

## SUJET DE THESE G-SCOP 2023

**Titre de la thèse :** Usages de l'Intelligence Artificielle pour la sûreté de fonctionnement et la maintenance intelligente des équipements de production dans l'industrie du futur.

**Directeur de thèse :** Eric GASCARD (Maître de Conférence, HDR)

**Ecole doctorale :** EEATS

**Spécialité de thèse :** Automatique-Productique

**Date de début** (souhaitée) : septembre 2023

**Financements envisagés :** [allocation de recherche EEATS](#)

**Domaine :** Automatique et ingénierie des systèmes industriels, Sûreté de fonctionnement, Intelligence Artificielle, apprentissage automatique

**Mots clés :** Industrie 4.0, Systèmes cyber-physiques de production, Diagnostic, Maintenance, Arbres de défaillances dynamiques, Apprentissage automatique

### Résumé du projet de thèse :

La capacité à connaître l'état de santé d'un équipement de production est d'une importance capitale dans l'industrie du futur afin de mettre en place une maintenance intelligente des équipements dans les usines du futur. Leurs analyses de la fiabilité contribuent ainsi à la durabilité des équipements et répondent aux responsabilités sociétales et environnementales des systèmes de production. Dans ce projet de thèse, nous voulons développer des outils d'analyse de la fiabilité et d'aide à la décision pour le diagnostic et la maintenance en utilisant des outils d'intelligence artificielle. Sur la base d'une modélisation incomplète du système et de données de surveillance de l'état de santé du système, nous allons aborder deux approches complémentaires. Premièrement, nous allons aborder le problème de la construction d'arbres de défaillances dynamiques en utilisant des approches d'apprentissage automatique. Les arbres de défaillances dynamiques [Dugan&al 1992] représentent des scénarios avec des comportements dynamiques et des liens de causalités entre différents événements aboutissant à la défaillance redoutée du système. Cet outil permet une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité [Gascard & Simeu-Abazi 2015, Gascard & Simeu-Abazi 2018]. Deuxièmement, nous allons étudier la problématique du diagnostic de systèmes dynamiques pour lesquels nous avons une connaissance incomplète des modes de défaillances : nous développerons une méthodologie de diagnostic hybride basée sur les arbres de défaillances dynamiques [Gascard&al 2011] et les automates temporisés [Gascard&Simeu-Abazi 2013, Gascard&Simeu-Abazi 2019]. Les automates temporisés [Alur&Dill 1994] permettront le suivi des modes de fonctionnement du système (nominal, dégradés, défaillants) et seront construits à partir du modèle nominal du système et des données de surveillance.

### Objectifs :

L'objectif général de ce projet de doctorat est de développer des méthodologies basées sur les modèles et les données qui peuvent contribuer à l'étude de la fiabilité de systèmes cyber-physiques de production et à leur maintenance intelligente dans le contexte de l'industrie du futur.

### Profil recherché :

Titulaire d'un diplôme de Master 2 ou Ingénieur d'une formation en Génie Industriel ou Ingénierie des systèmes industriels avec des connaissances sur la sûreté de fonctionnement et des compétences en programmation et analyse de données. Des compétences en algorithmes d'intelligence artificielle et en apprentissage automatique sont un plus.

### Contexte :

Un verrou scientifique majeur dans l'accompagnement de la transformation digitale de l'industrie de production (Industrie 4.0) est le manque d'outils d'aide à la décision pour l'étude de la fiabilité, le diagnostic et la maintenance de systèmes dynamiques complexes tels que les systèmes cyber-

physiques de production [Cardin 2019]. En effet, ces systèmes cyber-physiques sont des technologies hétérogènes par nature : ils combinent des sous-systèmes mécaniques, électroniques, du logiciel et du réseau. Cette hétérogénéité les rend alors plus difficiles à modéliser et à appliquer des méthodes de sûreté de fonctionnement [Dhillon 2020] (RAMS - Reliability Availability Maintainability and Safety) et de pronostic et management de la santé [Kim&al 2017] (PHM -Prognostics and Health Management) à leurs équipements de production.

Différents travaux de recherche cette dernière décennie ont porté sur le développement de méthodes de diagnostic, de pronostic et de maintenance de systèmes dynamiques complexes par des approches à base de connaissances, de modèles ou de données. Cependant, celles-ci supposaient avoir une connaissance complète du fonctionnement du système soit à base de modèles (dans son mode nominal et ses modes de défaillances), soit à base de données (grand nombre de données issus de tous les modes de fonctionnement du système). Cette thèse a pour but de proposer des outils d'analyse de la fiabilité et d'aide à la décision pour le diagnostic et la maintenance en utilisant des outils d'intelligence artificielle lorsqu'on ne possède qu'une modélisation incomplète du système en exploitant les données de surveillance de l'état de santé du système.

### **Méthode :**

Pour prendre en compte la problématique d'une modélisation incomplète d'un système de production ou une insuffisance de données de surveillance (en quantité et en qualité) représentative de son fonctionnement dans tous ses modes (nominal, dégradés, défaillants) lors de l'étude de la sûreté de fonctionnement et de la maintenance, nous proposons de développer une méthodologie à base d'arbres de défaillances dynamiques et d'automates temporisés.

L'outil des arbres de défaillances dynamiques permettra de représenter l'enchaînement des événements menant à des modes dégradés ou défaillants du système étudié. Les arbres de défaillances dynamiques seront construits par inférence et apprentissage automatique à partir de la connaissance d'une modélisation hiérarchique et multi-vues du système dynamique [Haj Kacem 2018] et des données de surveillance du système. La littérature jusqu'à présent propose essentiellement des méthodes de construction d'arbres de défaillances statiques par des approches à bases de modèles, de connaissances ou de données, mais très peu de travaux [Pai&Dugan 2002, Dehlinger&Dugan 2008, Baklouti&al 2020] proposent des méthodes de construction d'arbres de défaillances dynamiques, et celles-ci se basent sur une connaissance complète de la structure ou du comportement du système.

De nombreux travaux ont porté sur le développement de méthodologie de diagnostic de systèmes dynamiques complexes à bases de modèles ou de données, cependant ceux-ci présupposent la connaissance d'un modèle complet ou d'un jeu de données suffisamment conséquent et exhaustif des différents modes de fonctionnement du système. Très peu de travaux ont porté sur le développement de méthodes de diagnostic avec une connaissance incomplète, en modèles ou en données, du système [Kwong&Yonge-Mallo 2011, Yin&al 2019, Bates&al 2022]. Nous proposons dans ce projet de thèse une méthode de diagnostic hybride conjuguant l'utilisation des automates temporisés pour le suivi temporel des modes de fonctionnement du système et des arbres de défaillances dynamiques pour la détection et la localisation des défauts.

### **Résultats attendus :**

La thèse vise à développer des méthodes et des outils pour l'analyse de la sûreté de fonctionnement et de la maintenance de systèmes de production dans l'industrie 4.0 dans un contexte d'une modélisation incomplète de ces systèmes due à leur complexité ou d'une connaissance incomplète de leur fonctionnement par manque exhaustif de données sur tous les comportements possibles en présence de dégradation ou de défaillances. Les résultats attendus sont :

- Développement d'une méthode de construction d'arbres de défaillances dynamiques par inférence et apprentissage automatique à partir d'une modélisation partielle du système et de données de surveillance du système.
- Développement d'une approche hybride de diagnostic de défaillances basée sur les automates temporisés et les arbres de défaillances dynamiques.

### **Références :**

[Alur&Dill 1994] Alur, R., & Dill, D. L. (1994). A Theory of Timed Automata. Theoretical Computer Science, (126), 183-235.

- [Baklouti&a l2020] Baklouti, A., Nguyen, N., Mhenni, F., Choley, J. Y., & Mlika, A. (2020). Dynamic fault tree generation for safety-critical systems within a systems engineering approach. *IEEE Systems Journal*, 14(1), 1512-1522.
- [Bates&al 2022] Bates, I. W., Karimodini, A., & Karimadini, M. (2022). A Learning-Based Approach for Diagnosis and Diagnosability of Unknown Discrete Event Systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.
- [Cardin 2019] Cardin, O. (2019). Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework. *Computers in Industry*, 104, 11-21.
- [Dehlinger&Dugan 2008] Dehlinger, J., & Dugan, J. B. (2008). Analyzing dynamic fault trees derived from model-based system architectures. *Nuclear Engineering and Technology*, 40(5), 365-374.
- [Dhillon 2020] Dhillon, B. S. (2020). *Reliability, Maintainability, and Safety for Engineers*. CRC Press.
- [Dugan&al 1992] Dugan, J. B., Bavuso, S. J., & Boyd, M. A. (1992). Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems. *IEEE Transactions on reliability*, 41(3), 363-377.
- [Gascard&al 2011] Gascard, E., Simeu-Abazi, Z., & Younes, J. (2011). Exploitation of Built in test for diagnosis by using Dynamic Fault Trees: Implementation in Matlab Simulink. *Proceedings of the 20th European Safety and Reliability Conference, ESREL*.
- [Gascard&Simeu-Abazi 2013] Gascard, E., & Simeu-Abazi, Z. (2013). Modular modeling for the diagnostic of complex discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(4), 1101-1123.
- [Gascard&Simeu-Abazi 2015] Gascard, E., & Simeu-Abazi, Z. (2015). Failure root causes analysis of complex systems—Dynamic Fault Tree approach. *Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL*.
- [Gascard&Simeu-Abazi 2018] Gascard, E., & Simeu-Abazi, Z. (2018). Quantitative analysis of dynamic fault trees by means of Monte Carlo simulations: Event-driven simulation approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, 487-504.
- [Gascard&Simeu-Abazi 2019] Simeu-Abazi, Z., & Gascard, E. (2019). Fault diagnosis method for timed discrete-event systems: Application to autonomous electric vehicle. *Proceedings of the 3rd International Conference on Control, Automation and Diagnosis, ICCAD*.
- [Haj Kacem 2018] Haj Kacem, M.A. (2018). *Contribution au développement d'une méthodologie de diagnostic des systèmes Cyber-Physique*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.
- [Kim&al 2017] Kim, N. H., An, D., & Choi, J. H. (2017). *Prognostics and health management of engineering systems*. Switzerland: Springer International Publishing.
- [Kwong&Yonge-Mallo 2011] Kwong, R. H., & Yonge-Mallo, D. L. (2011). Fault diagnosis in discrete-event systems: Incomplete models and learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 41(1), 118-130.
- [Pai&Dugan 2002] Pai, G. J., & Dugan, J. B. (2002, November). Automatic synthesis of dynamic fault trees from UML system models. In *13th International Symposium on Software Reliability Engineering, 2002. Proceedings.* (pp. 243-254). IEEE.
- [Yin&al 2019] Yin, X., Chen, J., Li, Z., & Li, S. (2019). Robust fault diagnosis of stochastic discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(10), 4237-4244.

**Contact :** [eric.gascard@g-scop.grenoble-inp.fr](mailto:eric.gascard@g-scop.grenoble-inp.fr)