



Département COSYS

Lettre d'information du laboratoire ESTAS

Février 2024

Département COSYS

Composants et
Systèmes

Évaluation des
Systèmes de
Transports
Automatisés et de leur
Sécurité

estas.univ-gustave-eiffel.fr

Dans ce numéro

Édito du directeur

Trains autonomes :
Approche orientée
risques pour la prise de
décision

RECIFE : Prise en
compte des passagers

Actualités

Nouveaux projets

Fin de projets

Recrutement

Événements
scientifiques

Nouvelles thèses

Édito du directeur

Au sommaire de ce premier numéro de l'année 2024, la présentation d'une approche d'évaluation du risque et d'aide à la décision dédiée à la conduite ferroviaire autonome. L'approche, basée sur le processus décisionnel de Markov partiellement observable permet d'assurer une surveillance continue de l'environnement pour garantir la sécurité opérationnelle. Par la suite, une nouvelle réalisation de l'équipe gestion de trafic est esquissée. Elle concerne l'intégration dans notre plateforme RECIFE de la prédiction des flux de passagers en temps réel et leur affectation aux trains. Dans la rubrique Actualités, trois nouveaux projets lancés récemment sont présentés ; le premier concerne une collaboration avec l'entreprise italienne TRENOLab autour de différents algorithmes de gestion des opérations ferroviaires. Le second, REINFORCERAIL, est un projet franco-allemand autour de l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'optimisation de la gestion de trafic ferroviaire. Enfin, MobiLoos porté par les laboratoires ESTAS et LaPEA dans le cadre du programme ExcellencES du Plan d'Investissements d'Avenir, vise à accompagner le changement de comportement de mobilité en vue de réduire l'empreinte carbone.

Toujours dans la rubrique Actualités, une courte présentation est faite des projets PERFORMINGRAIL (Shift2Rail) et Navette Autonome, qui viennent de s'achever. En outre, d'autres éléments sont listés. Ils concernent le démarrage de nouvelles thèses, le recrutement d'un nouveau chargé de recherche qui vient de rejoindre l'équipe Sécurité, les manifestations scientifiques auxquelles les agents du laboratoire ont pris part, ainsi qu'une liste des nouvelles parutions.

En vous souhaitant une très bonne lecture. N'hésitez pas à prendre contact avec les référents indiqués pour plus de détails.

[Mohamed Ghazel](#), Directeur d'ESTAS

Trains autonomes : Approche orientée risques pour la prise de décision

Dans le train autonome, la tâche et la responsabilité d'évaluation des risques en opération et la prise de décision incombe désormais au système

de conduite autonome. L'équipe Sécurité du laboratoire, notamment dans le cadre de la thèse de Mohammed Chelouati, a élaboré une approche de prise de décision basée sur l'évaluation dynamique des risques. L'approche utilise le Processus Décisionnel de Markov Partiellement Observable (POMDP) et vise à assurer une surveillance continue de l'environnement pour garantir la sécurité opérationnelle, en particulier la prévention des collisions. L'approche repose sur le principe du maintien d'un niveau de risque acceptable (maintien d'une évaluation continue de la gravité ainsi que de la probabilité d'occurrence de collisions) grâce à une estimation et une actualisation continues de l'état opérationnel du train et des données de perception de l'environnement.

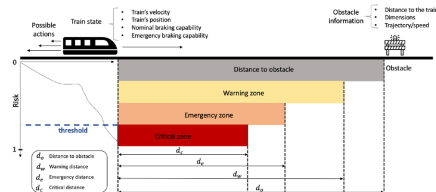
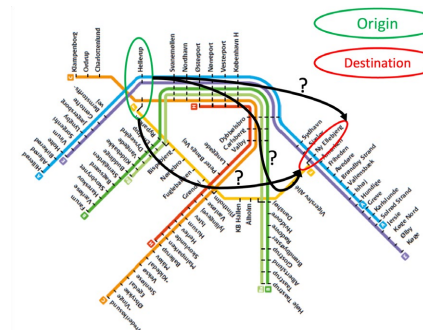


Illustration d'un cas d'étude concernant l'évaluation dynamique de risque de collision avec un obstacle sur la voie.

Contact : [Abderraouf Boussif](#)

Prise en compte des passagers dans RECIFE*

L'équipe "Gestion de trafic" du laboratoire a proposé une variante de l'algorithme RECIFE-MILP définissant les itinéraires et les horaires des trains en cas de perturbations, pour intégrer les choix et les retards des passagers. Cette variante est intégrée dans une approche d'optimisation prédictive, avec un module de prédiction de la demande basée sur l'intelligence artificielle et un module d'affectation des passagers aux trains. Le premier module prédit les futurs flux de passagers à l'aide des données observées en temps réel. Le deuxième affecte les passagers aux trains. L'algorithme RECIFE-MILP utilise ensuite l'affectation pour optimiser l'horaire. L'intégration a été validée sur un cas d'étude du réseau ferroviaire urbain de Copenhague. Les résultats montrent qu'il est possible de prendre en compte les choix et les retards des passagers en temps réel sans réduire l'efficacité du système par rapport aux approches classiques.



Exemple de choix possibles pour un usager sur le réseau ferroviaire urbain de Copenhague.

*RECIFE : REcherche sur la Capacité des Infrastructures FERroviaires

Contact : [Paola Pellegrini](#)

Actualités

Nouveaux projets

Contribution to algorithm design

La collaboration s'inscrit dans la cadre du développement par TRENOLab de prototypes d'outils pour l'optimisation de problèmes liés à la conception de services ferroviaires. Ces outils peuvent couvrir, entre autres, l'optimisation des roulements du personnel, la production de grilles horaires ou la gestion du trafic en temps réel. Avec cette prestation, l'Université Gustave Eiffel participe à la conception d'algorithmes du champ d'activités de TRENOLab à travers des discussions sur la mise en place et le raffinement des différents choix algorithmiques.

Ce contrat est financé par TRENOLab Srls.

Contact : [Paola Pellegrini](#)

REINFORCERAIL - Railway Efficiency Fostered by Operations Research Empowering Artificial Intelligence

Le projet REINFORCERAIL est un projet franco-allemand sur la période 2023-2027. Il propose une nouvelle composante intelligente du système de gestion de trafic basée sur l'Intelligence Artificielle (IA). Des résultats préliminaires ont montré que la gestion du trafic basée sur l'IA est envisageable, mais au prix d'une conception de modèles complexes et d'une phase d'apprentissage laborieuse. Pour surmonter ces difficultés, deux méthodes sont explorées. La première doit permettre de réduire la taille du problème à l'aide de réseaux de neurones qui vont identifier les trains qu'il faut réguler lors d'une perturbation et qui vont définir l'horizon de régulation le plus pertinent. Dans la seconde méthode, des modèles de la Recherche Opérationnelle (RO) seront couplés à des agents intelligents programmés par des techniques d'apprentissage.

Les partenaires de ce projet sont : Université Gustave Eiffel, SNCF, TU Dresden, DB Netz.

Contact : [Paola Pellegrini](#)

MobiLoos - Susciter et accompagner le changement de comportement de mobilité

En 2017, le laboratoire a mené une recherche-action, CISMOP, qui a eu pour ambition de construire avec et pour la population du territoire périurbain de Loos-en-Gohelle (62) une transition vers des mobilités plus durables pour réduire la dépendance de ce territoire périurbain à la voiture individuelle. Ce projet a ouvert la voie à l'élaboration d'un projet de développement d'une mobilité quotidienne bas carbone, intégré dans le projet de transition de la ville pour la mandature 2020-2026 avec l'objectif d'apporter une réponse systémique partant des besoins exprimés par les habitants.

L'équipe municipale s'attache aujourd'hui à mettre en œuvre les solutions de mobilité alternative et la collaboration avec la recherche se poursuit dans le cadre d'une recherche expérimentale sur la question du changement de comportement de mobilité (projet MobiLoos), travail nécessaire en complément des investissements financiers et humains dans les solutions alternatives et les services de mobilité. Les conclusions de cette recherche fourniront des éléments sur les conditions de pérennisation et d'essaimage de la démarche. La finalité de ce projet est de permettre l'élaboration d'une méthode à dupliquer sur d'autres territoires.

Cette recherche-action est menée par les laboratoires ESTAS et LaPEA et est financée dans le cadre du projet CityFab du programme ExcellencES

du PIA (Plan d'Investissements d'Avenir).

Contact : [Marielle Cuvelier](#)

Fin de projets

Implémentation en sécurité du concept opérationnel de "canton mobile" : Objectifs atteints pour le projet européen PERFORMINGRAIL (2020-2023)

Le projet PERFORMINGRAIL* soutenu par Shift2Rail**, s'est terminé fin juin 2023 avec succès, comme en témoigne son séminaire de clôture qui s'est tenu le 15 juin 2023 à l'Université de Birmingham et qui était intitulé "One Step Closer to Safe and Effective Moving Block Rail Operations" (cf. lien). Cet événement a permis de restituer les résultats des travaux réalisés au cours du projet par ses cinq groupes de travail. Au final, ces travaux ont apporté les différentes contributions ci-dessous pour l'implémentation en sécurité du concept opérationnel de "canton mobile" (Moving Block) au sein des futurs systèmes de contrôle-commande et de signalisation ferroviaires :

- Le premier groupe de travail WP1, piloté par l'université Gustave Eiffel et plus précisément par l'équipe "Sécurité" du laboratoire, a contribué à la spécification d'exigences et de performances opérationnelles minimales pour des systèmes avec cantons mobiles.
- Le groupe WP2, piloté par le consortium inter-universitaire italien CINI, a contribué à la modélisation et l'analyse formelle de ces systèmes avec une forte implication de l'équipe "Sécurité" du laboratoire.
- Pour le groupe WP3, la PME espagnole ROKUBUN a apporté son expertise pour le développement de solutions de localisation autonomes des trains utilisant les satellites de navigation.
- Le groupe WP4, piloté par l'université de technologie de Delft, a développé un modèle d'optimisation du trafic ferroviaire sur une infrastructure exploitée par cantons mobiles, en partenariat avec l'équipe "Gestion de Trafic" du laboratoire.
- Le groupe WP5, piloté par l'université de Birmingham, a mis en œuvre sa plate-forme de simulation ferroviaire à des fins de test et de validation des systèmes avec cantons mobiles.

*PERformance-based Formal modelling and Optimal tRaffic Management for movING-block RAILway signaling

**L'entreprise commune Shift2Rail a eu pour objectif, sur la période 2015-2023, de coordonner et gérer au niveau européen, les investissements de recherche et d'innovation dans le domaine ferroviaire, ceci dans le cadre du programme européen H2020. Ses missions sont aujourd'hui reprises par Europe's Rail dans le cadre du programme Horizon Europe ([lien](#)).

Contact : [Julie Beugin](#)

Projet Navette Autonome

La restitution finale du projet "Navette Autonome à la Demande" pour le département Innovation de la SNCF a eu lieu le 19 juin 2023 dans leurs locaux.

Ce projet a eu l'objectif de concevoir un algorithme d'optimisation de l'exploitation d'un service de navettes autonomes à la demande sur une

infrastructure dédiée. Nous avons proposé un modèle mathématique linéaire en nombres entiers pour capturer les caractéristiques du problème. Nous avons ensuite proposé un algorithme heuristique afin de pouvoir résoudre des instances réalistes. En cours de projet, la collaboration bilatérale entre l'Université Gustave Eiffel et SNCF a été étendue à l'IRT SystemX, ce qui a rendu possible la conception et la réalisation d'une plateforme expérimentale intégrant les algorithmes conçus et le simulateur de mobilité MATSim. Les résultats obtenus grâce à cette plateforme expérimentale ont permis de quantifier l'impact de l'optimisation sur un grand nombre d'indicateurs de performance.

Contact : [Paola Pellegrini](#)

Un nouveau chercheur rejoint l'équipe "Sécurité"

Abderraouf Boussif a rejoint le laboratoire le 1er novembre 2023 en tant que chercheur de l'équipe "Sécurité". Il va notamment travailler sur l'assurance de sécurité des systèmes ferroviaires autonomes, avec un focus plus particulier sur la sécurité des systèmes intégrant de l'intelligence artificielle.

Participation à des événements scientifiques

IEEE MT-ITS 2023 - 8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems à Nice, France - 14 au 16 juin 2023

- [Analysis of the robustness of railway traffic management to driving behaviour noise](#), David B., **Pascariu B.**, **Pellegrini P.**, **Marlière G.**
- [A full factorial sensitivity analysis for a capacitated flex-route transit system](#), **Shahin R.**, **Hosteins P.**, **Pellegrini P.**, **Vandanjon P.O.**

ECC 2023 - Workshop "Formal methods for data-driven control systems" de la conférence European Control Conference à Bucarest, Roumanie - 13 au 16 juin 2023

- Mixed-monotonicity reachability analysis of uncertain neural networks, **P.-J. Meyer**

IFORS 2023 - 23rd Conference of the International Federation of Operational Research Societies à Santiago, Chili - 10 au 14 juillet 2023

- Integrating passenger demand prediction in real-time rail traffic management, **Pascariu B.**, **Flensburg J.V.**, **Pellegrini P.**, **Lima Azevedo C.M.**

IFAC 2023 - 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control à Yokohama, Japon - 10 au 14 juillet 2023

- Reachability Analysis of Neural Networks with Uncertain Parameters, **P.-J. Meyer**

ODS 2023 - International Conference on Optimization and Decision Science à Ischia, Italie - 4 au 7 septembre 2023

- A consensus algorithm for decentralised real-time railway traffic management, D'Amato L., Trianni V., **Pellegrin P.**
- Artificial Intelligence for self-organized train re-routing and re-scheduling in real-time, D'Amato L., **Naldini F.**, Tibaldo V., Trianni V., **Pellegrini P.**
- Integrating passenger demand preferences in real-time rail traffic management, **Pascariu B.**, Flensburg J.V., **Pellegrini P.**, Lima Azevedo C.M.
- Train Rerouting and Rescheduling in case of Perturbation: Focus on Passenger Connections, **Sharma B.**, **Rodriguez J.**, **Pellegrini P.**, Chaudhary N.

AI4RAILS 2023 - 4th International Workshop on "Artificial Intelligence for RAILwayS" à Ischia, Italie - 4 au 7 septembre 2023

- Designing self-organizing railway traffic management, D'Amato L., **Naldini F.**, Tibaldo V., Trianni V., **Pellegrini P.**

EWGT 2023 - Euro Working Group on Transportation à Santander, Espagne - 6 au 8 septembre 2023

- Rail traffic optimization integrating recife-milp and linear regression demand prediction, **Pascariu B.**, Flensburg J.V., **Pellegrini P.**, Lima Azevedo C.M.

SAFECOMP 2023 - Workshops Computer Safety, Reliability, and Security à Toulouse, France - 19 septembre 2023

- [Rear-End Collision Risk Analysis for Autonomous Driving](#), Liang, C., **Ghazel, M.**, Ci, Y., Faouzi, N.E.E., Wang, R., Zheng, W. in Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2023 Workshops. SAFECOMP 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14182. Springer, Cham.

ISTC 2023 - IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems à Bilbao, Espagne - 24 au 28 septembre 2023

- [Integrated and colony optimization and mixed integer linear programming for multi-objective railway timetabling](#), Coviello N., Medeossi G., Nygreen T., **Pellegrini P.**, **Rodriguez J.**

VECoS'23 - 16th International Conference on Verification and Evaluation of Computer and Communication Systems à Marrakech, Maroc - 18 au 20 Octobre 2023

- A sound abstraction method towards efficient neural networks verification, Boudardara F., Boussif A., **Ghazel M.**

MSR'23 - 14ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs à Toulouse, France, 22 - 24 novembre 2023

- Vérification formelle d'un système de signalisation ferroviaire à base de cantons mobiles (Poster), Saddem-Yagoubi R., **Beugin J.**, **Ghazel M.**

Nouvelles thèses

Thèse d'Abdelrahman Ibrahim

Démarrage de cette thèse en novembre 2023 sur la vérification formelle d'équations différentielles neurales pour l'évaluation de la sécurité des véhicules autonomes. La thèse est financée par le programme CLEAR-Doc de l'Université Gustave Eiffel, co-encadrée par Pierre-Jean Meyer et Mohamed Ghazel, et avec une mobilité international de 6 mois prévue au sein du Département des Technologies Marines de NTNU à Trondheim en Norvège.

Contact : [Pierre-Jean Meyer](#)

Thèse de Manal Zidani

Démarrage de cette thèse CIFRE avec SNCF DGEX en juin 2023 sur l'« Intégration de l'IA et de la Recherche Opérationnelle pour la gestion du trafic ferroviaire ».

La plupart des approches de gestion du trafic ferroviaire en temps réel existantes sont basées sur l'application d'algorithmes d'optimisation à partir d'un modèle simplifié de la réalité, visant à minimiser une fonction objectif prédéfinie. Les représentations du problème contiennent généralement des données d'entrée qui sont en quelque sorte arbitrairement fixées a priori et qui ne sont souvent pas suffisamment validées. Dans cette thèse, nous proposons d'intégrer l'optimisation et l'utilisation de l'intelligence artificielle pour surmonter les limites intrinsèques de la première, notamment pour améliorer la précision des données d'entrée de l'optimisation.

Contact : [Paola Pellegrini](#)

Thèse de Maissa Mati

Démarrage de cette thèse en octobre 2023 sur l'« Optimisation de l'infrastructure ferroviaire » (sécurité ferroviaire) avec un financement de la Chaire CERTIFER GAPAVE. Les gares et les nœuds ferroviaires complexes sont fréquemment identifiés comme les points critiques de l'exploitation du réseau ferroviaire. La configuration ou reconfiguration de leur plan de voie est souvent décidée par les experts sans l'utilisation d'approches d'optimisation. Cette thèse vise à proposer un algorithme d'outils d'aide à la décision pour supporter les décideurs dans le choix de reconfiguration du plan de voie. En particulier, l'algorithme fournira une sélection de choix de reconfiguration qui permettra de couvrir au mieux les futures demandes et qui prendra également en compte d'autres critères ou contraintes comme les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation, les aspects sécuritaires, les contraintes d'emprise urbaine ou de gestion des flux de voyageurs dans les gares.

Contact : [Paola Pellegrini](#)

Thèse soutenue

Reza Shahin a soutenu sa thèse intitulée "**Intégrer des arrêts ad hoc dans les transports publics : une étude sur le transport en commun Flex-Route**" le 26 janvier 2024.

Ces dernières années, on a assisté à une tendance croissante à l'adoption de solutions de transport flexibles telles que le transport à la demande (DRT), principalement car elles répondent mieux aux attentes des passagers. Cependant, cette flexibilité s'accompagne d'importants coûts économiques. Par conséquent, les autorités de transport explorent actuellement des méthodes pour augmenter la flexibilité des transports

publics conventionnels (CPT), qui sont généralement moins innovants que la DRT. Cela amène à l'importance du Flex-Route Transit (FRT), un système innovant fusionnant les avantages du DRT et du CPT. Dans cette thèse, nous menons une enquête exhaustive sur le FRT. Plus précisément, nous examinons la littérature académique et nous mettons en évidence les lacunes existantes dans la recherche. Ensuite, nous formulons un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) étendant l'état de l'art pour inclure des caractéristiques du problème précédemment négligées, et nous le complétons par un ensemble d'inégalités valides pour améliorer sa relaxation linéaire. Nous introduisons également un algorithme heuristique pour obtenir une solution réalisable et employons une technique de démarrage à chaud pour accélérer la résolution du problème d'optimisation mixte. Par la suite, une analyse de sensibilité est réalisée sur la base d'un plan factoriel complet. Ici, nous évaluons les niveaux de saturation du système selon divers scénarios de demande, en nous concentrant sur les temps d'attente pour les passagers. Dans le dernier chapitre, un modèle MILP stochastique pour le FRT est proposé, dans lequel certains paramètres initiaux du MILP de base deviennent des variables. Nous concluons la thèse en décrivant des pistes prospectives pour des recherches futures.

Publications

Direction d'ouvrage

Siri S., Pasquale C., Bhourri N., De Schutter B., **Ghazel M.**, Viti F., [Innovative Control Approaches for Smart Transportation Systems](#), Guest Editorial, Journal Control Engineering Practice, Vol. 135, Elsevier, August 2023.

Contribution à un ouvrage collectif

Liang C., **Ghazel M.**, Accident Prediction Modeling Approaches for European Railway Level Crossing Safety, Chapter in book : New Research on Railway Engineering and Transport, Intechpen, ISBN 978-1-83768-620-9, March 2023.

Cuvelier M., Gabaude C., Mathon G., Construire la transition vers une mobilité plus durable en périurbain - L'exemple d'une recherche-action à Loos-en-Gohelle, Ouvrage "L'action publique locale et régionale en matière de mobilité : un paysage en transition ?", CEREMA, Edition Les Presses Universitaires de Grenoble, ISSN 978-2-7061-5485-0, novembre 2023.

Articles de journaux

Sharma B., **Pellegrini P.**, **Rodriguez J.**, Chaudhary N., [A review of passenger-oriented railway rescheduling approaches](#), European Transport Research Review, 15:14, May 2023.

Boussif A., Tonk A., **Beugin J.**, **Collart-Dutilleul S.**, [Operational Risk Assessment of Railway Remote Driving System](#), Safety and Reliability Journal, July 2023, DOI: 10.1080/09617353.2023.2226965.

Boudardara F., Boussif A., **Meyer P.-J.**, **Ghazel M.**, [A review of abstraction methods towards verifying neural networks](#), ACM

Transactions and Embedded Computing Systems, July 2023, DOI : 10.1145/3617508.

Boudardara F., Boussif A., Meyer P.-J., Ghazel M., [INNAbstract: An INN-Based Abstraction Method for Large-Scale Neural Network Verification](#), IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, October 2023, DOI: 10.1109/TNNLS.2023.3316551.

Chelouati M., Boussif A., Beugin J., E. Koursi E. -M. , [A Risk-Based Decision-Making Process for Autonomous Trains Using POMDP: Case of the Anti-Collision Function](#), IEEE Access, December 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3347500.

Shahin R., Hosteins P., Pellegrini P., Vandanjon P.O. and Quadrifoglio L., [A survey of flex-route transit problem and its link with vehicle routing problem](#), Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 158:104437, January 2024, DOI doi.org/10.1016/j.trc.2023.104437.

Versluis N.D., Quaglietta E., Goverde R.M.P., Pellegrini P. and Rodriguez J., [Real-time railway traffic management under moving-block signalling: A literature review and research agenda](#), Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 158:104438, January 2024, DOI doi.org/10.1016/j.trc.2023.104438

D'Amato L., Naldini F., Tibaldo V., Trianni V., Pellegrini P., [Towards self-organizing railway traffic management: concept and framework](#), Journal of Rail Transport Planning & Management, 29:100427, March 2024, DOI doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100427 .

Chouchane A., Ghazel M., [Fault-prognosability, K-step prognosis and K-step predictive diagnosis in partially observed petri nets by means of algebraic techniques](#), Automatica, Elsevier, Vol. 162, Avril 2024, DOI doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111513 .