

Titre de la thèse : Diagnostic et Pronostic à l'aide de l'IA dans le cadre de la maintenance industrielle / *Diagnostic et Prognostic via AI within the frame of industrial maintenance*

- **Domaines scientifiques :** *Industry 4.0, IMS (Intelligent Maintenance Systems), Machine Learning*
- **Mots-clés :** *Alarm correlation, Diagnostic & Prognostic, Machine Learning, IA*

Encadrement :

- **Directeur de thèse :** Anne LOUIS, Directeur de recherche CESI
- **co-encadrant (s) :**
 - Mohamed Amin BENATIA, Enseignant-Chercheur, Campus de Rouen
 - Ramzi CHAIEB, Enseignant-Chercheur, Campus La Rochelle (Région Ouest) – (A confirmer)

Contexte

Positionnement du laboratoire

LINEACT CESI (EA 7527), Laboratoire d'Innovation Numérique pour les Entreprises et les Apprentissages au service de la Compétitivité des Territoires, anticipe et accompagne les mutations technologiques des secteurs et des services liés à l'industrie et au BTP. La proximité historique de CESI avec les entreprises est un élément déterminant pour nos activités de recherche, et a conduit à concentrer les efforts sur une recherche appliquée proche de l'entreprise et en partenariat avec elles. Une approche centrée sur l'humain et couplée à l'utilisation des technologies, ainsi que le maillage territorial et les liens avec la formation, ont permis de construire une recherche transversale ; elle met l'humain, ses besoins et ses usages, au centre de ses problématiques et aborde l'angle technologique au travers de ces apports.

Sa recherche est organisée selon deux thèmes scientifiques interdisciplinaires et deux domaines applicatifs.

- *Le thème 1 "Apprendre et Innover" relève principalement des Sciences cognitives, Sciences sociales et Sciences de gestion, Sciences et techniques de la formation et celles de l'innovation. Les principaux objectifs scientifiques visés par ce thème sont la compréhension des effets de l'environnement, et plus particulièrement des situations instrumentées par des objets techniques (plateformes, ateliers de prototypage, systèmes immersifs...) sur les processus d'apprentissage, de créativité et d'innovation.*
- *Le thème 2 "Ingénierie et Outils Numériques" relève principalement des Sciences du Numérique et de l'Ingénierie. Les principaux objectifs scientifiques de ce thème portent sur la modélisation, la simulation, l'optimisation et l'analyse de données de systèmes industriels ou urbains. Les travaux de recherche portent également sur les outils d'aide à la décision associés et sur l'étude des jumeaux numériques couplés à des environnements virtuels ou augmentés.*

Ces deux thèmes développent et croisent leurs recherches dans les deux domaines applicatifs de l'Industrie du Futur et de la Ville du Futur, soutenues par des plateformes de recherche, principalement celle de Rouen dédiée à l'Usine du Futur et celles de Nanterre dédiée à l'Usine et au Bâtiment du Futur.

Positionnement du centre porteur du projet

CESI campus de Rouen accompagne ses étudiants et stagiaires dans les domaines du management et de l'organisation industrielle et du numérique. Pour appuyer ses formations et répondre aux besoins des entreprises du territoire normand, CESI Rouen développe une activité de recherche en lien avec le domaine applicatif industrie du futur de LINEACT CESI. Plus particulièrement, CESI Rouen a initié des premiers travaux de recherche autour la maintenance prédictive à travers les travaux de thèse d'Ahmed REMADNA au sein du projet DEFI&Co en abordant l'application de l'Intelligence artificielle à la maintenance prédictive dans l'industrie manufacturière. Le campus de Rouen souhaite donc poursuivre ces travaux afin de concevoir, développer et valider des outils innovants pour la maintenance industrielle, et ainsi garantir la compétitivité des entreprises manufacturières de la région, mais aussi celles à l'échelle nationale. Pour mener à bien ces travaux de recherche, il sera nécessaire d'avoir à disposition des données qui pourront être issues soit du démonstrateur « Usine du Futur (UdF) » présent sur le campus soit d'un partenaire industriel présent sur le territoire normand. Ainsi, les différents modèles proposés dans la thèse, seront testés et validés sur des cas d'étude réels via le démonstrateur UdF.

Positionnement dans les axes de recherche du laboratoire

Ce sujet de thèse s'inscrit dans l'axe 1 intitulé Cyber Physical Production Systems (CPPS) du Thème 2 Ingénierie et outils numériques de LINEACT. Les travaux se dérouleront autour de l'Organisation et la planification dynamique des activités et des services dans un contexte industrie 4.0 en s'intéressant plus particulièrement à des techniques de classification de données, à l'utilisation de méthodes d'analyses prédictives sur des systèmes industriels pour obtenir des outils d'aide à la décision pour des activités de maintenance. La problématique concerne l'automatisation de la phase de diagnostic et de pronostic, ainsi que la réduction du nombre d'alertes affichées aux opérateurs de maintenance. Dans ce contexte, ce projet de thèse permettra de proposer des solutions innovantes et participera au développement de l'axe de recherche mentionné ci-dessus.

Travaux de Recherche

- [Sujet de thèse résumé](#)

Cette thèse de doctorat a pour objectif de concevoir et de développer une approche permettant d'établir la durée de vie d'un équipement industriel évoluant dans un système cyber-physique (CPS). Pour ce faire, ce travail vise la prédiction de pannes et de dysfonctionnements d'un équipement industriel, ainsi que l'évaluation de toutes les causes racines sous-jacentes. Le système permettra aussi d'identifier les actions à entreprendre afin de maintenir le système à un certain niveau de performances et l'opérer de la manière la plus efficace, ce qui implique une étude de tous les aspects : de fiabilité, de disponibilité et de maintenance.

La plupart des travaux existants, réduits à quelques cas d'étude (ex. : roulement à billes, PoC) et relevant un manque de données considérable, se limitent souvent à la phase d'estimation du RUL (Remaining Useful Life) sans pour autant impliquer une décision par la suite. L'innovation de ce travail de recherche sera de concevoir et de développer des approches de diagnostic et de pronostic basées sur le Deep Learning (ex. : Machine de Boltzmann, Réseaux récurrents et ESN) pour la maintenance et la gestion de la santé des équipements industriels évoluant dans un CPS.

[Projet de thèse](#)

- [Contexte scientifique](#)

Les nouvelles industries manufacturières fortement connectées représentent un environnement de production riche en données (capteurs omniprésents, capacités analytiques embarquées, etc.) qui peuvent être exploitées afin : d'améliorer les processus de production (ERP prédictif, variation de process et impact sur la qualité des produits, ...), d'augmenter la disponibilité des équipements (IMS - Intelligent Manufacturing Systems et maintenance prédictive) ou encore de réduire la consommation énergétique et l'empreinte carbone (Jin, Weiss, Siegel, & Lee, 2016).

Parmi ces critères, la gestion intelligente de la maintenance ou de la production (IMS) reste un domaine très jeune et partiellement couvert par les études scientifiques, comme le rapporte l'étude bibliographique réalisée par Eker et al. (Eker, Camci, & Jennions, 2012), ou bien (Vichare & Pecht, 2006), (Varde & Pecht, 2018). La mise en place de tels systèmes implique des capacités de diagnostics et de pronostics en temps quasi-réel. Le PHM (Prognostics and Health Management) est une discipline de l'ingénierie qui vise à estimer le temps restant avant qu'un équipement s'arrête d'accomplir la tâche qui lui a été affectée. Ceci passe par l'estimation de l'indicateur RUL (Remaining Useful Life) qui permet d'établir une courbe de dégradation de l'équipement à partir des données capteurs. Les approches visant l'estimation du RUL peuvent être classées en deux grandes catégories : PoF-Based (Physics of Failures) et Data-Driven. Une combinaison de ces deux approches est possible, ce qui donne naissance à une troisième catégorie d'approches appelées : approches hybrides (ou fusion).

Les travaux menés par (Gugulothu, et al., 2018), montrent l'efficacité des approches axées données et plus précisément le Deep Learning dans la prédiction de l'indicateur RUL. Les auteurs précisent que plusieurs challenges doivent être relevés par les approches axées données, telles que :

- *La tendance de la dégradation complexe de la santé des équipements*
- *Des données bruitées provenant des capteurs*
- *L'indisponibilité partielle des données*
- *La dépendance temporelle complexe entre les données capteurs*

Afin de répondre à ces challenges les auteurs proposent une approche appelée Embed-RUL pour l'estimation de l'indicateur RUL sur des équipements industriels. Un réseau de neurones récurrent

(RNN) a été utilisé afin d'intégrer (de fusionner) plusieurs données capteurs (i.e. : série temporelle). Le RNN est utilisé en tant qu'encodeur afin d'obtenir une représentation à dimension fixe qui sert d'intégrateur des données chronologiques multi-capteurs (i.e. : série temporelle multivariée). Les résultats obtenus montrent une nette amélioration des performances vis-à-vis de deux Datasets (Engine Dataset et Pump Dataset). Toutefois, les auteurs soulignent la nécessité d'une grande puissance de calcul afin de répondre à la phase d'apprentissage du RNN. Afin de répondre à cette problématique, Rigamonti M. et al. (Rigamonti, Baraldi, Roychoudhury, Goebel, & Poll, 2018) proposent l'utilisation d'un ensemble d'ESN (Echo State Networks) pour la prédiction du RUL tout en minimisant les capacités de calcul nécessaire à la phase d'apprentissage du modèle.

- **Sujet de thèse**

Cette thèse de doctorat a pour objectif de concevoir et de développer une approche permettant d'établir la durée de vie d'un équipement industriel évoluant dans un système cyber-physique (CPS). Pour ce faire, ce travail vise la prédiction de pannes et de dysfonctionnements d'un équipement industriel, ainsi que l'évaluation de toutes les causes racines sous-jacentes. Le système permettra aussi d'identifier les actions à entreprendre afin de maintenir le système à un certain niveau de performances et l'opérer de la manière la plus efficace, ce qui implique une étude de tous les aspects : de fiabilité, de disponibilité et de maintenance.

La plupart des travaux existants, réduits à quelques cas d'étude (ex. : roulement à billes, PoC) et relevant un manque de données considérable, se limitent souvent à la phase d'estimation du RUL (Remaining Useful Life) sans pour autant impliquer une décision par la suite. L'innovation de ce travail de recherche sera de concevoir et de développer des approches de diagnostic et de pronostic basées sur le Deep Learning (ex. : Machine de Boltzmann, Réseaux récurrents et ESN) pour la maintenance et la gestion de la santé des équipements industriels évoluant dans un CPS.

- **Antériorité du sujet dans le laboratoire**

Ce sujet résulte d'une suite logique de travaux initiés au laboratoire depuis 2019 et qui concerne la maintenance des équipements industriels. Un premier travail de recherche a été ainsi proposé et développé dans le cadre du projet DEFI&Co dont l'objectif était le filtrage d'alertes (i.e., identification et suppression des fausses alertes). Une partie de ce travail a été publiée dans le congrès international IFAC-2020 (M. A., Benatia, et. al. 2020), et une rédaction d'article journal est en cours. Suite à ce travail, nous avons cette année renouvelé l'expérience, en se concentrant sur la prédiction de pannes machine, et l'identification de dysfonctionnement. Nous avons ainsi proposé un algorithme d'extraction de tâches de maintenance à partir du système de gestion de maintenance, et un modèle de prédiction de pannes prenant en entrée des alertes de maintenance et produisant en sortie une estimation sur l'état de dégradation de la machine. Comme perspective nous visons de développer un outil d'aide à la décision dans le cadre de la maintenance industrielle qui une fois une panne détectée (prédite), lance une phase de recherche exhaustive des causes racines. Le sujet de thèse a pour objectif la conception et le développement de l'outil d'aide à la décision ainsi que son évaluation sur des situations réelles.

- **Programme de travail**

La première partie de la thèse sera dédiée à l'étude d'un équipement industriel évoluant dans un CPS. Ce type de machine étant récemment adopté dans les industries (capteurs intégrés connectés à Internet, 5G, capteurs non-intrusifs, etc.), il existe peu de jeux de données « publiques » disponibles qui permettent une étude pertinente et qui favorisent la mise en place d'algorithme d'aide à la décision dans le cadre de la maintenance industrielle. D'un autre côté, aucun consensus n'existe sur l'architecture à adopter pour les IMS (Intelligent Maintenance System) ni les parties prenantes impliquées dans chaque couche du CPS. Sachant qu'il existe trois niveaux décisionnels (opérationnel,

managérial et stratégique), une première étude visera la proposition d'un modèle répondant à chaque type de décision ainsi que chaque action à entreprendre pour chaque niveau du CPS (Multi-couches et multi-échelles : Connexion, Conversion, Cyber, Cognition and Configuration). Ce travail s'effectuera dans la continuité des travaux de Zhongchang, L. (Liu, 2018) et de C. Goebel (Rigamonti, Baraldi, Roychoudhury, Goebel, & Poll, 2018) (Gugulothu, et al., 2018), qui ont proposé des modèles axés données pour l'estimation de la RUL.

Comme mentionné au début, la phase de diagnostic et de pronostic étudiée sera scindée en deux parties : (1) Prédiction de pannes via des modèles Deep-Learning et (2) identification des causes racines et planification de maintenance. La première étape vise à proposer un modèle de prédiction de pannes permettant la prise en compte d'informations provenant de divers niveaux dans le système (système de monitoring d'alertes de maintenance, GMAO, etc.). Dans cette partie, l'objectif est de concevoir un modèle neuronal profond (Deep Neural Net) ayant pour mission de traduire des données capteurs en un indicateur permettant d'estimer une défaillance potentielle. La seconde quant à elle, s'intéressera à la modélisation mathématique des différents critères de disponibilité, fiabilité et maintenance et à l'intégration du modèle proposé dans le système de maintenance.

Suite à cela, une étude de validation et de test en grandeur nature sera réalisée dans le cadre d'une Preuve de Concept (PoC).

Enfin, dans le cadre de cette thèse, nous essaierons de trouver le lien entre les informations fournies par les modèles de pronostic développés et le pilotage (décision) des actions de maintenance de manière à optimiser les coûts et les performances du système. L'étude s'ouvrira sur les deux volets : méthodologie et procédures à mettre en place pour la surveillance et pilotage intelligent des actions de maintenance des équipements industriels.

- Collaboration avec des partenaires extérieurs

Des pistes de collaboration avec des partenaires industrielles sont envisagées, afin de valider les modèles proposés dans la thèse sur des cas d'étude réels. Ainsi, le/la doctorant(e) pourra être amené à tester et valider ses travaux sur des outils de production chez les partenaires identifiés.

- Production scientifique/technique attendue

Les attentes sur ce sujet de thèse sont les suivantes :

- *Rapport d'état de l'art sur le Pronostic et Diagnostic, ainsi que la corrélation d'alerte, dans le cadre de la maintenance industrielle*
- *Deux articles de conférences : (1) sur l'algorithme de prédiction de pannes, et (2) sur la corrélation d'alertes de maintenance*
- *Un/Deux articles journaux : sur la méthode hybride (diagnostic & pronostic).*
- *Un rapport de thèse regroupant : l'état de l'art, le/les modèle(s) proposé(s), ainsi que les résultats obtenus.*

Organisation de la thèse

- **Lieu de travail** : Laboratoire LINEACT/ CESI Campus Rouen
- **Date de démarrage** : Oct./Nov. 2021
- **Ecole doctorale de rattachement** : ED SMI (Sciences des Métiers de l'Ingénieur) HESAM
- **Durée** : 36 mois

Modalités de Recrutement : sur dossier et entretien.

Merci d'adresser votre candidature à Dr. Anne LOUIS (alouis@cesl.fr), Dr. Mohamed Amin BENATIA (mberatia@cesl.fr), et Dr. Ramzi CHAIEB (rchaieb@cesl.fr) avec pour objet de mail :

« [Candidature] Diagnostic et Pronostic à l'aide de l'IA dans le cadre de la maintenance industrielle »

Votre candidature devra comporter :

- **Un Curriculum-Vitae détaillé du candidat.** En cas de rupture dans le cursus universitaire, merci de donner une explication ;
- **Une lettre de motivation** explicitant ses motivations à réaliser une thèse de doctorat ;
- **Les résultats** des MASTER 1 et MASTER 2 et les bulletins de notes correspondant (au minimum les résultats du premier semestre pour le MASTER 2).
- **Lettres de soutien extérieur** au laboratoire d'accueil (2 maximum).

Merci de transmettre l'ensemble des documents au sein d'un fichier zip intitulé **NOM prénom.zip**.

Vos compétences :

- **Compétences scientifiques et techniques :**
A préciser - Lister entre 3 et 5 compétences scientifiques et technique attendues
 - *Langages de programmation : Python, C++*
 - *Plateformes de développement : TensorFlow, PyTorch, Keras*
 - *Des connaissances en maintenance industrielle sont un plus*
- **Compétences relationnelles :**
 - Être autonome, avoir un esprit d'initiative et de curiosité,
 - Savoir travailler en équipe et avoir un bon relationnel,
 - Être rigoureux.

Références

- Eker, O. F., Camci, F., & Jennions, I. K. (2012). Major challenges in prognostics: study on benchmarking prognostics datasets. *European Conference of the Prognostics and Health Management Society* (pp. 148-155). Dresden, Germany: PHM Society.
- Gugulothu, N., TV, V., Malhorta, P., Vig, L., Agarwal, P., & Shroff, G. (2018). Predicting Remaining Useful Life using Time Series Embeddings based on Recurrent Neural Networks. *International Journal of Prognostics and Health Management*.
- JIA, X. H. (2018). A Review of PHM Data Competitions from 2008 to 2017. *PHM Society Conference. 2018*.
- Jin, X., Weiss, B. A., Siegel, D., & Lee, J. (2016). Present status and future growth of advanced maintenance technology and strategy in US manufacturing. *International journal of prognostics and health management*.
- Liu, Z. (2018). *Cyber-Physical System Augmented Prognostics and Health Management for Fleet-Based Systems*. Cincinnati (Texas): Univ. Cincinnati.
- O'Donovan, P., Bruton, K., & O'Sullivan, D. T. (2016). Case study: the implementation of a data-driven industrial analytics methodology and platform for smart manufacturing. *International journal of prognostics and health management*.
- Pecht, M., & Gu, J. (2009). Physics-of-failure-based prognostics for electronic products. *Transactions of the institute of measurement and control*, 309-322.
- Rigamonti, M., Baraldi, P., Roychoudhury, I., Goebel, K., & Poll, S. (2018). Ensemble of Optimized Echo State Networks for Remaining Useful Life Prediction. *Neurocomputing*, 121-138.

- Varde, P. V., & Pecht, M. G. (2018). Prognostics and Health Management . Dans P. M. G., *Risk-Based Engineering* (pp. 447-507). Singapore: Springer.
- Vichare, N. M., & Pecht, M. (2006). Prognostics and Health Management. *IEEE Transaction on components and packaging technologies*, 222-229.
- Benatia, M. A., Louis, A., & Baudry, D. (2020). Alarm Correlation to improve industrial fault management. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10485-10492.