

Offre de thèse

SFTRF – CETU – Institut Pascal

Démarrage : janvier 2027

Titre : Développement d'un jumeau numérique pour la gestion, exploitation, maintenance d'un tunnel routier en service

Mots Clés : Jumeau Numérique, BIM (Building Information Modeling), Tunnel Routier, Interopérabilité, Intelligence Artificielle, Exploitation, Maintenance.

Description du sujet de thèse

Les infrastructures routières souterraines, telles que les tunnels, jouent un rôle stratégique dans le réseau de transport urbain, interurbain, national et international. Leur exploitation sécurisée, performante et durable est un enjeu majeur pour les gestionnaires d'infrastructures, en particulier face à la densification du trafic, aux exigences croissantes en matière de sécurité et de résilience. Par ailleurs, la transition numérique contribue au développement de maquettes numériques (MN), de l'Internet des Objets (IoT) et l'Intelligence Artificielle (IA). Dans ce contexte, le concept de jumeau numérique émerge comme une solution innovante pour repenser l'exploitation et la maintenance des tunnels routiers à travers une modélisation numérique dynamique, connectée et évolutive de l'infrastructure physique.

Un jumeau numérique [1] est une réplique virtuelle d'un système physique, qui intègre en temps réel les données issues de capteurs, de systèmes de supervision et d'informations environnementales, pour permettre l'analyse, la simulation, la prise de décision et l'action en retour dans le système physique. Dans le cas d'un tunnel routier, il peut couvrir des dimensions variées : circulation et flux de véhicules, gestion des équipements (ventilation, éclairage, signalisation), sécurité (incendie, évacuation), maintenance prédictive et impact environnemental (qualité de l'air, bruit, consommation énergétique). L'ambition est de fournir un outil capable de représenter fidèlement l'état du tunnel, de prévoir les évolutions futures, et de piloter intelligemment son exploitation.

Des développements de jumeaux numériques pour différents cas d'usage (visualisation des tunnels tels que construit [2, 3], gestion de crise en cas d'incendie [1], gestion des inspections et de la programmation des maintenances structurelles [4, 5], simulation du trafic [6], simulation de la phase de réalisation [7, 8], etc.) ont d'ores et déjà été réalisés. Ces jumeaux numériques sont généralement développés pour un seul cas d'usage. L'intérêt du projet de recherche proposé, tel que développé dans les paragraphes suivants, est d'intégrer dans un même jumeau numérique l'ensemble des cas d'usage pour la gestion exploitation maintenance d'un tunnel routier (dynamique du trafic, ventilation et dispersion des fumées ou polluants, interaction entre les équipements et leur impact sur la sécurité et la performance, formation des personnels, suivi du génie civil et opération de maintenance) en intégrant des données en temps réel de sources multiples.

Le CETU contribue activement au développement de la transition numérique : animation du GT 45 et du WG22 au sein de l'AFTES et de l'AITES, contribution au développement du format interopérable IFC dans le cadre du projet MINND¹, suivi du projet spécial « Progrès mondiaux en matière de jumeaux numériques : pratiques et résultats concrets dans le secteur des routes et de la mobilité » au sein de PIARC, expérimentation interne sur 2 tunnels (Oloron en conception et Butte d'Osse en exploitation) afin de tester les capacités et les limites du Building Information Modeling (BIM) pour des ouvrages

¹ <https://minnd.fr/>

souterrains. Ces deux expérimentations ont permis de démontrer : que le BIM est adapté à la modélisation des équipements et du Génie Civil en phase de conception ainsi qu'en phase d'exploitation tant que le Niveau d'Information Requis (LOIN)² est correctement défini.

La problématique centrale que cette thèse propose d'explorer est donc la suivante : comment concevoir, implémenter et exploiter un jumeau numérique pour améliorer la gestion en temps réel et la performance globale d'un tunnel routier, tout en intégrant les contraintes techniques, opérationnelles et économiques spécifiques à ce type d'infrastructure ?

Cette problématique soulève plusieurs sous-questions scientifiques et techniques :

- Quels sont les modèles numériques les plus pertinents pour représenter le comportement dynamique d'un tunnel en exploitation (trafic, ventilation, risques) ? Quel est le besoin de niveau d'information (LOIN)² adéquat ?
- Comment intégrer les données hétérogènes (temps réel, historiques, issues de capteurs ou de systèmes tiers) dans un environnement numérique cohérent et réactif ?
- Quelles architectures technologiques (IoT, edge computing, intelligence artificielle, plateformes BIM) permettent de garantir la robustesse, la fiabilité et la cybersécurité du jumeau numérique ?
- Comment utiliser ce jumeau pour optimiser la prise de décision opérationnelle, en particulier dans les situations critiques (événements, maintenance urgente) ?
- Quels bénéfices économiques, environnementaux et sociaux peut-on raisonnablement attendre de l'adoption d'un tel outil dans la gestion des tunnels ?

L'objectif de cette thèse est d'apporter une contribution scientifique et technique au jumeau numérique appliqué à l'exploitation des tunnels routiers, en s'appuyant sur une approche pluridisciplinaire combinant équipements, génie civil, systèmes intelligents, science des données et ingénierie des systèmes. Dans notre cas particulier, il s'agira du tunnel routier du Fréjus.

Le travail de thèse comportera quatre volets complémentaires :

- Un volet basé sur la formalisation de la démarche de conception d'un jumeau numérique de tunnel routier pour de la gestion (exploitation et maintenance) et son application à un métier du tunnel routier du Fréjus (2 tubes). La modélisation intégrera le tunnel lui-même et les équipements associés dans une optique de modélisation de la ventilation, de l'extraction des fumées ou la dilution des polluants, de la propagation de la chaleur en cas d'incendie, de l'interaction entre les équipements (capteurs, éclairage, signalisation, etc.) et de leur impact sur la sécurité des usagers et la performance de l'exploitation ;
- Un volet basé sur le traitement des données de masse par fusion de données et l'intégration dans le jumeau numérique ;
- Un volet sur l'interopérabilité entre les logiciels de modélisation, de gestion exploitation maintenance et des systèmes existants opérationnels de gestion ;
- Un volet d'analyse de la valeur ajoutée, en définissant des indicateurs de performance (KPIs) pertinents, et en développant des méthodes d'évaluation rigoureuses (expérimentations, simulations, études économiques) pour quantifier les gains en sécurité, en efficacité et en coûts.

² <https://www.buildingsmart.org/methods-to-specify-information-requirements-in-digital-construction-projects/>

Références bibliographiques :

- [1] X. Zhang, Y. Jiang, X. Wu, Z. Nan, Y. Jiang, J. Shi, Y. Zhang, X. Huang et G. G. Huang, «AloTenabled digital twin system for smart tunnel fire safety management», *Developments in the Built Environment*, vol. 18, p. 100381, 2024.
- [2] Afrazi M., Armaghani D.J., Afrazi H., Fattahi H., Samui P., «Real-time monitoring of tunnel structures using digital twin and artificial intelligence: A short overview», *Deep Underground Science Engineering*, DOI: 10.1002/dug2.70029.
- [3] Wu Z., Chang Y., Li Q., Cai R., «A Novel Method for Tunnel Digital Twin Construction and Virtual-Real Fusion Application», *Electronics*, <https://doi.org/10.3390/electronics11091413>.
- [4] Y. Gang, W. Yi, M. Zeyu, H. Min, S. Vijayan, K. Wang, «A digital twin-based decision analysis framework for operation and maintenance of tunnels», *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104125>.
- [5] L. Bellini Machado, M. Massao Futai, «Tunnel performance prediction through degradation inspection and digital twin construction», *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105544>.
- [6] N. Diren et S. Althen, «Tunnel 4.0: Managed digital twin for tunnel operations», *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, 2023, pp. 2635-2642.
- [7] Y. Zijian, Y. Ying, Z. Chengping, Z. Zhiming, L. Wei, W. Xuejie Wang, W. Lei, W. Libin, «A digital twin approach for tunnel construction safety early warning and management», *Computers in Industry*, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103783>.
- [8] L. Tao, L. Xiaojun, R. Yi, L. Jiaxin, Z. Sicheng, Z. Hehua, «Digital twin for intelligent tunnel construction», *Automation in Construction*, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105210>.

Laboratoire d'accueil : Institut Pascal (<http://www.institutpascal.uca.fr/index.php/fr/>)

Placé sous la tutelle de l'Université Clermont Auvergne et du CNRS (institut principal INSIS, instituts secondaires INS2I, INP), l'Institut Pascal est un laboratoire de recherche interdisciplinaire s'inscrivant dans les domaines stratégiques des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes : Génie des Procédés, Mécanique, Robotique, Physique des Sciences de l'Information, Santé. Le CHU de Clermont-Ferrand est tutelle secondaire de l'unité. L'Institut Pascal est membre de Clermont Auvergne INP, qui regroupe trois écoles d'ingénieurs ISIMA, POLYTECH Clermont et SIGMA Clermont.

L'Institut Pascal développe des systèmes innovants et intelligents par une approche intégrative systémique et multi-échelle, s'appuyant sur des champs scientifiques identifiés : électromagnétisme, fiabilité, génie des procédés et des bioprocédés, génie civil, imagerie, matériaux, mécanique, microsystèmes, nanophysique, perception, photonique, robotique, séparation et fonctionnalisation de biomolécules, technologies interventionnelles et diagnostiques médicales.

L'Institut Pascal est composé de 5 Axes de recherche :

- Génie des Procédés, Énergétique et Biosystèmes (GePEB) - Claude-Gilles DUSSAP
Réacteurs et bioréacteurs, Photoprocédés, Bioénergies, Ecosystèmes clos artificiels, Bioraffineries.
- Image, Systèmes de Perception, Robotique (ISPR) - Omar AIT AIDER
Image, Perception artificielle, Commande pour la robotique.
- Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Génie Industriel (M3G) - Hélène CHANAL
Mécanique, Matériaux, Structure, Machines.
- Photonique, Ondes, Nanomatériaux (PHOTON) - Guillaume MALPUECH
MicroSystèmes, Nanosciences, Nanostructures, Photonique, Compatibilité Electromagnétique.
- Thérapies Guidées par l'Image (TGI) - Jean-Jacques LEMAIRE
Guidage par l'Image (pelvis, abdomen, cerveau), Techniques endovasculaires, Endoscopie et Vision par ordinateur, Analyse d'impact.

L'équipe encadrante s'inscrit dans l'axe M3G et a des compétences en méthodes d'analyse des risques, en méthodes d'aide à la décision multicritères, en méthodes de traitement des données incertaines, en méthodes d'évaluation des performances environnementales, en Intelligence Artificielle, dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, dans le domaine du BIM (Building Information Modeling).

Entreprise d'accueil : la thèse, en bourse CIFRE, se déroulera dans les locaux de la Société française du tunnel routier du Fréjus à Modane, avec des déplacements ponctuels à Clermont-Ferrand et au CETU (Centre d'Etude des Tunnels) de Bron, partenaire de la thèse, pour des réunions de thèse et les formations doctorales.

La SFTRF est le concessionnaire de l'Autoroute de la Maurienne et de la partie française du tunnel routier du Fréjus. Ce dernier est un ouvrage bi-tubes à circulation monodirectionnelle, de près de 13 km, suite à l'ouverture à la circulation à l'été 2025 d'un second tube (Italie => France). Divers ouvrages d'interconnexion (rameaux, stations techniques, by-pass) sont répartis tout le long de l'ouvrage.

Equipe d'encadrement de la thèse : l'équipe d'encadrement sera constituée de l'Institut Pascal (Clermont-Ferrand), de la SFTRF (Modane) et du Centre d'Etude des Tunnels – CETU (Bron)

Le CETU (Centre d'Études des Tunnels) est un service technique central du ministère en charge des transports, rattaché à la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités. Il est centre de ressources, d'expertise et de recherche dans le domaine des ouvrages souterrains.

Profil du candidat :

Le(La) candidat(e) recherché(e) doit avoir des compétences en BIM et en Intelligence Artificielle. Des compétences en génie civil et équipements de tunnels routiers seraient un plus. Le(a) candidat(e) doit avoir réalisé lors de sa formation un stage de recherche et développement d'au moins 5 mois.
Langue de travail : français.

Lieu de travail : Modane (Haute-Maurienne, Savoie)

Rémunération : 25 k€ brut annuel + nombreux avantages

Contacts :

Aurélie TALON – aurelie.talon@uca.fr – 04 73 40 75 27

Pierre BREUL – pierre.breul@uca.fr – 04 73 40 75 01

Mode de candidature :

Merci de transmettre **au plus tard le 22/05/2026** à Aurélie TALON :

- Un CV
- Une Lettre de Motivation
- Un document de 3 pages maximum répondant à ces trois questions :
 - o De votre point de vue, qu'est-ce qu'un jumeau numérique va apporter à la démarche d'exploitation et de maintenance du Tunnel Routier du Fréjus ?
 - o De votre point de vue, quelles sont les différentes briques constituant un jumeau numérique de tunnel routier et les liaisons à créer entre ces briques ?
 - o Décrivez succinctement les étapes (et leurs durées) que vous proposeriez pour répondre à la problématique.