

Proposition de sujet de thèse, Campagne 2018, ED-EEA

Approche thermodynamique pour la commande des systèmes multiphasiques : application à une pompe à chaleur

• Partie I :

- **Etablissement d'inscription** : Université Claude Bernard Lyon 1
- **École doctorale** : ED 160 EEA de Lyon
- **Intitulé du doctorat** : Automatique
- **Sujet de la thèse** : Approche thermodynamique pour la commande des systèmes multiphasiques : application à une pompe à chaleur
- **Unité de recherche** : LAGEP UMR5007
- **Directeur de thèse** : Pr. Bernhard Maschke

• Partie II

- Domaine et contexte scientifiques

Ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre des activités de recherche que mène l'équipe DYCOPI sur la modélisation et la commande des systèmes énergétiques complexes pour lesquels le formalisme des systèmes hamiltoniens à ports est particulièrement bien adapté.

Ce formalisme représente par des éléments distincts, le comportement énergétique des composantes élémentaires du procédé ainsi que celui des échanges de puissance entre composantes [2,17,18]. Ce formalisme a déjà été mis en œuvre pour l'étude de systèmes monophasiques en dimension finie et infinie, plus particulièrement des réacteurs chimiques pour lesquels des synthèses de commande basées sur la passivité ou basées sur l'approche de Lyapunov en utilisant des fonctions thermodynamiques comme fonctions candidates de Lyapunov ont été développées [3,19]. Cependant ce type d'étude n'a pour l'instant été mené sur des systèmes multiphasiques.

Le sujet de thèse proposée aborde donc cette étude par le biais d'un système énergétique particulier: une pompe à chaleur. Ce système est de nature multiphasiques puisque l'évaporateur et le condenseur présents dans le procédé font subir au fluide frigorigène des changements de phase allant de la phase fluide à la phase vapeur et vice versa. La commande de ces changements de phase est cruciale pour le fonctionnement de la pompe à chaleur.

De plus la pompe à chaleur est un élément essentiel dans de nombreux systèmes énergétiques pour assurer un confort thermique. Elle peut être aussi couplée à des modules de stockages d'énergie thermique dans le cas des bâtiments tertiaires à basse consommation énergétique dont l'équipe DYCOPI a l'expérience par le projet ANR ACLIRSYS (ANR SEED, ANR-11-SEED-0004-02, 2012- 2016) [1,10].

- Mots-clefs : pompe à chaleur, systèmes multiphasiques, frontières mobiles, réduction de modèles, commande non-linéaire, commande passive, Système hamiltonien à port
- Objectifs de la thèse

La pompe à chaleur est composée de quatre éléments : le compresseur, la vanne de détente, l'évaporateur et le condenseur. Le compresseur et la vanne de détente sont généralement modélisés par des relations statiques. L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs thermiques où se produisent des phénomènes de transitions de phases du fluide frigorigène. Ces échangeurs peuvent

avoir au maximum trois zones spatiales distinctes correspondant au phase liquide, diphasique et vapeur [8]. Ce phénomène est très complexe et fait intervenir des propriétés thermodynamiques fortement non linéaires.

Il existe dans la littérature un modèle connu sous le nom de « modèle à frontières mobiles » (voir [11]) qui permet de représenter les trois zones supposées préexistantes. Chacune des zones est composée d'un seul compartiment homogène de volume variable, est décrite par des équations différentielles ordinaires sur des quantités moyennées. Ce modèle a été étendu par des variables d'état discrètes de manière à traiter le cas d'apparition ou de disparition de zone [12]. Ce modèle a très largement servi pour la synthèse de lois de commande car il présente l'avantage d'être un modèle de complexité réduite [7,8,13,14,15]. Cependant ce modèle est trop imprécis pour une représentation causalement juste des phénomènes et l'objectif de la thèse est de proposer un modèle de dimension infinie à interface mobile pour la modélisation des échangeurs et la commande de la pompe à chaleur.

Les objectifs dans cette thèse se déclinent en trois parties :

- **Modélisation** : Il s'agit d'écrire un modèle de dimension infinie à interfaces mobiles d'un échangeur thermique en utilisant le formalisme hamiltonien à port développé dans [2]. Ce modèle sera basé sur des lois bilans de matière et d'énergie écrits dans le contexte de la thermodynamique irréversible. Ces bilans seront complétés par le bilan d'entropie.
- **Réduction structurée de modèle pour la commande** : pour les objectifs de synthèse de lois de commande, il est nécessaire de définir un modèle dynamique de complexité réduite qui conserve les propriétés thermodynamiques du système [4]. Pour cela les méthodes de discrétisation, préservant la structure des systèmes hamiltoniens à port [5,6,9] seront généralisées aux systèmes à domaine spatial variable. Les résultats pourront être comparés et validés en utilisant le simulateur d'un système réel, développé dans le cadre du projet ANR ACLIRSYS (ANR SEED, ANR-11-SEED-0004-02, 2012- 2016) [1,10].
- **Commande d'une pompe à chaleur** : L'objectif est de synthétiser des lois de commande non-linéaire du système complet de la pompe à chaleur sur la base du modèle hamiltonien à port développé par des méthodes de commande passive telles que IDA-PBC en utilisant des fonctions thermodynamiques telles que la disponibilité thermodynamique [16,18,19,20].

- Verrous scientifiques

Les verrous scientifiques se situent au niveau des 3 parties :

- **Modélisation** : Il n'existe aucun modèle en dimension infinie avec interfaces mobiles concernant l'évaporateur et le condenseur. Seuls des modèles moyennés de dimension finie existent [11,12]. La caractérisation de ces interfaces mobiles par des lois constitutives est un verrou important.
- **Réduction de modèle structurée pour la commande** : Par rapport au modèle à frontières mobiles existant, l'enjeu est de définir un schéma avec plus d'un seul compartiment par zone afin de définir d'une manière causale les relations aux interfaces. Par ailleurs un autre verrou qu'il faut lever concerne les propriétés du maillage spatial afin de tenir compte des frontières mobiles de chaque zone.
- **Commande d'une pompe à chaleur** : Le principal verrou concerne le choix de l'Hamiltonien ou de la fonction de Lyapunov pour chacun des systèmes multiphasiques.

- Contributions originales attendues

Les contributions originales se situent au niveau des 3 parties :

- **Modélisation** : Le travail consiste à trouver les équations constitutives des deux frontières mobiles donnant leurs positions en se basant sur les différents bilans et les propriétés thermodynamiques. Ce modèle à frontières mobiles sera écrit sous forme structurée en utilisant la formulation hamiltonienne à ports qui permet naturellement d'écrire les propriétés conservées dans le système [18].
- **Réduction de modèle structurée pour la commande** : c'est une des perspectives importantes de ce travail qui consiste à combiner les méthodes de réduction et de discrétisation géométrique des systèmes d'équations de bilan avec frontières mobiles.
- **Commande d'une pompe à chaleur** : Généralisation aux systèmes multiphasiques des méthodes de synthèse de commande basées sur la disponibilité thermodynamique [3,19]. Pour un système homogène (une seule phase), cette dernière est définie à partir de la fonction d'entropie qui satisfait une propriété de concavité qui induit la positivité et la convexité de la disponibilité thermodynamique et donc son utilisation comme fonction de Lyapunov pour la synthèse de lois de commande (voir [19] par exemple). Par contre, pour un système multiphasique cette propriété n'est plus vérifiée d'où la nécessité de généraliser cette disponibilité thermodynamique aux cas multiphasiques.

- Programme de recherche et démarche scientifique proposée

Le programme de recherche suivra le plan développé dans la partie Objectif de la thèse :

- Le développement du modèle en dimension infinie à frontières mobiles avec la caractérisation des interfaces mobiles par des relations constitutives
- La réduction structurée sur le modèle EDP obtenu en utilisant des méthodes des méthodes qui conservent les propriétés thermodynamiques et géométriques des systèmes (voir [9,5] par exemple). Le modèle réduit va être validé en comparant les dynamiques de certains scénarios de simulation avec ceux donnés par le simulateur développé au cours du projet ACLIRSYS [1].
- La synthèse de commande et validation sur le simulateur de la pompe à chaleur

- Encadrement scientifique :

Directeurs de thèse et comité d'encadrement

Directeur de thèse : Bernhard Maschke – bernhard.maschke@univ-lyon1.fr

Co-Encadrants de thèse : Boussad Hamroun – boussad.hamroun@univ-lyon1.fr

Bernhard Maschke apportera son expertise sur les systèmes hamiltoniens à port en dimension infinie avec interface mobile [2] et leur réduction structurée.

Boussad Hamroun interviendra pour la synthèse de commande, en particulier la synthèse de commande passive [20] et apportera son expérience sur la modélisation des pompes à chaleur.

Pourcentages d'implication : Bernhard Maschke 50% Boussad Hamroun 50%.

- Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s) (Département/Equipe(s) impliquée(s))
(pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s))

Le doctorant participera aux travaux de l'équipe de recherche « Dynamique des Procédés et commande à base de lois de conservation » DYCOPI. Cette équipe mixte (automatique et génie des procédés) est formée de 6 enseignants-chercheurs et de 2 chargées de recherche. Elle vise à

développer des travaux à l'interface entre l'Automatique non-linéaire, la commande des systèmes à paramètres distribués et le Génie des Procédés.

- Financement de la thèse (origine, employeur, montant, durée du financement, etc.)
- Profil du candidat recherché (prérequis)

Le ou la candidat(e) devra posséder de solides connaissances en Automatique non-linéaire et s'intéresser à la modélisation des systèmes.

- Compétences qui seront développées au cours du doctorat

Le candidat développera lors de ce doctorat des compétences fortes aussi bien en Automatique que dans le domaine de l'énergétique. Ce sujet est d'actualité et constitue cette année un des axes prioritaires de l'ANR.

- Perspectives professionnelles après le doctorat

Les outils et méthodes développés pourraient permettre au candidat d'envisager aussi bien une carrière dans la recherche que dans l'industrie.

- Références bibliographiques sur le sujet de thèse

- [1] Wu, J., Gagnière, E., Couenne, F., Hamroun, B., Latour, T., Jallut, C. (2015). A hybrid transient model for simulation of air-cooled refrigeration systems: Description and experimental validation. *International Journal of Refrigeration*, 53, 142-154.
- [2] Diagne, M., & Maschke, B. (2013). Port Hamiltonian formulation of a system of two conservation laws with a moving interface. *European Journal of Control*, 19(6), 495-504.
- [3] Zhou, W., Hamroun, B., Le Gorrec, Y., & Couenne, F. (2015). Lyapunov Based Nonlinear Control of Tubular Chemical Reactors. *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, ADCHEM, IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 1045-1050.
- [4] A.C.Antoulas. *Approximation of Large-Scale Dynamical Systems*. Philadelphia, 2005.
- [5] G. Golo, V. Talasila, A.J. van der Schaft, and B.M. Maschke. Hamiltonian discretization of boundary control systems. *Automatica*, 40 :757–771, 2004.
- [6] Wu, Y., Hamroun, B., Le Gorrec, Y., Maschke, B., Port Hamiltonian System in Descriptor Form for Balanced Reduction: Application to a Nanotweezer. In : *Proc. 19th IFAC World Congress, South Africa*. 2014.
- [7] Shah, R., P Rasmussen, B., & Alleyne, A. G. (2004). Application of a multivariable adaptive control strategy to automotive air conditioning systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 18(2), 199-221.
- [8] López-Quiroga, E. (2014). Operational models for real time applications of nonlinear and moving boundary process distributed systems. Phd Thesis, URL: <http://hdl.handle.net/10261/102429>
- [9] Harkort, C., & Deutscher, J. (2012). Stability and passivity preserving Petrov–Galerkin approximation of linear infinite-dimensional systems. *Automatica*, 48(7), 1347-1352
- [10] J. Wu, B. Tremeac, M.-F. Terrier, M. Charni, E. Gagnière, F. Couenne, B. Hamroun, and C. Jallut, "Experimental investigation of the dynamic behavior of a large-scale refrigeration–pcm energy storage system. validation of a complete model," *Energy*, vol. 116, pp. 32–42, 2016.
- [11] Rasmussen, B., 2005. "Dynamic Modeling and Advanced Control of Air Conditioning and Refrigeration Systems". PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign
- [12] Bin Li, Andrew G. Alleyne, A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations, *International Journal of Refrigeration*, Volume 33, Issue 3, 2010, Pages 538-552, ISSN 0140-7007

- [13] Herschel C. Pangborn, Andrew G. Alleyne, Switched linear control for refrigerant superheat recovery in vapor compression systems, *Control Engineering Practice*, Volume 57, 2016, Pages 142-156, ISSN 0967-0661
- [14] Guillermo Bejarano, José A. Alfaya, Manuel G. Ortega, Manuel Vargas, On the difficulty of globally optimally controlling refrigeration systems, *Applied Thermal Engineering*, Volume 111, 2017, Pages 1143-1157, ISSN 1359-4311,
- [15] N. Jain and A. G. Alleyne, "Thermodynamics-based optimization and control of vapor-compression cycle operation: Optimization criteria," *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, San Francisco, CA, 2011, pp. 1352-1357. doi: 10.1109/ACC.2011.5991005
- [16] M. Razmara, M. Maasoumy, M. Shahbakhti and R. D. Robinett, "Exergy-based model predictive control for building HVAC systems," *2015 American Control Conference (ACC)*, Chicago, IL, 2015, pp. 1677-1682. doi: 10.1109/ACC.2015.7170974
- [17] Françoise Couenne, Christian Jallut, Bernhard Maschke, Melaz Tayakout, Peter Breedveld, Structured modeling for processes: A thermodynamical network theory, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 32, Issue 6, 2008, Pages 1120-1134, ISSN 0098-1354
- [18] Duindam, V., Macchelli, A., Stramigioli, S., & Bruyninckx, H. (Eds.). (2009). *Modeling and control of complex physical systems: The Port-Hamiltonian approach*. Springer Science & Business Media.
- [19] H. Hoang, F. Couenne, C. Jallut, Y. Le Gorrec. Lyapunov-based control of non-isothermal continuous stirred tank reactors using irreversible thermodynamics. *Journal of Process Control*, Volume 22 issue 2, 2012, Pages 412-422, DOI :10.1016/j.jprocont.2011.12.007, 2012.
- [20] B. Hamroun, A. Dimofte, L. Lefevre, E. Mendes, Control by Interconnection and Energy-Shaping Methods of Port Hamiltonian Models. Application to the Shallow Water Equations, *European Journal of Control*, Lavoisier, 2010, 16 (5), pp.545 - 563. 10.3166/ejc.16.545-563.