Systèmes de transports ferroviaires et urbains

Sous la direction de
Federico Antoniazzi et Patricia Perennes

Presses des Ponts

COLLECTION
Manuels

SYSTÈMES DE TRANSPORTS FERROVIAIRES ET URBAINS

Systèmes de transports ferroviaires et urbains

Sous la direction de
Federico Antoniazzi et Patricia Perennes

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES
IP PARIS
Presses des Ponts
ALLIANCE SORBONNE UNIVERSITÉ
utc
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES HAUTS-DE-FRANCE

ISBN 978-2-8597-8566-6
© Octobre 2024
ISSN en cours
Collection Manuels n° 2
Dépôt légal Octobre 2024

Presses des Ponts
21 Boulevard de l'hôpital, 75005 Paris
École nationale des ponts et chaussées

École nationale des ponts et des chaussées
6-8 avenue Blaise-Pascal
Cité Descartes – Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée cedex 2

Conception et réalisation éditoriale
Pierrine Malette, chargée d'édition
direction de la Documentation, des archives et du patrimoine,
École nationale des ponts et chaussées

Mise en page
Desk
25, boulevard de la Vannerie
53940 Saint Berthevin
www.desk53.com.fr

Photo de couverture : Rame Régiolis du Léman Express en gare de Bellegarde
© Marc Debrincat, 17 avril 2022.

Sommaire

Remerciements 9

Préface 11

Avant-propos 13

Chapitre 1 | Les quinze ans du mastère spécialisé® Systèmes de transports ferroviaires et urbains
Federico Antoniazzi

1.1. Une formation diplômante tournée vers l'industrie ferroviaire 15
1.2. La vision « système » proposée par le MS STFU 16
1.3. Une pédagogie innovante et évolutive 17
1.4. Les conférences thématiques, les voyages d'études et la vie associative de l'AEMF 18
1.5. Innovation, internationalisation et recherche dans la stratégie de développement du MS 19

Chapitre 2 | L'enseignement ferroviaire à l'École nationale des ponts et chaussées
Federico Antoniazzi, Georges Ribeill

2.1. Le développement des chemins de fer et des transports urbains en France 21
2.2. Le rôle du corps des ponts et chaussées 25
2.3. Les enseignants de l'École et leurs enseignements 28

Pour approfondir 35
Focus n°1 – Enseigner le ferroviaire à l'École nationale des ponts et chaussées 36
Focus n°2 – Penser l'enseignement des chemins de fer : la vision de Jean Alias 37
Focus n°3 – Biographies d'enseignants marquants de l'École nationale des ponts et des chaussées 37

Chapitre 3 | Enjeux, acteurs et institutions du transport ferroviaire et urbain en France et à l'international
Laura Foglia, Patricia Perennes, Géraud Peytavy

3.1 . Introduction aux transports collectifs urbains : perspective historique et enjeux 42
3.2. Introduction aux transports ferroviaire : perspective historique et enjeux 52

Pour approfondir 67
Étude de cas n°1 – Cas pratique : la mise en concurrence des services TER d'une Région 68

Chapitre 4 | La conception d'un système de transport ferroviaire et urbain par la mise en œuvre des méthodologies d'ingénierie système
Didier Dupré

4.1. Introduction à la conception générale des systèmes de transport 73
4.2. Choisir un système de transport urbain 73
4.3. Le dimensionnement d'un système de transport 80
4.4. Les choix technologiques majeurs et leurs incidences sur le système 83
4.5. La définition et l'intégration dans les villes des systèmes tramways 90

Pour approfondir 95
Étude de cas n°2 – Le projet Light Rail Transit (LRT) Red Line de Tel-Aviv (Israël) 96
Focus n°4 – Une illustration typique d'un projet de système urbain : la définition du réseau du Grand Paris express 99

Chapitre 5 | L'économie du système ferroviaire
Martin Koning, Patricia Perennes, Alain Sauvant

5.1. Les spécificités de l'économie ferroviaire : premier aperçu 101
5.2. Différents modèles économiques 107
5.3. Perspectives de l'économie du système ferroviaire 130

Chapitre 6 | Exploitation
Pierre-Marie Verchere

6.1. L'exploitation ferroviaire : présentation générale 138
6.2. La gestion des ressources de l'exploitation 144

Chapitre 7 | Génie civil et infrastructures lourdes
Christian Schang, Patrick Le Frapper, Serge Montens

7.1. Les ouvrages d'art ferroviaires dans un projet de système de transport guidé 184
7.2. Les ouvrages souterrains ferroviaires urbains (métro, RER, tramways) 197

Chapitre 8 | Infrastructure et maintenance

Laurent Bouillaut, Willem-Jan Zwanenburg

8.1. La voie ferrée et ses interfaces 212
8.2. Le traitement du bruit et des vibrations de la voie ferrée 213
8.3. Une première question à la conception : voie sur dalle ou voie ballastée ? 215
8.4. L'électrification : un problème simple à énoncer, mais souvent très difficile à résoudre 217
8.5. L'*asset management* : du besoin de performance aux travaux à réaliser 220
8.6. Les suites rapides, trains usines de régénération de l'infrastructure 222
8.7. Innovation dans les process de maintenance et de construction des voies 225
8.8. Comparaison européenne de l'organisation de la maintenance de l'infrastructure : les mêmes… mais différents ! 227

Chapitre 9 | Sécurité ferroviaire

Jean-Noël Benso, Guy Larraufie, Gilbert Moëns, Jacques Poré, Walter Schön

9.1. L'importance de la sécurité dans le ferroviaire 231
9.2. Les principaux accidents potentiels du ferroviaire 232
9.3. Les causes possibles de ces accidents potentiels 234
9.4. Les principales fonctions de sécurité ferroviaire 236
9.5. La protection des voyageurs 236
9.6. Mise en œuvre de la sécurité ferroviaire 238

Chapitre 10 | La signalisation ferroviaire

Jean-Noël Benso, Guy Larraufie, Gilbert Moëns, Jacques Poré, Walter Schön

10.1. L'espacement des trains 245
10.2. Les postes d'aiguillage et les enclenchements : commander les aiguillages, autoriser les itinéraires 249
10.3. La détection et la localisation des trains 254
10.4. La signalisation latérale et vue du conducteur 258
10.5. Signalisation de cabine et contrôles de vitesse (KV-ATP) 266
10.6. Les passages à niveau 281
10.7. Signalisation, contrôles de vitesse et pilotages automatiques des transports urbains 283
10.8. Systèmes d'automatisation des transports urbains 287
10.9. Centraliser les commandes 295
10.10. Réalisation d'un projet de signalisation 296

Chapitre 11 | Le matériel roulant ferroviaire
Marc Debruyne, Bernard Desmet, Samuel Hibon
11.1. Les caisses du véhicule ferroviaire : un composant de premier ordre 302
11.2. Les organes de roulement et les bogies 303
11.3. Le système de traction 307
11.4. Les systèmes de freins : leurs technologies et leurs applications 320
11.5. Le système de contrôle-commande d'un véhicule ferroviaire 323
11.6. Les aménagements intérieurs 330

Les auteurs 337

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des intervenants du MS, nos partenaires académiques et professionnels, ainsi que les directeurs de trois écoles pour la confiance dans l'élaboration de ce manuel. Nous tenons à remercier la direction de la Documentation, des archives et du patrimoine de l'École nationale des ponts et chaussées (Stéphanie Rivoire, Pierrine Malette et Guillaume Saquet), ainsi que les Presses des Ponts (Jean-François Figuié et Laurent Deschryver) pour leur support dans la réalisation et publication de ce travail.

Préface

Le mastère spécialisé® Systèmes des transports ferroviaires et urbains (MS STFU) représente le résultat d'une collaboration de longue date entre nos trois écoles partenaires. Avec l'appui et la collaboration des partenaires industriels, ce mastère apporte une vision « système » pour former et encourager l'émergence des compétences multidisciplinaires dans les domaines des transports. En France comme à l'international, une attention accrue est portée sur les enjeux climatiques et sociaux caractérisant le monde des transports ferroviaires et urbains. Chaque école partenaire est engagée à travers ses enseignants et ses intervenants pour apporter des compétences spécifiques dans son domaine de spécialisation : l'École nationale des ponts et chaussées, par sa vocation et sa tradition dans la formation des ingénieurs et fonctionnaires, dans les domaines du génie civil, de l'environnement et de la mobilité ; l'INSA Hauts-de-France dans le domaine de l'énergétique, du génie électrique et du génie mécanique, en lien avec le pôle de compétitivité et d'excellence dans le domaine du matériel roulant situé à Valenciennes ; et l'Université de technologie de Compiègne, dans le génie informatique et l'automatisation, qui constituent des domaines d'innovation pour la conduite autonome des trains et des métros automatiques. La collaboration de nos trois écoles, élargie à des partenaires industriels (Fédération des industries ferroviaires, SNCF, RATP, Alstom, Hitachi Rail, Siemens, Keolis) et institutionnels (Agence française de développement, Établissement public de sécurité ferroviaire, Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés) a permis de former depuis 2008 plus de cinq cents élèves issus des entreprises partenaires, des étudiants étrangers ou des jeunes professionnels.

Répondant à des objectifs sociaux et aux enjeux liés au changement climatique, cette formation est en parfaite adéquation avec les missions de service public, tout en répondant aux exigences des entreprises de la filière ferroviaire, qui constituent un atout pour la compétitivité économique de la France, y compris sur la scène internationale. À l'occasion des quinze ans du mastère, les écoles partenaires ont soutenu l'initiative de cet ouvrage, qui rassemble et présente de manière pédagogique le contenu de la formation proposée au sein du mastère. L'objectif est de s'adresser à un large public d'experts dans le domaine de la mobilité, ainsi qu'à des futurs potentiels candidats. C'est dans cet esprit que nous vous invitons à parcourir cet ouvrage, fruit d'une collaboration d'excellence entre nos trois écoles.

Nous profitons de cette occasion pour remercier chaleureusement Federico Antoniazzi, directeur du MS STFU, ainsi que l'ensemble des directeurs et directrices qui se sont succédés depuis 15 ans (Françoise Manderscheid, Jean-Fréderic Benoit), pour leur engagement sans faille, permettant ainsi un maintien constant de l'attractivité et de la pertinence des enseignements du mastère.

Claire Rossi
Directrice de l'Université de technologie de Compiègne

Armel de la Bourdonnaye
Directeur de l'INSA Hauts-de-France

Anthony Briant
Directeur de l'École nationale des ponts et chaussées

Avant-propos

L'intuition qui a permis la création en 2008 du mastère spécialisé® Système de transports ferroviaires et urbains (STFU), en partenariat avec de grandes entreprises du secteur et des établissements d'enseignement supérieur, montre aujourd'hui toute sa pertinence.

Les opérateurs historiques et les grands industriels du matériel roulant et de la signalisation souhaitaient élargir les compétences de leurs ingénieurs et cadres pour leur donner une vision plus large des enjeux techniques, mais aussi commerciaux, économiques, sociétaux et réglementaires des transports ferroviaires et urbains, dans un contexte international. Ils voulaient aussi pouvoir compléter la formation de jeunes diplômés sur ce large champ. La rencontre avec trois écoles couvrant tout ce spectre a permis de donner chair à ce projet.

Aujourd'hui, la décarbonation des transports est devenue une urgence, et le développement du ferroviaire et des transports urbains écologiques apparaît comme une solution incontournable pour proposer une mobilité durable.

Former des experts, des spécialistes et des exploitants de haut niveau est une des clés stratégiques pour que le secteur puisse relever ces défis. De nouvelles entreprises rejoignent aujourd'hui les fondateurs, convaincues de l'intérêt de la démarche.

Trois caractéristiques de la formation sont aujourd'hui particulièrement bien adaptées aux attentes des entreprises.

Tout d'abord, le mastère illustre à toute occasion, et rappelle comme un mantra, l'aspect « système » du ferroviaire. En effet, tout a un impact sur la performance finale, qui est la contrepartie attendue des lourds investissements consentis par la collectivité. Ce qui est exacerbé par les caractéristiques techniques du ferroviaire lourd justifie aussi en grande partie la nécessité de concevoir de façon cohérente les véhicules, les infrastructures et les systèmes d'exploitation des transports urbains.

La deuxième force du mastère est qu'il répond au besoin croissant des ingénieurs et des experts de connaître l'aval, l'amont et les « à-côtés » de leur spécialité. Comprendre les besoins des clients et utilisateurs, les conditions d'utilisation, les attentes sociétales, le cadre économique est essentiel à celui qui conçoit. Depuis peu, cette compréhension est tout aussi essentielle à cause de la concurrence croissante chez les opérateurs ferroviaires. Les entreprises historiques, structurées en grandes entités mono-produit, font place à de petites entités d'offre ou d'exploitation nécessitant de « bons généralistes » capables d'embrasser les enjeux de plusieurs métiers.

Enfin, l'ouverture internationale de la formation est plus précieuse que jamais pour les industriels comme les exploitants, affrontés à une compétition mondiale et recherchant aussi les solutions les plus performantes développées ou expérimentées sous d'autres cieux.

Cet ouvrage témoigne du partenariat original et efficace entre opérateurs, industriels, établissements d'enseignement supérieur et organismes du secteur qui a permis l'éclosion et le développement du mastère spécialisé STFU. Il reflète notamment, par les sujets de ses chapitres, un enseignement unique en France, dont la largeur et la profondeur permettent de rendre compte du système étudié. La palette de ses auteurs illustre la diversité des compétences et expériences

d'un corps enseignant, issu à la fois de l'École nationale des ponts et chaussées (ENPC), de l'INSA Hauts-de-France, de l'Université de technologie de Compiègne (UTC), du monde universitaire et des entreprises partenaires, au plus grand bénéfice des élèves.

Au nom du comité de pilotage du mastère, je remercie tous les contributeurs de cette œuvre collective et originale. Je souhaite que cet ouvrage permette à beaucoup de lecteurs de découvrir « en relief » l'univers des transports ferroviaires et urbains, sa complexité et ses enjeux.

Je forme aussi le vœu qu'il donne aux plus motivés d'entre eux l'envie de s'engager plus avant dans ce secteur passionnant et de rejoindre la communauté des Alumni du mastère spécialisé.

Jean-Claude Larrieu
Président du comité de pilotage du mastère spécialisé STFU
Directeur des risques, des audits, de la sécurité et de la sûreté à la SNCF

Chapitre 1 | Les quinze ans du mastère spécialisé® Systèmes de transports ferroviaires et urbains

Federico Antoniazzi

Le mastère spécialisé® (MS) Systèmes de transports ferroviaires et urbains (STFU) est une formation diplômante de haut niveau créée en 2008 en partenariat entre l'École nationale des ponts et chaussées (ENPC), l'INSA des Hauts-de-France (HdF) et l'Université de technologie de Compiègne (UTC). Cette formation vise à former des cadres et les spécialistes dans les domaines des transports ferroviaires et urbains en France comme à l'international, en proposant une vision système en lien avec des entreprises du secteur. Faisons un retour sur les quinze ans depuis la création du MS pour montrer ses atouts, les évolutions passées et à venir pour rester compétitif et toujours en lien avec les changements technologiques et sociétaux du monde des transports ferroviaires et urbains.

1.1. Une formation diplômante tournée vers l'industrie ferroviaire

Le MS est une formation de haut niveau reconnue par la Conférence des Grandes Écoles (CGE), accessible au niveau Bac+ 4/5 ou une équivalence professionnelle, qui délivre un titre universitaire à l'issue de la période de formation. Dans le cadre du MS STFU, la période de formation se déroule de septembre à juin en alternance (une semaine à l'école et une semaine en entreprise) pour un total de 520 heures de formation. Elle est suivie d'une période de stage ou de mission professionnelle en entreprise de 4 à 5 mois, qui permet d'élaborer une thèse professionnelle. Cette alternance permet en effet aux élèves, salariés ou jeunes professionnels, de suivre cette formation tout en restant actif au sein de leur entreprise, ou dans le cadre d'une mission professionnelle en alternance accessible grâce à la reconnaissance du diplôme par le Registre national des compétences professionnelles (RNCP), qui délivre à l'issue de cette formation un titre de niveau 7 d'expert international en systèmes de transports ferroviaires et urbains. C'est en effet la demande des industriels, des exploitants et d'autres acteurs du monde ferroviaire qui a motivé la création de cette formation en 2008, époque pendant laquelle des changements profonds dans l'organisation des transports ferroviaires et urbains se sont produits. Une meilleure prise en compte de l'environnement économique et institutionnel, une vision plus systémique des enjeux techniques et réglementaires ou encore une meilleure compréhension du marché des transports

ferroviaires et urbains à l'international, a conduit à la mise en place de ce cursus par les exploitants historiques (SNCF, RATP) et les industriels du domaine (Alstom, Bombardier Transports, Siemens, Hitachi Rail) avec le soutien de la Fédération des industries ferroviaires (FIF), le pôle de compétitivité i-Trans et Ville et Environnement. Après une première phase de conception du projet, trois établissements partenaires[1], l'ENPC, l'INSA (ex-Ensiame, École nationale supérieure des ingénieurs en informatique, automatique, mécanique, énergétique et électronique) et l'UTC, ont relevé le défi de proposer une formation de haut niveau répondant aux exigences à la fois académiques et professionnelles. Elle permet ainsi de répondre de manière satisfaisante aux enjeux de la filière ferroviaire en palliant le manque de formation transverse couvrant l'ensemble des métiers de la filière ferroviaire, incluant les aspects techniques mais également économiques et sociétaux. En effet, par leur expertise et leurs domaines de spécialisation, ces trois écoles recouvrent l'ensemble des champs d'applications et compétences requises, à savoir : l'ENPC pour la partie infrastructure, exploitation et économie des transports, l'INSA pour la partie conception système et matériel roulant, et l'UTC pour la partie signalisation, automatisation et sûreté de fonctionnement.

1.2. La vision « système » proposée par le MS STFU

Au-delà des enjeux exposés plus haut, soit une meilleure compréhension de l'environnement économique, institutionnel et réglementaire dans lequel s'inscrit le transport ferroviaire et urbain, le MS STFU vise avant tout à apporter une vision systémique en appréhendant les caractéristiques et interfaces entre les différents sous-systèmes qui composent les systèmes de transports ferroviaires et urbains. Pour cela, le plan de formation du MS STFU est décomposé en modules, qui traitent de chaque sous-système de manière détaillée, ainsi que des interfaces et des enjeux dans leur ensemble. Cette décomposition est effectivement nécessaire pour mobiliser à chaque fois les connaissances théoriques et pratiques propres à chaque sous-système, tout en tenant compte de l'origine des professionnels suivant la formation, qui parfois ne connaissent de manière détaillée qu'un sous-système seulement. L'objectif étant, à l'issue de la formation, de transformer l'expert métier en un véritable intégrateur système ou en un chef de projet capable de comprendre rapidement les enjeux de chaque sous-système, en apportant une solution globale ou clés en main pour tous les acteurs de la filière ferroviaire. Cette vision répond de plus en plus à l'évolution technologique et économique du monde des transports ferroviaires et urbains, qui, par leur complexité croissante, exigent plusieurs expertises au sein d'un même projet, tant en France qu'à l'international. Cette évolution, très visible depuis une quinzaine d'années, est certainement amenée à s'intensifier à l'avenir, compte tenu de la croissance de la demande de mobilité et des enjeux sociétaux et climatiques. Si les transports ferroviaires et urbains répondent aux défis posés par le changement climatique de façon globalement satisfaisante (faible niveau d'émission de CO_2, haute efficacité et rendement énergétique), il est vrai que la recherche de solutions optimales aux phénomènes de congestion urbaine observés dans toutes les mégalopoles, l'insertion de

1. Initialement l'ENTPE, l'École Centrale Paris et l'École Centrale de Lille étaient aussi parmi les partenaires académiques de la formation.

nouveaux moyens de transport urbains dans les villes, ou encore les enjeux d'aménagement du territoire requièrent des compétences et solutions de plus en plus spécialisées et complexes, en France comme à l'international. L'objectif du MS STFU est aussi de familiariser les élèves à ses enjeux et à ses objectifs, afin de pouvoir répondre de manière satisfaisante aux différentes contraintes imposées par les évolutions à venir, tant dans le domaine du ferroviaire conventionnel que dans celui des transports guidés urbains.

1.3. Une pédagogie innovante et évolutive

Dans le but d'apporter cette vision « système », la pédagogie du MS STFU a été conçue de manière innovante par rapport à la tradition universitaire, tout en garantissant un haut niveau d'exigence académique en lien avec les prérequis de la formation. Les modules qui composent le plan de formation se déroulent la semaine, du lundi au vendredi, à temps plein et en présentiel uniquement. Les intervenants, pour la plupart issus du monde professionnel, délivrent à la fois des cours théoriques et pratiques, ou des conférences thématiques en lien avec le contenu du module, dont un responsable garantit la cohérence et la conformité au plan de formation. Les évaluations de chaque module se traduisent par des examens classiques (exposé, tests de connaissance, etc.), et le plus souvent par des études pratiques que les élèves élaborent en petits groupes, afin d'intégrer dans la formation la notion de gestion d'équipe et de projet. À titre d'exemple, les élèves élaborent des projets portant à la fois sur :

- le tracé et génie civil d'une infrastructure de transport ferroviaire ou urbain ;
- la réponse à un appel d'offres pour du transport ferroviaire régional conventionné ;
- un projet de matériel roulant type navette autonome, tramway, métro automatique ou rame à grande vitesse ;
- un plan de signalisation d'une station de métro ou l'ERTMS niveau 2 en signalisation ferroviaire ;
- une étude de préfaisabilité pour un projet de transport ferroviaire ou urbain à l'international, à la demande d'une ambassade ou agence de financement.

Ce dernier projet international, par exemple, se déroule tout au long de l'année afin d'assimiler et appliquer les différentes notions propres à chaque sous-système. Le projet est encadré par une équipe pédagogique avec la participation de l'Agence française de développement (AFD) et fait l'objet, chaque année, d'une publication en anglais et en français, diffusée *via* le site de l'école et de l'AFD. Cette pédagogie a également évolué, de façon plus ou moins importante, depuis l'origine du MS STFU. La dénomination initiale du mastère, « Système de transports ferroviaires et guidés », a été transformée en « Systèmes de transport ferroviaires et urbains » pour rendre compte de ces changements. Les deux parcours initialement prévus, ingénierie et management, ont été fusionnés rapidement en un tronc commun, pour prendre en considération la nécessité de préserver la vision système pour l'ensemble des futurs diplômés. Le choix de modules optionnels a été revu et le contenu de certaines interventions a été adapté ou remis à jour. De nouveaux thèmes sont aussi apparus, comme le *mass transit*, la cybersécurité, l'ouverture à la concurrence dans le transport des voyageurs, ou encore la traction par batterie et à hydrogène

qui remplace progressivement la traction diesel. Le programme du MS STFU est évalué par les élèves chaque année, quelques adaptations s'avérant en effet parfois nécessaires (en particulier pour intégrer des évolutions technologiques, comme l'utilisation de la localisation par satellite), tout en garantissant une conformité et cohérence globale au plan de formation. Ces évolutions sont d'ailleurs discutées lors d'un comité de pilotage, qui se réunit une fois par an, et qui compte parmi ses membres :

- les écoles partenaires (ENPC, INSA, UTC) ;
- les industriels de la filière (notamment Alstom, Hitachi Rail, Siemens) ;
- les exploitants ferroviaires et urbains (SNCF, RATP, Keolis) ;
- des observateurs institutionnels (FIF, EPSF, STRMTG, etc.).

La participation à ce comité de pilotage est d'ailleurs ouverte à des entreprises qui en font la demande, en lien avec leur propre besoin de formation.

1.4. Les conférences thématiques, les voyages d'études et la vie associative de l'AEMF

En plus de son caractère universitaire, le MS STFU se veut également être un lieu de rencontres et d'échanges pour des professionnels impliqués dans l'univers des transports ferroviaires et urbains. Les élèves côtoient des professionnels de renom, qui interviennent parfois dans le MS STFU depuis son origine. Ils accèdent également à toute une série de contacts et d'opportunités offertes par le monde professionnel, comme l'AFFI (Association ferroviaire française des ingénieurs et cadres) ou encore la RGCF (*Revue générale des chemins de fer*), qui publie régulièrement des travaux issus des thèses professionnelles. Chaque année, sauf cas de force majeure, le MS STFU organise un voyage d'études à l'étranger, qui a eu lieu entre autres en Angleterre, en Chine, en Italie, en Allemagne, ou aux Pays-Bas. Ce voyage d'une semaine permet de rentrer en contact avec des acteurs de la filière différents de ceux présents en France, de comparer les solutions adoptées et de nourrir un réseau professionnel international. En plus de cela, le MS STFU et l'association des anciens élèves du mastère Ferroviaire (AEMF) organisent des conférences annuelles, ouvertes aux élèves et *alumni*, qui permettent d'aborder des thèmes d'actualité, comme la réponse aux appels d'offres dans le transport régional des voyageurs, la mise en place du cadencement, le développement des infrastructures en Afrique, le train autonome, etc. L'AEMF, qui compte désormais plus de 400 anciens élèves, organise également des événements conviviaux et des mises en relation avec les acteurs du monde professionnel, entre autres.

1.5. Innovation, internationalisation et recherche dans la stratégie de développement du MS

À l'issue de ses 15 ans, le MS STFU affiche un bilan très positif, tant par le retour des anciens élèves que par celui des professionnels associés à son élaboration. Le thème de la formation dans le domaine des transports ferroviaires et urbains est aujourd'hui au cœur des enjeux du secteur et des transitions écologiques, énergétiques et numériques, compte tenu notamment des nombreuses exigences (techniques, réglementaires, environnementales…), du manque de profils et des contraintes au niveau des ressources humaines. Le MS STFU compte maintenir et développer sa place de formation de haut niveau, alors que de nombreuses initiatives similaires se multiplient. Pour cela, la stratégie de développement du MS STFU repose sur trois piliers, qui seront étendus dans les années à venir :

1. Le thème de l'innovation s'avère essentiel pour proposer une formation en lien avec les évolutions technologiques et les changements du secteur. L'innovation ne se limite pas pour autant aux seuls aspects techniques, elle touche également à toutes les évolutions propres à l'environnement économique, politique et institutionnel des transports ferroviaires et urbains. Le MS STFU travaille activement en collaboration avec des clusters, comme l'Institut de recherche technologique (IRT) RAILENIUM dans les Hauts-de-France, ou encore l'association Rail Open Lab. D'autres collaborations de ce type sont à l'étude, par exemple pour proposer aux élèves un environnement de travail pendant leur thèse professionnelle ou même après le MS STFU.

2. L'internationalisation représente le deuxième enjeu stratégique du MS STFU, afin de développer sa visibilité en dehors de la France. L'industrie ferroviaire étant aujourd'hui largement tournée vers l'international, y compris pour les exploitants historiques, le MS STFU souhaite apporter une vision plus internationale des enjeux des transports ferroviaires et urbains, en lien avec les enseignements et intervenants. Quand bien même les cours sont pour la plupart délivrés en français (certains supports étant d'ores et déjà en anglais), un bon niveau d'anglais est requis lors du processus de sélection, et un tiers des élèves provient de l'étranger.

3. Enfin, la recherche représente un axe de développement du MS STFU afin de renforcer ses liens avec le monde industriel et académique. Le MS STFU fait désormais partie de l'alliance des universités pour la grande vitesse, sous l'égide de l'UIC (Union internationale des chemins de fer) et du réseau de recherche européen Eurnex. La participation à ces réseaux permet à l'équipe pédagogique du MS STFU de rester en contact avec le monde de la recherche, au bénéfice des élèves et des enseignants.

In fine, pour capitaliser le savoir et les connaissances accumulées depuis la création du MS STFU, plusieurs ouvrages issus des cours dans les domaines du matériel roulant et de la signalisation ferroviaire ont été publiés et sont actuellement disponibles en librairie. Enfin, l'ensemble des modules de la formation sont maintenant rassemblés dans le présent ouvrage collectif, édité en 2024 par les Presses des Ponts.

Au chapitre suivant : L'enseignement ferroviaire à l'École nationale des ponts et chaussées