



gdr-macs.cnrs.fr

Prospectives extraites du Projet 2024-2028

Dimitri Peaucelle, Damien Trentesaux, Gülgün Alpan, Romain Postoyan

Jean Auriol, Christophe Berenguer, Eric Bonjour, Olivier Cardin, Vincent Cheutet,
William Derigent, Valérie Dos Santos Martins, Sylvain Durand, Paolo Frasca,
Laurent Geneste, Marion Gilson-Bagrel, Virginie Goepp, Mamadou Kaba Traoré,
Jimmy Lauber, Michael di Loreto, Guillaume Mercère, Sylvie Norre, Elena Panteley,
François Peres, Mihaly Petreczky, Franck Plestan, Nacim Ramdani, Evren Sahin,
Reine Talj, Louise Travé-Massuyès, Etienne Cocquebert

Version du 10 janvier 2024

Ce document est une extraction du document de Bilan 2019-2023 et Projet 2024-2028 [17] produit à l'occasion du renouvellement du GdR MACS. La prospective scientifique y est organisée de la façon suivante. Dans la section 1 sont rappelés quelques-uns des résultats scientifiques marquants de ces 5 dernières années en Automatique et sciences et techniques de la production, marquants au sens qu'ils ouvrent de nouvelles perspectives. Les perspectives en question et les enjeux soulevés sont ensuite présentés succinctement selon qu'ils sont disciplinaires ou inter-disciplinaires dans les sections 2 et 3 respectivement. Pour la plupart d'entre eux, des Actions MACS (cf. section ??) ont déjà été lancées ou sont envisagées pour la période 2024-2028 auquel cas celles-ci sont indiquées. Ces actions MACS sont en effet un levier privilégié pour encourager et favoriser l'émergence et le développement de travaux de recherche au sein de la communauté nationale sur ces thématiques à fort potentiel.

1 Résultats marquants des dernières années

Avant de procéder à l'élaboration en tant que telle de prospectives, le conseil scientifique s'est attaché à identifier des résultats ayant eu une forte influence en termes d'émergence de problématiques nouvelles au niveau international. Ce recensement est inévitablement incomplet et subjectif.

Commande basée données Les récents succès de l'intelligence artificielle (IA) apportent un nouvel éclairage et ravivent grandement l'intérêt et la recherche sur la commande basée données au sein du monde de l'automatique. La commande basée données consiste à concevoir directement les lois de contrôle à partir des mesures d'entrée et de sortie du système. Aucun modèle explicite du système n'est ainsi nécessaire. Ce paradigme pourrait grandement simplifier la synthèse de contrôleurs et être la clé pour le contrôle de systèmes pour lesquels la construction d'un modèle est problématique de par le manque de données, la grande variabilité du système ou la complexité des dynamiques mises en jeu.

De nombreuses méthodes de l'automatique peuvent légitimement revendiquer l'appellation commande basée données ou commande par apprentissage à l'instar de la commande adaptative [12], de l'« iterative learning control » [4], de la commande sans modèle [8] ou encore de l'« extremum seeking control » [22] pour n'en citer que quelques unes. Les récents travaux de [18] ouvrent une nouvelle voie qui se distingue des domaines précédemment cités. Fondée sur le lemme fondamental de Willems [25], cette approche permet de synthétiser des contrôleurs avec garanties (stabilité, performance, robustesse) en exploitant un jeu données entrées-sorties collectées dont la taille dépend de l'ordre du système. Ces travaux sont remarquables à plusieurs égards. Non seulement, ils offrent une voie tout à fait originale par rapport aux travaux similaires en apprentissage par renforcement en exploitant des propriétés de l'automatique (e.g., stabilisabilité, détectabilité) tout en apportant des garanties analytiques, mais ils ne nécessitent pas une grande quantité de données. L'article de [18] est symbolique de tout un élan de nouveaux travaux dans le domaine et permet d'entrevoir des versions basées données des grandes approches de commande jusqu'à présent reposant sur un modèle, e.g., [1, 2, 7, 10, 24].

Analyse et synthèse d'algorithmes d'optimisation L'article [15], ainsi que des travaux qui ont suivi sur ce même sujet comme par exemple [9, 21], sont symptomatiques d'un intérêt renouvelé pour l'étude des méthodes d'optimisation à l'aide d'outils issus de l'automatique. Cet article va dans le détail de l'analyse des algorithmes d'optimisation itératifs de type gradient et ses variantes accélérées (Nesterov, Heavy-ball...) en les interprétant comme des systèmes dynamiques à temps discret. Il démontre et illustre comment les outils de la commande robuste conduisent non seulement à de nouvelles garanties de convergence des algorithmes d'optimisation en question, mais permettent également la synthèse de nouveaux algorithmes aux performances améliorées. Ces travaux ouvrent ainsi la voie à de nouvelles études dédiées à l'analyse d'algorithmes avec des certificats sur leur stabilité et leur robustesse.

Approches par noyaux pour l'identification de systèmes L'identification des systèmes traite de l'estimation de modèles de systèmes dynamiques à partir de signaux d'entrée et de sortie mesurés. La plupart des techniques actuellement utilisées pour l'identification de systèmes sont fondées sur des méthodes d'estimation issues des statistiques. Mathématiquement, l'identification des systèmes est un problème inverse qui peut souffrir d'instabilité numérique et de problème d'identifiabilité. Le chercheur

russe Tikhonov a proposé dans les années 1940 une manière générale de contourner ces instabilités par une technique dite régularisation, qui a donné lieu à de nombreuses avancées pour le cas de dynamiques linéaires. Récemment, l'émergence du machine learning a offert un regard nouveau permettant d'envisager la régularisation de systèmes dynamiques non-linéaires. Ces solutions trouvent leur fondement mathématique dans la théorie des « Reproducing Kernel Hilbert Spaces » [14], qui viennent révolutionner l'approche classique en identification. Ce renversement de perspective permet d'envisager le développement de nouvelles techniques pour des dynamiques complexes, élargissant ainsi le champ d'application potentiel de l'identification [5, 19].

Covid, incertitudes internationales : résilience des supply chains Les incertitudes internationales liées, entre autres, à la crise du Covid 19 ont vu l'émergence de nombreux travaux de recherche autour de la notion de résilience comme le montre l'explosion, depuis 2019, du nombre d'articles référencés dans Scopus ayant comme mot-clé résilience (plus de 87000 soit 52% des documents depuis 1980). L'intérêt pour ce concept s'explique par sa définition qui, quelque soit le domaine d'application, est *la capacité et l'aptitude d'un élément à revenir à un état stable après une perturbation* [3]. La perturbation est dans le cas de la résilience généralement qualifiée de non prévisible et a un impact important sur l'élément considéré.

Dans le cadre des problématiques qui intéressent le GdR MACS, les travaux traitant de la résilience de la supply chain sont significatifs. Ces travaux explorent comment éviter les risques de ruptures de la supply chain en proposant des outils spécifiques comme une structure de jumeau numérique dans [13] ou du machine learning dans [11]. D'autres comme, par exemple [16, 23], mettent en évidence le lien positif entre résilience de la supply chain et technologies de l'Industrie 4.0. En tout état de cause, la problématique de la résilience fait partie des sujets d'intérêt pour le GdR MACS (voir l'action MACS Amélioration de la résilience des systèmes complexes dans un contexte perturbé).

Cette thématique peut servir de pont entre les communautés automatique et sciences et techniques de production du GdR MACS puisque la résilience peut s'appréhender à différents niveaux et devrait s'articuler avec les concepts de robustesse et de risque. Le projet d'école MACS 2024 sur le thème *Résilience, Risque et Robustesse* va résolument dans ce sens. Un des enjeux forts est d'aller vers la caractérisation des perturbations et de la résilience des systèmes tout en fournissant des méthodes et outils permettant de supporter la dynamique à mettre en oeuvre en cas de perturbation.

Cognitive Digital Twin La notion de Jumeaux Numériques s'est fortement développée ces dernières années comme un des piliers de la dernière révolution industrielle et de nombreux travaux dans la communauté ont proposé des contributions pour leurs applications aux systèmes de production (voir en particulier l'action du GdR sur cette thématique mais aussi [6, 20]). Après une première phase très orientée technologie poussée par de nombreux éditeurs de logiciels ou de solutions d'hébergement, la place de l'Humain au sein du Jumeau Numérique redevient aujourd'hui centrale comme partie prenante fondamentale et positionne le Jumeau Numérique comme aide à la décision dans un environnement complexe. De plus, les systèmes de production deviennent de plus en plus dynamiques dans leur configuration pour respecter au mieux des demandes de plus en plus hétérogènes et diverses. Cela implique alors un système de pilotage qui puisse suivre cette dynamique et donc puisse s'adapter le plus facilement possible.

Tout cela se traduit aujourd'hui entre autre par le concept de « Cognitive Digital Twin » (CDT) [26]. Les principaux bénéficiaires d'un CDT sont les systèmes et processus de production complexes qui impliquent de multiples sous-systèmes avec des parties prenantes de différents domaines ou qui traversent plusieurs phases du cycle de vie. Le CDT peut permettre de créer un cadre unifié pour orchestrer les interactions entre les sous-systèmes et les processus. Du point de vue des exigences du système, le CDT fournit une solution pour les systèmes industriels qui nécessitent un niveau plus élevé de capacités agiles, résilientes et reconfigurables, ainsi que des capacités améliorées de prise de décision et de réaction autonome.

Ces quelques résultats marquants ne sont bien sûr qu'un échantillon des contributions majeures ayant émergées au cours des 5 dernières années au sein de notre communauté. Néanmoins, ces 5 thématiques sont promises à un avenir florissant et sont au cœur des enjeux présentés par la suite. Les enjeux identifiés sont d'ailleurs le fruit de l'analyse de l'IEEE-CSS/IFAC Roadmap 2030, disponible via ce lien : [IEEE-CSS/IFAC Roadmap 2030](#).

2 Enjeux disciplinaires

Nous présentons ci-dessous quelques enjeux disciplinaires prospectifs. Cette liste n'est pas considérée comme exhaustive et sera révisée annuellement par le conseil scientifique. Les Actions MACS envisagées ou ayant eu lieu sur la période 2019-2023 sont mentionnées à la fin de chaque descriptif.

Optimisation et systèmes dynamiques L'Automatique est historiquement intimement liée à l'optimisation. Elle doit ainsi nombre de ses plus grands succès à l'interaction avec ce champ disciplinaire, comme par exemple la commande optimale linéaire quadratique, le filtre de Kalman, la commande prédictive ou l'intrication en programmation semi-définie (LMI) et la commande robuste. Cette tradition est amenée à connaître un renouveau majeur dans les années à l'avenir selon deux axes complémentaires. Le premier est celui de l'optimisation pour le contrôle. De par le besoin de plus en plus pressant de techniques de commande non seulement sûres (au sens de la stabilité, de la robustesse ou de la sécurité) mais aussi performantes pour des systèmes dits complexes (non-linéaires, hybrides, à plusieurs échelles de temps, de grande dimension etc.), les techniques d'optimisation auront nécessairement un rôle majeur à jouer. Qu'il s'agisse de la commande par programmation dynamique, de la commande par réseaux de neurones ou plus généralement toute loi de commande faisant intervenir explicitement un algorithme d'optimisation dans la boucle fermée, de nombreux verrous méthodologiques sont à relever pour modéliser et surtout analyser la boucle ainsi fermée. Le second axe est celui du contrôle pour l'optimisation, cf. section 1. L'idée ici est de modéliser des algorithmes d'optimisation, qu'ils soient distribués ou non, comme des systèmes dynamiques et d'exploiter les outils de l'automatique pour analyser leur convergence voire leur propriété de stabilité et de robustesse. Cet axe de recherche a connu un regain d'intérêt majeur ces dernières années (voir le paragraphe sur l'analyse et la synthèse d'algorithmes d'optimisation), qui est amené à prendre de l'ampleur. De plus, ce parallèle permet d'envisager l'exploitation voire le développement de techniques de contrôle donnant ainsi lieu à de nouveaux algorithmes d'optimisation plus rapides, plus stables et plus robustes.

Actions MACS envisagées : (i) optimisation et systèmes dynamiques ; (ii) réseaux de neurones pour les systèmes dynamiques : quelles garanties analytiques ?

Architectures de commande et de décision L'introduction des avancées technologies conjointement liées à l'Internet des Objets et l'Industrie du futur conduit au développement de systèmes industriels cyber-physiques, composés d'une grande variété d'entités virtuelles et physiques, collaboratives et autonomes, organisées selon des relations de natures différentes (physiques, informationnelles, organisationnelles), multi-niveaux et multi-échelles, évoluant dynamiquement au cours du temps. Dans ce contexte, l'étude du contrôle/pilotage de ces systèmes nécessite de prendre en compte l'architecture de commande/pilotage sous-jacente, aussi bien pour structurer l'organisation hiérarchique entre les contrôleurs/centres de décision interconnectés virtuellement et physiquement, que pour identifier leurs interactions en termes d'échanges d'information par exemple. L'architecture de commande/pilotage, en tant qu'objet d'étude scientifique, reste donc un enjeu fort dans le contexte de ces nouveaux systèmes. Cela implique de proposer des architectures de référence adaptées et, d'autre part, des méthodes de conception permettant d'aboutir à des structures distribuées optimales, robustes, flexibles et reconfigurables. De nouvelles questions peuvent se poser, en lien avec d'autres enjeux scientifiques : par exemple, l'introduction du jumeau numérique et de ces capacités de simulation temps-réel soulève la question de l'intégration contrôle-simulation multi-niveau au sein de ces architectures, tout comme l'intégration de l'humain dans la boucle entraîne un questionnement important sur la manière de concevoir ces architectures de façon anthropocentrée.

Actions MACS 2019-2023 : les Jumeaux Numériques pour les systèmes de production.

Modélisation, analyse et conduite des systèmes hétérogènes, de grande taille Au cours des dernières décennies, la modélisation, l'analyse et la conduite des systèmes hétérogènes de grande taille se sont fortement développés en raison des nombreux champs applicatifs concernés et des enjeux sociétaux associés. On citera par exemple la gestion des réseaux de tous types (électrique, de communication et pilotage à distance, de stockage et de distribution d'eau, de gestion de trafic routiers, de gestion de flottes...), dans le contexte de l'industrie du futur le pilotage d'usine de production, la gestion logistique multimodale, ou encore dans le domaine de la santé, l'assistance à l'humain, les traitements EGCs, les traitements médicamenteux, les évolutions épidémiques. La théorie des systèmes et du contrôle propose des méthodes bien solides pour garantir la stabilité et les performances de certaines classes de systèmes

dynamiques. Plusieurs verrous majeurs persistent néanmoins comme la prise en compte de l'hétérogénéité (combinaison de systèmes de nature structurelle ou temporelle différentes) ou la grande dimension (issue de systèmes dont le nombre de variables d'état est très grand ou issue de l'interconnexion d'un nombre important de sous-systèmes simples), pour lesquels les outils existants peuvent montrer leurs limites d'un point de vue calculatoire. En effet, les principales difficultés concernent, dans un cas, la mise sous un formalisme commun, et dans l'autre, le passage à une taille exploitable pour l'automaticien. Parmi les outils souvent utilisés pour appréhender ces familles de systèmes, dans la littérature on retrouve des approches basées sur les systèmes dynamiques hybrides, à commutations, interconnectés, ou plus récemment sur les systèmes multi-agents. L'objectif est alors de réaliser : le pilotage, le contrôle, l'observation, l'optimisation sous contraintes, ou encore le diagnostic dans des contextes variés : multi-échelle de temps, continu-discret ; puissance, possibilités de calcul, et/ou ressources limitées par rapport aux dimensions du problème à traiter. Les enjeux scientifiques résident clairement dans le développement de méthodologies permettant d'unifier les différences dans le cas des systèmes hétérogènes, et de réduire la complexité de calcul ou de la reporter hors ligne pour les systèmes de grande taille tout en apportant des garanties de performance.

Actions MACS 2019-2023 : (i) commande décentralisée des systèmes multi-agents sous contraintes ; (ii) Commande des EDPs, mathématique et ingénierie ; (iii) « Epidemics : modeling, identification, control » ; (iv) les réseaux sociaux et l'Automatique.

Action MACS envisagée : Contrôle des équations de Navier-Stokes (très prospectif, à réfléchir avec le GdR Navier-Stokes 2.00).

Systèmes cyber-physiques avec l'humain dans la boucle L'humain est aujourd'hui partie prenante dans les boucles de contrôle-commande dans une large variété de domaines applicatifs, allant du biomédical, aux véhicules autonomes et aux infrastructures critiques. A la frontière entre l'humain et les systèmes cyber-physiques résident une large variété d'interactions, parmi lesquelles des interactions physiologiques (pancréas artificiel, par ex), cognitives ou physiques (exosquelettes, par ex.), ou encore à l'échelle de population (pandémies, gestion de trafic, par ex.). La présence de l'humain dans la boucle de contrôle-commande impacte significativement les stratégies de conception car deviennent prépondérantes les problématiques de la sécurité de l'interaction pour l'humain et de la confiance qu'il peut avoir dans le système cyber-physique. Apporter des réponses à ces nouveaux défis est d'autant plus difficile que le composant humain, en tant qu'acteur à part entière dans la boucle de contrôle-commande, montre une grande variabilité et une forte capacité d'adaptation dans son comportement dynamique, alors même que sa modélisation constitue un verrou majeur compte tenu de l'absence de lois fondamentales et de la difficile acquisition de données expérimentales. Les verrous principaux qui doivent être résolus pour permettre un développement harmonieux des solutions technologiques impliquant l'humain dans la boucle concernent les aspects de modélisation et de synthèse. Le premier verrou concerne la caractérisation et la modélisation du composant humain et la manière avec laquelle il s'adapte pendant l'interaction. Ici combiner des approches basées données et des méthodes basées lois fondamentales (physiques, physiologie, etc..) constitue une première piste de recherche pour développer des modèles appropriés pour la commande et la prédiction en ligne. Le second verrou concerne le développement des lois de commande qui garantissent la sécurité de l'interaction, qui sont robustes à l'incertitude, et qui sont dotées de capacités d'apprentissage et d'adaptation. Les aspects éthiques, responsabilité et confiance doivent aussi être pris en compte dès la conception. Les architectures des lois de commande devront être adaptées à la nature de l'interaction (physiologique, cognitive, ou à l'échelle d'une population) et devront exploiter les structures hiérarchiques sous-tendant l'interaction (boucle rapide pour l'interaction physiologique, planification à moyen terme pour des interaction à l'échelle de population, etc..). Par ailleurs, la nécessaire adjonction d'un composant d'apprentissage dans la boucle de commande pose la question de la validation et de la garantie de performances. Ici, le concept de synthèse de loi de commande *probably approximately correct* (PAC) constitue une bonne piste de recherche.

Action MACS envisagée : Sécurité des systèmes cyberphysiques.

3 Enjeux inter-disciplinaires

Nous donnons ci-dessous quelques enjeux inter-disciplinaires prospectifs. Cette liste n'est également pas considérée comme exhaustive et sera révisée annuellement par le conseil scientifique.

Électrification L'accroissement de la demande en énergie électrique induit des défis majeurs, qui impactent tous les aspects de la société, en incluant les mobilités, la production, l'habitat et la santé. Les scientifiques et ingénieurs dans le domaine de l'Automatique ont un rôle primordial dans cette transition énergétique, afin de garantir une exploitation optimisée de cette énergie d'une manière durable et accessible. Sur le plan technique, la transition énergétique vise à faire de l'électricité un vecteur énergétique universel. Ce changement de paradigme donne lieu à des défis techniques et méthodologiques inédits à chaque étape de la chaîne énergétique, afin de concevoir des systèmes optimisés, de la conception à l'usage.

L'infrastructure électrique et les systèmes électriques la composant font face à de nombreux enjeux, comme la décentralisation de la production, l'intégration d'énergies renouvelables (photo voltaïque, hydraulique, éolien, biomasse, géothermie), la mise en place croissante de réseaux intelligents, les nouveaux usages (notamment pour la mobilité et l'habitat), le besoin énergétique de l'industrie, ainsi que l'accroissement de systèmes ou objets connectés et/ou communicants et de données. Ces enjeux s'accompagnent bien souvent de nouveaux besoins énergétiques, mais ont la capacité de contribuer à une meilleure gestion de l'énergie, dans son ensemble, et ce de manière durable. De manière générale, tout secteur énergétique est confronté au triptyque consommation-stockage-génération. Les interactions et couplages de ces trois sous-secteurs énergétiques sont inhérents, et doivent être pilotés conjointement afin de participer à la transition énergétique. Chaque élément de ce triptyque doit optimiser ses propres fonctionnalités et performances, en tenant compte de ces couplages, dans un objectif commun de durabilité et d'accessibilité, afin de réduire l'impact environnemental de l'humain.

Sans prendre en compte l'interaction pilotable au sein de ce triptyque, le dimensionnement de la génération (production) et du stockage énergétique est gouverné par les valeurs des pics de consommation. Les sources de génération énergétique avec une forte variabilité, comme le sont un grand nombre d'énergies renouvelables, induisent une capacité sur-estimée et un sur-dimensionnement de l'infrastructure de production et de stockage, associés à des coûts prohibitifs. Il est donc primordial d'intégrer les interactions pilotables entre consommation-stockage-génération. Bien que cela contribue à l'objectif global, il n'est cependant pas suffisant, car il ne concerne qu'un seul secteur énergétique. Une avancée significative vers l'objectif est donc d'envisager une approche multi-sectorielle énergétique, c'est-à-dire de coupler différents secteurs énergétiques pour répondre au besoin de l'utilisateur. Ce couplage s'appuyant sur la conversion énergétique, il s'agit alors d'en optimiser ses performances, par une approche multi-source et pluri-disciplinaire, comme par exemple la co-génération. Cette stratégie permet d'envisager un gain significatif dans la réduction de la capacité de génération énergétique et la réduction des systèmes de stockage, tout en introduisant davantage de flexibilité dans les infrastructures énergétiques.

Les verrous et défis scientifiques attendus dans cette perspective s'appuient sur cette réflexion, en parcourant toutes les étapes de la chaîne énergétique,.

1. Génératrice/moteur : aux extrémités de la chaîne énergétique se trouvent les moteurs/génératrices, qui sont des convertisseurs électro-mécaniques. L'enjeu majeur est ici de disposer d'une large gamme de puissance pour ces convertisseurs (de quelques Watts à plusieurs MegaWatts). Il s'agit en effet d'exploiter au mieux les sources d'énergies primaires, tout en proposant un usage généralisé (et bien dimensionné) des actionneurs électriques. Les objectifs sont ici multiples : améliorer le rapport poids/puissance par la conception et la commande, conception de commande robuste par rapport aux incertitudes de modélisation et à des charges variables incertaines, méthodologies pour la conception conjointe du dimensionnement et du contrôle, stratégies pour l'interconnexion des actionneurs électriques et leurs conversions énergétiques (électronique de puissance), techniques de diagnostic et de détection de fautes, sûreté de fonctionnement.
2. Transport/distribution de l'énergie : de plus en plus nombreux, les éléments terminaux du réseau de transport sont également de plus en plus fréquemment connectés via des interfaces d'électronique de puissance pour autoriser des vitesses de rotation variables. Par ailleurs, l'intermittence ne concerne plus seulement la consommation mais s'étend à la production, du fait de l'usage d'énergies renouvelables comme sources d'énergie primaire. Ces mutations des éléments terminaux imposent des changements pour le réseau lui-même, par le biais de sa structure, de l'usage du courant continu, et de son inertie. Les verrous concernent ici l'équilibrage entre la production et la demande dans un réseau marqué par l'intermittence généralisée, la prise en compte des contraintes d'interopérabilité des réseaux de différentes générations, la numérisation de l'infrastructure de contrôle (réseau intelligent), ainsi que l'acheminement de puissance en présence de défaillances.
3. Conversion énergétique : la commande de systèmes électriques est réalisée par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance, qui sont eux mêmes l'interconnexion de composants passifs linéaires, non-linéaires, et d'interrupteurs commandés. Ces systèmes évoluent dans un environnement évo-

lutif (caractère intermittent des énergies renouvelables et de la consommation), avec une grande variété de comportement dynamique de charges électriques connectées en aval des convertisseurs, et présentent intrinsèquement des modèles évolutifs en fonction de leur état de vie. Les principaux enjeux concernent ici les convertisseurs multi-fonctionnels et leur commande pour une meilleure flexibilité d'utilisation des convertisseurs, les outils de synthèse pour les modèles retenus (modèle moyen, modulation de largeur d'impulsion, modèle commuté à entrée de cardinalité finie) et leur comparaison, ainsi que les méthodes d'analyse et de synthèse pour les systèmes incertains, aussi bien du point de vue de leur dynamique que de leur environnement. Enfin, les aspects de sûreté de fonctionnement, en lien avec le vieillissement ou la défaillance de nouveaux composants, sont ici fondamentaux.

4. Stockage de l'énergie : les principaux défis sont ici d'augmenter les densités de puissance et d'énergie. Les enjeux concernent la sûreté de fonctionnement, dans le cadre de modèles de vieillissement de composants, la commande et l'équilibrage des capacités.
5. Approche multi-disciplinaire : comme cela a été mentionné, l'usage de la cogénération (chaleur + électricité) permet d'augmenter radicalement les rendements des génératrices électriques classiques. Les réseaux multi-vecteurs (électricité, chaleur, froid, gaz, hydrogène) constituent le support de ce type de cogénération, tirant profit des synergies possibles entre les différents vecteurs énergétiques. L'enjeu est ici d'établir des méthodologies de gestion d'énergie de type haut-niveau, en se basant sur une complexité et pluri-disciplinarité croissantes, qui puissent s'interfaçer avec les gestions locales de commande de composants. L'intérêt d'intégrer dans la modélisation l'utilisateur, afin de modéliser le comportement évolutif de la demande énergétique, conjointement à l'exploitation de données, doivent permettre le déploiement de méthodologies de gestions de modes optimisées.

Actions MACS envisagées : (i) contrôle des convertisseurs (avec le GdR SEEDS) ; (ii) apports MACS au GdR Éolien, énergies marines renouvelables, hydraulique.

Automatique et communication (et IOT) Dans les systèmes de contrôle modernes, qui intègrent les systèmes physiques et les ressources numériques, les réseaux de communication jouent un rôle crucial étant donné qu'ils relient les différents systèmes et assurent les tâches de collecte, de traitement et de transmission des données. Lorsque les échanges d'informations se font sur des canaux sans fil, cela implique que les données échangées entre les contrôleurs et les systèmes sont nécessairement imparfaites. Le problème du contrôle de ces systèmes se situe à la frontière de deux disciplines : la théorie du contrôle et les télécommunications. Pour la communauté du contrôle, l'objectif est d'atteindre un niveau de performance ciblé compte tenu des caractéristiques du système contrôlé et des conditions de l'environnement. Pour la communauté des télécommunications, l'objectif est d'assurer la transmission d'informations entre les nœuds connectés, compte tenu des caractéristiques du réseau. La plupart du temps, ces problèmes sont traités séparément par les deux communautés. Cependant, de nombreuses applications émergentes peuvent bénéficier d'un dépassement du paradigme actuel qui sépare complètement la conception des réseaux de communication de la source et de la destination de l'information qui circule à travers le réseau. Ces applications nécessitent des recherches à l'interface entre la théorie du contrôle et les communications sans fil. Une telle approche permet de considérer le système de contrôle et de communication comme un système unique dans lequel les couches de communication et de contrôle sont les deux composantes d'un système unique. Parmi les exemples de ces démarches, on peut citer une conception conjointe qui garantit l'objectif de contrôle du système et la minimisation de l'énergie de transmission sans fil, un schéma conjoint pour l'allocation des ressources radio ainsi que l'adaptation des paramètres de contrôle, une approche combinée communication-contrôle pour l'analyse de la performance et de la fiabilité, un schéma combiné de contrôle des mouvements et d'allocation des ressources.

Action MACS en cours : Commande décentralisée des systèmes multi-agents sous contraintes.

IA et MACS Les liens entre Intelligence Artificielle (IA) et MACS sont nombreux et sont amenés à prendre de l'ampleur à l'avenir. Des efforts en ce sens ont ainsi déjà été initiés par le GdR MACS notamment via la création d'un [groupe de réflexion](#) en 2020 et une [enquête](#) en 2022 pour cartographier les techniques utilisées dans la communauté en lien avec l'IA et les objets de recherche concernés. Les paragraphes intitulés "Commande basée donnée" et "Approches par noyaux pour l'identification des systèmes" de la section 1 illustrent que le domaine voit des avancées significatives récentes sur cette thématique.

L'enjeu est majeur car les deux communautés, Automatique et STP d'une part et IA de l'autre ont beaucoup à y gagner. En effet, l'Automatique et les STP peuvent tirer parti des techniques d'IA afin

d'envisager l'analyse, l'estimation, l'identification, la commande et le diagnostic de systèmes complexes (non-linéaires, incertains, variant dans le temps etc.) sans reposer pour cela sur un modèle mathématique des dynamiques mises en jeu. Cela pourrait grandement faciliter la mise en œuvre de telles techniques et ouvrir la voie à des domaines d'application pour lesquels les approches basées modèle montrent leur limites, à l'instar du transport autonome, des neurosciences et de la biologie. En contrepartie, le cœur de métier de MACS a aussi son rôle à jouer dans le développement de l'IA en apportant des garanties de stabilité, de robustesse, d'explicabilité, de validation ou de vérification pour les systèmes pilotés par des techniques d'IA. Les efforts de la communauté en optimisation et en stochastique pourraient également bénéficier aux approches d'IA, tout comme les méthodologies de boucle fermée et adaptative pour l'apprentissage par renforcement (*reinforcement learning*), ou la théorie des systèmes en réseaux pour le *cloud computing*. Ces questions soulèvent de nombreux verrous méthodologiques, qui stimuleront indubitablement de nombreux travaux de recherche dans les années à venir. Dans ce contexte, la question de la qualité des données utilisées lors de l'apprentissage et de leur impact sur le système en boucle fermée se posera nécessairement. La qualification des données (exactitude, actualité, fiabilité, disponibilité, précision, cohérence, densité (« sparsity »), réputation, interprétabilité, accessibilité, sécurité...) sera un enjeu essentiel pour assurer le bon fonctionnement des systèmes de contrôle ou de planification, ou encore, des jumeaux numériques. De façon plus générale, une plus forte intégration de l'apprentissage automatique, des jumeaux numériques et de l'expertise humaine (intégration des données, des modèles et des connaissances) sera certainement requise pour améliorer le pilotage et le contrôle des systèmes physiques.

Il sera naturel de mener ces efforts en collaboration avec le [GdR RADIA](#) en IA, le [GdR ISIS](#) en traitement du signal (qui a un de ses 5 thèmes dédié à l'IA) ainsi que le [GdR Robotique](#).

Actions MACS envisagées : (i) contrôle basé données ; (ii) méthodes d'apprentissage pour l'identification des systèmes dynamiques (à construire avec le GdR ISIS) ; (iii) réseaux de neurones pour les systèmes dynamiques : quelles garanties analytiques ? ; (iv) application du traitement automatique du langage, en lien avec le GdR TAL, dans les domaines de la maintenance prédictive et de la conduite des systèmes de production de services (dont les systèmes hospitaliers) ; (v) Apports des techniques du GdR MACS au GdR Ingénierie augmentée par la donnée, l'Apprentissage et l'IA.

Robotique Les interactions entre Robotique et Automatique sont historiques, d'ailleurs nombreux sont les membres du GdR MACS à appartenir aux deux communautés et donc au [GdR Robotique](#). Aussi, une action MACS a permis en 2022 de créer le [CT UAV](#) de la SAGIP, commun avec le [GT2 UAV](#) existant au GdR Robotique, autour des véhicules aériens autonomes. Les efforts se poursuivront sur les défis en matière de contrôle en Robotique, notamment sur la résilience, la réactivité et la reconfigurabilité des robots évoluant dans des environnements complexes, non structurés et incertains, ou sur la sécurité des opérations à proximité des humains et en interaction avec les humains.

Action MACS 2019-2023 : les outils MACS appliqués aux drones aériens.

Santé L'approche « One Health » vise à promouvoir une approche pluridisciplinaire et globale des enjeux sanitaires, pour relever les défis de la médecine 5P (prédictive, préventive, personnalisée, participative et basée sur les preuves). Pour la communauté GdR MACS, cela se traduit par des travaux en collaboration avec les structures hospitalières (CHU, ARS, etc.) et d'autres communautés scientifiques (informatique, sociologies des organisations, etc.) permettant le développement entre autre :

- de dispositifs médicaux adaptatifs et collaboratifs (robots, pré-diagnostic à distance, etc.),
- d'outils d'aide à la décision pour l'optimisation de ressources (dimensionnement des lits, Planification des activités en chirurgie, transports sanitaires, etc.),
- d'outils de prédiction (des durées de séjour PMSI, des flux d'arrivées aux urgences, etc.),
- d'outils de détection précoce (de fragilités dans le processus de prise en charge du cancer, de flux anormaux aux Urgences, etc.)
- de Jumeaux Numériques de patient ou de systèmes hospitaliers exploitant les données en temps réel.

L'action « l'automatique au service de la santé » et le comité technique GISEH (Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers) sont des exemples du fort investissement de la communauté GDR MACS sur cet enjeu, investissement qui se poursuivra ces prochaines années.

Actions MACS 2019-2023 : (i) « Epidemics : modeling, identification, control » ; (ii) l'Automatique au service de la santé : de la modélisation aux thérapies en boucle fermée.

Action MACS envisagée : application du traitement automatique du langage, en lien avec le GdR

TAL, dans les domaines de la maintenance prédictive et de la conduite des systèmes de production de services (dont les systèmes hospitaliers).

Soutenabilité et systèmes de décision éco-responsables L'action menée sur la soutenabilité des pratiques et les fruits de la recherche en conception et contrôle des systèmes sociotechniques, notamment en croisant les regards sur les enjeux associés par les chercheurs, montrent une pluralité des définitions, des hypothèses de travail et des résultats scientifiques produits en matière "d'éco-responsabilité". L'ancrage interdisciplinaire est fondamental en soutenabilité. Cependant, une hypothèse majoritairement partagée par les chercheurs est que les ressources planétaires étant limitées, il apparaît nécessaire d'intégrer ces finitudes dans les projets de recherche. En conditionnant l'habitabilité de la Terre par le respect des limites au-delà desquelles les effets systémiques engendrés augmentent les inégalités et vulnérabilités sociotechniques au sein de nos sociétés, le regard critique sur les "effets rebonds" ou transferts d'impacts négatifs potentiels des fruits de la recherche à court ou moyen terme est nécessaire. Ceci exige une certaine transparence des effets potentiellement imprévisibles et incertains des développements technologiques auxquels nous contribuons.

De manière générale, les questions posées sont : comment permettre l'émergence de pratiques soutenables par le fruit des recherches en conception et contrôles des systèmes sociotechniques supportés par les sciences et technologies de l'information ? Comment inscrire l'activité de recherche dans une démarche de soutenabilité (réflexivité, posture et éthique de l'activité du chercheur) ? Comment mobiliser et formaliser les indicateurs de soutenabilité adaptés, les méthodes d'analyses des pratiques sur ces enjeux de soutenabilité et contribuer à développer une vision critique plurielle transformant nos systèmes sociotechniques ? Plus précisément, sur le thème de la soutenabilité en sciences du numérique, l'approche « green-by-IST » considère que les systèmes développés pour optimiser les ressources, faire la prédiction, etc. permettent de construire des systèmes sociotechniques faisant partie d'une société respectant les limites planétaires. Dans cette optique, l'écoconception des systèmes est nécessaire et demande de mettre en place une analyse d'impacts environnementale dans une logique de changement d'échelle (plusieurs archétypes d'upsizing : upsizing, mass-producing, reaching a level, up and down-zooming, down-limiting, cf. Riondet et al. 2022). L'ensemble des méthodes d'écoconception de type "design for sustainability" sont à intégrer dans les processus de développement des sciences du numérique, abordant l'hétérogénéité des systèmes en fonction de la limitation de ressource disponible, l'architecture au juste besoin technologique (technodiversité du milieu, « right » technologie pour les fonctions attendues ; cela peut se traduire par un dimensionnement de capteurs et d'actionneurs au plus près du besoin, et d'une hiérarchisation des besoins prioritaires traduits dans le cahier des charges fonctionnel du système à concevoir).

Une seconde approche de "green IST" estime que les sciences et technologies de l'information font partie du problème, de par le fort impact environnemental induit par l'essor des nouvelles technologies. Cet effet rebond observé dans nos sociétés, conduisant à saturer les systèmes rendus possibles par de nouvelles fonctionnalités, ouvre des champs de recherche ancrés dans une intégration des limites (matérielles, logicielles, énergétiques, temporelles, spatiales, etc.) dès les phases amont du développement des IST, et donc, en intégrant les (futurs) parties prenantes du cycle de vie des systèmes en développement. Ainsi le cadre d'analyse critique permettant d'argumenter les risques, les menaces ou les bénéfices d'un système technologique sera essentiel pour éclairer le choix écoresponsable de poursuivre les travaux de recherche, et de renoncer à certains développements pour en favoriser d'autres. En particulier, l'approche d'analyse de soutenabilité absolue peut être pertinente à mobiliser (et à davantage développer pour l'IST, notamment au niveau des principes d'allocation). La notion de frugalité, d'adaptabilité des systèmes pour favoriser la capacité de résilience des pratiques sociales en fonction de l'évolution des infrastructures de demain et des perturbations attendues par la déstabilisation des conditions d'habitabilité de la planète (conséquences géopolitiques, allocation des ressources, etc.) s'avère un champ de recherche stimulant pour les années à venir.

Action MACS 2019-2023 : les enjeux de la soutenabilité et leurs impacts sur la recherche en conception et contrôle des systèmes techniques.

Action MACS envisagée : apports MACS au GdR Éolien, énergies marines renouvelables, hydraulique.

Références bibliographiques

- [1] G. Baggio, D.S. Bassett, and F. Pasqualetti. Data-driven control of complex networks. *Nature communications*, 12(1) :1429, 2021.

- [2] J. Berberich, J. Köhler, M.A. Müller, and F. Allgöwer. Data-driven model predictive control with stability and robustness guarantees. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 66(4) :1702–1717, 2020.
- [3] Ran Bhamra, Samir Dani, and Kevin Burnard. Resilience : the concept, a literature review and future directions. *International Journal of Production Research*, 49(18) :5375–5393, 2011.
- [4] D.A. Bristow, M. Tharayil, and A.G. Alleyne. A survey of iterative learning control. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(3) :96–114, 2006.
- [5] T. Chen. On kernel design for regularized lti system identification. *Automatica*, 90 :109–122, 2018.
- [6] Chiara Cimino, Elisa Negri, and Luca Fumagalli. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113 :103130, 2019.
- [7] J. Coulson, J. Lygeros, and F. Dörfler. Data-enabled predictive control : In the shallows of the DeePC. In *European Control Conference, Naples, Italy*, pages 307–312, 2019.
- [8] M. Fliess and C. Join. Model-free control. *International Journal of Control*, 86(12) :2228–2252, 2013.
- [9] D. Gramlich, C. Ebenbauer, and C.W. Scherer. Synthesis of accelerated gradient algorithms for optimization and saddle point problems using lyapunov functions. *Systems & Control Letters*, 165, 2022.
- [10] M. Guo, C. De Persis, and P. Tesi. Data-driven stabilization of nonlinear polynomial systems with noisy data. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(8) :4210–4217, 2021.
- [11] Young-Chae Hong and Jing Chen. Graph Database to Enhance Supply Chain Resilience for Industry 4.0 :. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 15(1) :1–19, November 2021.
- [12] P.A. Ioannou and J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [13] Dmitry Ivanov and Alexandre Dolgui. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9) :775–788, July 2021.
- [14] R. Kennedy and P. Sadeghi. *Hilbert space methods in signal processing*. Cambridge University Press, 2013.
- [15] L. Lessard, B. Recht, and A. Packard. Analysis and design of optimization algorithms via integral quadratic constraints. *SIAM Journal on Optimization*, 26(1) :57–95, 2016.
- [16] Dilupa Nakandala, Richard Yang, Henry Lau, and Samantha Weerabahu. Industry 4.0 technology capabilities, resilience and incremental innovation in Australian manufacturing firms : a serial mediation model. *Supply Chain Management : An International Journal*, 28(4) :760–772, April 2023.
- [17] Dimitri Peaucelle, Damien Trentesaux, Gülgün Alpan, Romain Postoyan, Jean Auriol, Christophe Bérenguer, Eric Bonjour, Olivier Cardin, Vincent Cheutet, William Derigent, Valérie dos Santos Martins, Sylvain Durand, Paolo Frasca, Laurent Geneste, Marion Gilson, Virginie Goepp, Mamadou Kaba Traoré, Jimmy Lauber, Michaël Di Loreto, Guillaume Mercère, Sylvie Norre, Elena Panteley, François Pérès, Petreczky Mihaly, Franck Plestan, Nacim Ramdani, Evren Sahin, Reine Talj, and Louise Travé-Massuyès. Groupement de Recherche MACS - Bilan 2019-2023 et Projet 2024-2028, October 2023.
- [18] C. De Persis and P. Tesi. Formulas for data-driven control : Stabilization, optimality, and robustness. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(3) :909–924, 2019.
- [19] G. Pillonetto, T. Chen, A. Chiuso, G. De Nicolao, and L. Ljung. *Regularized System Identification – Learning Dynamic Models from Data*. Springer, 2022.
- [20] Concetta Semeraro, Mario Lezoche, Hervé Panetto, and Michele Dassisti. Digital twin paradigm : A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130 :103469, 2021.
- [21] A. Sundararajan, B. Van Scoy, and L. Lessard. Analysis and design of first-order distributed optimization algorithms over time-varying graphs. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 1(1), 2020.
- [22] Y. Tan, W.H. Moase, C. Manzie, D. Nešić, and I.M.Y. Mareels. Extremum seeking from 1922 to 2010. In *Proceedings of the 29th Chinese control conference*, pages 14–26, 2010.
- [23] Guilherme Tortorella, Flavio S. Fogliatto, Shang Gao, and Toong-Khuan Chan. Contributions of Industry 4.0 to supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, 33(2) :547–566, April 2022.

- [24] H.J. Van Waarde, J. Eising, H.L. Trentelman, and M.K. Camlibel. Data informativity : a new perspective on data-driven analysis and control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(11) :4753–4768, 2020.
- [25] J.C. Willems, P. Rapisarda, I. Markovsky, and B.L.M. De Moor. A note on persistency of excitation. *Systems & Control Letters*, 54(4) :325–329, 2005.
- [26] Xiaochen Zheng, Jinzhi Lu, and Dimitris Kiritsis. The emergence of cognitive digital twin : vision, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 60(24) :7610–7632, 2022.