

Jumeau numérique (Digital Twin) des engins de chantier électrique pour le creusement de tunnel : optimisation énergétique et maintenance prédictive

I. Consortium

Ce sujet de thèse CIFRE est une collaboration entre deux entités : la société METALLIANCE (société spécialisée dans la recherche et développement d'engins de chantier pour la construction de tunnel) et le laboratoire DRIVE (laboratoire de recherche de l'Université de Bourgogne au sein de l'école d'ingénieurs ISAT – Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports à Nevers).

1. La société METALLIANCE

La société METALLIANCE est une société de 120 salariés à Gévelard et Saint-Vallier en Saône et Loire. Elle conçoit et fabrique des équipements industriels et des engins logistiques destinés au secteur des travaux pour le rail et la route ainsi qu'à la construction de tunnels.

Basée en Bourgogne, la société METALLIANCE possède de fortes capacités en R&D, bureaux d'études, fabrication mécano-soudée et assemblage. Depuis 2020, elle est détenue majoritairement par Gaussin Manugistique, leader mondial dans le domaine du creusement de tunnel.

La société est l'inventeur du train sur pneus et du véhicule multi-services, utilisés pour la construction et la rénovation de tunnels. METALLIANCE poursuit ses efforts et innove pour limiter son empreinte sur l'environnement, réduire les émissions de gaz à effet de serre, la dépendance énergétique et améliorer la qualité de l'air en milieu urbain. Les engins de chantier développés par la société répondent à ce défi avec le développement de la technologie du tout électrique. Parmi ses innovations : les engins de creusement de tunnels autonome à délégation totale ou partielle de conduite e-TSV, ainsi que des engins électriques VMS, actuellement déployés et en tests réels sur site.

Parmi ses références récentes, la fourniture et mise en service des wagons pour la rénovation et la réhabilitation de la voie et de la crémaillère du célèbre train touristique de La Rhune (64), les véhicules de services (e-TSP) des lignes 14 et 16 du Grand Paris ou encore des Véhicules Multi-Services avec essieux rail/route pour les métros d'Auckland, de Quito, du Caire et de Tel-Aviv. Plusieurs rénovations de flottes de véhicules ont également été effectuées pour les métros de Panama ou encore de Cuenca en Espagne ainsi que pour le projet de la ligne ferroviaire Crossrail à Londres.

2. Le laboratoire DRIVE

Le laboratoire DRIVE de l'université de Bourgogne est spécialisé dans le domaine de l'automobile et des transports allant des problématiques matériaux, acoustiques, énergétique jusqu'aux systèmes embarqués et communication dans les transports.

C'est un laboratoire composé de 4 compétences recherches dont la compétence Systèmes Intelligents et Connectés (SIC). Les travaux envisagés dans le cadre de cette étude seront réalisés avec le support de cette compétence. Ils tireront profit de plusieurs travaux antérieurs menés dans le domaine des véhicules électriques et hybrides et de l'optimisation énergétique de leurs systèmes.

La compétence recherche Systèmes Intelligents & Connectés (SIC) de l'équipe Energie, Mobilité, Intelligence & Environnement EMIE a des compétences établies dans les systèmes autonomes et l'efficacité énergétique des systèmes véhiculaires. L'équipe est composée de 8 enseignants/chercheurs et d'une quinzaine de doctorants/postdoctorants qui travaillent sur 3 axes de recherches dédiés à l'intelligence véhiculaire, à l'efficacité énergétique et aux systèmes autonomes et connectés. L'équipe

envisage le système étudié (bateau, véhicule, drone, ...) comme une entité intelligente et communicante qui interagit avec son environnement pour le rendre autonome, connecté et efficient en énergie.

Les travaux qui sont menés traitent du développement d'outils d'optimisation et de gestion optimale des flux d'énergie dans les groupes motopropulseurs électriques, comprenant la modélisation et l'expérimentation d'organes tels que les batteries. Les recherches se focalisent sur l'analyse des besoins, ainsi que l'optimisation globale du système véhicule. Du codage d'un trajet issu de données GPS jusqu'à la mise en place de contrôle actif du véhicule (stratégie de contrôle), les recherches visent à rendre optimale l'utilisation énergétique avec une gestion embarquée. Des architectures différentes sont appréhendées de façon à proposer des outils de conception, de gestion, de simulation et d'optimisation, basés sur une approche système renforcée de modélisations physiques de phénomènes complexes.

II. Description du sujet de thèse

1. Contexte de l'étude

L'électrification croissante des engins de chantier industriels suit les progrès significatifs de l'industrie de l'automobile électrique de ces dernières décennies. Cette évolution de l'électrification nécessite l'emploi et le développement de technologies innovantes permettant la modélisation et l'optimisation des sous-ensembles et organes des véhicules favorisant une plus grande autonomie. Le jumeau numérique (JN) ou Digital Twin (DT) est une dernière tendance de l'industrie 4.0 liée à la technologie IoT. Il permet la représentation d'un objet physique, d'un process, ou d'un service, sous différentes conditions opératoires avec un faible coût et un environnement à risque-zéro et ce à partir d'une simulation de cet objet. Le Digital Twin utilise des prototypes virtuels enrichis de données réelles et exploite l'Intelligence Artificielle et le Machine Learning pour rendre les prédictions plus précises. Le jumeau numérique augmente la précision des simulations en réduisant les erreurs à un niveau proche de zéro. Il permet donc d'étudier de grands systèmes ou des sous-systèmes. Il nécessite des données réelles permettant de l'alimenter et ainsi permettre une optimisation ciblée.

Dans la littérature scientifique et technique, davantage d'équipes de recherches et de constructeurs s'intéressent, au développement de modèle de jumeaux numériques permettant ainsi d'économiser du temps, de l'argent et également développer des systèmes plus sûrs et plus performants. Pour développer un nouveau modèle de véhicule, Renault a recours à un jumeau numérique. Cette modélisation virtuelle lui permet ainsi de réaliser toutes sortes de tests avant la réalisation d'une vraie maquette. En 2022, Google et Renault se sont associés et renforcent leur collaboration pour la création d'un jumeau numérique automobile permettant de proposer de nouveaux services à la demande en s'appuyant sur le système d'exploitation Android Automotive et les technologies cloud de Google. Ce partenariat a notamment pour but de créer un jumeau numérique d'un véhicule doté des technologies d'intelligence artificielle (IA) pour faciliter l'intégration de nouveaux services embarqués et suivre les mises à jour over the air.

En 2023, Dassault Systèmes a profité du CES de Las Vegas pour présenter ses "jumeaux numériques" du cœur et du cerveau humain, destinés à faire progresser la recherche médicale et à aider les médecins à mieux comprendre et accompagner chacun de leurs patients. Il prévoit notamment d'étendre ses modèles au domaine de l'industrie automobile et aéronautique.

Pour les véhicules terrestres électriques, l'utilisation du Digital Twin est un domaine de recherche en pleine expansion et se développe rapidement en raison de l'augmentation de la demande de véhicules électriques et de la nécessité de réduire l'impact environnemental du transport terrestre. Ils sont utilisés pour optimiser l'efficacité énergétique des véhicules en simulant leur comportement dans différentes conditions de conduite. Les données collectées sont utilisées pour ajuster les paramètres du véhicule, tels que la vitesse, la puissance, la charge de la batterie, etc. Ils sont également utilisés pour prévoir les problèmes de maintenance potentiels avant qu'ils ne se produisent et les données collectées sur les performances du véhicule sont analysées pour détecter les anomalies qui pourraient indiquer un problème de maintenance. Des simulations dans des conditions réelles ou extrêmes de scénarios de conduite et de batteries sont employées afin d'optimiser la performance et la sécurité du véhicule et le comportement des batteries des véhicules terrestres électriques.

A l'instar de l'évolution de la propulsion électrique dans le secteur grand public, l'évolution de la propulsion électrique dans le secteur industriel se pose, mais à priori pas pour les mêmes motifs.

Le grand défi de l'électrification des engins industriels est la fabrication en série qui représente des surcoûts comparés aux modes de propulsions mécaniques conventionnels. Ces surcoûts sont liés aux différents organes composants la chaîne énergétique du véhicule électrique, notamment le moteur, les roues de puissance, le pack batteries, l'électronique embarquée, etc...

Une autre caractéristique du matériel industriel dans des milieux confinés, tels que les tunnels, est sa durée de mise en service qui est d'au moins une trentaine d'années. Pendant toute cette période le matériel subit des adaptations et des rénovations lui permettant d'assurer ces missions avec des performances optimales. La technologie du jumeau numérique permettra de répondre à ces problématiques liées au secteur industriel.

Dans le cadre de cette thèse, un jumeau numérique sera développé pour simuler des scénarios d'utilisation des engins de chantier électriques de la société METALLIANCE, en prenant en compte des paramètres tels que le poids des équipements embarqués, les conditions météorologiques, le terrain sur lequel le véhicule doit évoluer, etc. Cette simulation permet d'une part de surveiller l'état de santé du véhicule en temps réel, en collectant et en analysant des données provenant de différents capteurs embarqués (paramètres de fonctionnement du véhicule et ainsi maximiser son efficacité énergétique) et d'autre part déterminer les besoins énergétiques du véhicule et d'optimiser son système de propulsion GMP électrique en tenant compte de différents profils d'emploi (transport de charges lourdes, creusement, ...) et des éléments d'environnements intérieurs/extérieurs (habitable, terrain, météo, ...) influant sur ses performances.

Le Digital Twin présente des retombées potentielles à la fois pour les applications grand public et industriels. Côté civil, on peut citer quelques avantages à savoir le développement de véhicules électriques plus performants qui permettra de mieux comprendre le comportement des véhicules électriques dans différentes conditions d'utilisation et la réduction des coûts de maintenance avec un monitoring de l'état du véhicule et une prédiction des pannes potentielles avant qu'elles ne surviennent. Côté industriels, on peut citer quelques avantages, parmi eux :

- L'amélioration de la préparation opérationnelle au travers de la simulation des scénarios de chantier en temps réel,
- L'identification des performances et les défaillances du GMP et la définition des limites technologiques du système,
- La prédiction des pannes et la programmation des interventions de maintenances ainsi que le suivi de l'évolution des engins en proposant des versions optimisées avec le redimensionnement de sous-systèmes,
- La construction d'une base de données propre à l'engin permettant d'alimenter d'autres modèles futurs.

2. Objectifs du projet de recherche

Depuis 1970, l'entreprise METALLIANCE, installée à Saint-Vallier et Gévelard conçoit et construit des équipements et engins spéciaux, capables de transporter plus de 28 tonnes de matériel servant à la construction de tunnels et d'infrastructures dans l'univers des transports routiers, ferroviaires et métros. Depuis peu, la société s'est orientée vers le développement d'engins de construction de tunnel tout électrique. Des prototypes sont, en effet, actuellement en œuvre au sein de chantiers nationaux et internationaux. La société étant constamment en phase d'innovation, elle souhaite développer des modèles de prédiction lui permettant une optimisation énergétique de ses systèmes et une maintenance prédictive.

Dans le cadre de cette thèse, un jumeau numérique sera développé pour simuler des scénarios d'utilisation d'un engin de chantier électrique, en prenant en compte des paramètres tels que le poids des équipements embarqués, les conditions météorologiques, le terrain sur lequel l'engin doit évoluer, etc. Cette simulation permet d'une part de surveiller l'état de santé du véhicule en temps réel, en collectant et en analysant des données provenant de différents capteurs simulés (paramètres de fonctionnement du

véhicule et ainsi maximiser son efficacité énergétique) et d'autre part déterminer les besoins énergétiques du véhicule et d'optimiser son système de propulsion électrique GMP en tenant compte de différents profils d'emploi (furtivité, combats intenses, ...) et des éléments d'environnements intérieurs/extérieurs (habitable, terrain, météo, ...) influant sur ses performances.

Dans le contexte de cette thèse, le modèle de jumeau numérique aura pour objectifs :

- L'optimisation énergétique des systèmes du GMP électrique tenant compte de différents profils d'emploi (transport de charges lourdes, creusement, ...) et des éléments d'environnements intérieurs/extérieurs (habitable, terrain, météo, ...) influant sur ses performances.
- Le suivi de l'état de santé (SOH) du véhicule et de ses composants énergétiques amenant à de la maintenance prédictive.

Mots clés : Jumeau numérique, Digital Twin, optimisation énergétique, maintenance prédictive, maintien des performances, environnements sévères, écosystème industriel

III. Déroulement prévisionnel de la thèse

Le déroulement prévisionnel de la thèse proposée est celui-ci :

- **Etat de l'art** : Le (la) candidat(e) devra tout d'abord commencer sa thèse par un état de l'art exhaustif afin de mener une analyse critique sur les différents travaux existants sur les jumeaux hybrides et jumeaux numériques développés dans le cadre des applications militaires. Il (elle) devra, notamment se focaliser sur les méthodes d'optimisation et de prédiction de maintenance des systèmes véhiculaires existantes.
- **Développements** : Le (la) candidat(e) testera par la suite, des méthodes existantes résultantes de l'état de l'art critique pour des fins d'optimisation énergétique tenant compte des paramètres d'influences extérieures/intérieurs ainsi que le pronostic santé (SOH) des véhicules. Il (elle) développera une nouvelle approche, basé sur la modélisation systémique, en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle afin de développer un jumeau hybrides se basant sur des données générées.
- **Tests** : Le (la) candidat(e) effectuera d'abord une étude avec des bases de données ouvertes (open source) pour des véhicules civils proches des caractéristiques des engins de chantiers cibles de cette étude (engin de creusement). Il (elle) mettra en œuvre les algorithmes de l'intelligence artificielle ayant comme domaine applicatif l'optimisation énergétique et le diagnostic des véhicules électriques sur les différentes bases de données selon les deux critères suivants : les performances énergétiques et la maintenance calendaire prédictive.
- **Rédaction du manuscrit et soutenance** : Rédaction du manuscrit de thèse et préparation de la soutenance avec valorisation scientifique (publication dans des revues internationales avec comité de lecture et conférences).

Le planning des travaux du projet de thèse est établi sur une durée de 3 ans. La thèse sera structurée en plusieurs étapes ayant des objectifs bien définis. Les objectifs et le déroulement chronologique de l'étude sont schématisés ci-dessous :

- Etape T0 : Réalisation d'une étude bibliographique.
- Etape T1 : Test des approches existantes pour l'analyse et spécification du problème.
- Etape T2 : Proposition d'une solution et développement du jumeau numérique.
- Etape T3 : Validation des approches proposées sur des bases de données
- Etape T4 : Rapports techniques et de manuscrit de thèse.
- Etape T5 : Valorisation scientifique (publications ou brevets).

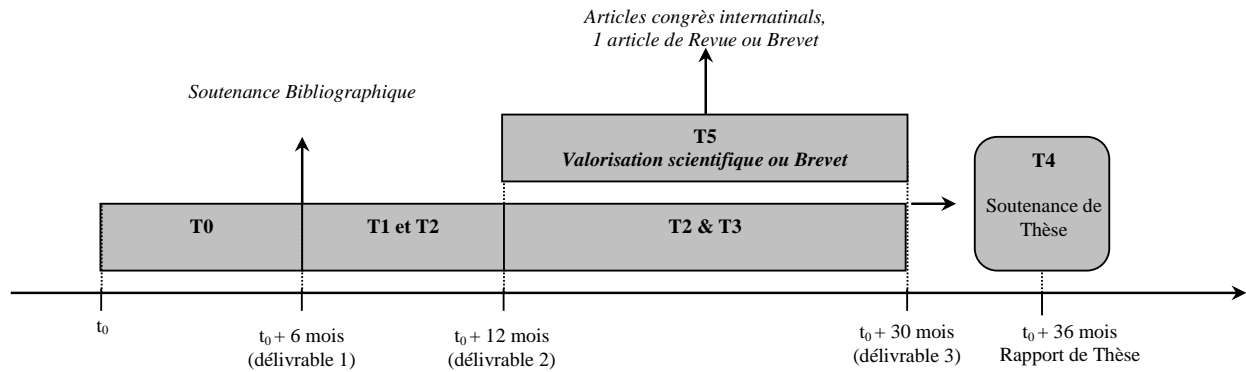


Figure 3 : Planning prévisionnel de la thèse

IV. Bibliographie

- [1] Pierre Caillard : « Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique », Thèse de doctorat, 2015. Laboratoire 2EP à l'Ecole Centrale de Lille (France).
- [2] Victor Mester : « Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique », - Thèse de doctorat n°48 - 2007. Laboratoire L2EP EA 2697 Ecole Centrale de Lille Villeneuve d'Ascq (France).
- [3] Sharma, M.; George, J.P. Digital Twin in the Automotive Industry: Driving Physical-Digital Convergence; TCS White Papers; Tata Consultancy Services Limited: Mumbai, India, 2018.
- [4] Biesinger, F.; Weyrich, M. The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry. In Proceedings of the 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Salerno, Italy, 23–26 October 2019. <http://doi.org/10.1109/ICMECT.2019.8932101>.
- [5] Merkle, L.; Pothig, M.; Schmid, F. Estimate e-Golf Battery State Using Diagnostic Data and a Digital Twin. Batteries 2021, 7, 15.
- [6] Szalay, Z. Next Generation X-in-the-Loop Validation Methodology for Automated Vehicle Systems. IEEE Access 2021 9, 35616–35632.
- [7] Van Mierlo, J.; Bercibar, M.; El Baghdadi, M.; De Cauwer, C.; Messagie, M.; Coosemans, T.; Jacobs, V.; Hegazy, O. Beyond the State of the Art of Electric Vehicles: A Fact-Based Paper of the Current and Prospective Electric Vehicle Technologies. World Electr. Veh. J. 2021, 12, 20.
- [8] Wu, B.; Widanage, W.; Yang, S.; Liu, X. Battery digital twins: Perspectives on the fusion of models, data and artificial intelligence for smart battery management systems. Energy AI 2021, 1, 100016.
- [9] Rodríguez, B.; Sanjurjo, E.; Tranchero, M.; Romano, C.; González, F. Thermal Parameter and State Estimation for Digital Twins of E-Powertrain Components. IEEE Access 2021, 9, 97384–97400
- [10] D. M. Botín-Sanabria, A. Mihaita, R. E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza, J. J. Lozoya-Santos, Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review, Remote Sens. 2022, 14, 1335.

V. Candidature

Les candidats doivent posséder un diplôme de Master ou d'ingénieur avec de fortes compétences en informatique, énergétique, mathématique et optimisation. Des bases en IA sont souhaitables. Des compétences pratiques en programmation et des outils logiciels (par exemple, Matlab) et un anglais

courant (écrit et parlé) sont requis. Les candidats doivent être motivés pour apprendre rapidement et travailler efficacement sur des problèmes de recherche difficiles.

Conditions de recrutement :

Ce projet sera financé par une bourse CIFRE. Toute candidature devra être adressée par mail à El-Hassane Aglizim (el-hassane.aglizim@u-bourgogne.fr). Les éléments constitutifs du dossier sont obligatoirement :

- un Curriculum Vitae détaillé (contenant notamment une description du cursus universitaire et une description de l'expérience professionnelle et de stage),
- les notes obtenues en Master (avec éventuellement un classement),
- une liste des publications (y compris mémoire(s), rapport(s) de stage),
- une lettre exposant les motivations pour la recherche et le sujet proposé,
- lettre(s) de recommandation(s) de personnes ayant déjà travaillé avec ou encadré le candidat (lettre d'encadrant de Master ou de stage par exemple).

Date limite de candidature :

16 juin 2023