

THÈSE DE DOCTORAT EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Titre : Distributed Intelligence and Connected Things for robust and efficient Industrial cOmmunication Networks

Mots-clés : Intelligence artificielle hybride, Modélisation des connaissances, Optimisation par métaheuristique, Systèmes multiagents

Laboratoires d'accueil :

Laboratoire Connaissance et Intelligence Artificielle Distribuées (CIAD) – Université de Technologie de Belfort-Montbéliard - 13 rue Ernest Thierry-Mieg, 90010 Belfort Cedex, France - <https://www.ciad-lab.fr/>

ESTIA-Recherche, unité Propre de Recherche n° RNSR 201420655V conventionnée avec l'Université de Bordeaux - 90 allée Fauste d'Elhuyar, 64210 Bidart, France - <https://www.estia.fr/recherche>

1. Contexte

Depuis plusieurs années, l'application de solutions dites « digitales » à l'industrie s'est accélérée faisant naître le concept d'Industrie 4.0. Les enjeux de cette transformation digitale de notre industrie sont aussi bien économiques que sociétaux dont, parmi tant d'autres, la compétitivité, la réduction des coûts et des temps de production, la soutenabilité et le bien-être au travail¹. Technologies centrales de cette digitalisation, les systèmes dits Cyber-Physiques (ou Cyber-Physical Systems - CPS) ont la capacité de fournir aux industriels de nouvelles connaissances sur leurs outils de production mais aussi de les aider dans leur prise de décision quant à l'évolution et l'optimisation continues des performances de ceux-ci [1]. Néanmoins, s'appuyant sur objets, capteurs et actionneurs notamment, connectés mais aussi sur des moyens d'exploitation et de visualisation de données, le déploiement de ces CPS, dans un milieu industriel, reste confronté à de nombreux défis scientifiques et technologiques tels que l'intégration de ces équipements au sein d'environnements contraints (énergie, connectivité, interférences, encombrement...), la capacité de ces équipements à être interconnectés et facilement interopérables mais aussi à fournir des informations exploitables et pertinentes, au sein d'outils d'aide à la décision, à partir des nombreuses données collectées et échangées [2].

Dans ce contexte, pour être efficaces et résilients, cet ensemble de solutions connectées en réseau, basées sur l'IoT [3], et au cœur de la digitalisation de l'industrie se doivent donc non seulement (1) d'assurer une connectivité « transparente » et un maillage « total », par le biais de solutions multitechnologique dans un environnement indoor, mais aussi (2) de garantir l'exploitabilité des données collectées et échangées [4]. Le projet DICTION², au travers notamment d'une thèse doctorale, faisant l'objet de cette offre, se propose donc d'étudier et d'expérimenter comment l'apport de solutions logicielles, tels que le Machine Learning (ML) ou les Systèmes Multi-Agents (MAS), couplées avec une architecture matérielle adaptée peuvent constituer des opportunités pertinentes afin de répondre aux défis imposés pour le déploiement d'infrastructure réseaux au sein d'environnements industriels.

Cette thèse doctorale sera co-encadrée par des Professeurs et des Enseignants-chercheurs des laboratoires suivants :

- Le laboratoire **Connaissance et Intelligence Artificielle Distribuées** (CIAD - UR 7533), laboratoire public de recherche sous la tutelle de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) et de l'Université Bourgogne Europe (UBE). Spécialisé en intelligence artificielle, il vise à **formaliser et concevoir de nouveaux modèles, méthodologiques, concepts ou outils digitaux en relation avec l'Intelligence Artificielle hybride, distribuée et explicable**.
- **ESTIA-Recherche**, Unité Propre de Recherche, conventionnée avec l'Université de Bordeaux (n° RNSR 201420655V), équipe de recherche pluridisciplinaire travaillant sur la thématique des « Smart Interfaces for Engineering ». Dans le cadre de ses activités de recherche sur les systèmes embarqués, ESTIA-Recherche se focalise sur **l'étude, la proposition et l'implémentation de solutions**, aussi bien logicielles que matérielles, **permettant de rendre plus autonomes**, aussi bien au niveau énergétique que décisionnel, **ou plus performants des systèmes embarqués aux ressources contraintes tout en tenant compte du cadre applicatif**.

¹ [Industrie 4.0 : technologies, enjeux en entreprise, où en est-on ? | Big média | S'inspirer, S'informer, S'engager](#)

² Projet co-financé par l'Institut Carnot ARTS

Le(la) doctorant(e) sera inscrit(e) à l'École Doctorale de Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques (ED SPIM, ED37), et réalisera ses travaux de thèse principalement au sein du laboratoire ESTIA-Recherche à Bidart.

2. Sujet

2.1. Verrou scientifique

Le déploiement d'intelligence artificielle au sein des infrastructures industrielles se heurte à un verrou central : **comment intégrer des algorithmes avancés, hybrides et distribués, au sein de systèmes électroniques embarqués, aussi appelés nœuds, hétérogènes et fortement contraints en ressources, tout en garantissant l'interopérabilité, la fiabilité des échanges et l'exploitabilité des données en contexte opérationnel ?** Ce verrou se décline en plusieurs dimensions. La première concerne la capacité à faire coopérer des agents intelligents implantés sur des dispositifs aux capacités de calcul, de mémoire et de communication très variables, sans pour autant centraliser l'intelligence ni générer des volumes de données incompatibles avec les contraintes temps réel de l'Industrie 4.0. La seconde dimension porte sur la fiabilité des échanges dans des environnements où les pertes de données, les erreurs de transmission ou les défaillances matérielles sont fréquentes, nécessitant des mécanismes de tolérance aux pannes et de compensation qui sont intégrés au plus près du capteur ou de l'actionneur. Enfin, un troisième verrou, d'ordre méthodologique, réside dans l'absence d'outils permettant de coupler en temps réel des résultats expérimentaux et simulés afin d'anticiper les performances réelles d'une infrastructure associant des nœuds hétérogènes, avant même son déploiement définitif. La réponse à ces verrous suppose de repenser conjointement l'architecture logicielle des systèmes multi-agents, leur implantation matérielle et les méthodes de validation associées.

2.2. Objectifs scientifiques et d'ingénierie

La thèse poursuit des objectifs scientifiques et d'ingénierie articulés autour de quatre axes complémentaires. Le premier objectif est de concevoir des mécanismes d'intelligence artificielle hybride et distribuée, dont l'exécution s'effectue au plus près des capteurs et des actionneurs, selon une logique de « Edge AI ». Cette approche vise à réduire drastiquement les échanges de données entre les nœuds tout en préservant un haut niveau de fiabilité des résultats. Le deuxième objectif consiste à développer une architecture à base de systèmes multi-agents permettant de faciliter, selon une logique proche du « plug'n play », le déploiement et l'interopérabilité de nœuds hétérogènes dans un environnement industriel donné. Une attention particulière sera portée à la standardisation des méthodes de codage et d'exécution des agents sur des dispositifs contraints, incluant passerelles intelligentes et terminaux capteurs-actionneurs. Le troisième objectif porte sur la gestion différenciée des flux de données selon leur criticité, en distinguant les données générales, qui peuvent supporter une latence plus élevée, des données critiques impliquant une action immédiate, pour lesquelles des mécanismes de compensation des pertes ou des erreurs doivent être activés de manière déterministe. Le quatrième objectif, à dimension méthodologique, vise à proposer un framework reposant sur le couplage entre « Hardware in the Loop » et jumeau numérique, permettant d'évaluer et d'anticiper les performances réelles de l'infrastructure réseau avant son déploiement. L'ensemble de ces travaux s'appuiera sur des cas d'étude concrets issus de l'Industrie 4.0 et du bâtiment intelligent, garantissant une validation en conditions représentatives.

2.3. Approche méthodologique envisagée

L'approche méthodologique proposée s'articule autour d'une boucle itérative associant conception, simulation et expérimentation sur cible réelle. Dans un premier temps, une architecture multi-agents sera définie pour répartir les traitements d'intelligence artificielle entre passerelles intelligentes et nœuds hétérogènes. Cette architecture intégrera une typologie des données et des traitements permettant d'adapter dynamiquement le comportement des agents selon la criticité des informations échangées. Dans un second temps, les algorithmes seront implémentés sur des cibles matérielles contraintes représentatives des environnements industriels, en utilisant des techniques de passage à l'échelle et d'optimisation mémoire spécifiques à l'embarqué. La troisième phase consiste à mettre en place une plateforme de validation combinant Hardware in the Loop et jumeau numérique. Cette plateforme permettra de simuler l'environnement industriel réel, d'injecter des scénarios de défaillances (pertes de données, variations de charge, pannes partielles) et de confronter en temps réel les comportements simulés et expérimentaux. L'originalité de cette approche réside dans la capacité à faire interagir de manière synchrone les nœuds physiques avec leur jumeau numérique, de façon à anticiper les performances du système déployé tout en affinant itérativement les algorithmes. Enfin, la méthodologie sera répliquable et formalisée sous la forme d'un framework à base de systèmes multi-agents, destiné à faciliter le déploiement d'infrastructures similaires dans des contextes industriels variés.

2.4. Positionnement par rapport aux travaux connexes

Les travaux proposés se situent à l'intersection de plusieurs domaines de recherche. En matière d'intelligence artificielle embarquée sur systèmes contraints, la thèse s'inscrit dans le prolongement des recherches récentes sur le « Edge AI » et le « Tiny Machine Learning ». Un article de synthèse récent publié dans IEEE Design & Test souligne que la conception d'architectures d'apprentissage automatique sans tenir compte des contraintes mémoire, de calcul et énergétiques des dispositifs cibles rend le déploiement impraticable, soulignant l'interdépendance critique entre les modèles d'IA et les plateformes matérielles d'exécution [5]. Dans le domaine des systèmes multi-agents, la thèse mobilise les résultats du CIAD et de l'ESTIA, qui ont développé des expertises complémentaires sur la conception d'agents autonomes et leur déploiement en environnement industriel. L'originalité réside ici dans la volonté de standardiser le codage des agents pour des cibles matérielles hétérogènes, en s'appuyant sur des initiatives récentes pour la modélisation et le déploiement d'agents d'ordonnancement, permettant d'encapsuler différentes méthodes d'IA (heuristiques, programmation mathématique, apprentissage par renforcement profond) au sein d'un même agent. En ce qui concerne la fiabilité des échanges dans les réseaux de capteurs industriels, des travaux récents ont proposé des mécanismes de collecte de données tolérants aux pannes basés sur l'IA pour les réseaux de capteurs sans fil, traitant les problèmes de partitionnement du réseau et de trous énergétiques [6][7]. Cependant, ces approches traitent rarement la compensation des erreurs par une intelligence répartie au niveau des nœuds terminaux. L'approche proposée, qui combine différenciation de la criticité des données et mécanismes locaux de compensation, s'inscrit dans une logique de résilience distribuée encore peu explorée. Sur le plan méthodologique, le couplage entre « Hardware in the Loop » et jumeau numérique pour la validation d'infrastructures à base de systèmes multi-agents constitue une contribution originale. Si le jumeau numérique est largement utilisé pour la simulation de systèmes industriels, son association en temps réel avec des nœuds physiques exécutant des agents intelligents reste un champ en émergence. Une étude récente a, par exemple, démontré l'intérêt d'une approche par jumeau numérique couplé à des systèmes cyber-physiques mobiles pour le contrôle et la supervision de lignes de production modulaires [8].

La thèse s'appuiera pour la validation sur des plateformes existantes telles que la plateforme ARI4.0 de l'ESTIA, s'appuyant sur une infrastructure IoT³, permettant une confrontation directe avec des cas d'usage de l'Industrie 4.0 et du bâtiment intelligent.

3. Profil recherché

Le(la) candidat(e) recherché(e) pour cette thèse devra justifier d'un diplôme de Master (ou équivalent) en informatique ou électronique ou dans un domaine connexe, avec une spécialisation affirmée dans au moins deux des trois champs suivants : systèmes embarqués et architectures contraintes, intelligence artificielle distribuée ou systèmes multi-agents, et ingénierie des systèmes cyber-physiques.

Une solide formation en algorithmique distribuée et en programmation embarquée est indispensable, avec une maîtrise des langages de développement bas niveau (C/C++, Rust) ainsi que des environnements de simulation couplant logiciel et matériel (Hardware in the Loop). Le candidat devra faire preuve d'une capacité à implémenter des solutions algorithmiques sur des cibles matérielles hétérogènes, incluant microcontrôleurs et passerelles industrielles, et à les confronter à des cas d'usage concrets.

Des compétences en systèmes multi-agents et en architectures orientées agents constitueront un atout déterminant. Une première expérience avec les concepts de jumeau numérique et d'interopérabilité des systèmes industriels serait appréciée.

La maîtrise de l'anglais scientifique, tant à l'écrit qu'à l'oral, est requise pour la rédaction de publications et les échanges au sein de la communauté internationale.

Au-delà des compétences techniques, la thèse exige une forte autonomie, une appétence pour le travail expérimental et la validation sur plateformes réelles. Une curiosité pour les approches interdisciplinaires, à la croisée de l'informatique embarquée, de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie des systèmes industriels, constituera un facteur différenciant.

³ IoT Lab ESTIA, plateforme IoT financée dans le cadre du projet CAP ELENA, programme AMI CMA de France 2030

4. Candidature

Les candidatures pour ce sujet de thèse sont à adresser par voie électronique avant le **31 mai 2026** à l'adresse suivante : **Stéphane Galland** <stephane.galland@utbm.fr>, avec copies systématiques à **Guillaume Terrasson** <g.terrasson@estia.fr> et **Alvaro Llaría** <a.llaria@estia.fr>.

Le dossier de candidature devra être regroupé en un seul fichier au format PDF, nommé selon la convention « NOM_Prenom.pdf », et comprendra impérativement les éléments suivants :

- un curriculum vitae détaillé, mettant en avant les formations suivies, les compétences techniques acquises (notamment en systèmes embarqués, intelligence artificielle, systèmes multi-agents, programmation bas niveau), les expériences de recherche (stages de master, projets de recherche, publications éventuelles) ainsi que les niveaux de langue ;
- une lettre de motivation de deux pages maximum, explicitant l'intérêt du candidat pour le sujet, la cohérence de son parcours avec les axes scientifiques de la thèse et ses motivations pour une carrière en recherche ;
- les relevés de notes des deux dernières années d'enseignement supérieur (Master 1 et Master 2 ou équivalents), accompagnés des diplômes obtenus ou des attestations de réussite ;
- si cela est possible, une ou deux lettres de recommandation émanant d'enseignants-chercheurs ou de responsables de stage, en mesure d'attester des aptitudes du candidat à la recherche et à l'expérimentation.

Les candidatures seront examinées au fur et à mesure de leur réception par un comité de sélection composé par les encadrants. Les candidats présélectionnés seront convoqués pour un entretien de motivation, qui pourra se dérouler en présentiel ou à distance selon les contraintes géographiques. La prise de fonction est envisagée pour une rentrée au plus tard le 1^{er} octobre 2026.

Pour toute information complémentaire relative au sujet ou à la procédure, les candidats sont invités à contacter Stéphane Galland à l'adresse <stephane.galland@utbm.fr>.

Références

- [1] D. Serpanos, "The Cyber-Physical Systems revolution," *Computer*, vol. 51, no. 3, pp. 70-73, 2018, doi: 10.1109/MC.2018.1731058.
- [2] D.G.S. Pivoto, L.F.F. de Almeida, R.R. Righi, J.J.P.C. Rodrigues, A.B. Lugli, A.M. Alberti, "Cyber-Physical Systems architectures for Industrial Internet of Things applications in Industry 4.0: A literature review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 176-192, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.11.017.
- [3] R. Tallat, A. Hawbani, X. Wang, A. Al-Dubai, L. Zhao, Z. Liu, G. Min, A.Y. Zomaya, S.H. Alsamhi, "Navigating Industry 5.0: A survey of key enabling technologies, trends, challenges, and opportunities," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 2, pp. 1080-1126, 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3329472.
- [4] V.C. Gungor, G.P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, design principles, and technical approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258-4265, 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2015754.
- [5] G. M. Iodice, W. Furtner, "Edge AI—An Industry View," *IEEE Design & Test*, vol. 42, no. 5, pp. 27-34, Oct. 2025, doi: 10.1109/MDAT.2025.3576338.
- [6] G. Kaur, M. Bhattacharya, "Green fault tolerant AIoT-enabled mobile sink data collection scheme in sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 10, pp. 15385-15394, Oct. 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3400880.
- [7] S. Wongapisumpo, "On the use of asset administration shell for modeling and deploying production scheduling agents within a Multi-Agent System," *Borealis*, Oct. 2025, doi: 10.5683/SP3/CKTXTP.
- [8] G. Simion, A. Filipescu, D. Ionescu, A. Filipescu, "Cloud/VPN-based remote control of a modular production system assisted by a mobile Cyber-Physical Robotic System—Digital Twin Approach", *Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 591, Jan. 2025, doi: 10.3390/s25020591.