

Diagnostic en-ligne des systèmes dynamiques complexes : complémentarité des méthodes à base de modèles et des méthodes guidées par les données. Application à des manipulateurs robotiques souples éco-conçus.

Les recherches sur le diagnostic en-ligne (détection, localisation et identification de défauts) des systèmes dynamiques sont intensives depuis plus de 40 ans. De nombreuses méthodes ont été proposées et la littérature scientifique est abondante. On distingue classiquement deux grandes classes d'approches : les approches à base de modèle comportementaux et les approches de traitement et d'analyse de données.

Les méthodes de diagnostic à base de modèles comportementaux [1] (telle que la méthode de l'espace de parité, les méthodes à base d'observateurs ou de filtres, les méthodes d'identification paramétrique) reposent sur la génération d'indicateurs de défaut appelés classiquement résidus, qui sont des fonctions des entrées connues et des sorties mesurées. Ces résidus, calculés en-ligne, sont analysés et fournissent une indication de l'état de santé du système considéré. Des méthodes de décision sont alors mises en œuvre pour fournir un diagnostic. Ces méthodes ont fait leurs preuves d'efficacité et de performance sur de nombreux exemples applicatifs mais restent relativement théoriques. Peu d'applications réelles ont réellement été réalisées en raison de deux verrous majeurs : la difficulté à obtenir un modèle précis pour de nombreuses applications (ce qui nécessite une expertise importante sur le système/domaine considéré), la complexité d'utilisation/de manipulation des modèles lorsque ceux-ci sont non linéaires, de grande dimension ou comportent plusieurs dynamiques lentes et rapides, la difficulté à analyser les résidus et prendre une décision fiable en présence de perturbations et incertitudes paramétriques.

Avec le développement de l'intelligence artificielle, et en particulier des méthodes d'apprentissage, de classification et de traitement statistique des données, les méthodes de diagnostic guidées par les données reçoivent depuis plusieurs années un fort engouement dans la communauté scientifique [2]. Ces méthodes ont montré leur efficacité dans de nombreuses applications, cependant, elles sont confrontées à plusieurs difficultés qui limitent leur utilisation dans un contexte industriel : difficulté à avoir des données en grand nombre du système en défaut, difficulté pour couvrir tous les cas de défaut dans toutes les conditions de fonctionnement ou tous les modes opératoires ; difficulté pour prouver et garantir les performances du système de diagnostic en toute circonstances en vue d'une certification ; difficulté à tenir compte de la dynamique du système et des données ; difficulté à identifier la cause première du défaut c'est-à-dire le composant défaillant, responsable de la modification des données.

Au-delà des difficultés évoquées ci-dessus inhérentes aux deux approches, plusieurs verrous subsistent limitant d'autant plus leurs applications sur des systèmes dynamiques complexes. Parmi ces verrous, on peut citer le diagnostic des défauts multiples, des défauts intermittents ou des défauts naissants évoluant lentement ; la minimisation des taux de fausses alarmes et de non détections en environnement incertain, la prise en compte des dynamiques complexes et variables en fonction du mode de fonctionnement du système considéré.

Plusieurs travaux (voir par exemple les références [3-8]) ont été initiés pour établir des ponts entre les approches de diagnostic à base de modèles et celles guidées par les données, montrer et utiliser leurs complémentarités, afin d'améliorer les performances du diagnostic (en termes de fausse alarme, de non détection, de délais de détection, d'identification du défaut) mais aussi de faciliter leur déploiement et utilisation dans des applications industrielles. Ce sujet de thèse se situe dans la continuité de ces travaux.

Lorsque l'on dispose d'un modèle précis d'un système, celui-ci peut être simulé pour générer des données, en particulier du système en défaut. Cette simulation qui peut être réalisée à partir d'une description très fine et précise du système en fonctionnement nominal, ou présentant des dégradations ou des défauts (en utilisant par exemple des modèles dynamiques à éléments finis, des modèles fortement non linéaires, tenant compte de phénomènes physiques très fins), peut être enrichie, mise à jour, par des données réelles prélevées sur le système, fournissant ainsi un véritable jumeau numérique du système. Ces modèles numériques permettent de générer de grosses masses de données pour couvrir un très grand nombre de situations du système en fonctionnement normal ou défaillant, dans des conditions opérationnelles diverses. Les données de simulation ainsi obtenues et les données prélevées sur le système réel en fonctionnement, mais aussi certaines caractéristiques du modèle simulé, peuvent être utilisées conjointement pour réaliser un diagnostic performant.

Cette thèse visera à étudier les complémentarités des méthodes de diagnostic à base de modèles et des méthodes guidées par les données. Les objectifs sont d'améliorer les performances du diagnostic et de faciliter l'utilisation/implémentation des méthodes sur des systèmes réels.

En termes d'application, la thèse se focalisera sur des manipulateurs robotiques souples éco-conçus. Un robot souple est composé d'une structure flexible complexe déformée à l'aide d'actionneurs pour générer du mouvement [9]. Ces actionneurs peuvent être commandés dynamiquement pour réaliser des tâches de manipulation rapides, notamment dans le cadre d'applications industrielles [10]. Non seulement leur flexibilité naturelle les rend intrinsèquement plus sûrs pour des opérateurs humains à proximité, mais permet en plus d'envisager l'utilisation de matériaux bio-sourcés naturellement flexibles pour leur éco-conception. De fait, ils peuvent devenir des candidats prometteurs de robots industriels à très faible impact environnemental. Cependant, les matériaux bio-sourcés issus du monde végétal par exemple sont particulièrement sensibles aux facteurs environnementaux extérieurs (changements de température, UV) et aux contraintes mécaniques qui entraînent des modifications de leurs caractéristiques physiques. Ainsi les performances du manipulateur vont se dégrader au cours du temps en raison de ces facteurs externes et de la répétition de mouvements dynamiques, entraînant à terme la défaillance du robot. Il est donc essentiel de détecter le plus précocement possible les dégradations ou défauts du robot.

La thèse débutera par un travail bibliographique pour maîtriser les différentes méthodes de diagnostic. Ces méthodes seront implantées et testées, dans un premier temps sur des applications dont les modèles, simulations et données sont disponibles et servent de bancs d'essais pour la communauté scientifique tel le réacteur continu à cuve agitée (ou CSTR : continuous stirred-tank reactor) [11] ou un modèle physique d'éolienne (Wind turbine physical model) [12]. Dans un deuxième temps, les travaux se focaliseront sur le diagnostic des manipulateurs souples. Deux applications seront considérées : un robot mobile équipé d'un bras souple, système pour lequel un jumeau numérique est développé dans le cadre de l'action incitative transversale SOMOROB du CRISTAL et/ou un manipulateur souple constitué de matériaux bio-sourcés pour des tâches de saisie-dépose et son jumeau numérique développé à INRIA via la plateforme SOFA.

Online fault diagnosis of complex dynamical systems: complementarity of model-based and data-driven methods. Application on eco-designed soft manipulators.

Research on on-line fault diagnosis (detection, localisation, and identification of faults) of dynamic systems has been intensive for over 40 years. Many methods have been proposed and the scientific literature is abundant. Two main classes of approaches are classically distinguished: model-based approaches and data-driven approaches.

Model-based diagnostic methods [1] (such as the parity space method, observer or filter-based methods, parametric identification methods) rely on the generation of fault indicators, called residuals, which are functions of known inputs and measured outputs. These residuals, calculated on-line, are analysed and provide an indication of the health state of the system under consideration. Decision methods are then implemented to provide a diagnosis. These methods have proven their efficiency and performance on numerous application examples but remain relatively theoretical. Few real applications have actually been carried out due to two major obstacles: the difficulty of obtaining an accurate model for many applications (which requires significant expertise on the system/domain under consideration), the complexity of using/manipulating the models when they are non-linear, of high dimension or comprise several slow and fast dynamics, the difficulty of analysing the residuals and making a reliable decision in the presence of disturbance and model uncertainties.

With the development of artificial intelligence, and in particular of machine learning techniques, classification and statistical data processing methods, data-driven diagnostic methods have been developed for several years [2]. These methods have shown their efficiency in many applications, however, they are confronted with several difficulties that limit their use in an industrial context: difficulty to have a large amount of data of the faulty system, difficulty to cover all the fault cases in all the operating conditions or all the operating modes; difficulty to prove and guarantee the performance of the diagnostic system in all circumstances for certification purposes; difficulty to take into account the dynamics of the system and of the data; difficulty to identify the root cause of the fault, i.e. the faulty component, responsible for the modification of the data.

In addition to the difficulties mentioned above for each kind of approaches, several obstacles remain which further limit their application to complex dynamic systems. These include the diagnosis of multiple faults, of intermittent faults or incipient faults with a slow time-evolution ; the robustness/efficiency of the diagnosis in an uncertain environment by minimising the false alarm and non-detection rates; and the consideration of complex and variable dynamics depending on the operating mode of the system under consideration.

Several works (see for example references [3-8]) have been initiated to bridge the gap between model-based and data-driven diagnostic approaches, to show and use their complementarities, with the objective to improve the diagnostic performances (in terms of false alarm, non-detection, detection delays, fault identification) but also to facilitate their deployment and use in industrial applications. This proposed thesis aims at contributing in this active research field.

When an accurate model of a system is available, it can be simulated to generate data, in particular of the faulty system. This simulation, which can be carried out from a very fine and precise description of the system in nominal behaviour or in presence of degradations or faults (using, for example, dynamic finite element models, highly non-linear models, taking into account very fine physical phenomena), can be enriched and updated by real data taken from the system, thus providing a true digital twin of the system. These numerical models make it possible to generate large masses of data to cover a very large number of situations of the system in normal or faulty operation, under various operational conditions. The simulation data thus obtained and the data taken from the real system in operation, but also the model equations of the systems, can be used jointly to carry out an efficient on-line diagnosis.

This thesis will investigate the complementarities of model-based and data-driven diagnostic methods. The objectives are to improve the performance of diagnosis and to facilitate the use/implementation of the methods on real systems.

In terms of systems, the thesis will focus on eco-designed soft manipulators. A soft manipulator consists in a complex compliant structure that is deformed using actuators to produce motion [9]. These actuators can be dynamically controlled to perform fast manipulation tasks, especially in industrial applications [10]. Their intrinsic compliance make them safer for human operators working nearby, and allow for considering naturally flexible bio-sourced (plant-based) for their design. As a consequence, they are promising candidates for industrial robots with low environmental impact. However, their use is hindered by the uncertainty on their lifespan, and in particular on how the flexible materials degrade over time. Some expected degradation causes are environmental factors (Temperature, UV rays) and repetitive and dynamic motion cycles. This degradation is expected to be even higher in the case of bio-sources materials, which are particularly sensitive to these factors. As a consequence, the performance of the robot will degrade with time which may result in its total failure. It is thus of prime importance to detect as soon as possible the degradation or any incipient fault of the robot.

The thesis will start with a bibliographic work to master the different theoretical methods of diagnosis. These methods will be implemented and tested in a first step on applications, for which models, simulations and data are available and serve as test beds for the scientific community such as the continuous stirred-tank reactor (CSTR) [11] and/or a wind turbine physical model [12]. In a second step the work will focus on fault diagnosis of soft manipulators. Two applications will be considered: a mobile robot equipped with a soft arm, system for which a digital twin is developed as part of the SOMOROB project of CRISTAL, and/or a soft bio-sourced manipulator for pick and place applications and its digital twin developed at INRIA using the SOFA framework.

Références bibliographiques / bibliographic references

- [1] Wang, Z., & Shen, Y. (2022). *Model-Based Fault Diagnosis: Methods for State-Space Systems* (Vol. 221). Springer Nature.
- [2] Ji, C.; Sun, W. A Review on Data-Driven Process Monitoring Methods: Characterization and Mining of Industrial Data. *Processes* 2022, 10, 335. <https://doi.org/10.3390/pr10020335>
- [3] Jung, D., Sundström, C., (2017), A Combined Data-Driven and Model-Based Residual Selection Algorithm for Fault Detection and Isolation, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, PP(99), 1-15. <https://doi.org/10.1109/TCST.2017.2773514>
- [4] P. Freeman, R. Pandita, N. Srivastava and G. J. Balas, "Model-Based and Data-Driven Fault Detection Performance for a Small UAV," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1300-1309, Aug. 2013, doi: 10.1109/TMECH.2013.2258678.
- [5] Yufeng Huang, Gang Sun, Jun Tao, Yan Hu and Liuyin Yuan, A modified fusion model-based/data-driven model for sensor fault diagnosis and performance degradation estimation of aero-engine, *Measurement Science and Technology*, Volume 33, Number 8, 2022. DOI 10.1088/1361-6501/ac6081
- [6] Yuan-wu Xu, Xiao-long Wu, Xiao-bo Zhong, Dong-qi Zhao, Marco Sorrentino, Jianhua Jiang, Chang Jiang, Xiaowei Fu, Xi Li, Mechanism model-based and data-driven approach for the diagnosis of solid oxide fuel cell stack leakage, *Applied Energy*, Volume 286, 2021, 116508, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116508>.
- [7] H. Jin, Z. Zuo, Y. Wang, L. Cui and L. Li, "An Integrated Model-Based and Data-Driven Gap Metric Method for Fault Detection and Isolation," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 52, no. 12, pp. 12687-12697, Dec. 2022, doi: 10.1109/TCYB.2021.3086193.

- [8] Khaoula Tidriri, Nizar Chatti, Sylvain Verron, Teodor Tiplica, Bridging data-driven and model-based approaches for process fault diagnosis and health monitoring: A review of researches and future challenges, *Annual Reviews in Control*, Volume 42, 2016, Pages 63-81, ISSN 1367-5788, <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.008>.
- [9] Duriez, C. « Control of elastic soft robots based on real-time finite element method ». In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3982-87, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631138>.
- [10] Zughaibi, Jasan, Matthias Hofer, et Raffaello D'Andrea. « A Fast and Reliable Pick-and-Place Application with a Spherical Soft Robotic Arm ». In 2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 599-606, 2021. <https://doi.org/10.1109/RoboSoft51838.2021.9479227>.
- [11] Karl Ezra Pilario. Feedback-controlled CSTR process for fault simulation. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/66189-feedback-controlled-cstr-process-for-fault-simulation>, 2021.
- [12] P. F. Odgaard, J. Stoustrup, and M. Kinnaert, "Fault-Tolerant Control of Wind Turbines: A Benchmark Model," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 1168–1182, 2013.