la base de l'algorithme, nous avons développé une plate-forme pour le monitoring (quasi) temps-réel de la vulnérabilité du réseau et pour effectuer des analyses de contingence sur le réseau routier, cf. figure 2.41.