

CT CADO: Contrôle et Analyse basés DONnées

Pauline Kergus*, Matteo Tacchi-Bénard†, Mayank S. Jha‡

Février 2026

À l'origine : une action du GdR MACS

Présentation générale

Comme indiqué dans la prospective 2024–2028 du GDR MACS [1], les méthodes orientées données prennent de l'ampleur au sein de la communauté MACS, notamment grâce à des avancées récentes utilisant l'IA (renforcement learning [2, 3]) ou sur la représentation d'un système par des trajectoires “informatives” (lemme de Willems [4] et les méthodes en découlant [5-7]). En automatique, les approches orientées données sont particulièrement intéressantes lorsque les modèles considérés sont trop complexes pour les méthodes basées-modèles (grande dimension, non-linéarité, etc...), ou lorsque la construction d'un modèle adapté à la commande s'avère trop complexe par rapport à une utilisation uniquement pour la synthèse de loi de commande. Le développement des méthodes basées-données pourrait ainsi permettre d'élargir le champs applicatif de la communauté MACS. Des méthodes d'analyse orientée données ont également été développées pour analyser les boucles fermées obtenues [8, 9].

Au cours des quinze dernières années, les approches d'apprentissage par renforcement et de programmation dynamique adaptative (ADP) basées sur des réseaux de neurones ont connu un essor remarquable au sein de la communauté de l'automatique, en offrent aujourd'hui un cadre méthodologique mature pour la synthèse de lois de commande optimales et adaptatives à partir des données, en complément des paradigmes classiques de commande et d'estimation [10].

Cette thématique connaît un intérêt croissant au niveau de la communauté nationale et internationale (voir Figure 1). Il nous semble ainsi important que les membres de la communauté française développant de telles approches orientées données puissent se rencontrer afin de mieux s'organiser au niveau national. C'est ainsi que les 30 septembre et 1er octobre derniers, nous avons réuni un groupe de chercheur·se·s en automatique autour du grand thème de notre action MACS, à savoir la commande orientée données. Ce colloque a été l'occasion pour les chercheur·se·s qui le souhaitent de présenter leurs travaux à un large auditoire (40 personnes en présentiel et 15 personnes connectées en webinaire), et s'est conclu par une table ronde où il a notamment été question de la **création d'un CT au sein de la SAGIP**, avec pour objectif de fédérer la communauté française de recherche en commande orientée données, et de la réunir régulièrement, en particulier dans le cadre de sessions invitées au Congrès de la SAGIP.

*CR CNRS, LAPLACE, INP Toulouse et Université Paul Sabatier. <https://pkergus.github.io>

†CR CNRS, GIPSA-lab, Grenoble INP et Université Grenoble Alpes. <https://matteotacchi.wordpress.com>

‡Maître de Conférences, CRAN, Polytech Nancy. <http://w3.cran.univ-lorraine.fr/mayank-shekhhar.jha>

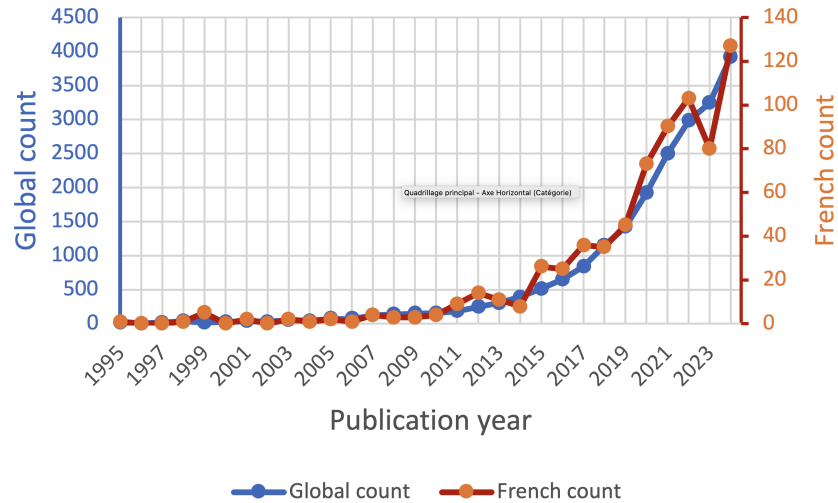


FIGURE 1 – Publications liées au mot-clef “data-driven control” (Web of Science)

Références

1. PEAUCELLE, D. *et al. Groupement de Recherche MACS – Bilan 2019–2023 et projet 2024–2028* rapp. tech. (CNRS, 2023).
2. RECHT, B. A tour of reinforcement learning : the view from continuous control. *Annual review of control, robotics and autonomous systems* **2**, 253-279 (2019).
3. BERTSEKAS, D. *Reinforcement learning and optimal control* (Athena Scientific, 2019).
4. WILLEMS, J. C., RAPISARDA, P., MARKOVSKY, I. & DE MOOR, B. L. M. A note on persistency of excitation. *Systems & Control Letters* **54**, 325-329 (2005).
5. COULSON, J., LYGEROS, J. & DÖRFLER, F. *Data-enabled Predictive Control : in the shallows of the DeePC* in *European Control Conference* (2019), 307-312.
6. DE PERSIS, C. & TESI, P. Formulas for data-driven control : stabilization, optimality and robustness. *IEEE Transactions on Automatic Control* **65**, 909-924 (2019).
7. VAN WAARDE, H. J., EISING, J., TRENTelman, H. L. & CAMLIBEL, M. K. Data informativity : a new perspective on data-driven analysis and control. *IEEE Transactions on Automatic Control* **65**, 4753-4768 (2020).
8. MADDALENA, E. T., SCHARNHORST, P., JIANG, Y. & JONES, C. N. *KPC : learning-based model predictive control with deterministic guarantees* in *Proceedings of Machine Learning Research* **144** (2020), 1015-1026.
9. TACCHI, M., LIAN, Y. & JONES, C. N. Robustly learning regions of attraction from fixed data. *IEEE Transactions on Automatic Control* **70**, 3936-3951 (2025).
10. JHA, M. S. & KIUMARSI, B. Off-policy safe reinforcement learning for nonlinear discrete-time systems. *Neurocomputing* **611** (2025).

Sujets de recherche identifiés

La commande orientée données regroupe plusieurs thèmes de recherche spécifiques, dont trois se sont notablement dégagés au cours du workshop¹ :

Apprentissage sécurisé et certification : Lorsque le modèle du système à contrôler est remplacé par des données, les techniques standard de synthèse et d'analyse doivent passer par des méthodes d'apprentissage, ce qui change la nature des **garanties** requises, qui doivent tenir compte de l'incertitude liée aux limites de la connaissance du modèle. Ainsi, des méthodes de représentation des systèmes par ensembles d'incertitude calculés à partir des données permettent d'obtenir des garanties flexibles (robustes ou probabilistes), tant sur la synthèse de contrôleurs [11] que sur l'analyse de stabilité [12]. Si historiquement l'automatique a globalement accordé davantage d'importance à de telles garanties que l'apprentissage, l'AI act et les réflexions récentes autour de l'IA suggèrent que l'expertise automatique sur les questions de fiabilité peut fortement contribuer aux futurs développements du domaine, par exemple à travers l'interprétation classique de l'apprentissage par renforcement comme un problème de commande optimale [13], ou bien en étudiant les propriétés de contractivité des réseaux de neurones récurrents modélisés comme des systèmes dynamiques [14]. Enfin, les progrès dans le domaine de la commande stochastique permettent désormais de synthétiser des lois de commande avec garanties de sûreté probabilistes, lorsque l'aléa lui-même est difficile à modéliser [15].

Commande sans modèle et approximation de contrôleurs : Une solution largement adoptée pour la synthèse basée données consiste à reporter la problématique d'identification du modèle vers le contrôleur. La commande sans modèle ([16],[17], [18]) en est le premier exemple : le comportement local du système est estimé en temps réel à partir des **données d'entrée-sortie**, permettant d'ajuster directement le signal de commande afin de suivre la trajectoire désirée, et ce sans s'appuyer sur un modèle prédéfini du système. Dans d'autres techniques [19], c'est un contrôleur idéal global qui est obtenu, de manière à faire coïncider le comportement du système contrôlé avec un comportement spécifié sous forme de modèle de référence. Ces techniques s'appuient sur des principes d'identification, mais les détournent de leur usage traditionnel : au lieu de construire des modèles du système, elles génèrent directement des lois de commande. Le développement de méthodes innovantes de modélisation basée sur les données, telles que [20], occupe d'ailleurs une place centrale dans ces recherches. Ces avancées s'inscrivent dans une dynamique plus large, qui inclut également les approches fondées sur le lemme de Willems [4, 6], où le système est caractérisé par des données d'entrée-sortie, permettant de synthétiser des lois de commande selon divers critères, via une représentation dite *data-based*. En résumé, ces techniques partagent une philosophie commune : exploiter directement les données pour concevoir des contrôleurs, plutôt que de s'appuyer sur des modèles intermédiaires, grâce au formalisme de l'automatique basée sur des modèles et au moyen de techniques issues de l'identification.

Méthodes adaptatives et apprentissage en temps réel : Comme mentionné plus haut, l'apprentissage par renforcement peut être interprété comme un problème de commande optimale où de nouvelles données sont générées par l'évolution du système et prises en compte à travers un mécanisme de rétroaction [13]. Plus généralement, la question de l'**adaptation** du système considéré

1. Plusieurs classifications différentes sont possibles, nous en proposons ici une qui nous semble particulièrement pertinente.

aux éventuels événements qui peuvent l'affecter est une composante historique de l'automatique. Ainsi, le problème de la commande prédictive orientée donnée, lorsque le système sous-jacent (dont le modèle est inconnu) est temps-variant [21] ou non-linéaire [22], peut se reformuler comme un problème de commande adaptative ; dans le premier cas, une approche hybride permet d'adapter la rétroaction, tandis que le second peut se traiter en sélectionnant des données à la fois suffisamment informatives au sens de Willems [4] et suffisamment locales pour linéariser le problème. Enfin, la théorie de Lyapunov demeure un outil puissant pour synthétiser des lois de commande adaptatives, y compris dans un formalisme orienté données, par exemple lorsqu'une dynamique de mode glissant est apprise par des réseaux de neurones [23].

Présentations au Workshop de l'action MACS

11. GIRARD, A. *Safe learning-based nonlinear model predictive control using data-driven set-valued models* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
12. KHATTABI, O. *Data-driven stability analysis* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
13. JHA, M. *Safe Reinforcement Learning with provable guarantees : Recent Advancements in* *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
14. ANDRIEU, V. *A nonlinear KKL framework for theoretical analysis and guarantees of neural network observers* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
15. BONALLI, R. *Safely Learning Controlled Stochastic Dynamics* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
16. JOIN, C. *From model-free control to HEOL setting* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
17. FLIESS, M. *Toward Model-Free Predictive Control : Possible Connections with AI* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
18. CONDOMINES, J.-P. *Restricted Model-Free Control* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
19. KERGUS, P. *Data-driven controller design in the Loewner framework* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
20. POUSSOT-VASSAL, C. *The Loewner Framework, the Kolmogorov Superposition Theorem and the Curse of Dimensionality* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
21. POSTOYAN, R. *A hybrid systems framework for data-based adaptive control of linear time-varying systems* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
22. ARANOVSKIY, S. *Dataset Management in Data-Enabled Predictive Control* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).
23. SARBANDI, M. *Data-Based Sliding Mode Control - Application to Floating Offshore Wind Turbines* in *Workshop automatique et données – Action MACS* (Toulouse, 2025).

Proposition de création d'un CT de la SAGIP : Contrôle et Analyse basés DONnées (CADO)

Périmètre scientifique

Suite à la table ronde lors du workshop, il ressort une volonté commune de la part des intervenants de pérenniser cette initiative pour structurer et animer la communauté française autour de ces thématiques. Nous proposons donc de créer un CT de la SAGIP pour répondre à ce besoin.

Objectifs du CT CADO : Le Comité Technique Contrôle et Analyse basés DONnées a pour objectif de fédérer la communauté travaillant sur les méthodes de commande et d'analyse basées données. Il s'intéresse à la synthèse de lois de commande directement à partir d'observations, à l'analyse et la garantie à partir de données de propriétés structurantes telles que la stabilité ou la robustesse de systèmes dynamiques, ainsi qu'à la certification des méthodes d'apprentissage modernes au sens de l'automatique. À l'interface entre automatique, apprentissage statistique et ingénierie des systèmes, le CT CADO vise à promouvoir des approches théoriques rigoureuses, à encourager les échanges entre chercheurs et praticiens, et à soutenir le développement d'outils garantissant la fiabilité, l'interprétabilité et la sûreté des systèmes pilotés ou analysés via les données. Portées par les avancées rapides en automatique et en intelligence artificielle, les approches de commande et d'analyse orientées données ouvrent aujourd'hui un champ de développements particulièrement dynamique, où modélisation, apprentissage et garanties formelles convergent pour façonner de nouvelles générations de systèmes autonomes sûrs, performants et interprétables.

Cette thématique comporte un certain nombre de défis majeurs, parmi lesquels on peut citer :

Convergence entre automatique et IA : Apporter aux futures IA des garanties de sécurité, stabilité, fiabilité etc, dans une approche centrée sur le système dynamique sous-jacent et ses propriétés, en identifiant les cas pathologiques pouvant mettre en défaut les méthodes actuellement déployées, et en proposant des solutions alternatives issues de l'expertise automatique, parfois insuffisamment sollicitée dans les communautés de sciences des données.

Au-delà de l'automatique des théorèmes : Accompagner le changement de paradigme, qui se détache progressivement des exigences de robustesse théorique parfois impossibles à garantir sans faire des hypothèses mathématiques fortes voire irréalistes, pour se tourner vers des approches pluridisciplinaires embrassant la notion de stochasticité, le caractère imparfait et incomplet des informations à disposition, avec une tolérance probabiliste maîtrisée sur les contraintes d'état.

Mitiger les problèmes liés à la modélisation : Proposer des approches alternatives à l'identification parfois coûteuse des modèles à partir de données, mais intégrant ces données directement dans leur conception, tant au niveau de la synthèse de lois de commande que lors de l'analyse des propriétés dynamiques des commandes obtenues ou de l'observation des systèmes ainsi commandés, pour faire progresser les champs de recherche autour de modèles difficiles à traiter, comme la commande non-linéaire, la commande en grande dimension et la commande stochastique.

Intégrer des données hétérogènes : Couvrir la totalité du spectre des approches possibles, qu'elles soient totalement sans modèle, orientées données, mixtes données-modèles (apprentissage

informé de la physique), modélisées avec des incertitudes que les données viendraient réduire (approches bayésiennes), ou fondées sur des informations encore plus hétérogènes (représentations hybrides continu-discret, modèles partiels ne traitant qu'une partie des variables, aléas non modélisés...).

Action au sein de la SAGIP

Outre l'animation de la recherche, à l'échelle de la SAGIP, sur les thématiques présentées ci-dessus, il existe des interactions avec des CTs existants :

CT Identif : Ce CT se concentre sur les méthodes de modélisation des systèmes, en particulier en vue d'appliquer des méthodes orientées modèles. Toutefois, il a été souligné lors du workshop que ces méthodes peuvent également être utilisées pour la synthèse orientée données. En outre, la commande orientée données ne se limite pas à réemployer les mêmes méthodes à des fins différentes : elle trace également son propre chemin dans le domaine de l'analyse des données pour accomplir diverses tâches. Il y aurait donc à la fois des points de rapprochement et des éléments de complémentarité.

CT MOSAR : MOSAR se concentre sur la synthèse et l'analyse robustes à partir de modèles de systèmes, en garantissant performance et stabilité face aux incertitudes. CADO partage cet objectif de fiabilité, mais adopte une approche orientée données, en apprenant directement à partir d'observations et en intégrant la certification automatique des méthodes. La commande orientée données peut s'appuyer sur les fondations théoriques de MOSAR tout en explorant des voies nouvelles où l'apprentissage et la validation algorithmique jouent un rôle central.

CT CPNL : CPNL se focalise sur la commande prédictive non linéaire, optimisant la performance sous contraintes via des modèles explicites. CADO, tout en partageant l'objectif de concevoir des lois de commande performantes et stables, privilégie une approche basée sur les données et l'apprentissage. La commande orientée données ne se limite pas à reproduire les méthodes de CPNL : elle crée également ses propres méthodes pour apprendre et certifier des contrôleurs à partir d'observations. On retrouve donc des zones de recoupement et des pistes d'innovation spécifiques à CADO.

CT SYNOBS : SYNOBS s'intéresse à l'observation, la synchronisation et la fiabilité des estimateurs dans les systèmes complexes. CADO partage un intérêt pour l'apprentissage de propriétés de stabilité et d'observabilité à partir de données. Toutefois, la commande orientée données va au-delà de l'analyse d'observateurs en incluant la synthèse directe de lois de commande et la validation automatique des méthodes. On y retrouve des points de convergence mais aussi une extension claire du champ d'action.

Projet à court terme : Un premier projet que nous avons, dans la lignée de notre action MACS et afin de pérenniser la dynamique qu'elle a lancée, serait d'organiser une session dédiée au CT CADO, pour continuer à rassembler autour de ses thématiques spécifiques, à l'occasion du prochain congrès de la SAGIP à Bordeaux, du 10 au 12 juin 2026. Ce serait à la fois l'opportunité de confirmer l'intérêt de la communauté pour la commande et l'analyse orientées données, et de lancer de nouvelles dynamiques autour de cette thématique.