

# Offre de thèse - Doctorat (36 mois)

## Titre de la thèse

Génération automatique de modèles formels à partir d'une ontologie pour la vérification des systèmes complexes : application aux systèmes ferroviaires Moving Block (ETCS niveau 3)

## Encadrement

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR **4RaiMBO – Formal verification for the Safety of Railway Moving Block Operations**, qui implique trois laboratoires complémentaires : le **LIS** à Aix-Marseille Université, **ESTAS** à l'Université Gustave Eiffel, et le **LITIS** à l'INSA Rouen Normandie. Le doctorant ou la doctorante sera accueilli(e) au **LIS** et encadré(e) par **Rim SADDEM** et **Claudia Frydman**.

La thèse bénéficiera également des collaborations scientifiques avec les partenaires du projet ANR, en particulier **Julie Beugin** et **Mohamed Ghazel** pour les aspects liés aux systèmes ferroviaires, à la sûreté et aux spécifications Moving Block, ainsi que **Cecilia Zanni-Merk** pour les aspects liés à l'ingénierie des ontologies et au raisonnement.

Selon l'avancement des travaux de thèse, des échanges scientifiques, réunions de travail et collaborations avec les laboratoires partenaires pourront être organisés afin d'accompagner le développement de l'ontologie RMBO, la génération de modèles formels et la vérification des scénarios ferroviaires critiques.

## Lieu

- Laboratoire d'Informatique et Systèmes (LIS), Aix-Marseille Université

## Contexte scientifique

Dans un contexte de transition écologique et d'augmentation du trafic ferroviaire, les systèmes de signalisation évoluent vers des solutions plus performantes telles que le Moving Block (ETCS niveau 3). Contrairement aux systèmes traditionnels à cantons fixes, le Moving Block permet une gestion dynamique des distances entre trains, en séparant les trains par une distance de freinage et une marge de sécurité. Cette évolution vise à améliorer la capacité, la fluidité et l'interopérabilité du réseau ferroviaire.

Cette évolution introduit cependant une complexité importante. L'architecture Moving Block est distribuée entre le système embarqué et le système sol : certaines fonctions traditionnellement assurées par l'infrastructure sont transférées vers le train. Le système doit également interagir avec plusieurs acteurs et interfaces externes, tels que le conducteur, le système de gestion du trafic, les dispositifs de détection train-sol, l'unité de localisation du train, le système de gestion de l'intégrité du train et le train lui-même.

La complexité provient aussi du nombre de fonctions à coordonner. Le bloc sol comprend notamment des fonctions de gestion des itinéraires, des aiguillages, des autorisations de mouvement, de l'état de la voie, des trains, des communications et de la détection train-sol. Le bloc embarqué inclut des fonctions de supervision vitesse-distance,

de reporting de position, de gestion de l'intégrité du train et de gestion du profil dynamique de vitesse. Les interactions entre ces fonctions sont nombreuses, temporelles, dépendantes des scénarios opérationnels et sensibles aux modes dégradés.

Les spécifications issues des projets X2Rail, et R2DATO sont riches, évolutives et formulées en langage naturel structuré. Le passage de ces exigences vers des modèles formels vérifiables reste donc un verrou scientifique important. Le projet ANR 4RaiMBO propose de lever ce verrou en construisant une ontologie du domaine Moving Block, utilisée comme pivot entre les exigences, l'architecture fonctionnelle, les modèles formels et la vérification.

## État de l'art à approfondir

### Ontologies ferroviaires

La thèse devra d'abord étudier l'état de l'art des ontologies ferroviaires déjà identifiées dans le projet 4RaiMBO. Ces ontologies ne ciblent pas directement le Moving Block, mais elles fournissent des éléments utiles pour structurer les connaissances ferroviaires, les concepts d'infrastructure, les données de sécurité, la maintenance, la signalisation ou encore l'ERTMS/ETCS.

Plusieurs ressources devront être analysées : RailSystemModel pour la description des réseaux ferroviaires et l'échange entre applications hétérogènes ; des ontologies orientées intégration de données et surveillance ; des ontologies dédiées à la maintenance ferroviaire ; des travaux sur la gestion de la sécurité ferroviaire ; Rail Topology Ontology pour la représentation standardisée de l'infrastructure ; les initiatives Transmodel et OntoRail ; ainsi que les ontologies relatives à ERTMS/ETCS, aux aspects temporels et à la configuration de la signalisation, comme RAISO.

L'objectif ne sera pas de repartir de zéro, mais d'étudier ces ontologies pour identifier les concepts, relations, propriétés, contraintes et fragments réutilisables. La thèse devra aussi analyser leurs limites pour le cas Moving Block : représentation insuffisante des comportements dynamiques, difficulté à représenter les interactions temporelles entre fonctions, faible prise en compte des scénarios opérationnels et absence d'une ontologie dédiée aux spécifications Moving Block. Cette analyse servira de base à la définition de l'ontologie RMBO.

### Modèles formels Moving Block déjà définis

La thèse devra également s'appuyer sur les modèles formels déjà définis dans les projets et travaux cités par 4RaiMBO. Les travaux du projet ASTRail ont proposé des modèles de Moving Block analysés avec Simulink, UPPAAL SMC et UPPAAL Stratego, en se concentrant principalement sur les deux grands sous-systèmes : l'embarqué et le sol. Ces modèles restent toutefois de haut niveau : certaines fonctions critiques, comme la gestion de l'intégrité du train, la supervision vitesse-distance, la gestion des itinéraires et des aiguillages, ne sont pas entièrement couvertes.

Les travaux de Himrane, Beugin et Ghazel ont développé des modèles temporisés et probabilistes pour évaluer la sûreté et la performance de la localisation ferroviaire par balises virtuelles GNSS. Ces modèles sont pertinents pour le Moving Block car la localisation embarquée et ses incertitudes jouent un rôle important dans les opérations ETCS niveau 3.

Dans le cadre de PERFORMINGRAIL, des modèles UPPAAL préliminaires ont été développés pour plusieurs fonctions embarquées et sol, notamment Train Position Reporting, Integrity Information Management, Train Management, Trackside Train Detection Management, Communication Management et Point Management. Ces modèles doivent être étudiés, comparés aux nouvelles spécifications et éventuellement adaptés. Leur composition

dans un modèle système unifié reste un défi, en particulier à cause du nombre d'interactions et du risque d'explosion combinatoire.

Un cas d'étude important est le scénario Loss of Train Integrity, pour lequel des modèles formels utilisables ont déjà été proposés. Ces modèles décrivent les interactions entre le TIMS, le conducteur, l'unité de localisation, la gestion de l'intégrité, le reporting de position, la gestion des trains, la supervision vitesse-distance et la gestion des autorisations de mouvement. Ils constituent une base solide pour comprendre la chaîne exigences - architecture - modèles - propriétés, mais ils ne couvrent pas encore toute la richesse des scénarios Moving Block.

## Objectifs de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR 4RaiMBO et vise à développer une chaîne de transformation allant des exigences Moving Block vers des modèles formels vérifiables, en utilisant une ontologie RMBO comme représentation pivot.

1. Construire un corpus de connaissances RMBO à partir des spécifications X2Rail, MOVINGRAIL, PERFORMINGRAIL et R2DATO, en assurant la traçabilité entre exigences, fonctions, interfaces et scénarios.
2. Étudier les ontologies ferroviaires existantes afin d'identifier les concepts et relations réutilisables, leurs limites et les besoins spécifiques au Moving Block.
3. Définir une ontologie RMBO capable de représenter les concepts, relations, contraintes, interfaces, fonctions, données et aspects temporels nécessaires à la génération de modèles.
4. Analyser les modèles formels Moving Block déjà développés et établir leur lien avec les exigences et l'architecture fonctionnelle mise à jour.
5. Définir une méthodologie de génération de modèles formels à partir de l'ontologie RMBO, notamment vers des modèles paramétriques réutilisables de type DEVS, automates temporisés ou autres formalismes adaptés.
6. Vérifier et simuler des scénarios critiques, par exemple Loss of Train Integrity, Points Control ou Loss/Restore of Communications, afin d'évaluer des propriétés de sûreté et des propriétés fonctionnelles.

## Méthodologie envisagée

La méthodologie suivra l'organisation scientifique du projet 4RaiMBO et s'appuiera sur trois blocs fortement liés:

- Analyse des spécifications et construction d'un corpus de connaissances RMBO : extraction, consolidation, traçabilité et classification des exigences.
- Définition de l'ontologie RMBO : conceptualisation, hiérarchie de classes, relations, propriétés, contraintes, modularité et réutilisation des ontologies ferroviaires pertinentes.
- Génération, composition et vérification des modèles formels : définition de règles de transformation ontologie -> modèles, production de modèles génériques, instanciation sur scénarios et vérification par model checking ou simulation.

Une attention particulière sera portée à la maîtrise de la complexité. La thèse devra proposer une approche modulaire, afin d'éviter de produire directement un modèle global difficile à vérifier. Les fonctions seront modélisées comme des composants paramétrables, puis composées progressivement selon les scénarios. Cette stratégie permettra de limiter l'explosion combinatoire et de mieux relier chaque modèle aux exigences et aux concepts de l'ontologie.

# Déroulement prévisionnel

## Première année

- Revue de l'état de l'art sur les ontologies ferroviaires et les modèles formels Moving Block.
- Étude des spécifications X2Rail, et R2DATO.
- Analyse de l'architecture fonctionnelle et des interactions entre fonctions embarquées, fonctions sol et interfaces externes.
- Première structuration du corpus de connaissances RMBO et premiers concepts de l'ontologie.

## Deuxième année

- Définition et validation progressive de l'ontologie RMBO avec les partenaires du projet.
- Étude détaillée des modèles formels existants et mise en correspondance avec les concepts de l'ontologie.
- Définition des premières règles de transformation de l'ontologie vers des modèles formels.

## Troisième année

- Génération de modèles formels génériques et paramétriques.
- Composition et instanciation sur des scénarios opérationnels critiques.
- Vérification, simulation, validation des résultats, rédaction et publications.

## Profil recherché

- Master 2 ou diplôme d'ingénieur en informatique, automatique, systèmes embarqués, mathématiques appliquées ou domaine proche.
- Compétences souhaitées en méthodes formelles, systèmes à événements discrets, model checking, simulation ou modélisation système.
- Intérêt pour les ontologies, les graphes de connaissances, l'ingénierie des exigences et les systèmes critiques.
- Un intérêt pour les systèmes ferroviaires et la sûreté de fonctionnement sera apprécié.

## Conditions

- Durée : 36 mois
- Financement : ANR 4RaiMBO
- Début : septembre 2026
- Localisation : Marseille, Laboratoire LIS

## Candidature

Le dossier de candidature devra comprendre :

- CV
- relevés de notes
- lettre de motivation
- lettres de recommandation

À envoyer à : Rim Saddem (LIS - AMU) : [rim.saddem@lis-lab.fr](mailto:rim.saddem@lis-lab.fr). L'objet du courriel devra être : **Candidature doctorat – Ontologie et modèles formels pour le Moving Block**

## Bibliographie

- [1] Saddem-Yagoubi, R., Beugin, J., & Ghazel, M. (2022). A Formal Modelling Framework for Moving Block Systems in the PERFORMINGRAIL project. In RAILWAYS 2022, 5th International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance.
- [2] Ferrari, A., & ter Beek, M. H. (2022). Formal methods in railways: a systematic mapping study. *ACM Computing Surveys*, 55(4), 1-37.
- [3] X2Rail-1 Deliverable D5.1 - Moving Block System Specification, Technical Report, 2016.
- [4] X2Rail-3 Deliverable D4.2 - Moving Block Specifications - Part 3 - System Specification, Technical Report, 2018.
- [5] X2Rail-5 Deliverable D4.1 - Moving Block Specifications - Part 3 - System Specification, Technical Report, 2022.
- [6] Goverde, R. et al. (2018). MOVINGRAIL D1.1 - Report on Moving Block Operational and Engineering Rules, Technical Report.
- [7] Marrone, S. et al. (2023). Deliverable D2.2 - Moving Block Specification Development, Technical Report.
- [8] Basile, D., ter Beek, M. H., Ferrari, A., & Legay, A. (2022). Exploring the ERTMS/ETCS full moving block specification: an experience with formal methods. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 24(3), 351-370.
- [9] Saddem-Yagoubi, R., Beugin, J., Ghazel, M., Marrone, S., Janssen, B., Flammini, F., et al. (2023). Deliverable D2.3 - Moving Block Verification and Validation, Technical Report.
- [10] UIC RailSystemModel. Railway Network Description, Technical Report.
- [11] Debbech, S. (2019). Ontologies pour la gestion de sécurité ferroviaire : intégration de l'analyse dysfonctionnelle dans la conception. Doctoral dissertation, École Centrale de Lille.
- [12] Bischof, S., & Schenner, G. (2021). Rail Topology Ontology: A rail infrastructure base ontology. In *International Semantic Web Conference*, pp. 597-612.
- [13] Hoinaru, O., Mariano, G., & Gransart, C. (2013). Ontology for complex railway systems: application to ERTMS/ETCS system. FM-RAIL-BOK Workshop in SEFM 2013.
- [14] Ayadi, A., Frydman, C., Laddada, W., Soualmia, L. F., Zanni-Merk, C., Grellet, E., & Imbert, I. (2021). Combining DEVS and semantic technologies for modeling the SARS-CoV-2 replication machinery. *ANNSIM 2021*, pp. 1-12.
- [15] Ayadi, A., Frydman, C., Laddada, W., Imbert, I., Zanni-Merk, C., & Soualmia, L. F. (2023). Combining DEVS simulation and ontological modeling for hierarchical analysis of the SARS-CoV-2 replication. *Simulation*, 99(10), 1011-1039.