

## Titre : Modélisation et commande de robots déformables (soft robots) à base de polymères électroactifs : une approche hamiltonienne à ports

### Encadrants :

Yongxin Wu (Co-encadrant), Maître de conférences, FEMTO-ST AS2M, UBFC Besançon [yongxin.wu@ens2m.fr](mailto:yongxin.wu@ens2m.fr)  
Kanty Rabenorosoa (Co-encadrant), Maître de conférences, FEMTO-ST AS2M, UBFC Besançon [kanty.rabenorosoa@ens2m.fr](mailto:kanty.rabenorosoa@ens2m.fr)  
Yann Le Gorrec (Directeur de thèse), Professeur des Universités, FEMTO-ST AS2M, UBFC Besançon [yann.le.gorrec@ens2m.fr](mailto:yann.le.gorrec@ens2m.fr)

### Contexte :

Cette thèse se déroulera au sein du département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) de l'institut FEMTO-ST à Besançon. L'objectif de la thèse est la conception, la modélisation et la commande des robots mous à l'aide d'actionneurs de type polymères diélectriques, en utilisant le formalisme Hamiltonien à ports.

### Mots clés :

Systèmes Hamiltoniens à ports ; robots mous ; les actionneurs DEAP ; modélisation multi-physique ; synthèse de commande frugale

### Description détaillée :

Dans cette thèse on s'intéresse à la modélisation et à la commande de robot déformables, ou robots mous (soft robots) actionnés à l'aide de polymères électroactifs. Les polymères électroactifs ou Dielectric Electro-Active Polymers (DEAP) ont connu un essor tout particulier ces dernières années. Ils ont attiré l'attention de la communauté roboticienne grâce à leurs différents avantages : large déformation, réponse rapide, efficacité énergétique, matériaux à bas coût [1, 2]. De nombreuses applications en robotique utilisent ces polymères diélectriques. Les plus récentes sont : un robot insecte à faible tension d'actionnement [3], une pompe étirable pour la robotique souple [4], un préhenseur conformable exploitant l'électro-adhésion [5]. Les technologies de fabrication de ces polymères ont bien évolué [6, 7, 8] et il est maintenant possible de réaliser des électrodes flexibles par simple impression jet d'encre [9], rendant possible la réalisation de configuration complexes.

L'objectif de cette thèse est **la conception, la modélisation et la commande de structures robotiques déformables pour la prise-dépose rapide d'objets de formes variables**. La structure robotique envisagée dans un premier temps repose sur l'utilisation d'actionneurs enroulés pour le bras robotique et d'actionneurs de type HASEL pour la préhenseur conformable.

Les caractères multi-physique, non-linéaires et à paramètres distribués (le système est régi par des Équations aux Dérivées Partielles (EDP)) des systèmes étudiés motive l'utilisation du formalisme Hamiltonien à ports, tant pour la modélisation que pour la synthèse de lois de commande. En effet, le formalisme Hamiltonien à ports est particulièrement adapté pour la modélisation et la commande des systèmes multiphysiques complexes et non linéaires tels que les systèmes électro-mécaniques. Ce formalisme est basé sur le principe de conservation de

l'énergie et permet une interprétation claire et cohérente d'un point de vue physique des problèmes de synthèse de lois de commande. Initialement proposé pour les systèmes (non linéaires) ouverts de dimension finie, le formalisme Hamiltonien à ports a été étendu aux systèmes à paramètres distribués régis par des EDP dans [10]. Il a permis la représentation de phénomènes tels que la propagation d'ondes, la convection et la diffusion ainsi que de nombreux autres phénomènes répartis dans l'espace.

En ce qui concerne les propriétés dynamiques, l'approche Hamiltonienne a été avantageusement utilisée pour l'analyse du caractère bien posé et la stabilisation des systèmes linéaires à paramètres distribués dans [11, 12]. De manière identique au cas de la dimension finie, il a été démontré que les échanges internes d'énergie et les interactions avec l'environnement peuvent être représentés à l'aide d'une structure géométrique appelée structure de Dirac. Cette structure géométrique, issue d'un choix approprié des variables d'état et des variables d'effort (notamment à la frontière), reflète les propriétés énergétiques du système et les liens existant entre forces motrices, dynamique et énergie. Cette structure s'avère d'un grand intérêt lorsque l'on étudie les propriétés dynamiques du système ainsi que sa stabilité et/ou sa stabilisation. En effet, les techniques de synthèse de lois de commande pour les systèmes non linéaires et/ou à paramètres distribués utilisent principalement la théorie de Lyapunov dont les fondements reposent sur la notion d'énergie. L'approche Hamiltonienne à port est donc naturellement adaptée à ce type de synthèse. Ces dernières consistent principalement en une mise en forme de la fonction d'énergie (*Energie shaping*) ou de la puissance (*Power shaping*). Il est aussi possible de modifier la structure des équations en boucle fermée, ainsi que la fonction de dissipation, de sorte à obtenir un système dynamique au comportement désiré. Ces méthodes sont connues sous le nom d'IDA-PBC, *Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control* [13]. Elles ont été développées dans le cadre de la dimension finie et étendues récemment dans le cadre des systèmes 1D de dimension infinie contrôlés à la frontière [14]. Une première extension aux systèmes 2D et 3D contrôlés à la frontière est en cours d'étude dans [15]. Dans le cas des systèmes à paramètres distribués elles utilisent des retours d'état ou des observateurs [16,17].

## Objectifs et déroulement de la thèse :

Cette thèse a trois principaux objectifs :

- **Modélisation** : Dans un premier temps nous nous attacherons au développement de modèles fiables permettant la prise en compte du caractère multi-physique, non linéaire et à paramètres distribués de robots mous à base d'actionneurs DEAP. Les modèles seront développés pour des systèmes à base : d'actionneurs enroulés pour servir de bras robotique et d'actionneurs de type HASEL pour le préhenseur conformable.
- **Conception de robot** : Nous nous intéressons ensuite à déterminer la meilleure configuration géométrique pour la conception de robots souples dans le but principal est de maximiser les capacités d'actionnement (forces de contraction et raideur variable)
- **Synthèse de lois de commande** : Enfin, des méthodes de commande adaptées à l'approche Hamiltonienne à port seront développées dans l'objectif de répondre au cahier de charge initial tout en garantissant la minimisation de l'énergie consommée (commande frugale). Un objectif secondaire est de réaliser le robot entièrement mou le plus rapide au monde pour la prise-dépose d'objet de formes variables.

## Références :

[1] Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., & Joseph, J. (2000). High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science*, 287(5454), 836-839.

- [2] F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelrine, and P. Sommer-Larsen, Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology. Elsevier, 2008.
- [3] Ji, X., Liu, X., Cacucciolo, V., Imboden, M., Civet, Y., El Haitami, A., ... & Shea, H. (2019). An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators. *Science Robotics*, 4(37).
- [4] Cacucciolo, V., Shintake, J., Kuwajima, Y., Maeda, S., Floreano, D., & Shea, H. (2019). Stretchable pumps for soft machines. *Nature*, 572(7770), 516-519.
- [5] Shintake, J., Rosset, S., Schubert, B., Floreano, D., & Shea, H. (2016). Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators. *Advanced Materials*, 28(2), 231-238.
- [6] Qibing Pei, Marcus A. Rosenthal, Ron Pelrine, Scott Stanford, Roy D. Kornbluh, Multifunctional electroelastomer roll actuators and their application for biomimetic walking robots, Proc. SPIE 5051, Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), (28 July 2003);
- [7] Capsal, J. F., Galineau, J., Lallart, M., Cottinet, P. J., & Guyomar, D. (2014). Plasticized relaxor ferroelectric terpolymer: Toward giant electrostriction, high mechanical energy and low electric field actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 207, 25-31.
- [8] Acome, E., Mitchell, S. K., Morrissey, T. G., Emmett, M. B., Benjamin, C., King, M., ... & Keplinger, C. (2018). Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance. *Science*, 359(6371), 61-65.
- [9] Rosset, S., Araromi, O. A., Schlatter, S., & Shea, H. R. (2016). Fabrication process of silicone-based dielectric elastomer actuators. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (108), e53423.
- [10] A.J. van der Schaft and B. Maschke. Hamiltonian Formulation of Distributed Parameter Systems with Boundary Energy Flow. *Journal of Geometry and Physics*, 42:166–194, 2002.
- [11] Y. Le Gorrec, H. Zwart, and B.M. Maschke. Dirac structures and boundary control systems associated with skew-symmetric differential operators. *SIAM J. of Control and Optimization*, 44(5):1864–1892, 2005.
- [12] H. Ramirez and Y. Le Gorrec. Exponential Stability of a Class of PDE's with Dynamic Boundary Control. In: *Proceedings of the 2013 American Control Conference, Washington, USA, June 2013*, 2013.
- [13] R. Ortega, A.J. van der Schaft, B. Maschke, and G. Escobar. Interconnection and damping assignment: passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems. *Automatica*, 38(4) :585-596, 2002.
- [14] A. Macchelli, Y. Le Gorrec, H. Ramirez, and H. Zwart. On the synthesis of boundary control laws for distributed port Hamiltonian systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, (5), 2017.
- [15] V. Trenchant, Y. Fares, H. Ramirez, Y. Le Gorrec, and M Ouisse. A port-hamiltonian formulation of a 2d boundary controlled acoustic system. In *IFAC Workshop Lagrangian and Hamiltonian Methods for Non Linear Control*, July 2015.
- [16] Toledo, J., Wu, Y., Ramirez, H., Le Gorrec, Y. Observer-based Control by Interconnection of Distributed Parameter Systems. *IFAC-PapersOnLine* Volume 52, Issue 2, 2019, Pages 114-119
- [17] Y. Wu, B. Hamroun, Y. Le Gorrec, and B. Maschke. Reduced order LQG control design for port Hamiltonian systems *Automatica* (Volume 95, may 2018, Pages :86 - 92)