



**HAL**  
open science

## Contrôle en ligne garantissant la sûreté de fonctionnement de structures en mode dégradé

Daniel Martin Xavier, Ludovic Chamoin, Laurent Fribourg

### ► To cite this version:

Daniel Martin Xavier, Ludovic Chamoin, Laurent Fribourg. Contrôle en ligne garantissant la sûreté de fonctionnement de structures en mode dégradé. 1er Congrès Annuel de la Société Française d'Automatique, de Génie Industriel et de Productique, SAGIP, Jun 2023, Marseille, France. hal-04406026

**HAL Id: hal-04406026**

**<https://hal.science/hal-04406026>**

Submitted on 19 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Contrôle en ligne garantissant la sûreté de fonctionnement de structures en mode dégradé

Daniel Martin Xavier<sup>1</sup>, Ludovic Chamoin<sup>1</sup>, Laurent Fribourg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France

[daniel.martin\\_xavier@ens-paris-saclay.fr](mailto:daniel.martin_xavier@ens-paris-saclay.fr)

[ludovic.chamoin@ens-paris-saclay.fr](mailto:ludovic.chamoin@ens-paris-saclay.fr)

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, Laboratoire Méthodes Formelles, 91190, Gif-sur-Yvette, France

[laurent.fribourg@ens-paris-saclay.fr](mailto:laurent.fribourg@ens-paris-saclay.fr)

**Mots-clés :** *Model Predictive Control, Dynamic Data Driven Application Systems, Structural Health Monitoring.*

### 1 Présentation générale du projet ERC DREAM-ON

Le projet DREAM-ON a pour objectif de développer un cadre dans lequel la simulation et les mesures échangent des informations en temps réel au sein d'une application dynamique pilotée par les données. Les mesures échangent des informations en temps réel dans le cadre du concept DDDAS (Dynamic Data Driven Application Systems) [2]. L'idée principale de ce paradigme est de mettre en place une boucle de rétroaction entre le système réel et son simulateur numérique (jumeau) afin d'accroître la fiabilité des modèles de simulation et d'améliorer la robustesse des systèmes [8].

Le projet exploite le concept DDDAS : Il s'agit de prédire l'évolution des dommages à l'aide de modèles de calcul, qui sont ensuite utilisés par le contrôleur pour réduire l'impact des dommages structurels. Parallèlement, des mesures *in situ* sont assimilées à la volée pour évaluer dynamiquement l'état du système et mettre à jour le modèle de calcul. Ces informations sont ensuite utilisées pour surveiller les structures composites en suivant et en caractérisant leurs défauts, en prédisant leur durabilité et en anticipant les mesures à prendre pour éviter les défaillances. En tenant compte simultanément des informations théoriques et expérimentales, le paradigme DDDAS accroît la fiabilité des modèles de simulation et améliore la robustesse du système [4, 8]. Le projet, schématisé Figure 1 est divisé essentiellement en 3 parties.

La 1ère partie du projet consiste à concevoir une stratégie de traitement d'une vaste collection de données bruitées relatives à la santé structurelle. Pour résoudre ce problème, des capteurs optiques basés sur la rétrodiffusion élastique de Rayleigh sont utilisés pour récupérer des informations sur les déformations locales dans le matériau [5]. Cette technologie permet une détection distribuée et précise de la déformation, qui est ensuite convertie en une carte des dommages sur l'ensemble de la structure.

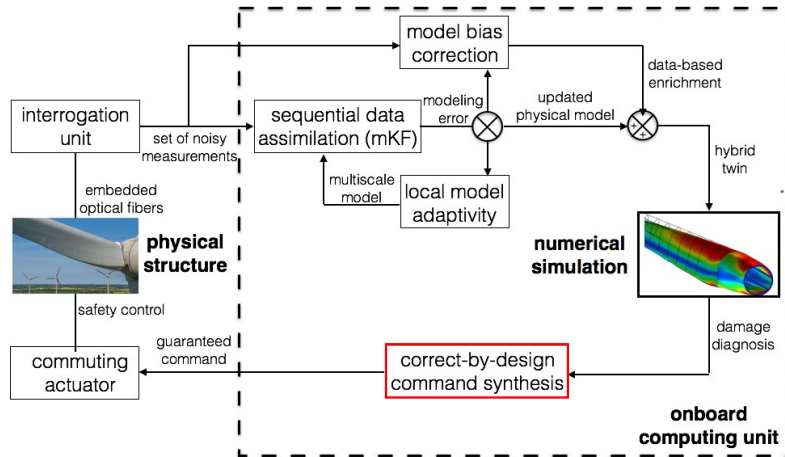


FIG. 1 – Schéma de la stratégie numérique DDDAS proposée dans le projet DREAM-ON.

Dans une 2<sup>ème</sup> partie, en parallèle des techniques de détection, des outils de modélisation et de simulation des dommages constituent une autre partie du projet. Dans le cas des matériaux composites, les modèles dépendent de plusieurs variables telles que la composition, l’architecture, la géométrie et l’historique du chargement. L’objectif est donc de développer un modèle d’endommagement à plusieurs échelles en recherchant un compromis entre la précision et la complexité en fonction des informations expérimentales.

Enfin une 3<sup>ème</sup> partie, représentée par le cadre rouge étiqueté “correct-by-design command synthesis” sur la Figure 1 et détaillée Section 2, consiste à mettre en œuvre une stratégie de contrôle qui reste robuste et stable lorsqu’elle est appliquée à un système dynamique évolutif et non linéaire.

## 2 Modèle de contrôle en mode dégradé

Le contrôleur doit utiliser la prédiction de l’évolution des dommages obtenue à partir des modèles pour calculer une loi de contrôle garantie. L’objectif est d’empêcher la structure de fonctionner en dehors d’une zone de sécurité, en assurant son intégrité structurelle.

Ceci est garanti par l’incorporation dynamique de contraintes, qui confinent la solution optimale à une région de sécurité. On formalise le problème de contrôle sous la forme d’un “Model Predictive Control” (MPC) qui est une technique d’optimisation dynamique sur un horizon de temps glissant [1]. Récemment des techniques mélangeant MPC et réseaux de neurones ont vu le jour [3]. Il s’agit d’“entraîner” les réseaux de neurones sur des données issues d’un fonctionnement en mode MPC et d’utiliser le réseau de neurones pour contrôler le système lui-même en ligne. Une difficulté inhérente au projet provient de ce que, au cours de la dégradation du système, la zone de sûreté correspondante se restreint progressivement impliquant la nécessité de prendre en compte des contraintes dynamiques. Notre objectif est de garantir que la loi de commande synthétisée par le réseau de neurones satisfasse bien les impératifs de sûreté correspondant au niveau de dégradation de l’état courant. La garantie de de sûreté est obtenue en utilisant des méthodes formelles de preuve à base de simulation par la méthode d’Euler [6].

## 3 Preuve de concept : Chargement structurel piloté par une plateforme hexapode

L’application repose sur une preuve de concept représentative pour valider la méthodologie DDDAS. Il s’agit de contrôler en temps réel les dommages subis par des pièces composites carbone-époxy enrobées de fibres optiques traditionnelles. L’hexapode H-850 [7] est utilisé

pour soumettre la pièce à une trajectoire de chargement multiaxiale contrôlée. L'objectif est d'atteindre une position souhaitée tout en préservant l'intégrité de la structure dans différentes conditions d'endommagement initiales.

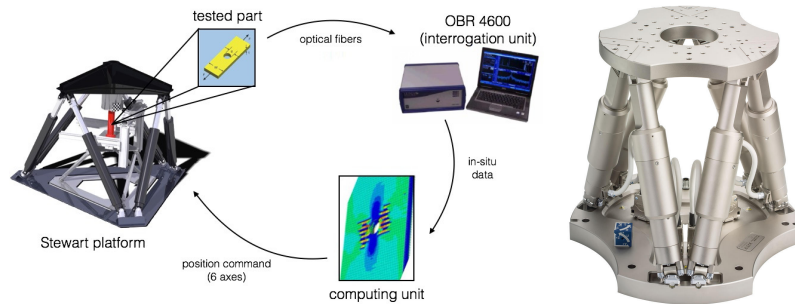


FIG. 2 – Schéma de la preuve de concept utilisée pour valider la méthodologie DDDAS.

Au cours des expériences, les données sur les dommages sont acquises à 5 Hz par un réflectomètre optique à rétrodiffusion (OBR-4600) basé sur des mesures de rétrodiffusion relative de Rayleigh et associé à des capteurs à fibre optique. Ce dispositif permet une détection à haute résolution et une interrogation des données en temps réel, ce qui convient aux applications de test et surveillance (“structural health monitoring”) dans les structures à grande échelle.

## 4 Conclusions et perspectives

Nous avons décrit la partie du projet DREAM-ON concernant la synthèse d'un contrôle garanti en mode de fonctionnement dégradé. La méthode consiste à entraîner un réseau de neurones sur les données générées par un modèle prédictif de contrôle, puis à faire fonctionner ce réseau de neurones en ligne sur le système. La garantie de sûreté est obtenue en utilisant des méthodes formelles basées sur l'approximation d'Euler. La difficulté principale vient de la présence de contraintes dynamiques engendrées par l'évolution des défauts matériels de la structure. La preuve de concept sera réalisée sur une plateforme hexapode.

## Remerciement

Ce projet a reçu un financement de l'European Research Council (ERC) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020, au titre de la convention No. 101002857.

## Références

- [1] Francesco Borrelli, Alberto Bemporad, and Manfred Morari. *Predictive Control for Linear and Hybrid Systems*. Cambridge University Press, 2017.
- [2] Ludovic Chamoin. Merging advanced sensing techniques and simulation tools for future structural health monitoring technologies. *The Project Repository Journal*, 10 :124–127, 09 2021.
- [3] Steven W. Chen, Tianyu Wang, Nikolay Atanasov, Vijay Kumar, and Manfred Morari. Large scale model predictive control with neural networks and primal active sets. *Autom.*, 135 :109947, 2022.
- [4] Frederica Darema. Dynamic data driven applications systems : A new paradigm for application simulations and measurements. In Marian Bubak, Geert Dick van Albada, Peter M. A. Slood, and Jack Dongarra, editors, *Computational Science - ICCS 2004*, pages 662–669, Berlin, Heidelberg, 2004. Springer Berlin Heidelberg.

- [5] Mark Froggatt and Jason Moore. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with rayleigh scatter. *Appl. Opt.*, 37(10) :1735–1740, Apr 1998.
- [6] Jawher Jerray, Adnane Saoud, and Laurent Fribourg. Using Euler’s method to prove the convergence of neural networks. *IEEE Control. Syst. Lett.*, 6 :3224–3228, 2022.
- [7] PI. *6-Axis Hexapod*. PI.
- [8] National Science Foundation (U.S.). *Simulation-based Engineering Science : Revolutionizing Engineering Science Through Simulation*. National Science Foundation, 2006.