

Projet de thèse

Diagnostic énergétique multi-physique dans les systèmes mécatroniques dynamiques : de la modélisation à l'optimisation

Contexte du projet de thèse

Les systèmes mécatroniques dynamiques, intégrant des interactions complexes entre mécanique, électronique, et contrôle, sont omniprésents dans des domaines tels que la robotique, le transport ou les chaînes de production. Leur efficacité énergétique, essentielle pour réduire les coûts, augmenter la durabilité et améliorer les performances, dépend de la capacité à modéliser, analyser et optimiser les flux d'énergie. L'efficacité de ces systèmes dynamiques dépend de la gestion en temps réel des interactions suivantes :

- Entrées : commandes (forces, signaux) ou stimuli (perturbations, défauts).
- Transformations : conversion d'énergie (électrique, mécanique) via actionneurs et mécanismes multi-corps.
- Sorties : mouvements et forces adaptés à une tâche précise.

Cependant, la complexité de ces systèmes, combinée à la diversité des phénomènes physiques impliqués (mouvements mécaniques, pertes électriques, dissipation thermique), exige une méthodologie systématique pour analyser et diagnostiquer les caractéristiques énergétiques principales, telles que le stockage, dissipation et le transfert d'énergie à différentes échelles.

Cette thèse s'inscrit dans une initiative transversale menée au sein de l'INSA Rennes, dont l'ambition est de mobiliser des compétences pluridisciplinaires autour d'un projet fédérateur, à savoir le développement de la mécatronique en faveur d'une industrie durable. Ce travail de recherche adopte une approche scientifique très amont, essentielle pour établir des bases théoriques solides et des outils méthodologiques avancés. Le développement de ces connaissances permettra de constituer un socle scientifique robuste à destination des industriels pour stimuler une production industrielle intelligente en plaçant l'efficacité énergétique au cœur des priorités. En intégrant la dimension d'éco-conception, les résultats de la thèse doivent permettre de concevoir des systèmes mécatroniques dynamiques optimisés, répondant précisément aux besoins fonctionnels. L'objectif est de garantir des performances adaptées tout en réduisant la surconsommation de ressources énergétiques et matérielles, à travers une démarche centrée sur l'utilisateur et sur la durabilité.

Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est de fournir un cadre unifié et généralisable permettant de quantifier les besoins et performances énergétiques, d'identifier les pertes, et de développer des solutions d'optimisation applicables dans des environnements réels. Cette méthodologie devra inclure :

1. **Un cadre théorique** pour la modélisation multi-physique des flux énergétiques. Cela inclut :
 - Une étude actualisée des formulations énergétiques multi-physiques de partition des systèmes mécatroniques dynamiques (formulations Hamiltonienne et Lagrangienne à Ports). Il faudra capturer :
 - L'efficacité mécanique : Identification des frottements, vibrations et inefficacités dans les transmissions (engrenages, courroies, articulations), en évaluant la part d'énergie transmise par rapport à celle injectée.
 - Les pertes électriques : Pertes dans les convertisseurs d'énergie (onduleurs, variateurs).
 - Les dissipations thermiques : Analyse des pertes dues à l'échauffement des composants actifs (moteurs, capteurs, circuits électroniques).
 - L'intégration des phénomènes multi-physiques (mécaniques, électriques, thermiques) dans des modèles complets conduisant au jumeau numérique énergétique.

Ce cadre devra également permettre d'évaluer les phases transitoires, comme l'accélération ou le freinage, où les variations des flux énergétiques sont les plus significatives.

2. **Le développement d'outils d'analyse systématique** pour :
 - Quantifier et définir des indicateurs de performances énergétiques sur l'énergie utile, l'énergie perdue par dissipation, et les possibilités de récupération.
 - Cibler précisément le monitoring via des capteurs intelligents. Cette approche garantit une analyse fine et pertinente tout en évitant une instrumentation excessive et coûteuse.
3. **Des études de validation expérimentale** pour évaluer l'efficacité des solutions proposées. Les modèles théoriques et les outils développés seront testés à travers des expérimentations pratiques :
 - Application de la méthodologie d'analyse énergétique développée sur un système mécatronique représentatif de typologies mécaniques actuelles rencontrées sur des machines spéciales et en robotique - à savoir un système actionné électriquement de type pendule d'Euler présentant une liaison souple avec l'actionneur (Actionneurs avec éléments élastiques en série – SEAs) et un pendule flexible (vibrations). Ce système permet une analyse approfondie des performances dans des conditions contrôlées et avec une instrumentation modulable.
 - Études de cas industriels : En s'appuyant sur le parc machines du plateau mécanique de l'INSA Rennes (Robots industriels, machines-outils à commande numérique, machines spéciales), appliquer la méthode développée sur un ou plusieurs cas industriels.

Perspectives de recherche

Quantifier les flux d'énergie, comparer leurs ordres de grandeur, et identifier les principales sources de pertes permet de cibler précisément le monitoring avec des capteurs intelligents. Cette approche garantit une analyse fine et pertinente tout en évitant une instrumentation excessive et coûteuse. L'intégration des technologies IoT (Internet des Objets) offre une perspective intéressante pour déployer un suivi en réel de ces flux énergétiques. Couplée à des algorithmes d'intelligence artificielle (IA) basés sur des modèles multi-physiques, cette infrastructure permet non seulement de diagnostiquer les pertes mais aussi d'optimiser les performances énergétiques à travers des stratégies de contrôle avancées.

Profil recherché

Ce projet de thèse offrira au doctorant l'opportunité de développer des compétences avancées en mécatronique, avec un accent particulier sur la modélisation des systèmes dynamiques, la simulation numérique et la validation expérimentale. Il s'adresse à des candidats de niveau Master 2 ou Ingénieur en génie mécanique, mécatronique, automatique ou disciplines connexes, disposant de bases solides dans plusieurs de ces domaines et présentant un fort intérêt pour l'expérimentation et l'approche multidisciplinaire.

Contacts

Eric COURTEILLE (eric.courteille@insa-rennes.fr)

Ronan LE BRETON (ronan.le-lebreton@insa-rennes.fr)

Envoi par email d'un CV, d'une lettre de motivation et des relevés de notes des trois dernières années.