

Proposition de sujet Programme AI@IMT

Vague 2020 <input type="checkbox"/>	Vague 2021 <input checked="" type="checkbox"/>	Vague 2022 <input type="checkbox"/>
-------------------------------------	--	-------------------------------------

Description du partenariat :

Titre de la thèse :	Commande robuste de systèmes non-linéaires basée sur un modèle LPV hybride physique-neuronal
Directeur de thèse :	Philippe Chevrel (25%)
Equipe d'encadrement :	co-encadrant : Maxime Thieffry (50%) maxime.thieffry@imt-atlantique.fr co-encadrant : Mohamed Yagoubi (25%) mohamed.yagoubi@imt-atlantique.fr
Laboratoire et Ecole de l'IMT impliqués	laboratoire : LS2N, UMR CNRS 6004 Université de Nantes – FST Bâtiment 34 2 Chemin de la Houssinière BP 92208, 44322 Nantes Cedex 3 école : IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire Campus de Nantes 4, rue Alfred Kastler - La Chantrerie CS 20722 44307 Nantes cedex 3
Partenaire cofinanceur académique (le cas échéant)	IMT Atlantique-DAPI (1/2 bourse)
Partenaire cofinanceur industriel	Le partenaire industriel ayant originellement soutenu de manière officielle l'appel à programme et ce sujet articulé IA & Automatique n'est plus en mesure de cofinancer à horizon des 2 ans à venir
Partenaire cofinanceur autre (le cas échéant) : région etc.	non
Montant de cofinancement, hors ANR	½ bourse
Ecole Doctorale	Ecole Doctorale MathSTIC n° 601, domaine AST Domaine de spécialité https://ed-mathstic.doctorat-bretagne Loire.fr/
Etablissement d'inscription	IMT Atlantique

Description de la thèse :

Description du sujet :

Les modèles linéaires à paramètres variants (en anglais LPV, voir par exemple [1]), sont une classe de systèmes capables de représenter une grande variété de processus physiques: des applications automobiles [2] à la modélisation d'aéronefs [3] ou de systèmes de piles à combustible [4]. La popularité des modèles LPV vient de leur bon compromis entre précision et complexité ainsi que du succès de l'extension de résultats pour les systèmes linéaires à temps invariants (LTI) grâce à des caractérisations d'inégalité matricielle linéaire (LMI) garantissant stabilité, performances optimales et robustesse sur l'ensemble du régime de fonctionnement. Les modèles LPV sont de la forme :

$$\dot{x}(t) = A(\rho(t))x(t)$$

Les matrices associées $A(\rho(t))$ sont obtenues par différentes approches. La dynamique du système peut être établie à partir de la compréhension interne du système. Cependant, ce type d'approche de modélisation basée sur la physique nécessite une connaissance a priori du système étudié et une expertise dans le domaine pour déduire les équations sous-jacentes. Le nombre minimum de paramètres et la nature de la dépendance paramétrique sont des aspects cruciaux à ce stade.

Parallèlement aux travaux en automatique ces dernières années, les algorithmes d'apprentissage et d'exploration de données ont connu un développement important. La croissance continue des données et des ressources informatiques amène toutes les communautés scientifiques à s'intéresser aux résultats obtenus à partir de ces méthodes basées sur les données. Le domaine de l'automatique ne fait pas exception [5]-[8]. Cependant, les approches axées sur les données pures souffrent d'un manque de robustesse, du besoin d'une énorme quantité de données et d'un accès à une puissance de calcul importante résultant de cluster d'unités arithmétiques pour obtenir un modèle correspondant. De plus, ces modèles complexes perdent leur interprétabilité physique en raison du nombre élevé de paramètres d'adaptation, alors que les modèles physiques ont généralement des paramètres moins nombreux et plus faciles à interpréter.

Cette thèse aura pour but de combiner le meilleur des approches basées sur la physique et les méthodes d'apprentissage basées sur des réseaux de neurones pour modéliser des systèmes non linéaires et concevoir des lois de contrôle robustes. L'idée de base de cette proposition est d'utiliser la propriété d'approximation universelle des réseaux de neurones, qui stipule que toute fonction continue et bornée peut être approchée uniformément sur un domaine borné de ses entrées par un réseau neuronal de taille finie, voir par ex. [9], [10] ou [11]. L'idée est d'améliorer la précision, la reproductibilité et la lisibilité des modèles de réseaux de neurones avec des informations basées sur la physique (c'est-à-dire la structure, l'ordre, la linéarité, l'interconnexion ...) afin de concevoir des modèles hybrides physiques-neuronaux, une analyse et un contrôle efficaces de grandes classes de systèmes non linéaires [12], [13].

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie pour concevoir une architecture de réseaux de neurones (voir [14] et [15]) avec des objectifs orientés vers le contrôle, afin de construire un modèle LPV de faible complexité, mais précis, sur la base duquel la conception d'une loi de contrôle robuste est possible [16].

Plusieurs questions théoriques seront étudiées au cours de ce projet :

- Comment concevoir une manière systématique d'obtenir un compromis souhaité entre la précision du modèle LPV et le nombre de non-linéarités ?
- Quel est l'impact du choix de la fonction d'activation ?

- Quelle devrait être la taille / profondeur du réseau de neurones ?
- Comment concevoir des contrôleurs (et observateurs) robustes à partir de ces modèles obtenus ?

Toutes ou partie de ces questions seront étudiées dans le cadre de cette thèse. Ces travaux seront donc principalement théoriques et méthodologiques mais feront également l'objet de validations *via* des simulations fines.

Quoique la démarche générique vise un large cadre applicatif et puisse *in fine* venir en appui de nos coopérations industrielles (Renault, Framatome, CEA), elle sera ici évaluée de manière ciblée pour l'étude des robots déformables. La robotique bio-inspirée, i.e. inspirés des organismes vivants est en plein essor. Afin de modéliser les phénomènes fortement non-linéaires lors de la déformation et le mouvement de ces robots, il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes de modélisation de systèmes dynamiques non linéaires. Il s'agit d'un exemple concret d'applications des méthodes hybrides physique-neuronales mentionnées plus haut. La prise en compte de ce modèle dans la loi de contrôle est aujourd'hui un problème ouvert qui s'inscrit parfaitement dans le cadre de ce projet. L'usage de simulateurs¹ en libre accès pour la collecte des données et l'entraînement des algorithmes proposés est envisagé et une collaboration avec le laboratoire CRISAL² permettra l'accès aux plateformes expérimentales, déjà utilisées pour des travaux récents (voir [17]).

Positionnement dans le programme AI@IMT, dans la stratégie IA au niveau national :

Ce projet de thèse s'inscrit dans les thématiques de « l'industrie de future » et « environnement et énergie », mais il bénéficiera à terme à toute la communauté impliquée dans la recherche en Intelligence Artificielle. Il s'agit en effet de proposer des solutions concrètes pour sortir d'un modèle de type « boîte noire » lors de l'utilisation de réseaux de neurones pour passer à une représentation hybride physique-neuronale. Les résultats issus de cette thèse élargiront les fondements théoriques aussi bien en intelligence artificielle qu'en automatique (voir certains travaux de l'équipe d'encadrement [17]-[22]).

Les résultats de ce projet étendront la classe de systèmes pour lesquels il existe des résultats théoriques afin de concevoir un modèle et des lois de contrôle robustes. Ces algorithmes de commande seront validés sur diverses plateformes expérimentales. Ces travaux de thèse auront donc des retombées concrètes dans différents domaines industriels, et soutiendront des collaborations naissantes dans le domaine de l'énergie ou de la robotique.

En général, l'utilisation de systèmes mécatroniques (e.g. robotiques) au sein d'un environnement où l'homme est très présent (e.g. le domaine médical pour les robots souples) pose la question de la sécurité et de sa gestion. Ceci conduit le concepteur d'un modèle ou d'une loi de commande à intégrer dans leurs études des exigences de sûreté de fonctionnement. Nous traitons ce point de manière indirecte via la plage de validité des modèles envisagés et la garantie de performances robustes visée par les lois de commande basées sur ces mêmes modèles.

Importance du partenariat :

¹ <https://project.inria.fr/softrobot/>

² Equipe Defrost, CRISAL UMR CNRS 9189, <https://www.cristal.univ-lille.fr/equipes/defrost/>

L'IMT Atlantique, tout comme le programme ANR AI@IMT ne financent que des ½ bourses. Le département DAPI³ de l'IMT Atlantique amène des compétences reconnues, en Automatique notamment. L'équipe Commande (<https://www.ls2n.fr/equipe/commande/>) qui le compose partie a choisi dans son projet à 5 ans (cf. HCRERES) d'orienter une part de sa recherche à l'articulation entre Automatique et IA, faisant état d'objectifs ambitieux. Des projets de collaboration industriels débutent d'ores et déjà sur ce champ. Dans le même temps, IMT Atlantique et le DAPI ont recruté Maxime Thieffry en 2020. L'enjeu est donc multiple : 1. Soutenir la recherche exploratoire du DAPI au bénéfice, *in fine*, de projets industriels financés, 2. Donner à Maxime Thieffry, nouveau maître assistant du DAPI, de mettre en œuvre son projet de recherche.

Retombées et Auto-évaluation :

Les résultats de ces travaux de thèse seront diffusés en open science, ce qui servira également à évaluer l'avancement du projet à travers la publication d'articles et de communications lors de conférences.

Les principaux objectifs à atteindre dans cette thèse sont les suivants :

T0 + 3mois : étude bibliographique pour le problème scientifique considéré

T0 + 12 mois : analyse des fondements théoriques des réseaux de neurones, leur architecture et leur lien avec la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques.

T0 + 18 mois : premier jalon : mise en œuvre d'un dispositif expérimental permettant la validation de la modélisation sur un système physique réel.

T0 + 24 mois : conception de loi de contrôle robuste basée sur ces modèles LPV physiques-neuronaux

T0 + 30 mois : second jalon : validation expérimentale de l'algorithme de contrôle en boucle fermée sur un système physique réel (démonstrateur).

T0 + 36 mois : rédaction et soutenance de thèse

Profil de candidat souhaité :

Le candidat devra avoir une formation de niveau bac +5 en automatique et/ou mathématiques appliquées (e.g. théorie de l'apprentissage) et un bon niveau d'anglais. Une solide formation théorique et un intérêt pour l'ingénierie des systèmes seront demandés. Le candidat devra également posséder des connaissances en programmation, en particulier maîtriser des logiciels de calcul scientifique de type Matlab/Simulink. La maîtrise du français est un plus mais pas obligatoire.

Voir la fiche de poste jointe au dossier.

Bibliographie :

- [1] J. Mohammadpour, C. W. Scherer. *Control of linear parameter varying systems with applications*. New York, USA: Springer, 2012.
- [2] O. Sename, P. Gaspar, J. Bokor. *Robust control of linear parameter varying approaches: applications to vehicle dynamics*. Springer, 2013.
- [3] C. Poussot-Vassal, C. Roos. *Flexible aircraft reduced-order LPV model generation from a set of large-scale LTI models*. *IEEE American Control Conference*, 2011.
- [4] S. De Lira, V. Puig, J. Quevedo, A. Husar. LPV observer design for PEM fuel cell system: Application to fault detection. *Journal of power sources*, 2011, pp. 4298-4305.

³ <https://www.imt-atlantique.fr/fr/l-ecole/departements-d-enseignement-recherche/automatique-productique-et-informatique>

- [5] Suykens, Johan AK, Vandewalle, J. P. and de Moor B., *Artificial Neural Networks for Modelling and Control of Non-Linear Systems*. Springer-Verlag US, 1996.
- [6] Suykens, Johan AK and Vandewalle, Joos PL and de Moor, Bart L. *Artificial neural networks for modelling and control of non-linear systems*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] Cembrano, G. and Torras, C., *Nonlinear System Identification Using Additive Dynamic Neural Networks—Two On-Line Approaches*, IEEE Transactions on circuits and systems, Vol. 47, No. 2, Feb. 2000.
- [8] Molga, E. J., *Neural network approach to support modelling of chemical reactors: problems, resolutions, criteria of application*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 42, No. 8–9, pp. 675-695, 2003.
- [9] Park, J. and Sandberg, I. W. , *Universal approximation using radial-basis-function networks*, *Neural Computation*, vol. 3, no. 2, pp. 246–257, 1991.
- [10] Werbos, P.L., *An overview of neural networks for control*, *IEEE American Control Conference*. San Diego, 1990.
- [11] Hornik, K., Stinchcombe, M. and White, H. , *Multilayer feedforward networks are universal approximators*, *Neural Networks*, Vol. , No. 5, pp. 359-366, 1989.
[https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8).
- [12] Raissi, M., Perdikaris, P. and Karniadakis G.E., *Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations*. *Journal of Computational Physics*, Vol. 378, pp. 686-707, 2019.
- [13] Manuel, A. Roehrl, A. Runkler, T. Brandtstetter, V., Tokic, M. Obermayer, S., *Modeling System Dynamics with Physics-Informed Neural Networks Based on Lagrangian Mechanics ?*, IFAC World Congress, Berlin, 2020.
- [14] Gupta, M. Jin, L. and Homma, N. , *Static and Dynamic Neural Networks*. John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [15] Kim, K.-K. K. Patron, E. R. and Braatz, R. D., *Standard representation and unified stability analysis for dynamic artificial neural network models*, *Neural Networks*, vol. 98, pp. 251 – 262, 2018.
- [16] Bendtsen, J. D. and Trangbaek, K., *Robust quasi-LPV control based on neural state-space models*, in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 13, no. 2, pp. 355-368, March 2002, doi: 10.1109/72.991421.

Travaux de l'équipe d'encadrement :

- [17] Thieffry, M. , Kruszewski, A. Guerra, T.M. Duriez, C., *LPV Framework for nonlinear dynamic control of soft robots*, *IFAC World congress 2020*. Berlin, 2020.
- [18] Loiseau, P. Boultifat, C.N.E. Chevrel, P. Claveau, F. Espié, S. Mars, F. , *Rider model identification: neural networks and quasi-LPV models*, *IET Intelligent Transport Systems*, 2020.
- [19] Blaud, P.C. , Haurant, P. Claveau, F. Lacarrière, B. Chevrel, P. Mouraud, A., *Modelling and control of multi-energy systems through multi-prosumer node and economic model predictive control*, *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 2020.

- [20] Yagoubi, M. Chaibi, R. and Lunel, M., *Descriptor Recurrent Neural Network Model and \mathcal{L}_2 - Gain Control Design for Systems with Dry Friction*, 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, pp. 19-24, 2020.
- [21] Nguyen, A., Chevrel, P., Claveau, P.. Gain-scheduled static output feedback control for saturated LPV systems with bounded parameter variations. *Automatica*, Elsevier, 2018, 89, pp.420-424.
- [22] Blaud, P., Chevrel, P., Claveau, F., Haurant, P., Mouraud A., From multi-physics models to neural network for predictive control synthesis; en cours d'examen