

Actes de la Journée MIS 2013

Olivier Poirion (directeurs : L. Krähenbühl & B. Lafay)

TIGre : Modélisation de la Transmission de l'Information Génétique héréditaire chez les bactéries à génomes multipartites

Delphine Paquereau (directeurs : E. Niel & L. Piétrac ; Thalès : L. Bouresche)

Application de la théorie du contrôle par supervision à la gestion automatique du trafic d'une ligne de métro

Sérine Damak (directeurs : X. Brun & M. Di Loreto)

Approximation de systèmes à paramètres répartis : Analyse, simulation et commande

Hoang Giang Vu (inscrit au LAGEP, H. Hamoui ; co-directeur H. Yahoui)

Diagnostic of double feed asynchronous wind generator

Thiago Caetano-Ferreira (directeur : E. Bideaux & F. Sixdenier & S. Sesmat)

Electrovanne pneumatique ultrarapide

Aurélien Lièvre (directeur : P. Venet & A. Sari ; IFSTTAR : S. Pelissier ; Valeo : D. Benchetrite, M. Ouattara)

Système de management de batterie Li-ion pour applications hybrides

Said Aoues (directeur : Prof. W. Marquis-Favre & D. Eberard)

Schéma de discrétisation préservant l'énergie dans le formalisme hamiltonien

Khoa Duc Nguyen (directeur : E. Bideaux & M.-T. Pham ; Volvo : P. Le Brusq)

Stability and Electrical Energy management of vehicle network including management of auxiliaries

Karla Quintero (directeur : E. Niel ; ULA Mérida, Venezuela : J. Aguilar)

Recherche d'alignements dans une gestion de maintenance prédictive: application aux réseaux de pipelines pétrole-gaz

Salvador Sermeno Mena (directeur : E. Bideaux ; Volvo : T. Morgan)

Vehicle thermal management control systems

Discrétisation des SHP et synthèse de lois de commande discrètes.

Said Aoues, Damien Eberard et Wilfrid Marquis-Favre

I. CONTEXTE GÉNÉRAL

Dans le domaine de l'automatique, l'étude des phénomènes physiques comporte trois aspects importants : la formulation d'un modèle mathématique, la synthèse de lois de commande et la simulation numérique pour le modèle considéré.

Remplacer un système physique par un modèle mathématique est une étape cruciale dans le domaine de la modélisation. Une façon de faire est de l'exprimer en termes d'échanges d'énergie. C'est l'idée générale de la *formulation hamiltonienne*, plus précisément les Systèmes Hamiltoniens à Ports notés SHP (approche entrées/sorties). Cette approche a montré un très grand intérêt dans le domaine de la modélisation car elle permet de décrire d'une manière naturelle la structure physique et les propriétés fondamentales du système telles que : les lois de conservation, les invariants, ... etc.

Cette approche a été étendue aux systèmes dynamiques plus complexes à paramètres répartis (décrite par les équations aux dérivées partielles) notées EDP. En ingénierie, leur étude est essentielle pour répondre à un cahier des charges de plus en plus exigeant (performances dynamique, énergétique, etc.). L'étude des EDP, de par leur complexité, est une tâche difficile due à la dépendance *en temps* et *en espace*. Les méthodes d'approximation sont un moyen de simplifier la représentation des EDP et, par conséquent, leur étude.

Récemment, il a été montré dans certains travaux que cette approche est également pertinente aussi pour faire de la synthèse de lois de commandes non-linéaires basées sur la notion de passivité. C'est l'idée de la commande IDA-PBC (Injection Damping Assignment-Passivity Based Control). Cette technique est décomposée en deux parties essentielles, la première s'appelle *modelage d'énergie* (energy shaping notée u_{es}), permet de façonner la structure interne désirée du système. La deuxième partie s'appelle injection de l'amortissement (damping injection notée $u_{di} = -Ky$) permet de stabiliser et d'améliorer la convergence vers le point d'équilibre désiré.

Une propriété forte de ces SHP utilisée pour faire de la modélisation et de la commande, est qu'elle est stable

Laboratoire Ampère, UMR CNRS 5005, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 25 Avenue Jean Capelle, 1^{er} étage Bâtiment Saint-Exupéry, 69621 Villeurbanne, France. E-mail:said.aoues, damien.eberard, wilfrid.marquis-favre @insa-lyon.fr

par composition. Du point de vue de la modélisation, l'interconnexion de deux SHP donne un SHP augmenté pour lequel les propriétés de ces deux SHP peuvent être à nouveau utilisées dans le SHP global. Du point de vue de la commande, cette interconnexion peut être vue comme étant un bouclage d'un système avec son contrôleur, souvent utilisée pour faire de la commande par interconnexion.

Dans le contexte qui vient d'être présenté, mes travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre d'un projet ANR JCJC intitulé "Approximation of Distributed Parameter Systems". Ce projet a pour ambition de développer des outils et des méthodes pour l'approximation des systèmes à paramètres localisés (EDO) et répartis (EDP) en vue de l'analyse, la commande (type IDA-PBC) et la simulation numérique de ces systèmes.

II. OBJECTIF ET PROBLÉMATIQUE

Que ce soit d'un point de vue théorie de contrôle ou d'un point de vue d'analyse numérique, il est donc nécessaire de convertir les systèmes continus à des systèmes discrets, qui peuvent être facilement implémentés sur les machines de calculs pour des objectifs différents tels que : la simulation numérique et la synthèse de lois de commande. En général, même si le modèle en temps continu est connu, nous ne pouvons pas toujours calculer sa solution analytique. Par conséquent, pour résoudre ce problème, un modèle approché obtenu avec un schéma numérique est utilisé à sa place.

Souvent, ce passage du continu au discret se fait avec des méthodes standards comme Euler, Runge-kutta,...etc, qui sont incapables de préserver les propriétés des systèmes continus. Pour palier à ce problème, de nombreux schémas numériques ont été développés par la communauté des numériques, voir par exemple [1], [2], [4], [9], [10],[11]. Les études entreprises par cette communauté concernent de façon générale les systèmes fermés, dans le sens où les systèmes étudiés ne possèdent pas de variables de port (systèmes sans entrées/sorties). Autrement dit, cette communauté s'intéresse particulièrement à la résolution et à la simulation numérique sans se préoccuper de la synthèse de lois de commande.

Afin d'illustrer la problématique, on considère la dynamique de l'oscillateur d'impact donnée par les équations

$$\begin{cases} \dot{q} = p \\ \dot{p} = -0.15 q + \frac{2}{q^3} \end{cases} \quad (1)$$

où q représente le déplacement généralisé et p représente le moment généralisé.

Ces résultats ont été obtenus par deux méthodes numériques (schéma A correspond à un schéma d'Euler et B correspond à un schéma énergétique) à un pas fixe $\Delta t = 0.25s$ et les mêmes conditions initiales $(q_0, p_0) = (4, -2)$.

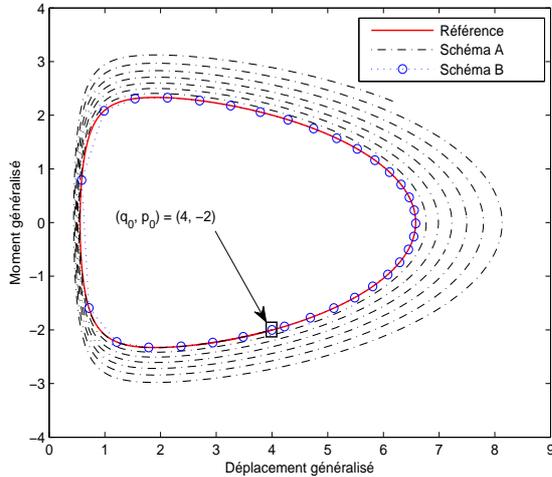


Fig. 1. Diagrammes des phases ($q \times p$)

A priori, les deux trajectoires obtenues avec le schéma A et B devraient être confondues avec la trajectoire référence, mais malheureusement on observe une nette différence. Cela revient au fait que le schéma B préserve certaines propriétés du système (1) que le schéma A ne préserve pas. La trajectoire obtenue avec le schéma A accumule des erreurs à chaque pas de discrétisation Δt . On observe alors une dérive de la trajectoire qui s'écarte de la référence. A l'inverse, la trajectoire obtenue avec le schéma B reste stable.

Dans les dernières décennies, ce problème a été abordé par la communauté automatique de différentes façons dans le but de faire de la synthèse discrète. Parmi eux, ceux qui s'intéressent à une approche purement géométrique où la simulation est faite avec les méthodes standards (Solver Matlab, ODE45 et autres), voir [14], [15]. D'autres, qui s'intéressent à l'échantillonnage, voir [13],[12]. En 2006, D.S Laila et A. Astolfi ont présenté une nouvelle approche purement discrète des SHP, voir [7] pour plus de détails. Dans leurs démarche, les auteurs se sont basés sur un gradient discret proposé par Gonzalez en 1996 [3]. Ils ont mentionné aussi "que les propriétés discrètes sont conservées à une erreur près".

Ces travaux ont été étendus pour faire de la synthèse de la commande IDA-PBC discrète. On trouve dans [16] une nouvelle approche IDA-PBC échantillonnée. Dans ce travail, la commande échantillonnée a été conçue à partir de la solution IDA-PBC en temps continu. Dans le cas discret

[6], [8] ont montré que la discrétisation des SHP joue un rôle important pour faire la synthèse de type IDA-PBC discrète. Les résultats sont très performants en les comparant avec le contrôleur standard (émulé) où le contrôleur a été conçu par une discrétisation directe du contrôleur continu. Malgré leurs performances, ces travaux restent insuffisant et fortement limités vu qu'ils ne préservent pas les propriétés de base de cette approche. Pour un pas de discrétisation un peu élevé, l'erreur accumulée durant cette intervalle va être importante ce qui peut déstabiliser le système en boucle fermée et détruire les propriétés fondamentales des SHP discrets.

Ce problème reste un défi, à la fois pour l'Automatique que pour l'Analyse Numérique.

Il apparaît donc nécessaire d'adapter un schéma numérique pour, d'une part, discrétiser les SHP et d'autre part, préserver les propriétés fondamentales pour faire de l'analyse et de la synthèse discrète dans le cas des systèmes décrits par des EDO et les systèmes décrits par des EDP.

D'où nos travaux de recherches que je présenterai un peu plus en détails dans ce qui suit.

III. CONTRIBUTIONS

Au début de ma thèse, mon travail s'est concentré sur l'étude de schémas numériques appliqués sur des systèmes fermés (sans entrées/sortie) afin de les adapter sur les systèmes ouverts (avec entrées/sorties). En se basant donc sur le gradient discret proposé par Itoh dans [5] et en modifiant la sortie de port discrète nous avons développé une nouvelle approche discrète des SHP tout en conservant exactement le bilan de puissance discret (l'énergie, la passivité et la stabilité) indépendamment du pas de discrétisation Δt . Ce point constitue une première contribution de mes travaux.

Suite à cela, nous avons étudié la stabilité des SHP discrets et nous avons montré que l'énergie globale de la dynamique discrète proposée est l'une des bonnes fonctions de Lyapunov (comme dans le cas continu) ce qui simplifie l'étude de la stabilité (pas besoin de chercher la fonction de Lyapunov discrète). Ensuite, nous avons montré que la propriété d'interconnexion discrète est exactement conservée lors de la discrétisation. Ce résultat dans le cas SHP linéaire à été soumis à la conférence CDC puis il a été généralisé au cas non-linéaire. Cette interconnexion a été très utilisée dans le domaine de la téléopération pour modéliser et commander des systèmes en interactions. Malheureusement, dans la pratique cette interconnexion se fait toujours avec des retards en temps. Autrement dit, l'information envoyée par le contrôleur n'arrive pas au bon moment au système. La stabilité et la structure des SHP en boucle fermée (interconnectés) sont perdues sous l'effet des retards. Pour palier à cela, d'autres fonctions d'énergie au sens de Lyapunov-Krasovskii ont été choisies pour trouver les

conditions de stabilité. Enfin, ce problème a été reformulé sous forme LMI dans notre étude.

Nous avons étendu nos résultats pour faire de la commande IDA-PBC discrète tout en conservant le bilan de puissance. Une partie de ces résultats (énergie séparable) ont été soumis et acceptés par la conférence Nolcos 2013 où la comparaison avec les résultats de la littérature a été faite. Enfin, ce résultat a été généralisé sur des SHP complexes non-linéaires.

Dans ce rapport, nous présentons juste la contribution au niveau de la commande IDA-PBC discrète traitée dans notre article (soumis et accepté par la conférence Nolocos).

Afin de bien comprendre la différence avec les résultats de la littérature, on prend l'exemple de l'oscillateur harmonique non-linéaire où la commande IDA-PBC intervient uniquement sur le moment généralisé p . Cet exemple a été traité au préalable dans la littérature, voir [6], [8] pour plus de détails.

Soit $H(q, p)$ l'énergie du système en boucle ouverte donnée par

$$H(q, p) = \frac{1}{2}p^2 - \cos(q). \quad (2)$$

le SHP continu est donné par la dynamique suivante

$$\begin{cases} \dot{q} = p \\ \dot{p} = -\sin(q) + u(t) \\ y = p \end{cases} \quad (3)$$

l'énergie désirée en boucle fermée est fixée comme suit

$$H_d(q, p) = \frac{1}{2}p^2 - \cos(q) + \frac{1}{2}q^2 + 1. \quad (4)$$

Après calcul, la commande IDA-PBC en temps continu est donnée par

$$\begin{aligned} u_{es}(t) &= 0.35 \sin(q(t)) + \frac{1}{2q(t)} + \frac{3}{2} \\ \text{and} \\ u_{di}(t) &= -K_{di}y(t) = -K_{di}p(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Pour plus d'informations concernant le contrôleur discret proposé dans la littérature, voir [6], [8].

Dans un premier lieu, nous considérons uniquement le contrôleur u_{es} (la partie stabilisante est nulle u_{di}). Le système en boucle fermée est censé préserver son énergie désirée (énergie globale), donc le bilan de puissance doit être nul $\Delta H_d = 0$. La Figure (2) représente l'évolution de l'énergie désirée H_d au cours du temps t obtenue avec différents contrôleurs.

On observe clairement que la trajectoire obtenue avec le contrôleur émulé diverge directement ce qui implique l'instabilité en boucle fermée. La trajectoire obtenue avec le contrôleur proposé dans la littérature diverge mais avec une vitesse faible par rapport à celle obtenue avec le contrôleur émulé, d'où leur contribution. Tandis que l'énergie désirée discrète $H_d(n)$ obtenue avec le contrôleur proposé reste

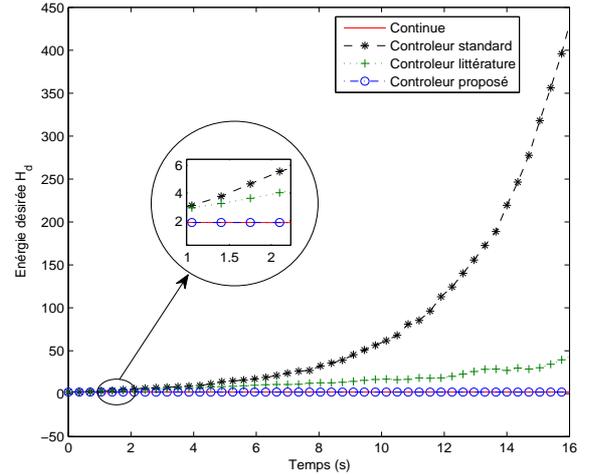


Fig. 2. Évolution de l'énergie H_d

stable elle se superpose exactement à la trajectoire obtenue avec le contrôleur continu considérée comme référence dans ce rapport. La différence s'explique du fait que le contrôleur émulé et celui proposé dans la littérature ne conservent pas exactement le bilan de puissance de la boucle fermée $\Delta H_d(n) \neq 0$. En revanche, le contrôleur proposé conserve exactement le bilan de puissance $\Delta H_d(n) = 0$ quelque soit le pas de discrétisation $\Delta t \neq 0$.

En second lieu, nous considérons tous les contrôleurs IDA-PBC $u = u_{es} + u_{di}$ avec $u_{di} = -K_{di}y$. Ici, l'objectif est de comparer la vitesse de convergence des différentes trajectoires vers le point d'équilibre désiré (ici l'origine). La Figure (3) montre le diagramme de phase ($q \times p$) obtenu avec différents contrôleurs discrets.

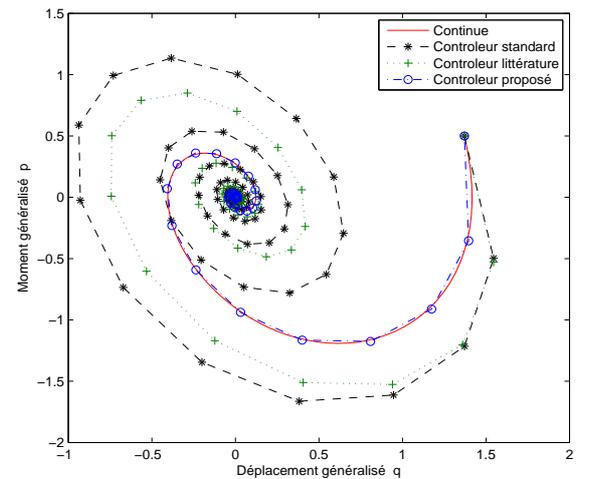


Fig. 3. Diagrammes des phases ($q \times p$)

On remarque que toutes les trajectoires convergent vers le point d'équilibre désiré. Par contre, leurs vitesses de convergence sont différentes. La trajectoire obtenue avec le contrôleur proposé dans la littérature est quasi proche de la référence par rapport avec celle obtenue avec le contrôleur émulé. En revanche, la trajectoire obtenue avec le contrôleur proposé converge exactement de la même manière que la référence (même vitesse de convergence). La seule raison pour laquelle les trajectoires obtenues avec le contrôleur émulé et celui de la littérature restent stable, est le fait que la partie stabilisante $u_{di} = -K_{di}y$ arrive à compenser l'erreur commise par ces deux contrôleurs.

Une question naturelle apparaît : que se passerait-il si on choisit une commande $u_{di} = -K_{di}y$ avec un gain K_{di} faible ?, la réponse est dans la Figure (4) ci-dessous,

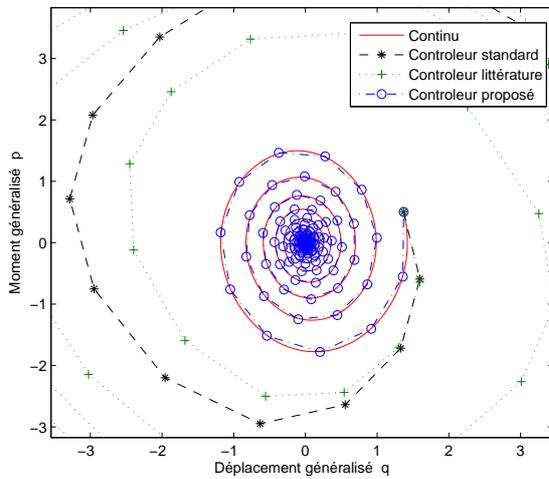


Fig. 4. Diagrammes des phases ($q \times p$)

D'après la Figure (4), on voit clairement que les trajectoires obtenues avec le contrôleur émulé et celui de la littérature divergent car le commande stabilisante u_{di} n'arrive pas à compenser l'erreur numérique commise avec ces deux contrôleurs. Contrairement au contrôleur proposé qui assure la stabilité et la vitesse de convergence exactement comme la référence. On constate que la vitesse de convergence devient plus faible, mais la trajectoire obtenue avec le contrôleur proposé suit exactement la trajectoire continue.

Cette commande discrète a été étendue sur des systèmes complexes non-linéaires décrits par des EDP. La démarche de ce travail en cours est énoncée dans la section suivante.

IV. PERSPECTIVES

En ce qui concerne les travaux en cours, nous avons commencé à étudier des SHP non-linéaires décrits par les systèmes à paramètres répartis, d'une part pour avoir une dynamique discrète des SHP tout en respectant les propriétés

fondamentales de ces systèmes, et d'autre part, pour faire de la synthèse de lois de commande discrètes de type IDA-PBC.

La démarche formelle suivie dans notre études concernant la discrétisation de ces systèmes est composée de 3 parties essentielles suivantes :

- Semi-discrétisation (discrétisation en espace) pour avoir un ensemble d'EDO.
- Discrétisation en temps en utilisant nos résultats développés dans le cas des SHP décrits par des EDO.
- Définition de variables de ports pour préserver le bilan de puissance discret.

En simulation, le bilan de puissance est conservé avec une perte de l'ordre de 10^{-16} . Cette dynamique est utilisée pour faire de la synthèse de lois de la commande IDA-PBC.

A titre d'exemple, nous avons commandé une équation d'onde non-linéaire (EDP 1D) donnée par

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} - \alpha \sin(x), \quad x = x(z, t) \quad (6)$$

Où : z correspond à la variable d'espace.

En utilisant la commande IDA-PBC, les résultats en boucle fermée sont présentés dans la Figure (5).

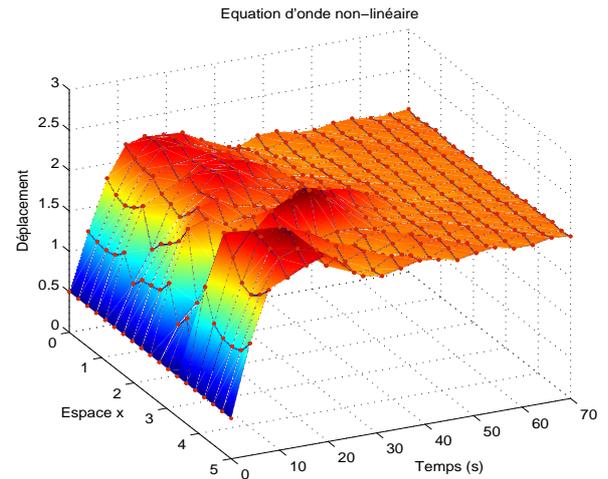


Fig. 5. Position de l'onde en 3D

La position initiale de l'onde est de $X_0 = 0.5$ et nous avons fixé une consigne à $X_{ref} = 2$. On observe que le système bouclé atteint sa consigne. A notre connaissance ce type de résultat n'existe pas dans la littérature.

Maintenant, il reste à finaliser ce premier résultat et l'étendre sur des EDP 2D et 3D.

REFERENCES

- [1] A. Bossavit. *Computational Electromagnetism*. Academic Press, 1998.
- [2] T.J. Bridges. Canonical multi-symplectic structure on the total exterior algebra bundle. *Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 462 :1531–1551, 2006.

- [3] O. Gonzalez. Time integration and discrete Hamiltonian systems. *Nonlinear Science*, 6 :449–467, 1996.
- [4] E. Hairer. Variable time step integration with symplectic methods. *Appl. Numer. Math.*, 25 :219–227, 1997.
- [5] T. Itoh and K. Abe. Hamiltonian-conserving discrete canonical equations based on variational difference quotients. *Journal Comput. Phys*, 77 :85–102, 1998.
- [6] D.S. Laila and A. Astolfi. Discrete-time IDA-PBC design for separable Hamiltonian systems. In *16th IFAC World Congress, Prague.*, 2005.
- [7] D.S. Laila and A. Astolfi. Construction of discrete-time models for port-Hamiltonian systems with application. *Systems & Control Letters*, 55 :673–680, 2006.
- [8] D.S. Laila and A. Astolfi. Discrete-time IDA-PBC design for underactuated Hamiltonian control systems. In *American Control Conference*, 2006.
- [9] B. Leimkuhler and S. Reich. *Simulating Hamiltonian Dynamics*. Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics, 2005.
- [10] J.E. Marsden, G.W. Patrick, and S. Shkoller. *Multisymplectic Geometry, Variational Integrators, and Nonlinear PDEs*. Communications in Mathematical Physics, 1998.
- [11] R.I. McLachlan, M. Perlmutter, and G.R.W. Quispel. Lie group foliations : dynamical systems and integrators. *Future Generation Computer Systems*, 19 :1207–1219, 2003.
- [12] S. Monaco, D. Normand-Cyrot, and F. Triefensee. Sampled-data stabilization : a pbc approach. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 56 :907–912, 2011.
- [13] S. Stramigioli, C. Secchi, A. J. van der Schaft, and C. Fantuzzi. Sampled data systems passivity and discrete port-hamiltonian systems. *IEEE Transaction on Robotics*, 21(4) :574–587, 2005.
- [14] V. Talasila, J. Clemente-Gallardo, and A.J. van der Schaft. Geometry and Hamiltonian mechanics on discrete spaces. *physics A : Mathematical and General*, 37 :9705–9734, 2004.
- [15] V. Talasila, J. Clemente-Gallardo, and A.J. van der Schaft. Discrete port-Hamiltonian systems. *Systems & Control Letters*, 55 :478–486, 2006.
- [16] F. Triefensee, S. Monaco, and D. Normand-Cyrot. Ida-pbc under sampling for port-controlled hamiltonian systems. In *American Control Conference, Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA*, 2010.

Electrovanne Pneumatique Ultrarapide

Thiago CAETANO FERREIRA

Eric BIDEAUX – INSA de Lyon

Sylvie SESMAT – INSA de Lyon

Fabien SIXDENIER – Université Lyon 1

Résumé—Ce rapport a pour objectif de présenter les principales actions menées au cours de la deuxième année de cette thèse CIFRE en partenariat avec ASCO Numatics. Seront également présentés les travaux à être réalisés au cours des 12 prochains mois, afin d'aboutir à l'objectif final: la conception d'une électrovanne ultrarapide. Après la proposition d'une première architecture à la fin de la première année, la majeure du temps de cette deuxième année a été consacrée pour la mise en place de différents moyens de mesures et à l'étude de faisabilité industrielle des architectures proposées. Des essais de caractérisation en débit ont validé la forme de disque multi-fentes proposée. Un banc de test a été développé pour évaluer l'influence du frottement sur la stabilité et la répétabilité de cette architecture. En parallèle, nous avons étudié une nouvelle configuration, basée sur une plaque à fentes linéaires. Pour celle-ci, nous envisageons un actionnement basé sur les alliages à mémoire de forme magnétique. Un modèle tenant compte des paramètres sensibles à cet actionneur est en cours de développement. Pour la suite des travaux, la finalisation des essais de frottements et l'insertion des résultats dans le modèle proposé permettra une étude plus précise de la dynamique des disques multi-fentes. Après la réalisation des différents essais prévus dans la suite du projet, nous pourrons retenir une dernière solution pour la réalisation d'un prototype permettant de valider les différentes fonctions prévues dans le cahier des charges. Les travaux effectués ont été l'objet d'une enveloppe soleau, une présentation dans la conférence internationale SICFP13. Dernièrement un papier sur l'étude des jets a été accepté pour la conférence IFK en 2014.

I. INTRODUCTION

Cette thèse se fait dans le cadre d'une thèse CIFRE en partenariat avec ASCO Numatics, référence dans le

domaine de contrôle et de transmission de puissance par fluide. L'objectif final est le développement d'une électrovanne ultrarapide qui permettra à la société ASCO de se positionner en avance par rapport à ses concurrents sur le marché du tri grâce à un produit ayant des performances encore non atteintes.

Le développement de composants à commutation rapide, comme les électrovannes ON/OFF qui font l'objet de ce travail de thèse, va permettre de se rapprocher des architectures de contrôle des systèmes électriques comme les hacheurs dont les hauts rendements sont dus en particulier à la limitation des pertes lors de la commutation de la puissance transférée. La commutation extrêmement rapide de ces éléments permet des gains substantiels d'un point de vue énergétique sans limiter les performances au niveau de la charge. On peut donc prévoir que le développement d'électrovannes à commutation rapide permettra le déploiement de contrôles de type digital à haut rendement.

D'un point de vue scientifique, les enjeux se situent donc à 2 niveaux:

Tout d'abord au niveau de l'actionnement de l'élément de commutation : le débit étant lié à la section de passage, plus le débit est important, plus la variation de section doit l'être également. Pour répondre aux contraintes dynamiques, il faut donc repenser et optimiser les principes de variation de section. Evidemment, la consommation énergétique de cet étage doit rester très faible devant la puissance transmise par l'élément commutant. Le développement d'actionneurs électriques miniatures à haute fréquence et grande course est donc le principal enjeu concernant ce premier aspect du travail de thèse.

Dans un deuxième temps, le comportement dynamique du système doit être étudié. A de telles fréquences, il

n'est plus possible de négliger la dynamique de l'écoulement. La prise en compte de cet aspect dans la conception du composant est donc essentielle. En outre, la puissance transmise étant directement liée au débit de fluide, il sera nécessaire d'optimiser les concepts de l'élément commutant, afin de maximiser le débit tout en limitant les pertes et l'impact sur le transitoire de débit.

II. OBJECTIFS

Ce papier a comme objectif de présenter les principales actions menées pendant la deuxième année de thèse, ainsi que le planning et les prochains travaux à être réalisés au cours des 12 prochains mois afin d'aboutir à l'objectif final de la thèse : la conception d'une électrovanne ultra rapide.

III. BILAN DE LA 1ERE ANNEE

Durant l'abondante recherche bibliographique réalisée au cours de la première année [1], il a été possible d'identifier l'évolution des divers actionneurs ainsi que les différentes architectures utilisées dans les électrovannes dites rapides. Cette étape de la thèse nous a poussés à réaliser, dans un premier temps, une étude de la forme et des méthodes d'ouverture de sections de passages pour une électrovanne rapide. D'après les résultats et tout en respectant les contraintes du cahier des charges défini par la société ASCO Numatics, nous avons pu choisir la forme de disques à fentes (Fig. 1) pour une première proposition de l'obturateur.

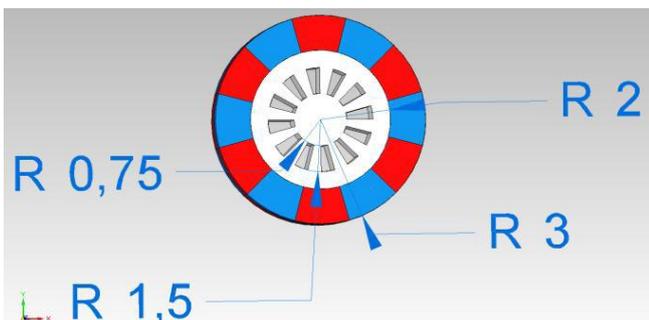


Fig. 1. Géométrie proposé pour l'obturateur (dimensions en mm)

Nous avons par la suite étudié la motorisation de type pas-à-pas pour l'actionnement du système. L'association de cette technologie innovante à la forme de l'obturateur choisie appliquée à des électrovannes a été objet d'une enveloppe soleau déposée au cours de la première année de thèse (Fig. 2.)

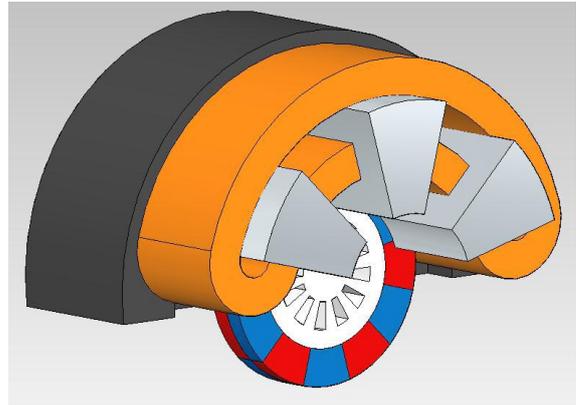


Fig. 2. Architecture proposée pour l'ensemble actionneur et obturateur.

A partir des modèles analytique et numérique simplifiés mis en place, il a été possible de vérifier que la solution retenue est capable d'avoir des dynamiques importantes (temps de réponse mécanique d'ouverture ou fermeture d'environ 0.35 ms). Cependant, il est nécessaire d'enrichir ce modèle pour prendre en compte la dynamique de la partie électrique négligée, ainsi qu'étudier l'évolution des paramètres sensibles aux performances du produit : frottements sec et visqueux du système. Ceux-ci sont directement liés à la stabilité du système pendant la réalisation des cycles et leur maîtrise est indispensable afin de respecter la contrainte de répétabilité de l'électrovanne.

IV. TRAVAUX PENDANT LA 2EME ANNEE

Cette deuxième année de thèse a été principalement consacrée à la mise en place de différents moyens de mesures et à l'étude de faisabilité industrielle des architectures proposées.

A. Validation de la fonction débit

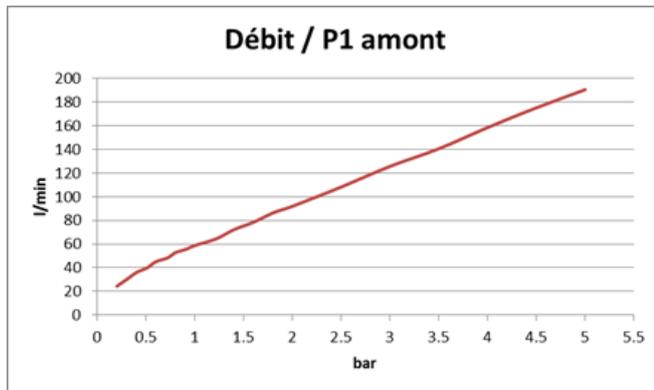
Dans un premier temps, nous avons envisagé la validation de la fonction débit de l'obturateur. Pour cela, des disques ayant la section de passage retenue après l'étude en première année ont été fabriqués (Fig. 3)



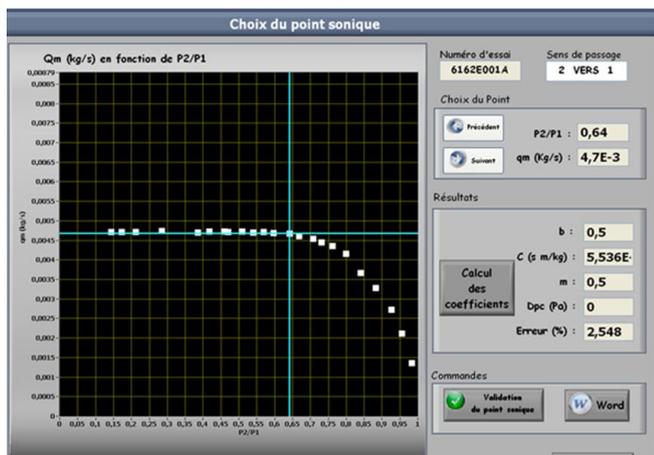
Fig.3. a) Disques fabriqués pour essais de débit et banc de frottement. b) Détail des fentes usinées.

Selon les calculs en simulation numérique (CFD), la forme proposée pour la section de passage de 2,6 mm² serait capable de fournir un débit nominal de 157 NI/min ANR.

La caractérisation en débit du disque proposé a été réalisée selon la norme ISO 6358 [2]. Pour cela ASCO Numatics a mis à disposition son banc de caractérisation en débit. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.



a)



b)

Fig.4. a) Courbe de débit en fonction de la pression amont pour système ouvert à la pression atmosphérique. b) Courbe de conductance de la section proposée.

Le débit mesuré est $Q=169$ NI/min ANR à une pression amont $P=6.3$ bar et pression aval $P=5.3$ bar. Le débit légèrement supérieur au débit calculé par CFD peut être dû, entre autres, aux défauts d'usinage des pièces qui ont été effectués par électroérosion. Suite à une vérification de l'état de surface et du contour des fentes usinées, il est fort probable que le dimensionnel des pièces n'a pas été respecté provoquant une légère augmentation de la section de passage. Toutefois les résultats obtenus montrent qu'avec la forme proposée il a été possible de respecter la contrainte de débit minimum du cahier de charge de 100 NI/min ANR.

B. Banc de frottement

Les premiers résultats issus des simulations numériques avec le modèle simplifié nous ont montré que la dynamique du système est très sensible aux variations du frottement sec entre le disque fixe et le disque mobile. Cette variation peut générer une erreur en position dans la réalisation d'un pas entre chaque cycle et générer une fuite (dans le cas d'une fermeture) ou un débit inférieur à celui attendu (dans le cas d'une ouverture). Aussi, il se peut que son évolution au cours du temps provoque une dégradation de la répétabilité du produit ainsi qu'un dysfonctionnement du système.

De cette façon, la conception d'un banc de frottement a été réalisée (Fig. 5) pour permettre de quantifier les vraies pertes mécaniques dans l'ensemble de disques ainsi que d'étudier l'influence de l'écoulement sur la dynamique du système. Ces informations sont nécessaires afin de valider les hypothèses prises pour la modélisation et donc de rendre plus réaliste le modèle développé pendant la première année de thèse.

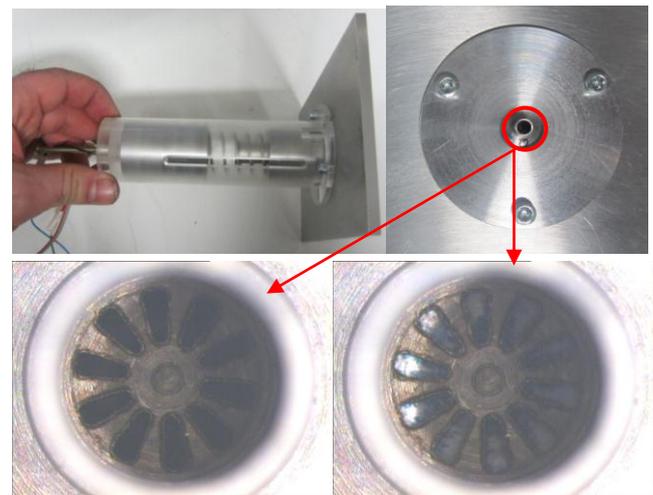


Fig.5. Banc assemblé (haut) ; Deux disques avec les fentes alignées (bas gauche) et fentes désalignées (bas droite)

Le banc a été développé en 2 versions. La première est composée d'un mini-moteur DC avec un codeur intégré. Ce moteur entraîne en rotation le disque mobile (Fig.3a à gauche) en contact avec le disque fixe (Fig.3a à droite). Différentes charges peuvent être appliquées à l'aide d'un ressort et l'effort appliqué est mesuré avec un capteur d'effort en jauge de contrainte.

Le deuxième banc est composé d'un moteur pas-à-pas à faible inertie. Ce banc permettra la validation de la fonction ouverture et fermeture de l'électrovanne pour différents efforts avec ou sans écoulement d'air.

À cause du retard dans l'approvisionnement des pièces et des différentes reprises en usinage durant le processus d'assemblage, le banc initialement prévu

pour février 2013 a pu être mis en place au cours du mois de mai. Des essais de validation ont été effectués et les essais prévus pour la suite du projet sont en cours d'exécution. De ce fait les résultats ne seront pas présentés dans ce rapport. Après l'exécution des essais, les résultats seront utilisés pour enrichir le modèle proposé.

C. Etude des jets - Banc de mesure

En parallèle aux principaux travaux de thèse, j'ai suivi les travaux d'amélioration et de mise au point d'un moyen de mesure pour la caractérisation des jets d'air. Ces travaux ont été réalisés dans le contexte de deux projets de fin d'étude. Le premier, réalisé par Johannes Ernicke [3], est basé sur la configuration et l'utilisation d'une sonde anémoclinométrique pour l'exploitation des jets subsoniques. Le deuxième, réalisé par Clément Lalève et Edgar Maeda [4], est la suite des travaux de Ernicke et est basé sur la mise à point du système d'acquisition, de pilotage et de post-traitement des données issues des essais. Le banc (Fig 6) est conçu et instrumenté [5] de façon à pouvoir mesurer les pressions statiques et dynamiques ainsi que la vitesse de l'air en tous points du jet.

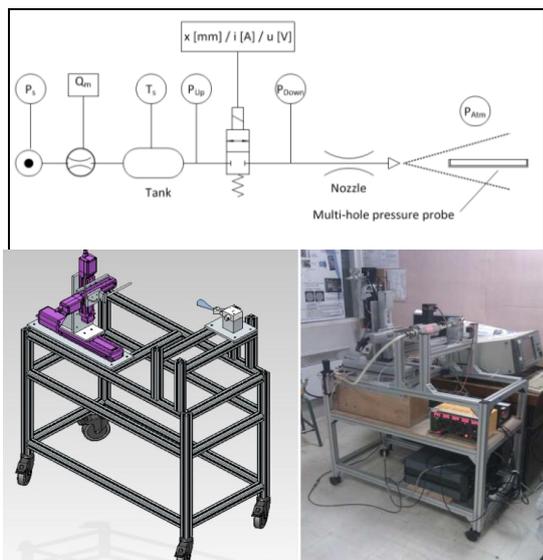


Fig.6. Banc de mesure et caractérisation des jets

Cela permet de mieux comprendre différents phénomènes qui peuvent avoir lieu dans les circuits interne et externe d'un système utilisé pour le tri. Il sera possible de déterminer l'influence de ces phénomènes sur la dynamique d'établissement du jet et sur son efficacité.

Des premières mesures en statique et dynamique dans le système ont été réalisées et les résultats ont fait l'objet d'une publication dans la conférence internationale SICFP 13 dans le domaine de la transmission pneumatique (fluid power) en 2013 [6].

Suite à des problèmes matériel et logiciel et après nombreuses conférences téléphoniques avec le fournisseur de la sonde aux EUA, le système a été renvoyé au fournisseur pour réparation. La sonde doit revenir au laboratoire à la fin du mois d'août pour la réalisation des essais prévus.

D. Nouvel obturateur

Suite aux différents retards dans l'exécution des différentes étapes du projet et conscients des possibles difficultés de réalisation industrielle du concept proposé, nous avons décidé d'exploiter une nouvelle architecture en parallèle.

Nous avons remarqué pendant l'étude des sections de passage et méthodes d'ouverture que des sections composées de multi-fentes rectangulaires étaient aussi intéressantes.

Grâce à cela nous nous sommes basés sur une plaque ayant des fentes de 0,2 mm d'épaisseur, décalées de 0,3 mm les unes des autres (Fig 7).

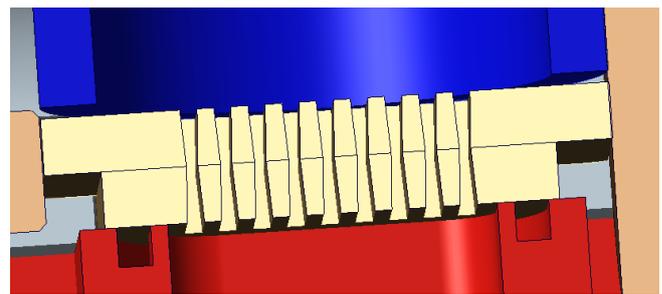


Fig. 7. Coupe des plaques avec des fentes linéaires

L'ouverture de la section se fait en glissant une plaque sur l'autre en alignant les différentes fentes présentes dans les deux plaques jumelles. Bien que cette méthode nécessite un changement de sens du mouvement pour l'exécution d'un cycle, elle reste néanmoins une méthode intéressante grâce aux faibles déplacements nécessaires à l'ouverture d'une grande section de passage.

Aussi concernée par les problèmes de frottements, quelques actions ont été mises en place pour contourner les problèmes rencontrés par le concept de fentes radiales. Pour les plaques étudiées, nous envisageons l'utilisation de la céramique comme matière puisque sa variation de coefficient de frottement au cours du temps est faible. Une étude de faisabilité des fentes a été réalisée pour vérifier l'usinabilité des fentes par technologie laser sur les substrats en céramique. La figure 8 présente une plaque usinée par laser.

Un ensemble de plaques avec différents états de surface a été commandé et des essais de frottement et

de validation de la fonction débit seront réalisés à partir du mois d'août.

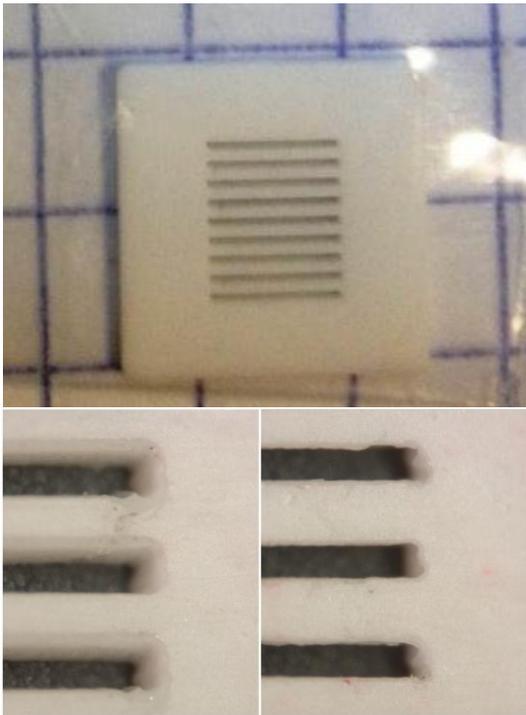


Fig. 8. Plaque en céramique usinée par laser. Détail de la surface d'attaque du laser (bas à droite) et de sortie (bas à gauche)

V. TRAVAUX FUTURS

A. Finalisation des essais de frottement

Après la mise en place des bancs de frottement, une matrice d'essais a été mise en place. Ceux-ci sont en cours de réalisation et les premiers résultats sortiront bientôt. Il sera alors possible de simuler le comportement dynamique de ce système de façon à se rapprocher au maximum de la réalité.

B. Réalisation des essais dans des jets

A l'arrivée de la sonde anémoclinométrique [7], les mesures sur des jets subsoniques et supersoniques pourront être accomplies. Ces résultats sont importants afin de déterminer les limites opérationnelles d'un jet pour la fonction de tri, ainsi que servir d'aide à la conception d'une nouvelle électrovanne.

C. Modélisation et dimensionnement d'un actionneur à base des AMFM

Suite à la proposition du deuxième concept pour l'obturateur de l'électrovanne, il est nécessaire de choisir un nouvel actionnement pour le système de

fentes linéaires. Le retour sur l'étude bibliographique effectuée au cours de la première année de thèse nous a permis de repérer des alliages à mémoire de forme magnétique ayant un grand potentiel pour différentes applications [8]. Parmi les matériaux actifs, la performance de ces alliages se place entre les piézoélectriques (haute fréquences et faible course) et les alliages à mémoire de forme classiques (grande course et faible bande passante)[9][10][11].

Pour la suite, nous nous intéressons à 2 architectures (actionneur push-push et actionnement avec retour par ressort) [12] pour évaluer les possibles dégradations des performances en haute fréquence [13] et valider l'utilisation de ces actionneurs dans une électrovanne rapide.

D. Définition de l'architecture retenue

Avec les résultats issus des différentes analyses pendant les deux années de thèse, il sera possible de déterminer laquelle correspond au mieux aux attentes définies dans le cahier des charges. Elle sera donc la solution retenue pour une nouvelle électrovanne rapide.

E. Réalisation d'un prototype et validation du produit

Une fois la solution finale retenue, nous passerons à l'étape de réalisation du prototype produit. Les dernières mesures et mises au point de l'électrovanne conçue seront effectués afin de valider l'ensemble des fonctions envisagées et définies dans le cahier des charges.

F. Rédaction de thèse

Rédaction du mémoire de thèse.

VI. CONCLUSION

Au cours de la première année de thèse, une recherche bibliographique et d'antériorité a été menée. Nous avons proposé une première architecture basée sur l'association d'un disque multi-fentes avec une architecture de moteur pas-à-pas.

Par la suite, nous avons consacré une partie majeure de cette deuxième année pour la validation des différentes fonctions définies dans le cahier des charges. En conséquence, différents moyens de mesure ont été développés pour permettre une analyse expérimentale des différents sous-systèmes.

Premièrement, la fonction débit a été validée. Les mesures réalisées nous montrent que la forme retenue

pour les disques est capable de fournir le débit défini dans le cahier des charges.

Ensuite un banc de mesure de frottement a été développé. Ceci du au besoin d'étudier l'évolution des paramètres tels que le frottement sec puisque le système est très sensible aux variations de ce frottement au cours du temps. Les essais prévus sont en cours d'exécution.

Une deuxième version du banc de frottement, composé d'un moteur pas-à-pas a aussi été réalisée. Elle permettra de valider la fonction ouverture et fermeture, ainsi que de déterminer le débit de fuite et la stabilité dans la réalisation d'un pas.

En parallèle, une nouvelle architecture basée sur les fentes linaires est en cours de développement. Une étude industrielle a été menée et dans un premier temps la céramique et les polymères sont envisagés comme matière de base pour l'obturateur de cette nouvelle version. Un banc de validation a été développé et permettra d'évaluer à la fois le débit, les efforts nécessaires pour l'ouverture et fermeture et les efforts d'interactions entre l'écoulement et la plaque mobile.

Pour cette nouvelle architecture, il est envisagé un actionnement basé sur les alliages à mémoire de forme magnétique. Un modèle est en cours de développement et permettra d'évaluer les performances à haute fréquence de l'actionnement proposé.

La finalisation du banc de caractérisation des jets avec l'arrivée de la sonde après réparation, permettra d'étudier les différents phénomènes liés à la dynamique d'établissement du jet et contribuera pour la conception d'une électrovanne ou d'un système dédié à l'application du tri.

Au cours de ces deux années de thèse, une enveloppe soleau a été déposée. La réalisation du banc de caractérisation des jets et les premiers résultats ont été l'objet d'une présentation dans la conférence internationale SICFP13 à Linköping, référence dans le domaine de transmission pneumatique (fluid power). Un deuxième papier sur l'étude des jets a été accepté pour la conférence IFK2014, qui aura lieu du 24 au 26 juin 2014 à Aix-la-Chapelle.

Les prochaines étapes prévues sont indispensables pour la suite du projet. Leur résultat déterminera le choix de l'architecture finale et entrainera la réalisation d'un prototype permettant de valider le produit au cours des 12 derniers mois de la thèse.

REFERENCES

- [1] *Electrovanne Pneumatique ultrarapide*. Ferreira, T. Rapport de première année - 2012.
- [2] *Détermination des caractéristiques de débit des composants traversés par un fluide compressible*. Norme ISO 6358 – 2013
- [3] *Caractérisation statique d'un système de jet d'air pour le tri*. Ernicke, J. Rapport PFE. 2013
- [4] *Caractérisation d'un jet d'air pulsé pour le tri*. Maeda, E. Lalève, C. Rapport PFE. 2013
- [5] *Caractérisation statique et dynamique d'un jet d'air pulsé*. Mazille, P.Y., Manfredi, R. Rapport PFE. 2011
- [6] *Fast switching pneumatic valves: experimental bench for flow and pulsed air jet characterizations*. Ferreira, T., Sesmat, S., Bideaux, E., Sixdenier, F. Proceedings to SICFP2013, Linköping. 2013
- [7] *Aeroprobe documentation*
- [8] *Emerging Actuator Technologies: A micromechatronic Approach*. Pons, J. L., John Wiley and Sons, 2005.
- [9] *Nonlinear Hamiltonian modeling of Magnetic Shape Memory Alloy based actuators*. Gauthier, J.Y., Hubert, A., Abadie, J., Chaillet, N., LExcellent, C. Sensors and Actuators A Physical, 141, 2008.
- [10] *Magnetic Shape Memory Alloys as smart materials for micro-positioning devices*. A. Hubert¹, N. Calchand¹, Y. Le Gorrec¹, J.-Y. Gauthier. ADVANCED ELECTROMAGNETICS, Vol. 1, No. 2, 2012.
- [11] *Position dependent inductance based on magnetic shape memory materials*. I. Suorsa, E. Pagounis, K. Ullakko. Sensors and Actuators A, vol. 121, pp. 136–141, 2005.
- [12] *Modélisation des Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques pour la conversion d'énergie dans les actionneurs et leur commande*. Gauthier, J. Y. Thèse. 2008
- [13] *Modeling the dynamical response of ferromagnetic shape memory alloy actuators using a dissipative Euler–Lagrange equation*. Weetman, P., Akhras, G. J. Appl. Phys. 105, 023917, 2009

Approximation de systèmes à paramètres répartis: Analyse, simulation et commande

Sérine Damak, Xavier Brun et Michael Di Loreto

I. INTRODUCTION

Mon sujet de thèse porte sur l'approximation des systèmes à paramètres répartis de dimension infinie qui sont présentées, par exemple, par des équations aux dérivées partielles, systèmes fonctionnels, systèmes à retards, ... Cette approximation nous permet de réduire la complexité du système de dimension infinie au niveau de la simulation, la synthèse du contrôle et l'observation. Dans la littérature, nous trouvons plusieurs méthodes d'approximation. L'un des objectifs de ma thèse est d'améliorer et de développer ces opérateurs d'approximation pour la synthèse du contrôle. Pour cela, nous nous basons sur l'utilisation des opérateurs à retards. Nous nous intéressons à l'approximation des systèmes linéaires de dimension infinie dont une réalisation appartient à l'algèbre de Banach présentée par

$$\mathbb{A} = \left\{ P(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f_k \delta(t - r_k) + P_{na}(t), P_{na} \in L_1[0, \infty) \right\}$$

avec $f_k \in \ell_1$ et $r_0 = 0 < r_1 < r_2 < \dots$. Une classe d'approximation a été proposée par [15]. Cette approximation constitue un système de dimension finie. Cette approximation est effectuée dans la topologie du graphe. Ils présentent une condition nécessaire et suffisante afin de garantir l'existence d'une approximation décrite par un système à paramètres localisés, malheureusement, cette condition est très conservative. Un autre objectif de ma thèse est de réduire le conservatisme de cette condition en introduisant une nouvelle classe. Cette nouvelle classe s'appuie sur l'introduction des opérateurs à retards. La classe plus général s'écrit sous la forme

$$P(t) = \sum_{k=1}^N A_k P(t - r_k) + \int_0^{r_N} G(\theta) P(t - \theta) d\theta \quad (1)$$

avec $A_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$, G est une fonction matricielle bornée définie sur $[0, r_N]$ et r_k représentent les retards, pour $k = 1, \dots, N$, tels que $r_0 = 0 < r_1 < r_2, \dots$. Durant mes deux années de thèse, nous avons étudié la stabilité de cette classe d'approximation. Pour caractériser le comportement dynamique de ce système par rapport aux variations des retards, nous commençons à étudier la stabilité des équations

aux différences données par

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k x(t - r_k).$$

Plusieurs travaux ont abordée l'étude de stabilité des équations aux différences [9], [2] et [6]. Nous définissons des fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii pour l'étude de stabilité exponentielle. Ces fonctionnelles nous permettent de quantifier le taux de la décroissance exponentielle. Pour cela, nous obtenons des conditions suffisantes et nécessaires pour le cas d'un seul retard (conditions suffisantes pour les cas plusieurs retards) de la forme inégalité matricielle linéaire (LMI). Une analyse du système avec retards variants dans le temps est faite. Nous traitons aussi le cas du système avec des paramètres incertains.

Pour le système (1), nous effectuons l'étude de la stabilité par deux différentes approches : analyse spectrale et approche de Lyapunov-Krasovskii. Cette dernière approche nous permet d'aboutir à des conditions sous LMI. Nous définissons des fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii pour décrire le taux de décroissance exponentielle. Une extension est faite pour l'analyse de la robustesse paramétriques.

Dans ce rapport, je présente quelques résultats publiés [4] et un exemple numérique afin d'illustrer la nouvelle classe d'approximation.

II. LES ÉQUATIONS AUX DIFFÉRENCES :

Dans cette section, nous nous intéressons à une classe du système régi par des équations aux différences donnée par

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k x(t - r_k), \quad (2)$$

où A_k est une matrice de dimension $n \times n$ et r_k représentent les retards tels que $0 < r_1 < \dots < r_N$. Pour une condition initiale $\phi \in C([-r_N, 0], \mathbb{R}^n)$, le système (2) admet une unique solution [7]. L'objectif de cette section est de présenter quelques résultats pour l'étude de stabilité du système (2) par deux approches : analyse spectrale et approche par Lyapunov-Krasovskii.

A. Analyse spectrale

Pour simplifier l'étude, nous présentons le cas d'un système avec un seul retard donné par

$$x(t) = Ax(t - r), \quad \forall t \geq 0, \quad (3)$$

Cette thèse est financée par le projet ANR AIDS intitulé par Approximation de Systèmes de Dimension Infinie.

Laboratoire Ampere, UMR CNRS 5005, INSA-Lyon,
20 Avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne, France
serine.damak@insa-lyon.fr

avec $A \in \mathbb{R}^n$ et r représente le retard. Soit une condition initiale ϕ définie sur $C([-r, 0], \mathbb{R}^n)$. Ce système est un cas particulier du système (2) avec des retards r_k rationnellement dépendant, i.e., il existe $r > 0$ tel que $r_k = m_k r$, $\forall k = 1, \dots, N$. On obtient ce résultat suivant.

Théorème 2.1: Le système (3) est

- i) asymptotiquement stable si et seulement si $\rho(A) < 1$.
- ii) stable si et seulement si $\rho(A) \leq 1$, et pour une valeur propre $|\lambda_k| = 1$, $\text{rank}(A - \lambda_k I) = n - q_k$, où q_k est la multiplicité algébrique du λ_k .

Exemple 2.2: Prenons

$$x(t) = \frac{3}{5}x(t-1) + \frac{2}{5}x(t-2), \quad \forall t \geq 0, \quad (4)$$

avec une condition initiale $\phi(t) = 2 \sin(t)e^t$ pour $t \in [-2, 0]$. Le système peut être réécrit sous la forme suivante

$$\tilde{x}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ x(t-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{5} & \frac{2}{5} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t-1) \\ x(t-2) \end{pmatrix} = A\tilde{x}(t-1).$$

Par Théorème 2.1, le système (4) n'est pas stable asymptotiquement puisque $\rho(A) = 1$. Mais, il est bien stable.

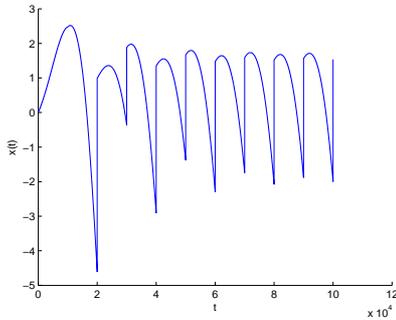


Fig. 1. Stabilité du système (4)

Pour les cas général, une condition nécessaire et suffisante été proposée par [12] pour le cas avec des retards quelconques (i.e. rationnellement indépendants).

Théorème 2.3: Pour le système (7), les assertions suivantes sont équivalentes :

- le système (7) est stable asymptotiquement pour des retards r_k , $k = 1, \dots, N$, rationnellement indépendants.
- le système (7) est stable asymptotiquement pour tous retards incertains $r_k + \delta_k$, $k = 1, \dots, N$, où δ_k est l'incertitude.
- le système (7) est stable asymptotiquement pour tous retards r_k , $k = 1, \dots, N$.
- $\sup\{\rho(\sum_{k=1}^N e^{j\theta_k} A_k), \theta_k \in [0, 2\pi]\} < 1$.

B. Approche par Lyapunov-Krasovskii

Pour le système (3), on définit une fonction du Lyapunov-Krasovskii présenté par

$$v(x_t(\varphi)) = \int_{t-r}^t x^T(\theta) P x(\theta) d\theta, \quad (5)$$

avec P est une matrice $n \times n$ définie positive symétrique.

Théorème 2.4: Le système (3) est asymptotiquement stable si et seulement si pour toute matrice définies positive

symétrique réelle M , il existe une matrice définie positive symétrique réelle P telle qu'elle vérifie

$$A^T P A - P = -M. \quad (6)$$

Si (6) est satisfaite avec une matrice définie positive symétrique réelle et une matrice semi-définie positive symétrique M , alors le système (3) est stable.

Pour le cas général du système,

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k x(t - r_k), \quad (7)$$

on définit une fonctionnelle du Lyapunov-Krasovskii v donnée par

$$v(x_t(\varphi)) = \sum_{k=1}^N \int_{t-r_k}^{t-r_{k-1}} x^T(\theta) P_k x(\theta) d\theta, \quad (8)$$

avec P_k , $i = 1, \dots, N$, sont des matrices $n \times n$ définies positives symétriques.

Théorème 2.5: Le système (7) est asymptotiquement stable si pour toute matrice M définie positive symétrique réelle il existe P_k des matrices définies positives symétriques réelles telles que (9) est satisfaite.

Si (9) est vérifiée avec des matrices définies positives symétriques réelles P_k , $k = 1, \dots, N$, et une matrice semi-définie positive symétrique réelle M , alors (7) est stable.

C. Robustesse par rapport aux retards

Considérons le système

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k x(t - r_k(t)), \quad (10)$$

où $r_k(t) = r_{k_0} + \delta_{r_k}(t)$, pour $k = 1, \dots, N$, tels que $\delta_{r_k}(t)$ sont des fonctions différentiables et

$$\delta_{r_k}(t) \leq \delta_k,$$

avec $\delta_k \in \mathbb{R}^+$. Alors, nous obtenons ce résultat suivant.

Théorème 2.6: Supposons que pour le système

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k x(t - r_{k_0})$$

il existe des matrices définies positives réelles symétriques P_k , $k = 1, \dots, N$ telles que la matrice M défini par (9) est définie positive. Alors, (10) est L_2 -asymptotiquement stable, si, pour $k = 1, \dots, N$,

$$|\dot{\delta}_{r_k}(t)| < \frac{\lambda_{\min}(M)}{\max_k (\lambda_{\max}(P_k) - \lambda_{\min}(P_{k+1}))}, \quad \forall t \geq 0,$$

et $P_{N+1} = 0$.

$$-M = \begin{bmatrix} A_1^T P_1 A_1 - P_1 + P_2 & A_1^T P_1 A_2 & \cdots & A_1^T P_1 A_N \\ A_2^T P_1 A_1 & A_2^T P_1 A_2 + P_3 - P_2 & \cdots & A_2^T P_1 A_N \\ & \vdots & & \\ A_N^T P_1 A_1 & A_N^T P_1 A_2 & \cdots & A_N^T P_1 A_N - P_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

III. RÉALISATION NUMÉRIQUES

Nous présentons un exemple du système de dimension infinie décrite par une convolution dont le noyau appartient à l'ensemble \mathbb{A} . Considérons

$$y(s) = P(s)u(s),$$

avec

$$P(s) = \frac{\sinh(\sqrt{\frac{s}{2}})}{(1 - \frac{1}{2}e^{-s}) \sinh(2\sqrt{\frac{s}{2}}) + \sinh(\sqrt{\frac{s}{2}})}. \quad (11)$$

Notons

$$N(s) = \frac{\sinh(\sqrt{\frac{s}{2}})}{\sinh(2\sqrt{\frac{s}{2}})} \quad (12)$$

et

$$D(s) = 1 - \frac{1}{2}e^{-s} + \frac{\sinh(\sqrt{\frac{s}{2}})}{\sinh(2\sqrt{\frac{s}{2}})}. \quad (13)$$

Nous nous intéressons à l'approximation du système P dans la topologie du graphe. L'approximation sur cette topologie du graphe nécessite la factorisation première du (N, D) telle que $P = ND^{-1}$. Pour l'exemple, nous avons $N(s), D(s) \in \hat{\mathbb{A}}$ et $(N(s), D(s))$ une factorisation première sur $\hat{\mathbb{A}}$. En effet, il existe $X(s) = -\frac{1}{1-\frac{1}{2}e^{-s}} \in \hat{\mathbb{A}}, Y(s) = \frac{1}{1-\frac{1}{2}e^{-s}} \in \hat{\mathbb{A}}$ tel que

$$X(s)N(s) + Y(s)D(s) = 1.$$

Ce système peut être approché par la nouvelle classe d'approximation.

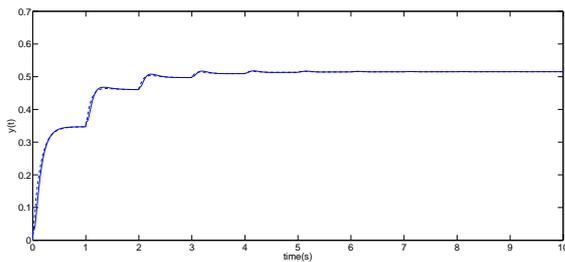


Fig. 2. la courbe en ligne continue présente le système $P(s)$ et la courbe en ligne discontinue présente le système d'approximation de degré $n = 2$

IV. CONCLUSION

Durant mes deux années de thèse, nous proposons une nouvelle classe d'approximation pour les systèmes linéaires de dimension infinie. Cette classe est présentée par des équations aux différences avec un retard distribué. Dans

un premier temps, nous nous intéressons à étudier le comportement dynamique de cette classe d'approximation. Plus précisément, nous proposons des conditions de différentes notions de stabilité pour le système régi par les équations aux différences. Cette étude est effectuée par deux approches : analyse spectrale et approche par Lyapunov-Krasovskii. Une extension de cette étude est faite pour l'analyse de la robustesse par rapport aux retards et aux paramètres. Dans un deuxième temps, nous effectuons une étude généralisée pour la nouvelle classe d'approximation (système régi par des équations aux différences avec un retard distribué). Ensuite, nous nous intéressons à proposer des méthodes pour la réalisation numérique de la nouvelle classe d'approximation en s'appuyant sur les outils existants.

REFERENCES

- [1] W. Melvin, Stability properties of functional differential equations, *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 48, 1974, pp 749-763.
- [2] C.E. Avellar and J.K. Hale, On the zeros of exponentials polynomials, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 73, 1980, pp 434-452.
- [3] D. Melchor-Aguilar, Exponential stability of some linear continuous time difference systems, *Systems & Control Letters*, vol. 61, 2012, 61-68.
- [4] S. Damak and A. Ferhi and V. Andrieu and M. Di Loreto and W. Lombardi, A bridge between Lyapunov-Krasovskii and spectral approaches for stability of difference equations, IFAC TDS Workshop, Grenoble, 2013.
- [5] S. Mondié and D. Melchor-Aguilar, Exponential stability of integral delay systems with a class of analytic kernels, *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 57, 2012, pp. 484-489.
- [6] M. Di Loreto and J.J. Loiseau, On the stability of positive difference equations, *Time Delay Systems : Methods, Applications and New Trends, LNCIS*, vol. 423, 2012, pp. 19-33.
- [7] R. Bellman and K.L. Cooke, Differential-Difference Equations, *Nature*, New-York, 1963.
- [8] K. Gu, V.L. Kharitonov and J. Chen, Stability of time-delay systems, *Birkhauser*, Boston, 2003.
- [9] L. Carvalho, On quadratic Lyapunov functionals for linear difference equations, *Linear Alg. and its Appl.*, vol. 540, 1996, pp. 41-64.
- [10] V.L. Kharitonov, Lyapunov functionals and Lyapunov matrices for neutral type time delay systems : a single delay case, *Intern. Journal of Control*, vol. 78, 2005, pp. 783-800.
- [11] M. Vidyasagar, *Control System Synthesis. A Factorization Approach*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
- [12] J.K. Hale and S.M. Verduyn Lunel, *Introduction to functional differential equations*, Springer-Verlag, New York, 1993.
- [13] E. Fridman, New Lyapunov-Krasovskii functionals for stability of linear retarded and neutral type systems, *Syst. & Control Letters*, vol. 43, 2001, pp. 309-319.
- [14] D. Melchor-Aguilar and V. Kharitonov and R. Lozano, Stability conditions for integral delay systems, *Intern. Journal of robust and nonlinear control*, vol. 20, 2010, pp. 1-15.
- [15] M. Vidyasagar and B.D.O. Anderson, Approximation and stabilization of distributed systems by lumped systems, *Systems & Control Letters*, vol. 12, 1989, pp. 95-101.
- [16] H. Lu and M. Di Loreto, D. Eberard, J.P. Simon, Approximation of distributed delays, , vol. , , pp. .

Système de management de batterie lithium-ion pour applications hybrides

Aurélien Lievre^{1,2,3}

Daniel Benchetrite³, Alaa Hijazi¹, Mathilde Ouattara-Brigaudet³, Serge Pelissier², Ali Sari¹, Pascal Venet¹

¹ Laboratoire Ampère UMR CNRS 5005, Villeurbanne, France

² Laboratoire Transports et Environnement, IFSTTAR, Bron, France

³ Équipement Électrique Moteur, Valeo, Créteil, France

Résumé – Ce document traite dans un premier temps des principales méthodes de détermination de l'état de charge d'une batterie rencontrées dans la littérature, qui constituent l'une des principales fonctionnalités du système de management étudié dans cette thèse. Il aborde ensuite quelques développements effectués au niveau du suivi de cet état de charge, ainsi que de sa détermination par un observateur réduit. La problématique de l'influence de la période d'échantillonnage sur la détermination des paramètres et indicateurs est abordée. Une attention particulière est apportée à la détermination de la résistance interne, principal indicateur du vieillissement de la batterie dans notre domaine d'application "hybride".

I. INTRODUCTION

Cette thèse CIFRE, débutée il y a un an et demi, est une collaboration entre la société Valeo, le laboratoire Ampère et l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). L'objectif est le développement d'un système de management de batterie (BMS pour Battery Management System) lithium-ion (Li-ion), à destination des véhicules "mild hybrid".

A. Contexte de la thèse

Ce mode d'hybridation ("mild hybrid"), qui constitue donc le domaine d'application de cette thèse, est destiné à pallier l'un des principaux inconvénients d'une motorisation thermique : la non réversibilité. Pour éviter que l'énergie cinétique ne soit dissipée thermiquement par les freins, une machine électrique associée à un moyen de stockage réversible, permet la récupération de cette énergie afin de pouvoir la restituer lors des accélérations (on parle de mode "boost"). Un autre aspect de ce mode d'hybridation est de permettre la reprise de la fonctionnalité "micro hybrid" (autre type d'hybridation), à savoir le démarrage, rapide et sans

surconsommation, du moteur thermique arrêté lorsqu'inutilisé (arrêt à un stop ou un feu par exemple).

L'énergie de freinage doit donc être stockée temporairement en attendant d'être utilisée lors d'une accélération ou d'un redémarrage. Se pose alors le principal inconvénient des véhicules hybrides (et à plus forte échelle des véhicules électriques) qui est le stockage de l'énergie électrique. Plusieurs systèmes de stockage réversibles peuvent être envisagés, avec pour le domaine automobile, une préférence pour le stockage électrochimique (supercondensateurs et batteries) qui a l'avantage de proposer une conversion plus directe de l'énergie. Cette thèse se base plus particulièrement sur l'utilisation de batteries Li-ion qui ont l'avantage d'avoir :

- une tension entre électrodes très élevée ($\approx 3,6V$),
- une tolérance à l'utilisation de forts courants,
- un faible ratio poids/encombrement,
- une absence d'effet mémoire,
- une cyclabilité importante (plusieurs milliers de cycles),
- une faible autodécharge (quelques pourcents par mois).

Malgré ces nombreux avantages, la technologie Li-ion présente l'inconvénient d'être plus coûteuse (même si le prix tend à baisser) et plus dangereuse car susceptible de s'enflammer, voir même d'exploser (d'où la nécessité d'un système de gestion) [1].

À noter qu'au sein des cellules Li-ion, plusieurs chimies existent et apportent leur lot d'avantages et d'inconvénients, que ça soit au niveau de la sécurité, de l'encombrement ou encore du coût. Parmi ces chimies, qui sont désignées par le matériau qui compose l'électrode positive (l'électrode négative étant souvent à base de graphite ou parfois de titanate de lithium), on peut notamment citer celles à base de fer phosphate ou bien encore celles utilisant des oxydes de cobalt, de nickel ou de manganèse.

Dans notre domaine d'utilisation, une cellule seule ne peut pas fournir la puissance ou l'énergie nécessaire à l'application. C'est le regroupement de plusieurs cellules (à savoir une batterie), qui va permettre d'augmenter le niveau

de courant et/ou de tension pour atteindre les puissances souhaitées et/ou les énergies ciblées.

B. Système de gestion des cellules

L'assemblage seul des cellules entre elles, ne suffit pas, il faut également mettre en place un système de gestion de ces cellules pour s'assurer qu'elles ne soient pas dégradées, et que l'on puisse en tirer la meilleure utilisation possible. Ce système a pour nom "Battery Management System" (BMS) et fait l'objet de cette thèse. Il s'agit ici de mettre au point des algorithmes et de les valider.

On distingue ainsi plusieurs fonctions pouvant être associées au BMS :

- la surveillance et la protection des cellules,
- la détermination de l'état des cellules (SoC, SoH, SoF que nous expliciterons par la suite),
- la communication vers un système extérieur pour informer de la disponibilité et de l'état des cellules,
- la gestion thermique du pack avec des stratégies et des moyens d'actions plus ou moins élaborés,
- l'équilibrage des énergies stockées dans les différentes cellules afin de fournir un niveau de service maximum (la batterie étant limitée par la plus faible cellule, il est important d'avoir un vieillissement uniformisé de toutes les cellules).

La gestion des cellules, et donc de la batterie, nécessite de connaître l'état de charge (SoC pour State of Charge) actuel des cellules, leur état de santé (SoH pour State of Health) ainsi que leur disponibilité (SoF pour State of Function) pour le type d'applications auxquelles elles sont destinées. Il s'agit des trois principaux états à déterminer pour la batterie [2].

Le SoC est le rapport (souvent exprimé en pourcent) entre la charge stockée (en A.h) à un instant "t" et la charge totale stockable (capacité en A.h) à un instant de référence. Selon les sources, cette référence peut correspondre à la capacité de la batterie donnée par le fournisseur, à celle mesurée lors d'une première utilisation, ou bien à la capacité actuelle. À noter que certaines sources parleront de Depth of Discharge (abrégé DoD), qui est le complément du SoC, et donc qui représente la quantité de charges libres dans la cellule. On peut également noter qu'au lieu (ou en complément) du SoC, certaines sources essaient d'introduire la notion de State of Energy (SoE) [3]. Ce n'est alors plus un rapport de quantité de charge, mais un rapport d'énergie (prise en compte de la tension) qui est étudié.

Le SoH est un état qui prend en considération le vieillissement de la cellule. Selon le type d'application pour lequel est destiné le pack batterie (énergie ou puissance), différents effets du vieillissement vont être surveillés au travers de ce paramètre. Les principaux effets du vieillissement (évoluant indépendamment) à surveiller étant l'augmentation de la résistance interne et/ou la perte de capacité [4-5-6-7].

Le SoF : est un état assez récent et très peu représenté dans la littérature. Cependant il commence de plus en plus à être utilisé dans l'industrie, car il répond à un besoin réel qui est de savoir la durée pendant laquelle les conditions actuelles (puissance fournie) peuvent se prolonger. Ce niveau de disponibilité est évalué en fonction du SoC (ou/et de son équivalent le SoE), du SoH et de la température [8].

II. METHODES COURANTES DE DETERMINATION DES ETATS D'UNE BATTERIE

A. Détermination du SoC

L'état de charge est le paramètre à estimer le plus important pour un BMS. Plusieurs méthodes (ainsi que des mixtes de ces méthodes) permettent de le déterminer et de le suivre, nous essayerons donc d'en résumer les grandes lignes.

1) Méthode coulombmétrique

Il s'agit de la méthode qui vient le plus facilement à l'esprit, et qui consiste en une mesure du courant que l'on intègre durant les phases de fonctionnement de la cellule (charge et décharge). La capacité d'une batterie s'exprimant en A.h, cette méthode revient à compter la quantité de charge entrante et sortante au cours du temps. La charge présente dans la cellule peut alors directement être mise en rapport avec la capacité totale de référence (Q_{ref} exprimée en A.h) pour obtenir le SoC (en %) :

$$SoC(t) = \frac{Q_{initial} + \int I(t).dt}{Q_{ref}} \quad (1)$$

Cette méthode a pour principal inconvénient de nécessiter une information de capacité initiale fiable (faussée par l'auto-décharge par exemple), ainsi que d'intégrer les erreurs de mesure de courant au cours du temps.

2) Méthode par mesure OCV

La mesure OCV (Open Circuit Voltage) est la méthode la plus basique pour identifier le niveau de SoC. Elle consiste en une mesure de tension lorsque les cellules sont au repos et stabilisées. Cette tension est comparée à une table de données (dont le tracé est illustré ci-dessous) permettant d'obtenir directement le SoC en fonction de la tension OCV qui dépend de la chimie utilisée.

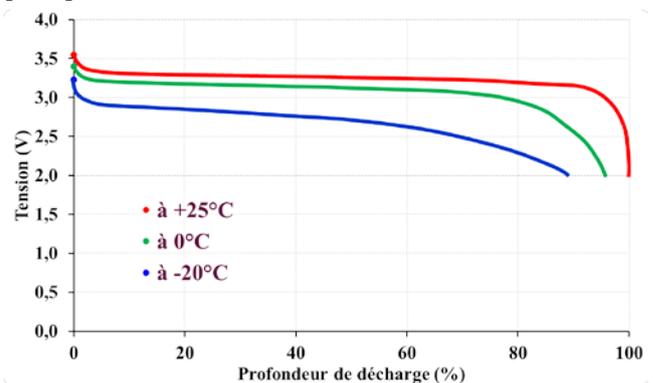


Figure 1 - Exemple de correspondance entre OCV (en décharge) et DoD (=1-SoC) pour différentes températures

Cette méthode nécessite donc d'avoir au préalable édité une table de correspondance (prenant en compte les effets de la température et du vieillissement). De plus, cette méthode a pour principal inconvénient de recourir à une mesure lorsque la cellule n'est pas sollicitée (au repos) depuis un certain temps (après relaxation). La détermination du SoC « en ligne » n'est ainsi pas permise lors des phases d'utilisation de la batterie (car la tension mesurée n'est alors pas à vide). Pour pallier ce problème, un modèle électrique simple est utilisé pour estimer la tension OCV correspondante à une tension mesurée lorsque la batterie est en fonctionnement (courant non nul). Pour la technologie Li-ion, la difficulté à déterminer le SoC à partir de tels tracés est accentuée par le

fait que certaines chimies possèdent une courbe très "plate" pour des niveaux de charges médians.

3) Méthodes adaptatives

La méthode coulombmétrique nécessite la connaissance de l'état de charge initial de la batterie, de ce fait, la seule méthode de détermination du SoC (mis à part une mesure de concentration des espèces chimiques à l'intérieur de la cellule) est la mesure de la tension en circuit ouvert (OCV). Cette tension n'étant accessible qu'au repos, les méthodes adaptatives tentent de remonter à cette valeur à partir de la réponse en tension de la cellule aux sollicitations en courant. De nombreuses méthodes existent, avec également de nombreuses variantes.

Le comportement temporel de la cellule est représenté par des modèles électriques (des modèles mathématiques plus poussés existent également) adaptés au niveau de complexité visé (en fonction de la puissance de calcul disponible et de la précision souhaitée) [9-10]. Ainsi on retrouve systématiquement une source de tension (ou un condensateur de grande capacité) qui traduit la tension entre électrodes au repos, mise en série avec une résistance de connectique et d'électrolyte. Un premier circuit RC est ajouté afin de traduire le phénomène de transfert de charge et de capacité de double couche intervenant à des constantes de temps de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

Les effets de la diffusion intervenant à des constantes de temps très élevées (à basses fréquences) sont représentés par des composants de types CPE (Constant Phase Element) [11], impédance de Warburg [12], ou bien encore plusieurs circuits RC chaînés (nombre de circuits RC pouvant aller de un à une dizaine selon la précision souhaitée). Aux fréquences très élevées, une inductance peut venir représenter les effets de la géométrie intrinsèque et de raccordement de la cellule.

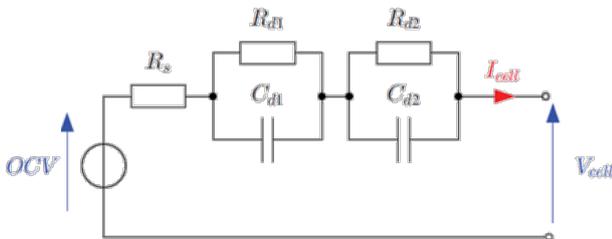


Figure 2 - Exemple de modélisation électrique d'une cellule (ici $E + R + RC + RC$)

Ces modèles sont utilisés pour simuler le comportement des cellules. Les paramètres inconnus sont déterminés par des méthodes d'automatique (observateurs). Selon les observateurs (parmi lesquels on peut citer les filtres de Kalman (parfois étendus), les observateurs à mode glissant, les observateurs réduits, ...) et selon la complexité du modèle électrique choisi, plus ou moins de paramètres (tension OCV, résistance série, ...) sont corrigés afin de rapprocher la sortie du modèle à celle réellement mesurée sur la cellule (souvent la tension est considérée comme sortie et le courant comme l'entrée du système et de l'observateur).

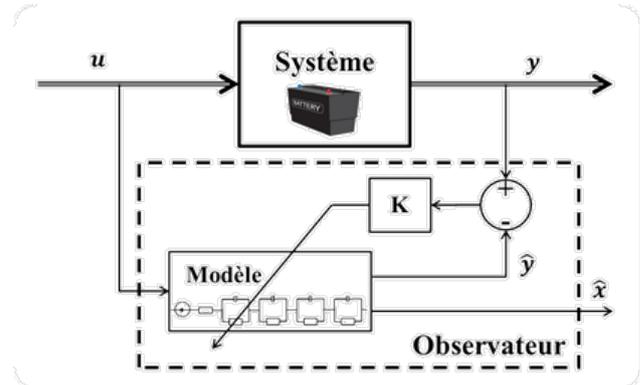


Figure 3 - Schéma de principe d'un observateur des états d'un système (système = cellule Li-ion)

Des méthodes basées sur la spectroscopie d'impédance existent mais nécessitent l'utilisation de matériels impossibles à implanter sur véhicule (méthodes de laboratoire). En effet, lors d'une période de repos, la cellule doit être excitée par diverses fréquences, et la réponse est analysée afin de remonter aux paramètres électriques d'un modèle plus ou moins poussé.

D'autres méthodes existent également et sont basées sur l'apprentissage. Elles ne reflètent pas directement les phénomènes physiques en jeu dans les batteries, mais permettent tout de même d'estimer l'état de charge (et peuvent également estimer l'état de vieillissement). On peut notamment citer les méthodes à base de réseaux de neurones [13-14], de logique floue [15-16], ...

B. Détermination du SoH

Jusqu'à maintenant, l'essentiel des batteries est utilisé comme moyen de stockage typé "énergie". C'est-à-dire que le principal critère est la capacité de stockage afin de pouvoir fournir un maximum d'autonomie à l'application visée (téléphones, ordinateurs portables, voitures électriques, ...). Dans ces conditions, c'est la perte de capacité lors du vieillissement qui est étudiée. Dans notre domaine "mild hybrid", la batterie est utilisée à mi-charge pour recevoir ou fournir de manière temporaire une faible énergie, mais à échanger (charge ou décharge) sur une courte durée (forte puissance). C'est alors l'aspect "puissance" qui prévaut, et c'est alors l'augmentation de la résistance interne lors du vieillissement qui est surveillée (car pour un même courant, les chutes de tensions et les pertes augmentent).

Il est difficile de dresser la liste des méthodes utilisées, ces dernières étant très peu nombreuses, mais surtout très peu communiquées. La plus courante est l'intégration simple lors d'une décharge ou d'une charge complète lorsqu'elle survient. Ce cas de figure s'appliquant aux applications typées "énergie" où c'est la capacité de la cellule qui doit être déterminée, et où des décharges complètes peuvent survenir.

Pour une application typée "puissance", la résistance étudiée (en réalité une partie de l'impédance) peut être celle calculée à partir des chutes de tensions lors d'impulsions de courant (ce qui se produit souvent lors d'une utilisation à de fortes puissances sur une courte durée, ou peut être forcée [17-18]). C'est l'augmentation de cette résistance qui est suivie, à partir des mesures effectuées lorsque des conditions bien précises sont présentes (température, état de charge, grandeur de courant, ...).

Enfin, il est possible de remonter à la valeur de la partie réel de l'impédance (qu'on nomme ici résistance) ou de la capacité, à partir d'un modèle (de type modèle électrique amélioré par exemple) que l'on va actualiser à partir de méthodes adaptatives.

Des méthodes plus empiriques peuvent consister en une historisation des conditions susceptibles de vieillir la cellule (cyclage, calendrier, températures élevées, ...).

III. TRAVAIL EFFECTUE

La partie expérimentale a dû être lancée au tout début de la thèse compte tenu des durées des tests. En effet, la caractérisation d'une seule cellule monopolise un banc de cyclage complet pour des tests nécessitant des décharges et des charges complètes répétées pour différents courants et différentes températures. Une seule charge nominale est effectuée avec une durée supérieure à une heure et nécessite des temps de repos avant et après chaque décharge. Les tests sont donc très chronophages et ont donc dû être lancés au plus tôt.

Une première phase de caractérisation a donc été lancée, pour l'instant pour trois différents types de cellules (aspect générique portant sur plusieurs types de cellules), afin de constituer une base de données utile pour le développement des fonctionnalités du BMS. Nous ne nous attarderons pas sur la mise en place de la plateforme expérimentale (et de ses sécurités) ainsi que sur la nature des tests de caractérisation qui sont assez génériques (auto-décharge, relaxation, décharges complètes et impulsions, le tout sous différents courants, températures et états de charge).

Le travail effectué en parallèle de ces tests a été d'étudier et de développer des méthodes de détermination et de suivi de l'état de charge, ainsi que de l'état de santé. Beaucoup de pistes sont envisagées et sont basées sur les méthodes (et les problématiques) décrites dans l'état de l'art de ce document.

A. Influence de la période d'échantillonnage lors du suivi du SoC en boucle ouverte

Le premier cas d'étude présenté dans ce rapport porte sur le suivi en boucle ouverte de l'état de charge suite à une détermination de l'OCV par mesure de tension au repos. Le suivi s'effectuant par intégration du courant lors de l'utilisation de la cellule. L'influence de la fréquence d'échantillonnage se devait d'être étudiée lorsque la cellule est utilisée dans des conditions "mild hybrid" où des impulsions en charge et en décharge de manière désordonnées ont été appliquées durant une vingtaine de minutes.

La fréquence d'échantillonnage n'est pas le seul élément étudié puisque différents décalages lors de l'acquisition du premier point de mesure ont été imaginés afin de diversifier les cas de figures pouvant être rencontrés. L'illustration de l'échantillonnage et des décalages effectués est la suivante :

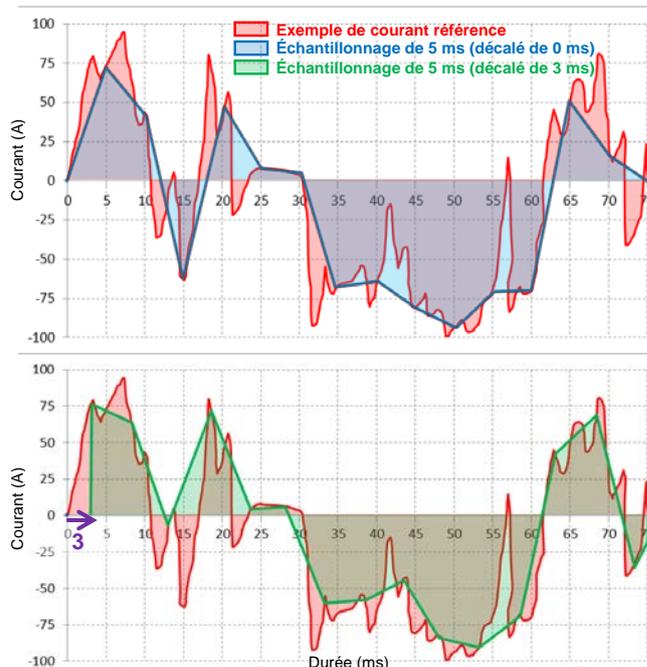


Figure 4 – Illustration d'un sous-échantillonnage décalé

L'aire entre l'axe des abscisses et la courbe représente l'intégration qui est faite au cours du test. Pour une même fréquence, on récupère la valeur de l'erreur maximale (par rapport à "l'exemple de courant référence") pour le décalage et l'instant les plus défavorables. Selon les cellules testées, on peut ainsi estimer l'erreur maximale faite sur le suivi de l'état de charge en une vingtaine de minutes, selon la fréquence d'échantillonnage choisie :

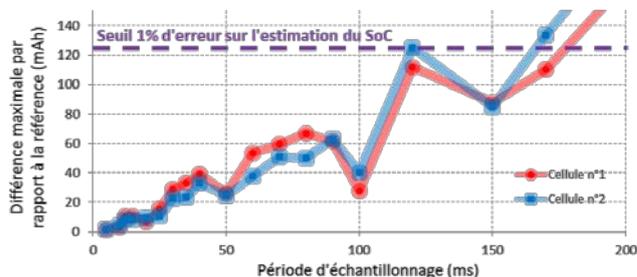


Figure 5 – Erreur sur l'estimation du SoC selon la période d'échantillonnage

La première démarche a permis de constater qu'une fois l'état de charge déterminé au repos, il est possible de le suivre durant un certain laps de temps sans dépasser un certain seuil d'erreur, pour une fréquence d'échantillonnage fixée (et quel que soit le décalage qui peut survenir lors de la prise de mesure). Seulement, la première limitation est la connaissance de l'état de charge initiale, et la seconde sa détermination en cours d'utilisation si la cellule est sollicitée durant une période trop longue (impliquant une intégration des erreurs de mesure trop conséquente).

B. Détermination du SoC en boucle fermée (observateur réduit)

Dans ce second cas d'étude, nous prendrons donc comme exemple le cas du suivi de l'état de charge d'une cellule dont la charge initiale est inconnue (en réalité elle est à 50% de SoC) et qui est donc initialisée à des valeurs aberrantes de 10% de SoC ou bien encore de 95% de SoC (voir instant zéro des tracés ci-dessous). La cellule est utilisée

aléatoirement avec des courants allant de 0 à 200 A en charge et en décharge. L'état de charge doit alors être déterminé dans un premier temps, puis suivi tout au long de l'utilisation de la cellule, au moyen d'un observateur réduit [19].

Une intégration en boucle ouverte (BO) initialisée à 50% (SoC réel normalement inconnu) sert de référence sur le tracé (et illustre la méthode en BO effectuée lors de l'étude de l'influence de la fréquence vue précédemment). Ensuite, selon le gain K (voir Figure 3) choisi, l'observateur réalisé permet de fixer une dynamique de convergence vers le SoC réel. Ainsi, l'observation peut être très sensible au bruit en convergeant rapidement, ou alors très robuste mais avec l'inconvénient d'une détermination très lente de l'état de charge. Sans connaissance préalable de l'état de charge, lors de l'utilisation de la cellule, l'observateur arrive donc à converger vers la tension de repos réelle qui est l'image de l'état de charge (mais qui n'est pas accessible par la mesure).

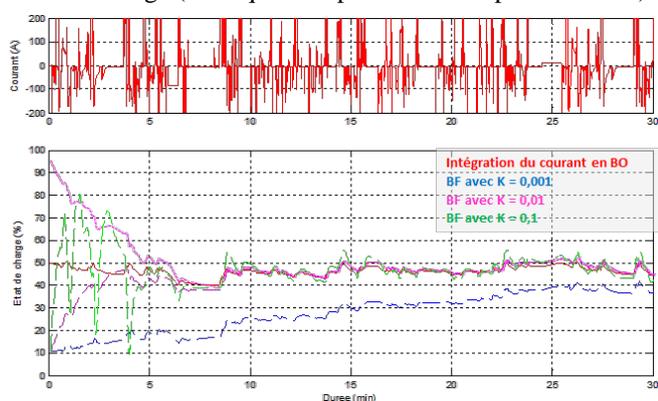


Figure 6 - Exemple d'application d'un observateur pour déterminer l'état de charge d'une cellule sollicitée en courant (impulsions aléatoires)

L'usage d'observateurs nécessite l'utilisation de modèles suffisamment précis permettant de reproduire le plus fidèlement possible le comportement de la cellule observée. Or, une fois le modèle adapté au domaine d'application choisi, il convient de déterminer les valeurs des paramètres. Cette détermination doit se faire dans des conditions propices, où les paramètres sont facilement extractibles.

Cette détermination peut être effectuée une fois pour toute lors de l'assemblage de la cellule, ou elle peut être actualisée au cours de l'utilisation de la batterie. Cette identification des paramètres peut être effectuée à partir de données fréquentielles ou temporelles (cf. état de l'art) illustrées ci-dessous :

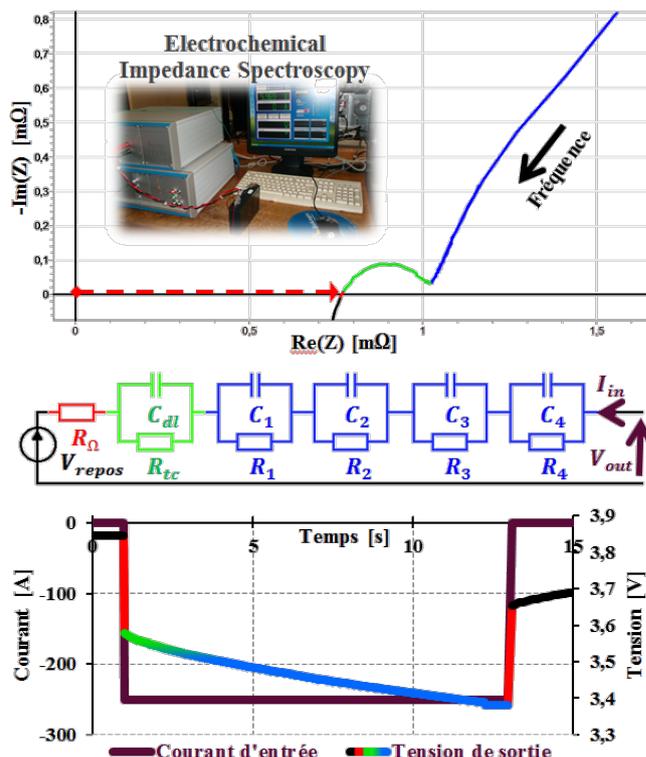


Figure 7 - Identification des paramètres du modèle électrique (schéma au centre) à partir de données fréquentielles (diagramme de Nyquist du haut) ou de données temporelles (tracés du bas)

Le comportement ohmique pur est représenté (en rouge) par une résistance qui donne une réponse instantanée de la tension à une sollicitation en courant de la batterie. Durant les premiers instants suivants, l'impédance de la batterie est représentée (en vert) par la capacité de double couche et la résistance de transfert de charge, puis les effets de la diffusion (en bleu, qui intervient aux basses fréquences et donc à des constantes de temps élevées) apparaissent.

Dans notre domaine d'utilisation "mild hybrid", la partie diffusion est négligée car elle intervient très peu étant donné que la batterie est surtout sollicitée par des impulsions brèves. Seuls les aspects "brefs" du comportement de la batterie nous intéressent, que ce soit pour remonter à la tension de repos lors d'une détermination de l'état de charge (cf. partie II), mais également pour le suivi du vieillissement de la batterie (détermination du SoH).

C. Étude de la résistance interne (SoH)

Ainsi, dans cette troisième et dernière étude présentée, nous nous intéressons au suivi de l'état de santé (SoH) et plus particulièrement à l'augmentation de la résistance interne de la batterie. En effet pour étudier le SoH en "mild hybrid" c'est la perte de puissance disponible (augmentation de la résistance) qui est étudiée plutôt que la perte de capacité. Il est à noter que cette valeur de résistance dépend de l'état de charge, des conditions d'utilisation précédentes, de la température et bien entendu du vieillissement.

Pour ce faire, lors de l'utilisation de la batterie dans des conditions "mild hybrid", nous nous intéressons à l'étude du rapport de l'ondulation de tension sur l'ondulation de courant $\Delta V/\Delta I$ (résistance) lors de fortes variations des grandeurs électriques sur la batterie. Ainsi, lors d'une forte variation de la grandeur d'entrée (pour nous le courant), la

réponse en tension "instantanée" (dépendante de la période d'échantillonnage tel qu'illustré ci-dessous) est divisée par la valeur de la variation de courant.

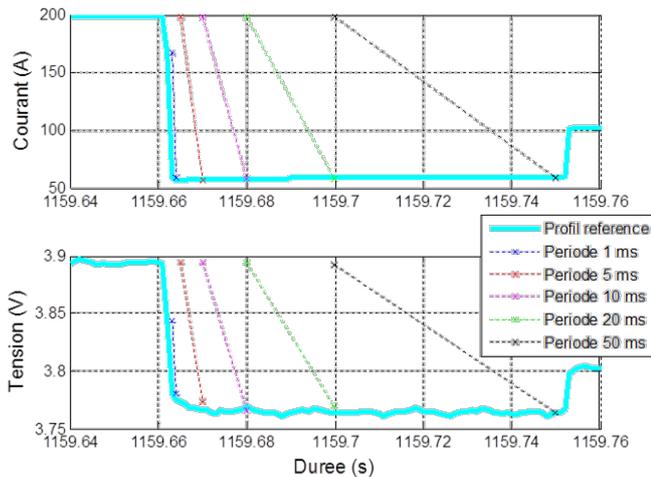


Figure 8 - Zoom autour d'une impulsion avec affichage des ΔV et ΔI tels que perçus à différentes fréquences d'acquisition

Cette méthode de détermination de la résistance (ou de la puissance si on s'intéresse au produit du courant et de la tension) peut être suffisante à un suivi du vieillissement de la batterie, si les conditions d'observations sont inchangées et basées sur des mesures à même température, même état de charge et même nature de courant. Si ces conditions sont remplies, l'augmentation de cette résistance (ou la diminution de la puissance) est autorisée jusqu'à un certain seuil (fixé par l'assembleur de la batterie) au-delà duquel la batterie sera considérée comme inutilisable.

IV. PERSPECTIVES

Depuis un an et demi, une partie bibliographie importante ainsi que de nombreuses expérimentations préalables ont donc été effectuées afin de couvrir une importante diversité d'utilisation et de comportement des cellules Li-ion (cycles d'hystérésis (mineurs ou non), relaxation, auto-décharge, différences de capacité ou d'impédance selon l'état de charge, température, ...).

Cette diversité d'expérimentales a permis la constitution de bases de données qui à leur tour ont permis la mise en place rapide des premiers observateurs développés. Pour ce qui est de ces observateurs, les premiers développements sont encourageants et doivent être validés avec des technologies Li-ion beaucoup plus exigeantes dont l'état de charge est difficilement déterminable (techno. LFP pour des tracés OCV en fonction du SoC très "plats").

L'aspect industriel de la thèse impose le développement d'un BMS destiné à être commercialisé, de manière à être inclus avec le pack batterie. La puissance de calcul est donc limitée pour des questions de coût, ce qui impose l'utilisation d'observateurs moins "gourmands" en termes d'opérations. Parmi les prochains observateurs à étudier, nous pouvons citer la mise en place d'un observateur à mode glissant [20]. Ces observateurs pourront être complexifiés afin d'y inclure la détermination de certaines valeurs de résistances internes ou de capacité afin d'évaluer le SoH (à comparer à la méthode étudiant le $\Delta V/\Delta I$).

Ces autres observateurs doivent donc être développés pour comparaison, le tout devant être amélioré afin d'inclure les effets de la température et du vieillissement, mais également optimiser en fonction de chaque technologie Li-ion étudiée. En plus des autres problématiques liées à la détermination de SoH et de SoF, de nouvelles expérimentations doivent permettre de valider ces modèles, mais aussi de mettre en situation un assemblage de cellule ainsi que des états de vieillissement différents des cellules (neuves, vieillissement calendaire ou par cyclage).

REFERENCES

- [1] B. Scrosati, J. Garche, "Lithium batteries: Status, prospects and future", *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2419-2430, 2010
- [2] L.W. Juang, "Online Battery Monitoring for State-of-Charge and Power Capability Prediction", PhD thesis, University of Wisconsin-Madison, 2010
- [3] K. Mamadou, A. Delaille, E. Lemaire-Potteau, Y. Bultel, "The State-of-Energy : A New Criterion for the Energetic Performances Evaluation of Electrochemical Storage Devices", *ECS Transactions*, vol.25, no. 35, pp. 105-112, 2010
- [4] B. Kortschak, C. Kurtulus, M. Dohr, U. Wiedemann, V. Hennige, "Detection Method of Battery Cell Degradation", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-6, 2011
- [5] D. Le, X. Tang, "Lithium-ion Battery State of Health Estimation Using Ah-V Characterization", *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, vol. 2, 2011
- [6] D.Ha, "On-line SOH Recognition for Large Capacity Lithium-ion Batteries on Electric Vehicle", *EVS26 Electric Vehicle Symposium*, 2012
- [7] A.T. Stamps, C.E. Holland, R.E. White, E.P. Gatzke, "Analysis of capacity fade in a lithium ion battery", *Journal of Power Sources*, vol. 150, pp. 229-239, 2005
- [8] M. Montaru, "Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages", PhD thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009
- [9] A. Devie, "Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité", PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012
- [10] M. Urbain, "Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-Ion. Estimation en ligne du SoC et su SoH", PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009
- [11] T.K. Dong, A. Kirchev, F. Mattera, J. Kowal, Y. Bultel, "Dynamic Modeling of Li-Ion Batteries Using an Equivalent Electrical Circuit", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, no. 3, pp. A326-A336, 2011
- [12] D. Di Domenico*, Y. Creff, E. Prada, P. Duchêne, J. Bernard, V. Sauvart-Moynot, "A Review of Approaches for the Design of Li-Ion BMS

- Estimation Functions", IFPEN International Conference, vol. 68, no. 1, pp. 127-135, 2013
- [13]J. Zhang, J. Lee, "A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery", Journal of Power Sources, vol. 196, no. 15, pp. 6007-6014, 2011
- [14]T. Weigert, Q. Tian, K. Lian, "State-of-charge prediction of batteries and battery-supercapacitor hybrids using artificial neural networks", Journal of Power Sources, vol. 196, no. 8, pp. 4061-4066, 2011
- [15]F. Khoucha, M.E.H. Benbouzid, A. Kheloui, "An optimal fuzzy logic power sharing strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-5, 2010
- [16]A. Zenati, P. Desprez, H. Razik, S. Rael, "A methodology to assess the State of Health of lithium-ion batteries based on the battery's parameters and a Fuzzy Logic System", IEEE International Electric Vehicle Conference, pp. 1-6, 2012
- [17]C. Nouillant, K. Ouaksel, S. Garnit, F. Guillemard, "Procédé d'estimation des états de charge et de santé d'une batterie d'un véhicule, estimateur et véhicule comportant un tel estimateur", Patent, 2010
- [18]J. Remmlinger, M. Buchholz, M. Meiler, P. Bernreuter, K. Dietmayer, "State-of-health monitoring of lithium-ion batteries in electric vehicles by on-board internal resistance estimation", Journal of Power Sources, vol. 196, no. 12, pp. 5357-5363, 2011
- [19]H. Rahimi-Eichi, C. Mo-Yuen, "Adaptive parameter identification and State-of-Charge estimation of lithium-ion batteries", IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4012-4017, 2012
- [20]I.S. Kim, "A Technique for Estimating the State of Health of Lithium Batteries Through a Dual-Sliding-Mode Observer", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 4, pp. 1013-1022, 2010
-

Power network stability and energy management of electrified auxiliaries in Plug-in Hybrid Vehicle

Khoa Duc NGUYEN, INSA de Lyon- Laboratory AMPERE

Pr.Eric BIDEAUX, INSA de Lyon- Laboratory AMPERE

Associate Pr. Minh-Tu PHAM, INSA de Lyon- Laboratory AMPERE

Abstract— The work presented in this document is a brief summary of my PhD entitled “Energy Management and Electrical Stability of vehicle network including electrified auxiliaries”. Since March 2012, my work has focused on modeling one typical electrified auxiliary in plug-in hybrid vehicle (PHEV) and investigated a predictive control. Another aspect has been to carry out a functional analysis of different operating-modes of PHEV. As a result several use-cases have been exhibited for the power network energy management of the vehicle.

I. INTRODUCTION

In order to improve battery utilization in Plug-in Hybrid Vehicle (PHEV) and reduce the auxiliaries dependency on internal combustible engine (ICE), Volvo Group investigates an electrification of some typical auxiliaries such as the air supply system, the 24V power network with the integration of a power converter DC/DC 600V/24V DC, the power steering system and the power-take-off. This electrification should allow to eliminate the auxiliary system dependency on the internal combustible engine, and gives the possibility to apply new control strategies dedicated to a better energy management. It should also ensure the power network electrical stability for stressed conditions of the vehicle. This problem raises several difficulties: the system under consideration is, in essence, multi-physical, with different typologies and contains many constraints.

The main objectives of this study could be summed up as follows:

- Synthesize an advanced control law on the electrified auxiliary system to improve the energy efficiency. This study assumes that the information of upcoming route is available.
- Analyze the electrical stability of the traction voltage bus in stressed conditions.
- Develop a method to evaluate the benefit of auxiliary electrification.

To achieve these objectives, we propose to consider firstly a typical electrified auxiliary and evaluate the benefit of the knowledge of upcoming auxiliary consumption in term of energy management. The electrified auxiliary selected to perform this study is the PHEV air supply system for many reasons. This typical auxiliary has a nonlinear behavior, contains multi-physical subcomponents and is described not only with white but also black boxes. A global analysis of the vehicle operating modes is carried out to determine the impact of the existing powertrain control on energy management. This analysis combined with the first work on one specific auxiliary will allow us to identify different use-cases.

This paper is organized as follows: The model of the air supply system is presented and its constraints are discussed in section II. A predictive model-based control is designed in Section III. The energy management formulation and the simulation results are also presented in this section. Section IV exhibits the operating modes of PHEV and a functional analysis of the power network is described. Based on this analysis, a proposal of predictive energy management dedicated to electrified auxiliary system is presented.

II. AIR SUPPLY SYSTEM

This auxiliary, shown in Figure 1, is composed of an electrical motor supplied by the traction battery, a screw-compressor driven by the electrical motor, a dead volume consisting of a capsule pipeline volume and a compressor housing volume, a tank containing pressurized air for pneumatic components such as braking system, suspension system, gear-box transmission and so on.

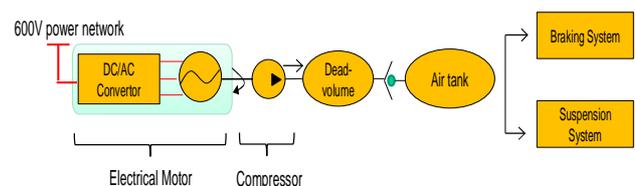


Figure 1: Sketch of air supply system on scope

In order to assure that the selected control strategy could be embedded into vehicle calculator, the auxiliary models dedicated to this control should be enough simple but are still able to capture the essential details of the system..

The air pressure inside the air tank and the dead-volume are the main state variables of the system and their dynamics can be represented by:

$$\dot{P}_t = \frac{k \cdot r \cdot T_t}{V_t} \cdot \rho_{air} \cdot (q_{in\,er} - q_{out}) \quad (1)$$

$$\dot{P}_{dv} = \frac{k \cdot r \cdot T_{dv}}{V_{dv}} \cdot \rho_{air} \cdot (q_{comp} - q_{in\,er}) \quad (2)$$

In (1) and (2), P_t and P_{dv} are air pressure in the air tank and the dead-volume, T_t and T_{dv} are the temperature inside the air tank and the dead-volume, V_t and V_{dv} are the volume of the tank and the dead-volume, k is the isentropic index of air inside the tank and dead volume; r, ρ_{air} are the gas constant and the air standard density ; $q_{comp}, q_{in\,er}, q_{out}$ are the mass flow rate at the compressor output, at the input and output of the tank respectively.

Concerning the screw compressor modeling, we used two available maps given by the manufacturer. These maps give the air mass flow rate and the torque at the output compressor as two functions of the pressure inside the tank and the rotation velocity of the motor.

A velocity closed-loop controls the electrical motor so that the acceleration of the motor cannot exceed 1000 rpm/s and its deceleration cannot be lower than -1000 rpm/s. The mathematical expression of the motor rotation velocity could be given as:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{if } \Omega = \Omega_{set} \\ 1000 & \text{if } \Omega < \Omega_{set} \\ -1000 & \text{if } \Omega > \Omega_{set} \end{cases} \quad (3)$$

Where Ω, Ω_{set} are respectively the rotation velocity and the set-point of the electrical motor. Furthermore, the following physical constraints must be considered:

$$\begin{aligned} \Omega_{min} &\leq \Omega \leq \Omega_{max} \\ P_t^{min} &\leq P_t \leq P_t^{max} \\ P_{dv}^{min} &\leq P_{dv} \leq P_{dv}^{max} \end{aligned} \quad (4)$$

Where min and max denote the minimum and maximum bounds of the different variables.

III. CONTROL ARCHITECTURE

The goal of the energy management system is to minimize the energy consumption of a specific energy source but also to ensure that all the constraints are not enforced. In this work, we designed a controller to determine the set-point rotation velocity Ω_{set} of the electrical motor and minimize the electrical energy withdrawn from the battery while all constraints of the system are still guaranteed.

The selected control strategy is a model-based predictive control (Figure 2). This technique uses a prediction of the air consumption within of a sliding window in order to calculate

Ω_{set} in a receding horizon. The principle of this control strategy is to calculate a future control sequence that minimizes a cost-function, which reflects the optimization problem subject to several constraints. Then, the first element of this sequence is applied to the air supply system model. The main idea of this control strategy can be found in [1], [2], [3]. An overview of different model predictive controls (MPC) both linear and nonlinear could be found in [4].

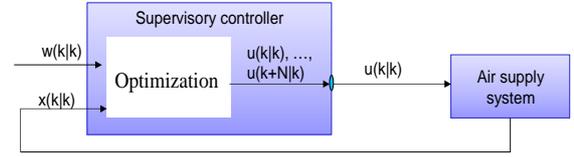


Figure 2: Predictive control system

Generally, the optimization problem of a predictive control can be formulated in discrete-time as:

$$\min_{\Omega_{set}} J = \sum_{i=0}^{N_p} \Omega(k+i|k) \cdot C(k+i|k) \quad (5)$$

Subject to

$$\begin{cases} x(k+i+1|k) = F(\Omega_{set}(k+i|k), x(k+i|k), w(k+i)) \\ C(k+i|k) = G(\Omega_{set}(k+i|k), x(k+i|k), w(k+i)) \\ \Omega(k+i|k) = H(\Omega_{set}(k+i|k)) \\ \Omega_{set}^{min} \leq \Omega_{set} \leq \Omega_{set}^{max} \\ x^{min} \leq x(k+i|k) \leq x^{max} \end{cases} \quad (6)$$

Where N_p is the prediction horizon, x is the state variable, $\Omega_{set} = [\Omega_{set}(k|k), \dots, \Omega_{set}(k+N_p|k)]^T$ is the sequence of the control variable, $C(k+i|k)$ is the predicted motor torque at the instance $(k+i)$ with the prediction horizon beginning at the instance k , w is the vector of known inputs (in this case, w is the air consumption), and $x(k+i|k) \in \mathbb{R}^n$ is the predicted state vector at the instance $(k+i)$ with the prediction horizon beginning at the instance k .

Figure 3 shows the pressure variation in the tank, the motor rotation speed, and the electrical power consumption of the system with this controller. A typical driving cycle defined by Volvo was used for the simulation. The control variable is the set-velocity of the electrical motor and its value is bounded between 0 and 3000rpm. The prediction horizon N_p and the sampling time are T_{step} are respectively 150s and 0.5s.

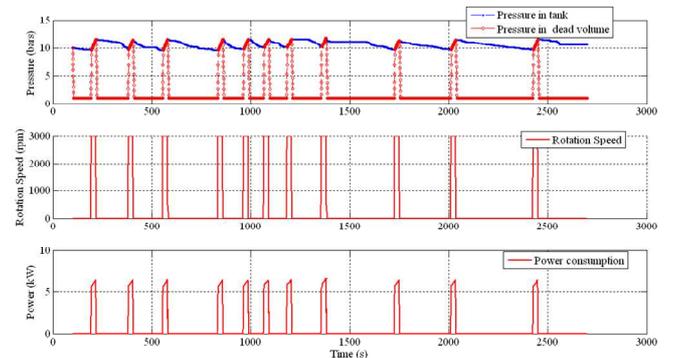


Figure 3: Simulation results with supervisory predictive control

In order to evaluate the benefit in energy saving of this method, we compare the simulation results given by this

predictive control with the results given by a hysteresis control. In hysteresis control, the air pressure in the tank is maintained inside a pressure range. It means that when the pressure drops off below a minimum pressure value, the screw compressor is activated to fill the tank with air; conversely, the screw compressor is deactivated when the pressure exceeds a maximum admissible value.

MPC	Hysteresis Control
Air Cons.: 322.92 KJ	Air Cons.: 322.92KJ
Electrical Cons.: 1677 kJ	Electrical Cons.: 1810,2 kJ
Final Pressure: 10.64 bars	Final Pressure: 12.66 bars

Table 1: Comparison on energy consumption given by two controllers: MPC and Hysteresis Control

As seen in Table 1, the electrical energy consumption of the air supply system is smaller than the result given by the hysteresis control. However, the energy consumptions of these two controllers are almost the same while comparing them at the same final air pressure. It means that the predictive control could have a benefit in term of energy saving compared to hysteresis control only while the final air pressure obtained with the hysteresis control is high.

The next step of this work will be to use dynamic programming to determine the optimal control of the electrified air supply system and compare the result obtained by this method the two other techniques.

IV. FUNCTIONAL ANALYSIS ON PHEV

In PHEV, the power-split configuration (between the engine and electrical motor) decides the efficiency of vehicle in term of energy management. This powertrain control development is not included in my PhD work, but has an important impact on the electrified auxiliary system control definition. Indeed, the battery and electrical motor are the main energy sources of the electrified auxiliary system, but the operation of these two components depends on the powertrain control. Existing powertrain control strategies could be found in [5], [6], [7], such as charge-depleting, charge-sustaining and so on. As a result, the identification of use-cases in which the energy management for the electrified auxiliary system is essential. This analysis leads to Figure 4.

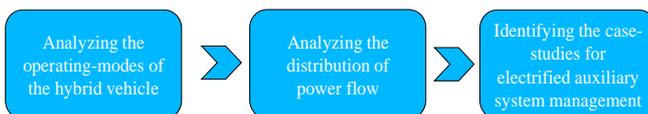


Figure 4: Analysis steps to identify the user cases

The main operating modes of the hybrid vehicle that concern the PhD study are identified as follows:

- the hybrid mode, where the engine and electrical motor cooperate to propel the vehicle;
- the full-electric mode, where the battery is the unique energy source of the vehicle;

- the full electric anticipated mode, where the engine is forced by the driver request to charge the traction battery of the vehicle;
- the electrical braking mode, where the electrical motor is used to decelerate the vehicle and transformed the kinetic/potential energy of the vehicle into electrical energy stored in the battery.

The operating-mode analysis also indicates the distribution of the power flow between the different modes. This step allows to determining the main power source for each mode.

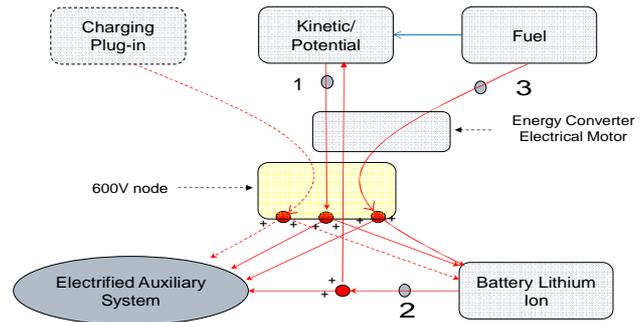


Figure 5: Power flow in the PHEV

Based on the first and second analysis step, a third step regroups the operating-modes having the same energy source to create new use-cases, and defines the objectives in the energy management problem of each case:

- hybrid and full electric anticipated mode, the objective for EAS management will be to use the electrified auxiliary system to support the engine to set a more efficient operating-point;
- full electric mode: the objectives consist in minimizing the energy consumption on the traction battery and ensuring the power network stability subject to power limit constraints;
- electrical braking mode: the objective is to maximize the regenerated energy braking by using auxiliary buffers.

The solutions of each user case will depend on the constraints of the components used in the system and will be considered more in detail in the future works.

V. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

The first simulation results show that a predictive control with *a priori* knowledge of the air consumption could lead to a benefit on energy consumption for the air supply system in comparison to a standard control (hysteresis control). However, this conclusion is only achieved when the final air pressure obtained with the hysteresis control is high. The solution of a predictive control needs to be compared to the global optimal solution given by a Dynamic Programming method that will be realized in the next step of my thesis. This work could lead to a conference paper submitted at the end of this year.

A general functional analysis on vehicle operating-modes is realized in order to identify several use-cases in which the

energy management of the electrified auxiliary system could lead to a benefit in term of consumption. The next step of this work will investigate appropriated methods that could be applied on the power network for each use-case.

REFERENCES

- [1] R.FINDEISEN et al., “An introduction to Nonlinear Model Predictive Control”, Control, 21st Benelux Meeting on Systems and Control, Eindhoven, 2002
 - [2] F.ALLGOWER et al., “Nonlinear Model Predictive Control: From Theory to Application”, J. Chin. Inst. Chem. Engrs., Vol. 35, No. 3, 299-315, 2004
 - [3] J.B.RAWLINGS, “Tutorial Overview of Model Predictive Control”, Control Systems, IEEE, Volume: 20, Issue: 3), 2000
 - [4] S.JOE QIN et al., ”A survey of industrial model predictive control technology”, Control Engineering Practice, Vol. 11, No. 7, pp. 733-764, 2003
 - [5] Y.-J. HUANG et al., “Design of energy management for parallel hybrid vehicles using logic threshold and instantaneous optimization method”, International Journal of Automotive Technology August 2009, Volume 10, Issue 4, pp 513-521
 - [6] C.C. LIN et al., “Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck”, American Control Conference. Proceedings of the 2001 (Volume:4)
 - [7] J.GONDER et al., “Energy Management Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, Presented at the 2007 SAE World Congress, 2007, Detroit, Michigan
-

Formalisation et synthèse de procédures d'exploitation d'une ligne de métro

Delphine PAQUEREAU

Laurent PIÉTRAC, AMPERE – INSA ; Eric NIEL, AMPERE – INSA ;

Laurent BOURESCHÉ, THALES

Abstract— The aim of the study is to gain knowledge about the operations procedures for managing incidents on a subway line and assess the level of risk in the implementation of these procedures. The second years of the PhD has developed a modeling method for these procedures : BPMN formalization, Petri Nets modeling of procedures and resources involved, and the study of the state space to identify unsafe states.

Résumé— L'objectif de cette étude est d'acquérir des connaissances sur les procédures d'exploitation permettant de gérer les incidents sur une ligne de métro et d'évaluer le niveau de dangerosité lors de la mise en oeuvre de ces procédures. La deuxième année de thèse a permis de développer une démarche de modélisation de ces procédures : la formalisation BPMN, la modélisation par réseaux de Petri des procédures et des ressources impliquées, et l'étude du graphe d'accessibilité pour identifier des états dangereux.

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années, la supervision du trafic des métros a évolué avec l'arrivée des systèmes informatisés de contrôle et de commande qui a modifié le rôle de l'opérateur humain. L'automatisation des opérations s'est généralisée pour faire progresser la sécurité ainsi que l'offre proposée aux voyageurs. Cependant, il existe toujours des modes d'exploitation dans lesquels l'opérateur humain doit reprendre le contrôle des opérations, comme lors d'un incident. Les conditions de transport sont alors fortement dégradées et le retour à une exploitation normale est confié aux opérateurs qui mettent en place des stratégies élaborées suivant leur expérience et leur savoir-faire.

Aujourd'hui, le système de supervision d'une ligne de métro développé par la société THALES signale par alarmes les dysfonctionnements qui se produisent mais n'apporte pas d'aide à la décision à l'opérateur pour

une gestion globale de l'incident. Afin de proposer des procédures structurées aux exploitants de métro, il faut s'assurer et garantir que ces procédures permettent de gérer les situations dangereuses. En effet, la sécurité des usagers, du personnel et du matériel est primordiale et dans un souci d'offrir le meilleur service possible aux voyageurs, les situations de blocage et dangereuses ne sont pas acceptables.

La société THALES souhaitant enrichir son application de supervision, mes recherches, débutées en décembre 2011, s'inscrivent dans le cadre d'un contrat CIFRE financées par l'ANRT et dans une collaboration entre le laboratoire AMPERE et le groupe THALES, et plus particulièrement avec le service ATSSoft en charge du développement informatique et de l'amélioration de l'application ATS. Au sein du laboratoire AMPERE, j'appartiens au groupe de recherche FDS (Fiabilité, Diagnostic et Supervision).

La première partie du rapport sera consacrée à la présentation du contexte industriel et des objectifs de la thèse. La démarche de l'étude et les résultats obtenus seront ensuite exposés et développés étapes par étapes. Une partie présentera l'étape en cours de recherche et la situation étudiée. La dernière partie développera les perspectives d'études et les interrogations.

II. CONTEXTE ET OBJECTIFS

A. Contexte industriel

Au cours d'une journée d'exploitation d'une ligne de métro, de nombreux incidents peuvent venir perturber la bonne gestion du trafic et donc diminuer considérablement l'offre proposée aux usagers. Les

systèmes modernes de supervision de trafic d'une ligne de métro appelés Automatic Train Supervision (ATS) assurent le contrôle de l'exécution de l'offre de transport en supervisant les systèmes d'acquisition et de commande directement reliés au terrain [1].

Dans le but d'assurer aux passagers le meilleur service possible, l'industriel souhaiterait développer une aide à l'opérateur pour uniformiser et améliorer la gestion du trafic à la suite d'une perturbation ayant fortement dégradé les conditions d'exploitation. L'application n'apporterait pas seulement des outils pour gérer ces situations, comme c'est le cas aujourd'hui, mais également des méthodes d'utilisation [2].

Lorsque l'exploitation est en mode dégradé, l'opérateur se trouve dans un environnement stressant puisqu'il est responsable de la sécurité des personnes présentes sur la ligne [3]. Le nombre d'intervenants sur le terrain, la variété du public concerné (de l'usager au pompier), le nombre de procédures à gérer simultanément sont également des contraintes à prendre en compte pour appréhender les responsabilités de l'opérateur de supervision dans ces situations. La mise en place de procédures d'exploitation en mode dégradé permettrait ainsi à l'opérateur de supervision d'être guidé par une ligne directrice lors de la gestion d'un incident.

B. Objectifs

Dans ce contexte industriel, les objectifs sont, tout d'abord, le recensement et la formalisation des principales procédures d'exploitation mises en œuvre lors de la gestion d'un incident se produisant sur une ligne de métro. Après avoir déterminé un modèle abstrait, l'objectif est de proposer une aide à l'opérateur de supervision lors de la gestion d'un incident. Pour prendre en compte un incident, une procédure définit l'ensemble des étapes à suivre et des actions à réaliser par l'opérateur [4].

Au cours de la deuxième année de recherche, l'objectif a été précisé et s'oriente aujourd'hui vers un signalement d'états dangereux pouvant être atteints lors de la gestion des incidents. L'étude permettra d'identifier ces états dangereux, de prévenir l'opérateur si on se rapproche d'un de ces états en signalant l'événement qui conduirait à l'état dangereux voire de proposer des solutions pour sortir de cet état. Une évaluation du niveau de dangerosité lors de la mise en œuvre des procédures de gestion d'incidents pourra ainsi être faite.

Un état dangereux se définit par une combinaison particulière des états de l'ensemble des ressources du système n'assurant plus la sécurité des personnes présentes sur la ligne, le déroulement des procédures de gestion des incidents modifiant l'état de ces ressources.

III. DEMARCHE ET RESULTATS

A. Recensement et classification des procédures

Le premier objectif de l'étude étant de formaliser des procédures d'exploitation, il était nécessaire d'avoir une bonne compréhension du système, de ces contraintes, des perturbations pouvant se produire lors de l'exploitation d'une ligne de métro ainsi que des procédures d'exploitation utilisées quotidiennement par les opérateurs de supervision [5]. L'acquisition de l'ensemble de ces connaissances s'est faite durant ma participation en tant qu'auditrice libre à une formation à la RATP de chefs de régulation, superviseurs d'une ligne de métro parisien. La RATP étant un client important de THALES, une collaboration a donc pu être mise en place et j'ai ainsi eu l'opportunité de participer à cette formation et de dialoguer avec des équipes d'opérateurs chargés de l'exploitation du métro.

Après avoir acquis et analysé les connaissances et savoir-faire des opérateurs sur la gestion d'un incident, notamment les procédures mémorisées, une classification a permis de mettre en évidence des structures et des séquences communes. Cette analyse a ainsi conduit à l'élaboration d'un graphe des dépendances pour hiérarchiser les procédures et identifier différentes inclusions.

Le graphe des dépendances suivant permet de donner un exemple des différentes inclusions possibles entre les procédures. Les rectangles représentent les procédures globales permettant de gérer un incident et pouvant être déclenchées par l'occurrence d'un événement. Les procédures représentées par une ellipse ont uniquement pour but de regrouper un ensemble d'activités et correspondent donc à des procédures élémentaires ne permettant pas seules de gérer un incident.

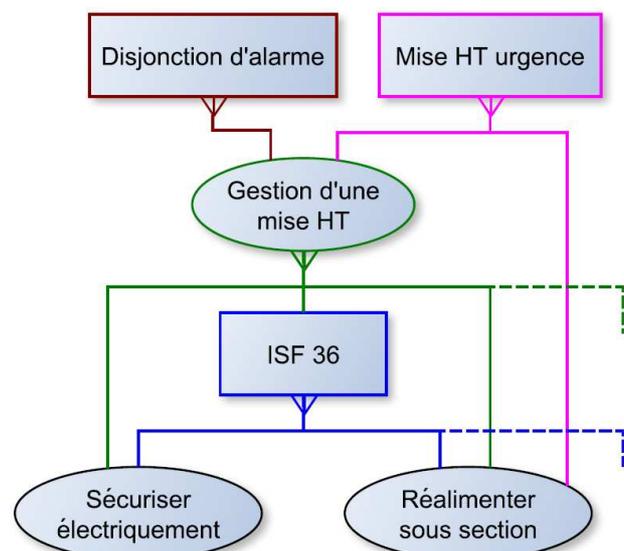


Fig.1. Partie du graphe des dépendances

On remarque dans le graphe des dépendances qu'une procédure globale *ISF 36* est incluse dans une procédure élémentaire *Gestion d'une mise HT*. Les relations entre les différentes procédures ne sont donc pas une simple hiérarchisation mais il existe de nombreuses inclusions et interactions entre elles, mise en évidence grâce aux procédures élémentaires. Onze procédures globales et six procédures élémentaires ont été identifiées suite à la formation suivie à la RATP.

B. Formalisation BPMN

1) Principe

L'étape suivante consiste à formaliser ces procédures d'exploitation dans un langage facilement compréhensible et accessible pour des non spécialistes, la notation graphique standardisée BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation) [6] a donc été choisie. Ce langage permet d'avoir des échanges avec des équipes métier susceptibles de valider les procédures formalisées. Ce langage a déjà été retenu par la société THALES pour mettre en place une aide à la décision dans une application de supervision globale de systèmes complexes.

Le langage BPMN a le même fonctionnel que les diagrammes d'activités UML (Unified Modeling Language) mais propose une notation permettant d'avoir une description plus précise du processus, comme des flux de messages, des couloirs d'activités par participants, des types d'activité. Le tableau suivant présente les principaux objets de ce langage.

TABLE I : EXEMPLES D'OBJETS BPMN

Événement	 Début Message  Intermédiaire  Fin Erreur
Branchement	 Ou exclusif  Parallèle
Activité	 Tâche  Sous-procédure
Type d'activité	 Utilisation d'une application par l'opérateur  Envoi d'un message  Tâche réalisée manuellement
Flux	 Séquence  Flux par défaut  Message

Ce langage permet ainsi de mettre en évidence certaines caractéristiques des procédures d'exploitation d'une ligne de métro comme les différents échanges entre les intervenants et la progression parallèle de certaines séquences. Cette notation est donc un intermédiaire entre une description littérale des procédures d'exploitation d'une ligne de métro et leur modélisation formelle.

2) Application

Les procédures d'exploitation sont formalisées avec l'outil yEd Graph Editor, par rapport aux actions réalisées par l'opérateur de supervision, principal utilisateur de l'application ATS et chef de régulation de la ligne de métro considérée.

Ainsi, les procédures globales seront formalisées indépendamment les unes des autres avec le langage BPMN tout en identifiant, sous forme de sous-procédures, les procédures élémentaires qu'elles emploient.

Trois grands types d'activités BPMN se distinguent au sein des procédures d'exploitation :

- les communications entre le superviseur et l'environnement extérieur (conducteurs, agents RATP, ...) qui se déroulent indépendamment de l'application ATS
- la gestion du trafic et la régulation qui sont des éléments en partie déjà intégrés dans l'ATS
- la gestion de l'énergie de traction alimentant les trains

Cette notation donne ainsi une vision globale des processus, des interactions entre les participants et de la progression du flux.

C. Identification des ressources

Afin de mettre en évidence les interactions entre les procédures d'exploitation et d'éventuelles situations dangereuses, il est nécessaire d'identifier les différentes ressources partagées. L'état de ces ressources varie avec l'évolution des procédures et la gestion des incidents. Ces ressources sont décrites du point de vue du train et en considérant la zone de ligne dans laquelle il se situe.

Pour identifier les ressources mises en jeu lors du déroulement des procédures de gestion d'incidents, une démarche a été établie. Tout d'abord, il est nécessaire d'identifier les éléments modifiés ou contraignant le système, en considérant les activités des modèles BPMN unes à unes. Ces éléments sont ensuite regroupés afin de déterminer des ressources ainsi que les différents états dans lesquels elles peuvent se trouver. Ainsi, 16 ressources principales ont été définies permettant de décrire la situation dans laquelle se trouve le train considéré.

Une classification de ces ressources a également été réalisée pour faciliter la recherche d'éventuelles situations dangereuses, 4 catégories ont ainsi été mises en avant.

TABLE II : CATEGORIES DES RESSOURCES

Catégorie	Définition
Train	Caractéristique du train
Réglementation	Contrainte
Alarme	Mise en évidence d'un incident
Zone	Caractéristique de la zone

On peut citer comme exemple les 5 ressources Train :

- sa position en station ou hors station
- son alimentation en énergie de traction
- son occupation par des voyageurs
- la situation de son conducteur
- son niveau de sécurisation électrique

Il existe également différentes relations entre les ressources :

- des liens qui sont propres à la définition même des ressources, comme par exemple un train ne peut changer de position que s'il est alimenté en énergie
- des relations obligatoires liées au respect de la réglementation ferroviaire
- des combinaisons d'états à éviter qui correspondent à des situations dangereuses

On définit ainsi un état dangereux comme une combinaison des états des ressources du système ne garantissant pas la sécurité des personnes présentes sur la ligne (voyageurs, agents RATP, ...).

IV. ETUDE EN COURS

A. Modélisation par réseaux de Petri

1) Poursuite de la formalisation

Dans la démarche de modélisation des procédures d'exploitation d'une ligne de métro, nous avons choisi de commencer par les formaliser avec le langage BPMN. Cette formalisation permet d'avoir une représentation graphique des séquences d'activités à réaliser ainsi que des échanges avec les différents intervenants, procédure par procédure, mais n'apporte pas d'outils pour représenter l'état des ressources du système et étudier les liens et interactions qui pourraient exister entre elles.

Le langage BPMN permet de représenter les étapes d'un processus sous forme d'activités et d'événements et les réseaux de Petri permettent de modéliser les différents comportements d'un système évoluant selon le franchissement de transitions.

2) Démarche

L'objectif est de modéliser les procédures d'exploitation et les ressources utilisées par des réseaux de Petri et ainsi obtenir les combinaisons de ressources atteignables par le système.

Pour cela, les procédures modélisées avec le langage BPMN doivent être traduites en réseaux de Petri et simplifiées afin de considérer uniquement les activités ayant un impact sur l'état des ressources. Les ressources doivent également être modélisées sous forme de réseaux de Petri qui indiqueront ainsi l'état du système suivant les différentes évolutions de procédures.

L'application CPN Tools [7] a été choisie pour représenter les modèles réseaux de Petri et étudier les propriétés du système, au travers notamment du graphe d'accessibilité des marquages.

B. Sûreté de fonctionnement

1) Problématique

La modélisation par réseaux de Petri permet d'obtenir l'ensemble des combinaisons des ressources atteignables par le système parmi lesquelles il existe des situations dangereuses. L'objectif est d'identifier, à partir du graphe d'accessibilité, les évolutions du système menant à ces situations dangereuses mais également les trajectoires possibles permettant d'en sortir [8].

L'identification de ces états dangereux se fait par expertise du système permettant de définir des combinaisons entre une partie des ressources ne garantissant pas la sécurité des personnes présentes sur la ligne. Cependant, le nombre de combinaisons possibles entre l'ensemble des états des ressources est très important (environ 2^{16} possibilités) même en ne prenant pas en compte les combinaisons impossibles.

L'identification d'états dangereux reste donc une tâche complexe et nécessite une exploration de cet ensemble de combinaisons.

2) Colorisation des états

Une première étude de différents états dangereux identifiés laisse penser qu'il n'est pas possible d'interdire ou d'éviter ces états sans bloquer le système. Ces états seront donc dans un premier temps mis en évidence dans le graphe d'accessibilité des marquages au travers d'une échelle de couleur permettant d'identifier le degré de dangerosité dans lequel le système se situe. Cette « colorisation » des nœuds du graphe de marquage est rendue possible par un ensemble de fonctionnalités présentes dans CPN Tools.

Les états dangereux identifiés jusqu'à maintenant ne sont pas évitables, mais dans plusieurs cas, la RATP a mis en place une procédure pour les prendre en compte et en sortir. Pour les états dangereux dont la

probabilité est très faible ou qui ne se sont pas encore produits, il semble qu'il n'existe pas encore de procédure pour les traiter. Cette colorisation pourra permettre d'identifier les trajectoires et les évolutions menant aux états dangereux non pris en compte.

Une première qualification [9] des nœuds du graphe de marquage est ainsi envisagée en définissant la contrôlabilité d'une transition au sens de la théorie du contrôle par supervision, c'est-à-dire qu'il est possible d'interdire son franchissement ou que l'on peut attendre avant de la franchir [10].

- État dangereux : état pouvant causer des dommages importants au système ou à son environnement et pouvant entraîner pour l'homme la mort ou des dommages corporels
- Événement redouté : événement conduisant à un état dangereux
- État Rouge = état catastrophique (ou indésirable) : état dangereux ayant uniquement des transitions incontrôlables permettant d'en sortir (pas de procédures existantes à la RATP)
- État Jaune = état critique : état dangereux ayant au moins une transition contrôlable permettant d'en sortir (il existe une procédure RATP pour gérer la situation et sécuriser les personnes)
- État Orange = état à risques : état non dangereux, ayant au moins une transition incontrôlable menant à un état Rouge
- État Blanc = état acceptable : état non dangereux ayant au moins une transition incontrôlable menant à un état Jaune
- État Vert = état sain : état ne présentant aucun risque pour le système, son environnement et les hommes

C. Situation étudiée pour valider la démarche

Pour valider la démarche, il est important d'identifier au préalable une première situation dangereuse que l'on pourra mettre en évidence avec la modélisation des procédures. Les procédures de gestion d'un incendie et d'une demande de coupure de l'énergie de traction sur la ligne pour la présence d'une personne sur les voies ont été ainsi choisies. En effet, lorsqu'un feu est détecté sur une ligne, l'opérateur de supervision doit essayer de tout faire pour que les trains puissent arriver en station et ainsi évacuer les voyageurs à quai pour garantir leur sécurité. Cependant, en considérant qu'une personne est descendue sur les voies dans la même zone de ligne, un conducteur va de manière instinctive et pour garantir la sécurité de la personne, demander une coupure de courant généralisée. Dans cette

configuration d'incidents, il est donc possible d'avoir des trains avec des voyageurs bloqués dans un tunnel enfumé et ne pouvant plus circuler.

La combinaison des ressources de cette situation dangereuse se définit donc par la position du train hors station et sans alimentation électrique dans une zone avec de la fumée.

V. PROBLEMES IDENTIFIES & PERSPECTIVES

A. Modélisation du système

Les procédures d'exploitation sont aujourd'hui modélisées avec le langage BPMN et devront être simplifiées et traduites afin de poursuivre la démarche d'identification de la dangerosité des états du système. Des chercheurs étudient les modalités de transformation des modèles BPMN en réseaux de Petri et des articles présentent des correspondances possibles entre les éléments des langages tout en observant des limites [11]. Des difficultés pourraient ainsi apparaître lors de la traduction.

Jusqu'à maintenant, le choix a été fait de modéliser le comportement d'un train et des ressources avec le point de vue du train, sans prendre en compte les interactions entre les trains, les répercussions d'une activité sur les autres trains et en considérant le train comme un système indépendant. Ce choix facilite la modélisation dans un premier temps et permet de bien définir les limites du système étudié mais occulte sûrement des interactions et des comportements. Un enrichissement de la modélisation des ressources est donc envisageable pour la suite de l'étude.

B. Sûreté de fonctionnement

Cette partie en cours d'étude présente des perspectives à plus court terme. Pour poursuivre son développement, il est nécessaire d'établir la contrôlabilité des transitions qui dépend en partie de la modélisation des procédures en réseaux de Petri, d'identifier les priorités entre les couleurs définies et d'enrichir leur définition, ainsi que d'appliquer la démarche à un système plus important.

La démarche de modélisation par réseaux de Petri a été testée sur deux procédures et en faisant des hypothèses. Un choix doit également être fait afin de déterminer si la modélisation de l'ensemble du système est étudiée, si ce sont des combinaisons de deux ou trois procédures, ...

Concernant l'identification des situations dangereuses, il sera nécessaire d'établir une démarche de recherche afin de garantir un recensement le plus exhaustif possible parmi un espace d'états très grand. Cet espace pourrait être réduit par le traitement du graphe d'accessibilité et en limitant l'objectif de sécurité aux ressources « humaines ».

La représentation du graphe de marquage coloré pourrait permettre d'identifier des nouvelles caractéristiques du système et d'analyser les positions des ensembles de danger les uns par rapport aux autres.

VI. CONCLUSION

La démarche d'étude mise en place au cours de la deuxième année de recherche et testée sur un exemple se décompose donc en cinq étapes : le recensement et la classification des procédures d'exploitation, leur formalisation avec le langage BPMN, l'identification des ressources mises en jeu, la modélisation par réseaux de Petri des procédures et des ressources, et l'analyse des situations dangereuses apparaissant au cours de l'évolution du système.

Ces recherches ont abouti à l'écriture d'un article [5] présenté au cours des 5^{èmes} journées doctorales MACS à Strasbourg.

- [8] G. Moncelet, «Application des réseaux de Petri à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile.» *Laboratoire LAAS, Université de Toulouse*, 1998.
- [9] A. Villemeur, P. Caseau et A. d'Harcourt, «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation,» 1988.
- [10] N. Rezg, «Contribution à la Sécurité Opérationnelle des systèmes : Mise en oeuvre d'une structure de surveillance basée sur les réseaux de Petri Objets Contrôlés,» *Laboratoire Automatique Industrielle de l'INSA Lyon*, 1996.
- [11] R. Dijkman, M. Dumas et C. Ouyang, «Formal semantics and analysis of BPMN process models,» 2007.

REFERENCES

- [1] F. Belmonte, K. Berkani, J. Boulanger et W. Schon, «Safety enhancement of railway traffic by modern supervision systems,» *Seventh World Congress on Railway Research., Montreal (Canada)*, 2006.
- [2] P. Brezillon, R. Naveiro, M. Cavalcanti et J. Pomerol, «SART: an intelligent assistant system for subway control,» *Pesquisa Operacional*, vol. 20, pp. 247--268, 2000.
- [3] C. Zanarelli, «Caractérisation des stratégies instrumentales de gestion d'environnements dynamiques: analyse de l'activité de régulation du métro,» *Thèse de doctorat d'ergonomie, Paris, Université Paris 8*, 2003.
- [4] D. Paquereau, L. Piétrac, E. Niel et L. Bouresche, «Démarche de formalisation et de synthèse de procédures d'exploitation d'une ligne de métro,» *5èmes Journées Doctorales MACS, Strasbourg*, 2013.
- [5] L. Pasquier, «Modélisation de raisonnements tenus en contexte: application à la gestion d'incidents sur une ligne de métro,» *Université Pierre et Marie Curie - Paris8*, 2002.
- [6] Object Management Group, «Business Process Model and Notation BPMN Version 2.0,» <http://www.bpmn.org/>, 2011.
- [7] CPN Tools, «State space manual,» *University of Aarhus, Denmark*, 2002.

TIGRe

modélisation de la Transmission de l'Information Génétique héréditaiRe chez les bactéries à genome multipartite

Olivier Poirion

Laurent Krähenbühl & Bénédicte Lafay — Laboratoire Ampère – CNRS UMR5005
École Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Écully

Abstract—In the context of studying the phenomena at play in the evolution of bacterial replicons (*i.e.*, chromosomes and plasmids), functional and evolutionary trends among genome maintenance-related genes present on the replicon sets of bacterial genomes were investigated. Traditional methods in bioinformatics and phylogenetics are not adapted to large scale and high-dimensional study. I thus implemented a semi-supervised analytical pipeline relying on data-mining methodologies and using the biological homology of the genetic mechanisms involved in the replication and segregation of replicons as parameters. Through this approach, the different types of replicons (plasmids, genome-integrated plasmids and chromosomes) could be characterized and classified, and specific evolutionary processes of genome stabilization could be postulated.

Résumé—Avec comme objectif d'étudier les différents mécanismes à l'œuvre dans l'évolution des réplicons bactériens (chromosomes et plasmides), les caractéristiques fonctionnelles et évolutives des réplicons formant les gnomes bactériens ont été étudiées à partir de la comparaison des gènes impliqués dans la maintenance du génome. Les méthodes traditionnelles de bioinformatique et phylogénie s'avérant inadéquates, j'ai développé une procédure analytique semi-supervisée reposant sur des approches de fouille de données et utilisant comme paramètres les homologies fonctionnelles des mécanismes génétiques de réplication et ségrégation des réplicons. Ainsi, les différents réplicons (plasmides, plasmides intégrés dans le génome et chromosomes) ont pu être caractérisés et classés, et des processus évolutifs de stabilisation de réplicons dans le génome proposés.

I. INTRODUCTION

Components of bacterial genomes are separated into the stable, relatively slow-evolving and species-specific chromosomes, and the accessory, exchangeable and rapid-evolving plasmids. Both these DNA molecules are support to genetic information and are united under the term “replicon” (*i.e.*, replicative unit). Chromosomes harbour essential genes and replicate in synchronisation with the cell cycle. By opposition, plasmids, originally defined as extra-chromosomal genetic elements, are considered to be dispensable and to have a cell-cycle independent replication. The evolution of chromosomes is related to that of plasmids through their interaction into the genome.

In recent years, phylogenetically diverse bacterial species have been shown to harbour multipartite stable genomes constituted of a primary chromosome, homologous to the standard bacterial chromosome (*e.g.*, that of *Escherichia coli*), supplemented with one or more essential replicons adapted to the cell cycle. Although a plasmidic origin is most commonly postulated for them, these elements generally exhibit both chromosomal and plasmidic features [For simplicity sake, they will be called “secondary chromosomes” throughout the following text]. These elements may thus be plasmids adapted to the cell cycle.

My PhD project aims to investigate this hypothesis. I thus developed a global classification procedure using

the genes involved in the replication and segregation of replicons as parameters, and applied it to the exploration of the functional and evolutionary relationships between all bacterial replicons for which complete genome sequences are available in biological sequence public databases.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Query dataset construction

Proteins involved in the replication and segregation of the replicons and the cell cycle were used to build annotated clusters of functional homologs using BLAST and TRIBE-MCL clustering algorithm. A query dataset was constructed based on chosen protein homolog families in ACLAME and in KEGG using KEGG BRITE hierarchy. The query set was then used as input in a BLAST analysis (10e-3 E-value cutoff) to identify putative homologous proteins among all protein sequences available from the Genbank database on 30/11/2012. Then all-vs-all BLAST analysis was conducted and the resulting score matrix was used as input to TRIBE-MCL to form clusters of homologous proteins. Each replicon was then considered as a vector of size n , with n the number of clusters of proteins (Figure 1).

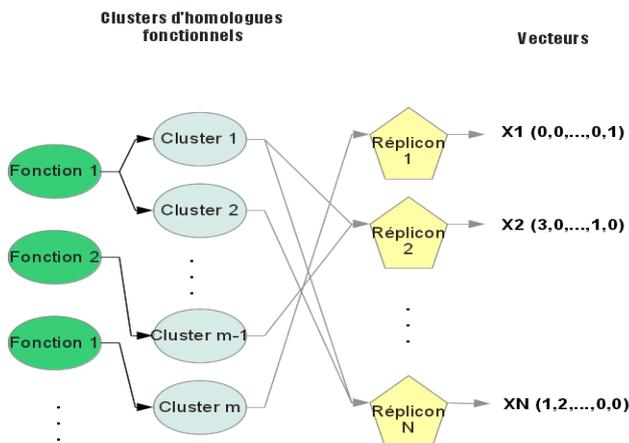


Fig.1. Query dataset construction

For a given replicon and its corresponding vector X_i , the j -th element of this vector $X_i[j]$ is equal to the number of proteins assigned to the j -th cluster, which belongs to this replicon.

B. Methodological approach

Because standard methods fail to describe the complexity of the links between bacterial replicons and the studied genes, various methodological approaches drawn from machine-learning techniques and data mining used to extract and correlate secondary chromosomes genomic specific features. A number of dimension reduction approaches were evaluated. Projection results were coupled with an unsupervised classification procedure to retrieve the structuration of the data. The results were assessed based on cluster

quality indices as well as the clustering relevance with regards to bacterial taxonomy and biology, as well as genomic knowledge extracted from the literature. A complementary exploration of data was realized using graph and spatialization algorithms (Figure 2).

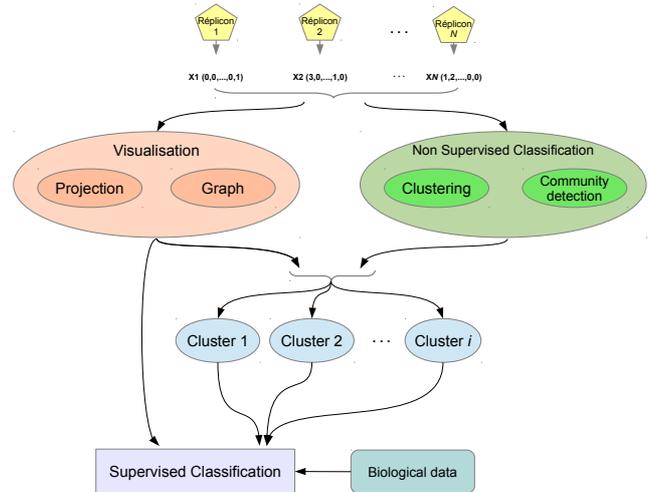


Fig.2. Analytical procedure

The second step of the procedure consisted in the coupling of unsupervised and supervised analyses to explore the functional characterization of bacterial replicons with regard to replication and segregation and identify features specific to secondary chromosomes identified (Figure 2).

III. RESULTS

The bibliographical work, the elaboration of the analytical pipeline, the selection and construction of the clusters of protein homologues, the implementation of databases as well as numerous numerical analyses were achieved during the first year of my PhD. I also conducted some early analyses (mainly visualisations) to check for the pertinence of the input data and methodological options. The second year has been spent in setting up and assessing the final version of the analytical pipeline rigorously, and conducting unsupervised and supervised analyses of the data under different conditions.

A. Analytical procedure

The quality for each clustering result and for each type of genomic elements was assessed. All the projection algorithms tested produced a clear separation of chromosomes and plasmids. Self-organized maps performed better in terms of biological coherence of the obtained clusters as well as in terms of bacterial taxonomy and species biology. This approach is thus expected to provide a more accurate representation of the data. In turn, the graph approach produces good results regarding cluster homogeneity despite presenting twice more clusters than other methods. It thus constitutes an interesting clustering alternative to the dimension reduction methods. Moreover, when

coupled to graph visualization tools, diverse information (see below) could be extracted from the graph visually.

B. Main results

Using this analytical procedure, I am able to characterize a bacterial replicon according to its distribution of genes involved in the cell cycle. For each replicon it is possible to access these different genes and their functionalities, and the links with other replicons according to sequence and/or functional similarities. As expected, chromosomes are clearly separated from plasmids. Overall, secondary chromosomes appear to be more closely related to plasmids than to chromosomes (Figure 3).

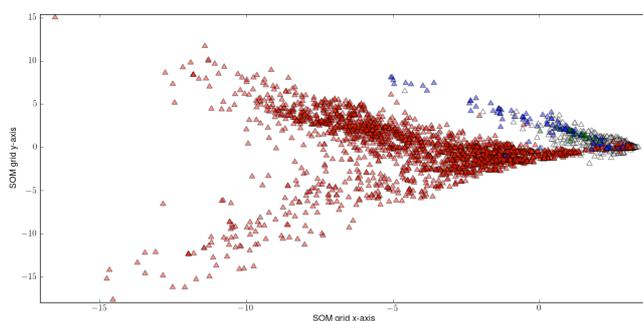


Fig.3. PCA projection of chromosomes (red), secondary chromosomes (blue) and plasmids (white)

Additionally, trends discriminating between chromosomes, plasmids, and secondary chromosomes have been identified, based on the interconnections between replicons as well as with protein clusters, which can be visualized together in a graph (e.g., Figure 4).

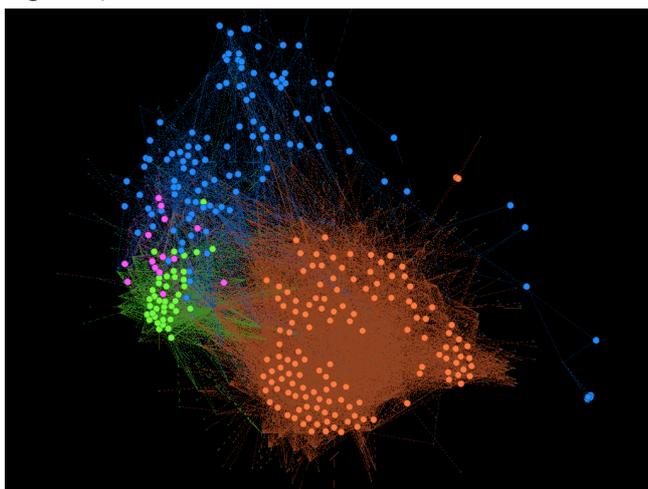


Fig.4. Bipartite graph of chromosomes (orange), secondary chromosomes (green and magenta) and plasmids (blue) of beta-proteobacteria

For instance, several clusters connecting the chromosomes and the secondary chromosomes could easily be identified. Interestingly, the majority among the 20 variables most connected to the secondary chromosomes replicons are specific to these replicons or shared with the chromosomes, hence supporting the

hypothesis of their stabilization in the genome of these bacteria.

IV. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

A. Conclusion

My PhD work is running on schedule. During these two last years, I have implemented an analytical pipeline designed to characterize and classify the different replicons composing bacterial genomes [1,3]. I thus investigated the functional and evolutionary relationships among all replicons that were available in genome sequence public databases, and obtained original results that prove the starting hypothesis of my work to be accurate, *i.e.*, that secondary chromosomes indeed constitute an intermediary stage of genome integration between plasmids and chromosomes [2,4].

B. Perspectives

Results are now accumulating, that will allow me to document the molecular players in the genome integration of replicon, on which to elaborate detailed molecular models of the processes involved in genome maintenance, *i.e.*, the transmission of hereditary genetic information in bacteria. Besides, the building of specific models and the writing of my results into a thesis and journal articles during the final year of my PhD, I will devote time to the searching of a postdoctoral position.

REFERENCES

- [1] O. Poirion and B. Lafay, "Visualization and analysis of an interconnected network of genomic elements," *Apprentissage et données Omiques AdO'13 workshop, 15^e Conférence d'apprentissage Francophone Cap 2013, 8e Plate-Forme Intelligence Artificielle PFI 2013, Lille, France, 2013.*
- [2] O. Poirion, L. Krähenbühl and B. Lafay, "Tracing the Origin of Megaplasmids and Secondary Chromosomes in Bacterial Genomes," *SBME 2013-Annual Meeting of the Society for Molecular Biology and Evolution, Chicago, USA, 2013.*
- [3] O. Poirion and B. Lafay, "Utilization of Machine-Learning Methodologies in Order to Understand Complex Evolutionary and Functional Links among Bacterial Genomes," *2013 conference of the International Federation of Classification Societies (IFCS), Tilburg, The Netherlands, 2013.*
- [4] O. Poirion and B. Lafay. "Identity crisis among bacterial replicons," *in preparation.*
- [5] C. Caté, O. Poirion and B. Lafay. "Quest for a reliable phylogeny of primate lentiviruses," *in preparation.*

Optimisation de l'Ordonnancement d'Opérations dans un Terminal Maritime Pétrolier

Karla Quintero

Eric Niel, AMPERE-INSA Lyon, Jose Aguilar, ULA-Mérida Venezuela, Philippe Jeannin, THALES Group

Abstract— The research is focused on operations optimization in an oil seaport. Namely, alignment selection optimization of pipelines in a seaport will be approached within the framework of preventive maintenance activities to be executed on the system as well as oil transfer operations from reservoirs to tankers. Up to this point of the research, scheduling of oil transfer operations and maintenance operations has been studied through tropical algebra approaches and, further along, alignment selection will be integrated in a multi-criteria optimization approach. The general aim is to provide an assistance tool for supervision operators to optimize operations management in an oil seaport so that the results are extendible to flow networks of different nature.

Résumé— La recherche est centrée sur l'optimisation d'opérations dans un terminal maritime pour le transfert de pétrole. Notamment, la sélection d'alignements de pipelines dans le terminal sera abordée dans le cadre des activités de maintenance préventive à être exécutées dans le système ainsi que des opérations de transfert de pétrole depuis des réservoirs vers des tankers. À ce point de la recherche, l'ordonnancement d'opérations de transfert et de maintenance a été étudiée à travers des approches tropicales et, par la suite, la sélection d'alignements sera intégrée dans une approche multi-critère d'aide à la décision. L'objectif général est de fournir un outil d'assistance à la décision pour les opérateurs de supervision tel que les résultats soient extrapolables aux réseaux de flux de différente nature.

I. INTRODUCTION

Ce rapport concerne les avancées obtenues lors de l'application de l'algèbre (max, +) comme outil de modélisation ainsi que le cadre théorique pour comprendre les propriétés et le potentiel de l'algèbre.

A. SYSTEME ETUDIE

Le système étudié est un terminal maritime pour l'exportation du pétrole qui comporte des réservoirs de stockage, des bras de chargement situés dans les quais du terminal pour servir les clients (i.e. des tankers) et une configuration de pipelines reliant l'ensemble de réservoirs avec l'ensemble de bras de chargement sur les quais. Pour servir un client, le pétrole commandé est transporté du réservoir au quai correspondant à travers des commutations des vannes dans le réseau. L'établissement de l'alignement de pipelines pour servir le client implique l'ouverture des vannes dans l'alignement et la fermeture de toutes les vannes adjacentes pour isoler l'alignement en sachant que le mélange de plusieurs types de pétrole est interdit.

Dans l'abstraction du système étudiée (qui pourra être étendue au futur), tous les alignements servant des clients doivent être toujours disjoints et des scénarios plus généraux tels que l'utilisation de plusieurs alignements pour servir un seul client ou l'utilisation d'alignements non disjoints pour servir le même type de pétrole à deux clients différents n'ont pas été abordés. Aussi, l'alignement pour satisfaire chaque requête a déjà été sélectionné au préalable et ne fait pas partie de cette étude.

Les vannes sont étudiées comme les dispositifs clés dans les opérations de transfert et de maintenance en supposant que le pétrole est transféré par gravité depuis les réservoirs aux quais correspondants. Celui-ci est le cas d'un important terminal maritime au Venezuela (appelé Guaraguao) duquel des données industrielles ont été obtenues pour ajuster et enrichir les modèles proposés.

B. CADRE GENERAL D'OPTIMISATION DE L'ORDONNANCEMENT D'OPERATIONS

Dans le système étudié, des conflits d'affectation de ressources (notamment des vannes), pour l'exécution d'opérations de transfert de pétrole et de maintenance sur les dispositifs, doivent être gérés. Pour ceci, un modèle mathématique d'optimisation est proposé dans lequel des contraintes de conflit de ressources sont spécifiées intuitivement à travers de l'algèbre (max, +).

D'autres approches gérant ces types de conflits incluent la modélisation par graphes d'états tels que les conflits sont résolus à priori au travers d'une politique de routage, i.e. un critère préétabli pour effectuer le choix d'une seule transition parmi plusieurs possibles en conflit; [2], [10] et [1] peuvent être consultés pour plus de détails sur l'application de politiques de routage. Inversement, il n'est pas l'objectif de ce travail de supposer une politique préétablie pour résoudre les conflits d'utilisation de ressources mais de construire un modèle algébrique tel que certaines contraintes représentent les conflits et, ainsi, la précedence d'utilisation de ressources par les différentes opérations soit choisie de telle manière que l'objectif global d'optimisation soit satisfait. Cet objectif est la minimisation des pénalités payées par le terminal pour tous les clients traités dans un horizon de temps en sachant que pour chaque client une date limite de service est établie et, si dépassée, le terminal paye une pénalité par unité de temps de retard.

Actuellement, des solutions commerciales pour l'optimisation de l'ordonnancement d'opérations dans des terminaux maritimes sont disponibles dans le marché mais dû à des aspects de confidentialité, le raisonnement scientifique qui soutient ces solutions logicielles n'est pas disponible à la communauté scientifique.

II. ALGÈBRE (MAX,+): MOTIVATION ET NOTIONS DE BASE

Les modèles mathématiques d'optimisation proposés reposent sur les bases de l'algèbre (max, +) pour la spécification des contraintes d'affectation de ressources (et toutes les autres contraintes pertinentes) de manière intuitive et synthétisée. Les bases de cette structure algébrique couvrent l'utilisation de deux opérateurs principaux: l'opérateur de maximisation et l'opérateur d'addition.

Formellement, la structure mathématique définissant l'algèbre (max, +) est le semi-corps commutatif idempotent dénoté \mathbb{R}_{max} avec les deux opérations de base \oplus pour la maximisation et \otimes pour l'addition,

[3]. Un semi-corps \mathcal{K} est un ensemble muni par deux opérations génériques \oplus et \otimes tel que, l'opération \oplus est associative (e.g. $a \oplus (b \oplus c) = (a \oplus b) \oplus c$), commutative (e.g. $a \oplus b = b \oplus a$) et contient l'élément zéro ε (e.g. $a \oplus \varepsilon = a$); aussi, l'opération \otimes est distributive par rapport à \oplus (e.g. $a \otimes (b \oplus c) = (a \otimes b) \oplus (a \otimes c)$) et son élément identité e satisfait $\varepsilon \otimes e = e \otimes \varepsilon = \varepsilon$. Le semi-corps est idempotent si la première opération est idempotente (i.e. $a \oplus a = a \forall a \in \mathcal{K}$) et dans un semi-corps l'opération \otimes doit être inversible (e.g. si $2 \otimes 3 = 5$ alors $2 = 5 \oslash 3$ ou en notation conventionnelle: si $2 + 3 = 5$ alors $2 = 5 - 3$). Ainsi, les expressions $max(a,b)$ et $a+b$ sont exprimées en notation (max, +) comme $a \oplus b$ and $a \otimes b$, respectivement.

L'approche de modélisation mathématique par cette algèbre a permis de modéliser de manière intuitive et synthétisée des systèmes comportant des phénomènes de synchronisation dont un procédure/opération/événement ne peut survenir qu'après l'exécution d'autres activités (entraînant une maximisation des dates d'achèvement de ces activités pour démarrer l'activité en question et où les dates d'achèvement sont naturellement les dates de démarrage plus ses durées). Ainsi, pour ces types de systèmes, la caractéristique principale est modélisée directement avec les opérateurs de base: maximisation et addition.

Nombreux travaux ont été dédiés à étendre le spectre d'application de l'algèbre en reconnaissant des nouvelles propriétés modélisables ainsi que des liaisons avec d'autres domaines tels que la théorie de commande, des systèmes linéaires et des automates (voir [5]), parmi d'autres. Les travaux de [4] présentent la motivation pour l'application de l'algèbre pour les chaînes de production et les réseaux de transport. L'ouvrage [3] peut être consulté pour la théorie des systèmes (max, +)-linéaires, [6] pour la théorie (max, +) et une application au contrôle de trafic, [11] pour une application à la planification de la production et [8] pour l'application à l'analyse et planification de la maintenance d'un hélicoptère. Par ailleurs, un effort considérable a été dédié à l'exploitation du potentiel de cette algèbre dans le cadre de la théorie des automates (voir [7] et [9] pour des développements récents dans ce domaine).

A notre connaissance, l'application de cette algèbre aux systèmes de flux comportant des opérations de maintenance n'a pas été abordée et semble prometteuse. Notamment, des modèles d'optimisation mathématiques (max, +) ont été facilement formulés pour les opérations de transfert et de maintenance dans un terminal maritime et des

travaux pouvant appliquer et potentiellement enrichir la théorie des automates (max, +) sont en cours.

III. STRUCTURE DU MODELE D'OPTIMISATION (MAX, +) POUR L'ORDONNANCEMENT D'OPERATIONS

Le modèle d'optimisation vise à représenter comme objectif la minimisation des pénalités dans le terminal pour le traitement d'un ensemble de clients sous plusieurs contraintes. Le résultat final visé est un ordonnancement optimum d'opérations de transfert et de maintenance tel que l'objectif proposé soit atteint et les contraintes respectées.

La contrainte fondamentale modélisant le conflit de ressources dans le système est représentée dans (1) en algèbre classique et dans (2) en algèbre (max, +) où \mathcal{O} est l'ensemble de toutes les commutations possibles à effectuer sur les vannes pour satisfaire nc clients et \mathcal{M} l'ensemble d'opérations de maintenance à exécuter.

L'équation (1) (où (2) est équivalente) permet de déterminer la date de démarrage (x_{ijkl}) d'une commutation l (fermeture/ouverture) sur une vanne k pour effectuer une opération de transfert ou requête i (l'indice j modélise l'ordre de commutation de la vanne dans l'ensemble des vannes à commuter pour établir l'alignement). Ainsi, pour affecter la vanne k à une opération de transfert i on détermine le maximum des dates d'achèvement d'autres opérations pouvant utiliser la même vanne avant l'opération en question. Le 1^{er} terme de la maximisation est t qui représente le début de l'horizon de temps, le 2^{ème} terme est la date d'arrivée du tanker correspondant, le 3^{ème} correspond au maximum des dates d'achèvement des activités de maintenance h sur la même vanne k et le 4^{ème} au maximum des dates d'achèvement d'autres opérations de transfert nécessitant la même vanne k . Dans ce contexte (max, +), toute date de démarrage d'une opération est connue comme un *dateur*.

Ainsi, dans (1) on établit qu'une vanne k ne peut pas être affectée à une opération de transfert ou requête i que si elle a été libérée par les autres opérations pouvant la nécessiter dans le système et, en outre, si le tanker de la requête est déjà en quai dans le terminal et si l'horizon de planification a démarré. Néanmoins, la précedence entre les opérations n'est pas encore connue. Ainsi, dans (1) le terme $max_h(xp_{hk} + tp_{hk} + V_{ijkl,hk})$ représente la date d'achèvement ($xp_{hk} + tp_{hk}$, dateur + durée) de toutes les opérations de maintenance sur la vanne plus une variable de décision $V_{ijkl,hk}$ binaire que détermine la précedence entre l'opération $ijkl$ et hk .

Cette variable peut prendre les valeurs théoriques de $-\infty$ et zéro. Dans le premier cas, tout le terme correspondant à l'opération de maintenance est négligeable dans l'équation et dans le deuxième cas le terme représente la date d'achèvement de l'opération de maintenance. Ainsi, dans le premier cas, l'opération $ijkl$ ne dépendra pas de la date d'achèvement de l'opération de maintenance (ce qui implique que $ijkl$ s'exécutera avant hk) et dans le deuxième cas $ijkl$ doit attendre l'achèvement de hk . La même analyse est effectuée pour le conflit entre la requête $ijkl$ et d'autres requêtes $i'j'kl'$ nécessitant la même vanne (4^{ème} terme de la maximisation générale dans (1)).

$$x_{ijkl} = max(t; u_i; max_h(xp_{hk} + tp_{hk} + V_{ijkl,hk}); max_{i'}(x_{i'j'kl'} + p_{i'j'kl'} + V_{ijkl,i'j'kl'})) \quad \forall ijkl, i'j'kl' \in \mathcal{O} | i \neq i' \wedge (l \neq l' \vee l = l' = 1), \forall hk \in \mathcal{M} \quad (1)$$

$$x_{ijkl} = t \oplus u_i \oplus (\oplus_h (xp_{hk} \otimes tp_{hk} \otimes V_{ijkl,hk})) \oplus (\oplus_{i'} (x_{i'j'kl'} \otimes p_{i'j'kl'} \otimes V_{ijkl,i'j'kl'})) \quad \forall ijkl, i'j'kl' \in \mathcal{O} | i \neq i' \wedge (l \neq l' \vee l = l' = 1), \forall hk \in \mathcal{M} \quad (2)$$

$$xp_{hk} = xp_{hk} \oplus (\oplus_i (x_{ijkl} \otimes p_{ijkl} \otimes V_{hk,ijkl})) \quad \forall ijkl \in \mathcal{O}, \forall hk \in \mathcal{M} \quad (3)$$

L'équation (3) est analogue à (2) puisqu'elle permet de déterminer le dateur pour une opération de maintenance. En supposant qu'un ordonnancement prévue des opérations de maintenance préventive est disponible et que ces opérations ne doivent jamais être décalées, le 1^{er} terme dans (3) assure que la date prévue soit respectée et le 2^{ème} terme permet de déterminer les valeurs des variables de décision pour établir la précedence entre l'opération de maintenance en question et les opérations de transfert en conflit. D'autres contraintes dans le modèle incluent: l'égalité des dateurs associés à toutes les vannes satisfaisant une requête dans le même alignement² et la définition des valeurs autorisées pour les variables de décision, en sachant que pour chaque paire d'opérations en conflit deux variables de décision complémentaires (une qui prenne la valeur zéro et l'autre $-\infty$) doivent être définies. Ces types de contraintes sont spécifiées pour les conflits entre opérations de transfert et de maintenance dans (4) et (5). La même analyse et les mêmes contraintes doivent être spécifiées pour les conflits entre deux opérations de transfert.

$$V_{ijkl, hk} \otimes V_{hk, ijkl} = B \quad \forall ijkl \in \mathcal{O}, \forall hk \in \mathcal{M} \quad (4)$$

$$V_{ijkl, hk} \oplus V_{hk, ijkl} = 0 \quad \forall ijkl \in \mathcal{O}, \forall hk \in \mathcal{M} \quad (5)$$

² Le temps de commutation est négligeable par rapport au temps de traitement de la requête.

L'objectif principal dans le système étudié est la minimisation des pénalités subies par le terminal. Plusieurs essais ont été effectués en rajoutant des aspects supplémentaires à ce critère. L'équation (8) montre la minimisation du TCP (*Total Cost due to Penalties* ou coût total dû à aux pénalités) en recherchant les dates au plus tard pour l'arrivée des tankers, ceci dans un cadre de production juste-à-temps. Le TCP est calculé comme la somme des pénalités payées par client dans (6) (qui se traduit par un retard dpr_i -*delay per request*- multiplié par le coût de pénalité c_i €/unité de temps par client), et la somme des dates au plus tard d'arrivée des tankers est calculé dans (7).

$$TCP = \sum_i \left(\sum_{n=1}^{dpr_i} c_i \right) \quad \forall i \in nc \quad (6)$$

$$Tu = \sum_i -u_i \quad \forall i \in nc \quad (7)$$

$$\text{Min } TCP + Tu \quad (8)$$

La section suivante montre quelques résultats obtenus lors de l'instanciation du modèle. D'autres structures de similaires pour le modèle continuent à être explorées, telles que la flexibilisation des activités de maintenance, parmi d'autres.

IV. INSTANCIATION DU MODELE

Dans Fig. 1, un réseau de base est montré sous la forme d'un graphe non orienté. Les vannes correspondent aux arcs dans le graphe et les segments de pipelines correspondent aux nœuds. Les 3 premiers nœuds en haut correspondent aux réservoirs contenant du pétrole (avec les vannes 1, 2 et 3 comme vannes de sortie) et les 3 derniers en bas (avec les vannes 16, 17 et 18) correspondent aux bras de chargement qui remplissent les tankers en quai.

Plusieurs requêtes sont à traiter (voir couleur des alignements) et deux opérations de maintenance doivent être effectuées dans le réseau. Les spécifications des requêtes sont montrées dans la Table 1 et l'opération de maintenance sur la vanne 13 doit démarrer à $t=12$ avec une durée de 2 heures et l'activité de maintenance sur la vanne 15 démarre à $t=20$ avec une durée de 4 heures.

Les résultats sont montrés dans Fig. 2 où l'ordonnancement optimum est obtenu tel que le TCP est minimisé et les tankers puissent arriver au plus tard au terminal. Les opérations de maintenance sont exécutées comme prévues et les opérations en conflit par affectation des ressources ne se chevauchent pas. Les opérations qui dépassent ses dates limites sont R_1 (par une heure) et R_2 (par 6 heures) ce qui contribue à un total de 14000€ pour le TCP. Cet exemple vise à illustrer un scénario où forcément le système doit subir des pénalités puisque la capacité opérative ne permet pas de satisfaire tous les clients avec les spécifications données. Néanmoins, la solution où les pénalités sont

minimisées est obtenue. Cette instanciation a été effectuée avec le solveur LINGO qui avec la routine 'Global Solver' permet d'obtenir l'optimum global du problème algébrique d'optimisation en testant des valeurs pour les variables de décision telles que la précedence des opérations varie ainsi que la valeur de la fonction objectif. D'autres outils seront utilisés au futur pour comparaison.

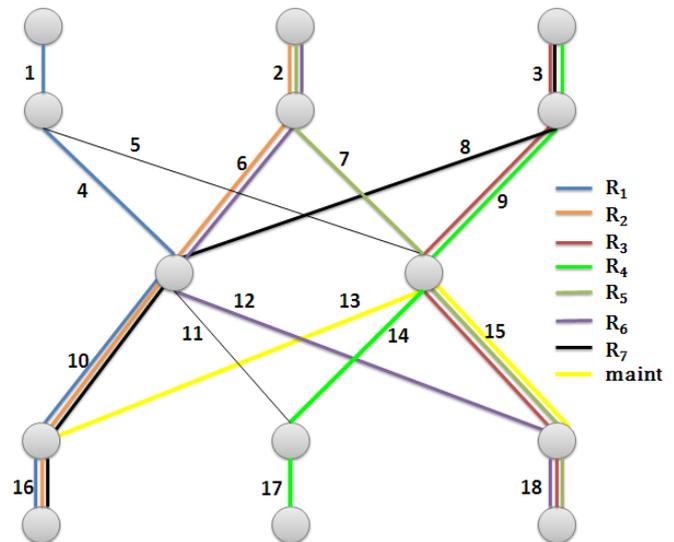


Fig.1. Exemple de terminal maritime avec des opérations de transfert et de maintenance à exécuter

TABLE I: SPECIFICATIONS DES REQUÊTES

Requête	Temps de Traitement (heures)	Date Limite d'achèvement	Pénalité (€/heure)
R ₁	6	10	2000
R ₂	5	10	2500
R ₃	8	10	3000
R ₄	5	20	2500
R ₅	4	30	2500
R ₆	9	30	3000
R ₇	6	20	2000

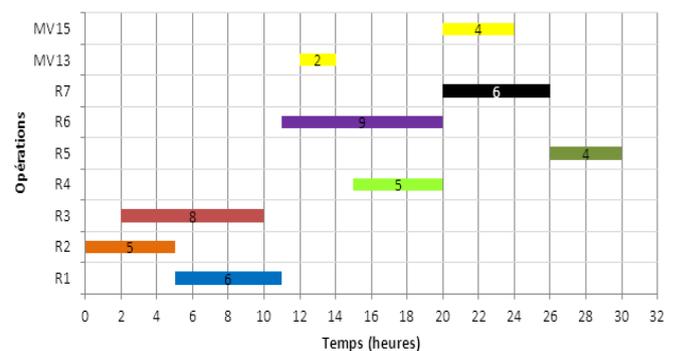


Fig.2. Ordonnancement optimum (TCP=14000€, Tu=79)

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats montrés correspondent à l'instanciation d'un modèle algébrique de base pour l'optimisation de l'ordonnancement d'opérations. L'étude et exploitation de ce modèle de base continue actuellement en envisageant une flexibilisation de la maintenance et en ajustant les contraintes par rapport aux nouvelles données industrielles obtenues lors d'une visite à un terminal pétrolier au Venezuela et une visite à être effectuée vers la fin de l'année.

En effet ces résultats permettent d'envisager déjà un apport à l'aide à la décision pour la supervision du système et dans les mois suivants les approches multicritères d'aide à la décision seront abordées pour intégrer ces résultats (pour le critère de minimisation des pénalités) au critère de sélection optimum d'alignements pour la satisfaction de chaque requête. L'intégration de ces deux critères vise à être un apport fondamental au niveau industriel puisque normalement ils sont gérés de manière indépendante sans considérer toutes les interrelations entre: 1) ordonnancement d'opérations de transfert en termes des pénalités 2) disponibilité des dispositifs pour l'ordonnancement et pour la sélection d'alignements et 3) optimisation de la maintenance. Au niveau scientifique on vise à continuer l'exploration des approches tropicales pour effectuer des comparaisons avec des approches classiques. Notamment, des développements sur l'application et des apports à la théorie des automates (max, +) sont en cours.

Par rapport au progrès exposé dans la recherche, deux publications sont prévues et seront prochainement soumises aux conférences.

REFERENCES

- [1] Ait-Cheik-Bihi, W., Nait-Sidi-Moh, A., & Wack, M. (2010). Conflict Management and Resolution Using (max,+) Algebra. *8th International Conference of Modeling and Simulation - MOSIM'10*. Hammamet, Tunisia.
- [2] Alsaba, M., Boimond, J.-L., & Lahaye, S. (2007). Sur la Commande des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière par l'Algèbre des Dioïdes. *Revue e-STA, Sciences et Technologies de l'Automatique*, 4(2).
- [3] Baccelli, F., Cohen, G., Olsder, G.-J., & Quadrat, J.-P. (2001). *Synchronization and Linearity*.
- [4] Cohen, G., Gaubert, S., & Quadrat, J.-P. (2005). L'algèbre des sandwichs. *Pour la Science*.
- [5] Gaubert, S. (1995, December). Performance Evaluation of (max,+) Automata. *Automatic*

Control, IEEE Transactions on, 40(12), 2014-2025.

- [6] Houssin, L., Lahaye, S., & Boimond, J.-L. (2005). Commande en juste-à-temps sous contraintes de systèmes (max,+)-linéaires. *Modélisation des Systèmes Réactifs*. 39, pp. 335-350. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*.
- [7] Komenda, J., Lahaye, S., & Boimond, J.-L. (2009). Le Produit Synchrone des Automates (max,+). *Journal Européen des Systèmes Automatisés - JESA(43 / 2009)*, 1033-1047.
- [8] Königsberg, Z. (2010). Modeling, analysis and timetable design of a helicopter maintenance process based on timed event petri nets and max-plus algebra. *Neural, Parallel & Scientific Computations*, 18(1), 1-12.
- [9] Lahaye, S., Komenda, J., & Boimond, J.-L. (2012). Modélisation Modulaire à l'Aide d'Automates (max,+). *Conférence Internationale Francophone d'Automatique - CIFA*. Grenoble, France.
- [10] Nait-Sidi-Moh, A., Manier, M.-A., El Moudni, A., & Wack, M. (2006). Petri Nets with Conflicts and (max,+) Algebra for Transportation Systems. *11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*. Delft, Netherlands.
- [11] Nasri, I., Habchi, G., & Boukezzoula, R. (2012). An algebraic max-plus model for HVLV systems scheduling and optimization with repetitive and flexible periodic preventive maintenance: just-in-time production. *9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'12*. Bordeaux, France.

Vehicle Thermal Management Control Systems

Salvador Sermeño

Eric Bideaux - Laboratoire Ampere

Tessa Morgan – Volvo GTT.

Abstract—The increasing complexity of engine cooling systems results in added interactions and disturbances to the performance. Also, the cost to operate large trucks has risen in the last few years, mainly due to oil prices. Using the full motive force of the engine for propulsion and maximizing fuel economy is a challenge for future designers and companies. Non-propulsion loads (fan, water pump...) draw a significant percentage of the engine's power thus lowering the vehicle's fuel economy. Electrification of such loads offers a way to minimize their effect, but it is not the only answer and in many cases it might be a limited approach. Recent studies have shown that by controlling components the efficiency is improved (adjusting fan speed according to cooling needs, adjusting coolant flow, oil flow).

This work is being performed at Renault Trucks, Saint Priest France and Ampere laboratory (INSA de Lyon), France. Access has been granted to the cooling systems of Volvo GTT trucks in order to provide a global view of the system, currently unavailable at the company. Currently, the Volvo group in order to optimize the performance of their truck's cooling systems had installed new thermal management components. The said cooling systems has been studied using the bond graph approach. And new concepts for controlling the actuators are proposed

Résumé— Les systèmes de refroidissement des véhicules continuent à se développer et devenir de plus en plus complexes. Ceci introduit des nouveaux problèmes dus aux interactions des composants et les perturbations du système. Avec la montée des prix des combustibles, les développeurs et les compagnies cherchent à améliorer la consommation en respectant les normes d'émission. Une partie de l'énergie produite par le moteur est utilisé par les composants du circuit de refroidissement. L'utilisation d'auxiliaires électriques est une manière de réduire ces pertes parasites, mais ce n'est pas la seule solution. Des études récents proposent que un control plus adaptes des composants peut réduire la consommation de carburant. Ce travail est réalisé avec

la collaboration de Renault Truck, Saint Priest France et le laboratoire Ampère (INSA de Lyon). L'auteur a accès direct aux informations du Groupe Volvo GTT pour comprendre le fonctionnement du circuit de refroidissement ainsi comme les caractéristiques des composants. Le système de refroidissement a été étudié grâce à l'outil Bond Graph. En plus, des nouveaux concepts de control automatique sont proposés.

I. INTRODUCTION

A. State of the art

If we research thermal management, three main focus points can be identified: development of new components (electric valves, electric pumps...), system simulations and advanced control (implementation of newly developed components).

A detailed list of Thermal Management concepts for heavy vehicles was given and reviewed by *Wambsganss [1]*. He also discussed some thermal management trends (computer control, heat storage...) but no tests were pursued. The work of *Allen and Lasecki[2]* completed this list. Electric valves, electric pumps, control of EGR cooler flow are some of the discussed concepts. The expected benefits of these optimizations are an increase of fuel economy (by decreasing the fan "On-Time" for example), decreasing engine warm-up time, increase oil life (optimized oil temperature) and decrease engine emissions (Optimized Combustion temperatures, fewer parasitic losses).

Nonlinear algorithms were first presented by *Setlur, Wagner, Dawson and Chen [3]*. They used a simplified cooling system model for real time computer algorithms to regulate the smart valve, electric water pump and radiator fan using nonlinear controls (Lyapunov). Nonetheless, it's not the only

nonlinear control found. *Bhat, Joshi, Shiozaki, Ogasawara, Yamada and Somu [4]* used a different strategy: the adaptive control of an electromagnetic fan clutch (ECFD), and then added a PID controller to be used only during warm up. In order to improve the energy management, *Salah, Mitchell, Wagner and Dawson [5]* compared different control strategies for a simple circuit with electric fans, pump an electric thermostat valve. The results showed that an advanced control (in their case backstepping) led to energy savings of up to 6 W (compared to the normal operation).

Further work was researched but it's not presented in this article. Most of the research has been done for passenger vehicles and hybrids (patents and papers). However the heavy duty vehicle manufacturers are beginning to follow the example set by the car industry.

The cooling system is becoming more complex and, in most cases, it results in a modification of the demands made to the cooling system (oil cooler bypass, EGR cooler, air compressor, engine brakes, engine performance ...). When several changes are made, a global view is needed and the complexity of said systems might hide interactions between controlled components that become evident in the final stages of vehicle validation (troubleshooting). The review of the current literature indicates that this hasn't been studied yet, since most papers relate to a specific modification to the system. But future vehicles will be possibly using many different technologies. A need to evaluate overall system performance and coupling has risen, and this is the goal of the work presented in this thesis.

B. Cooling System Description

Diesel engines are a prime mobile power source. Their maximum efficiency ratings reach up to 45%; a vast amount of waste energy in the form of heat is created. This heat is partly ejected in the exhausts and partly transmitted to the engine cooling circuit. All the heavy duty trucks studied in this research are equipped with one. The cooling system is responsible for keeping the engine working properly, some of its functions are:

- Cooling down and heating up the engine coolant system
- Charge air cooling
- Cabin comfort
- Component temperature control

For a heavy duty truck, typical numbers of rejected heat are given in the following table:

Table 1.2. Example for cooling demand, heavy duty truck

Component	Power
Radiator	220 kW
Charge Air Cooler	80 kW
HVAC Condenser	8kW

C. Basic Cooling System Components

A brief description of the basic components in cooling systems (fig.1.5.) is presented in the following lines.

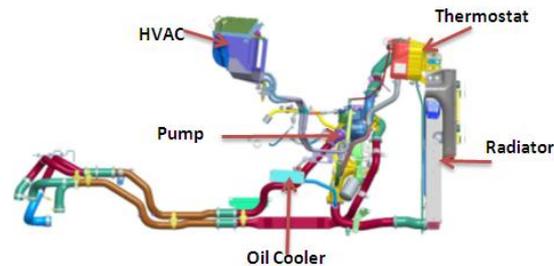


Fig.1. Cooling System CAD for a Diesel Engine

- Coolant
- Coolant Pump
- Engine Block jackets
- Radiator
- Fan
- Oil Cooler
- Expansion Tank
- Thermostat
- HVAC
- Turbocharger
- EGR
- Selective Catalyst Reduction (SCR)
- Transmission
- Retarder
- Air compressor
- APM

Rules have already been set by Volvo GTT for the development of a cooling system (mainly regarding the proper operation of the vehicle) and they must be respected. These rules were developed in order to achieve different goals: ensure engine and components protection, improve performance, fuel economy and reduce emissions. They can be related to emissions standards (Euro 5, Euro 6), competitiveness with other manufacturers, brand's renown for durability, quality, etc...

D. Purpose of the PhD

The goals of this work can be listed as follows:

- Provide a Global View of the cooling system (not currently available in Volvo)
- Understand the current control strategies for thermal management devices
- Determine interactions between subsystems
- Develop concepts to optimize the control of the overall system.

It has to be stated the development of a simulation platform is not part of the goals of this PhD. It will be provided by Volvo GTT.

II. PROCESS

As follows we will present the process used to carry on the previous objectives. We will first discuss the findings of our acknowledgement of the current control laws in the group. Then we will describe the Bond graph approach used, as well as its first conclusion. Finally, the ideas for new control concepts will be presented.

A. Design Rules for the cooling system

A first step consisted on acknowledging the cooling system and its limitation, a review was also made concerning the current control laws.

1) Coolant Temperature Limitations

The highest temperature that the coolant can reach at a defined percentage of maximum engine torque is called top tank temperature (TTT). If coolant temperature is too high, the engine torque is reduced.

2) Oil Temperature limitation

The oil temperature has to be kept under 125°C (criteria for oil oxidation & engine wear), the oil is cooled by a water/oil cooler.

3) Goals of control laws

Foremost, the new developed controlled laws shouldn't interfere with the proper working of the vehicle. They have to suffer the inputs from the driver but the protection of the integrity of the vehicle must comply with current performance.

a) List of evaluation criteria for control algorithms

It needs to comply with all the requisites of the current cooling system. However it should the following advantages:

- Faster warm up
- Reduction of the number of fan on time (noise, fuel economy)
- Limitation of the engine derating time

- Keep the engine (components) to an appropriate temperature

b) Redefinition of the System's Specifications

The mayor limitation of this PhD is the available information for optimization. All of the requirements currently being used are minimum flows at a given operating point. This is a practical approach since heat rejection or absorption cannot be easily quantified and or explained (it depends on many variables).

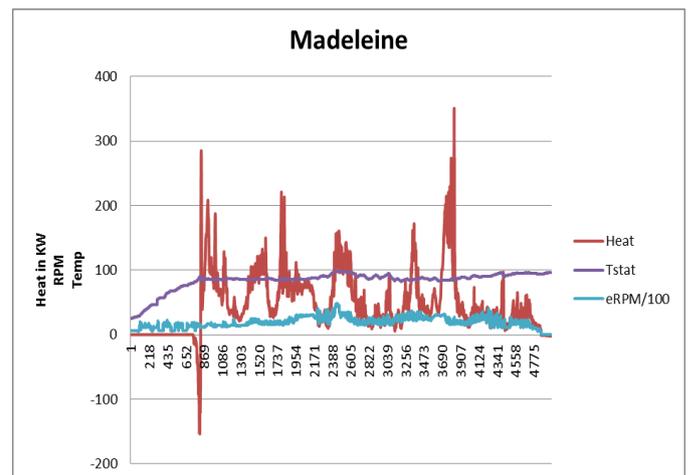
However, flow and heat rejection are deeply connected, so a minimum flow is also a minimum heat absorption (by the coolant). All of this data is used by the component developers (manufacturers), so no actual model is available in Volvo GTT. Currently it exist a gap of knowledge.

These requirements rely on a thermal analysis of the component (simulation, tests). Colder coolant could mean a lower flow, however the new value needs to be tested by the supplier. If we were able to understand better the true needs, not only we could anticipate them but optimize a response. If we focus only in a minimum flow approach for a single operating point we might overcool (more likely) or undercool the rest operating points.

To do so we attempted to rewrite the requirements. Using available test results we can estimate the heat flow for different components in determined driving cycles. As follows we present the heat exchanged in a driving cycle known as Madeleine.

Fig 2. Madeleine Driving cycle Heat input.

The estimation is limited since not all sensors were



installed in the truck. However it gives us an understanding of the transient behavior of the system.

Using this new information, an optimization can be achievable; it will, however, depend on the assumptions and choices made.

c) Discussion

Even if so far, no component owner works with an optimal temperature. It appears as the performance of the component isn't dependent on the coolant temperature. Some studies have been carried out changing the coolant temperature in order to achieve better engine performance. Results show that it requires a large change in the temperature in order to affect the performance and the emissions of the engine.

Nevertheless, better reliability could be achieved by reducing the coolant temperature or just limiting its changes. Working at different levels of temperature hasn't been proved beneficial yet.

B. Bond Graph Analysis

The bond graph tool was chosen to be used in order to determine interactions between actuators and study the structure of the cooling system.

It needs to be noted that for this research pseudo bond graphs were used in order to couple the two existing phenomena (thermal and hydraulic). We have hydraulic energy (coolant, oil flows), electrical (control of the fan and pump clutch), thermal (heat exchange) and mechanical (pumps and valves). Some dynamics have been neglected when needed. The system's dynamics are nonlinear mainly due to the coupling of different domains.

1) Structural Constraints

The Bond graph offers a structured view of the system that can be used to define the system's dynamics. It can evolve and be as simple (or complex) as the designer desires, thus enabling the conception of the system to a certain precision, with a level of precision depending on the goals of the analysis to be performed.

A simpler model will be used to determine the first control laws; however a higher degree of complexity is used to analyze the structural properties of the system.

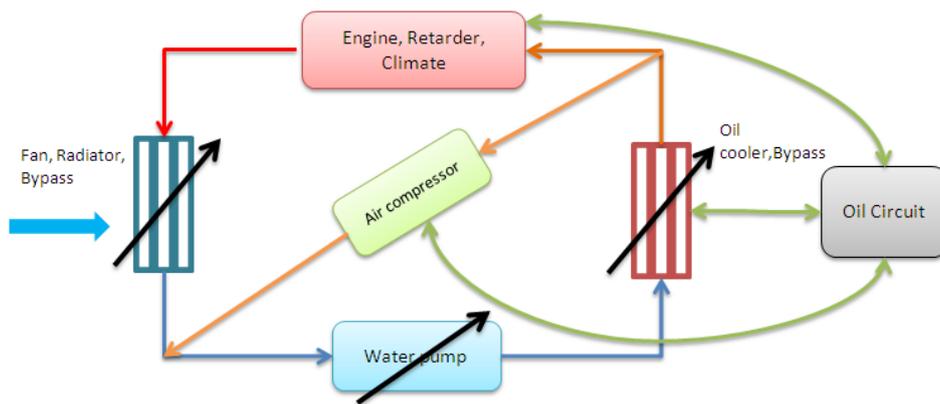


Fig 4. Simplified Word Bond Graph of the System

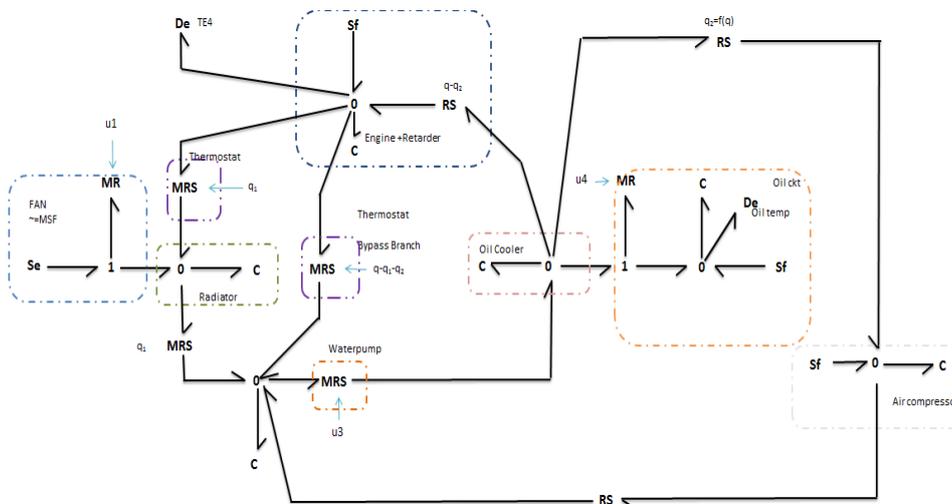


Fig 4. Simplified Pseudo Bond Graph of the System

1) Optimization Problem Definition

First conclusions have been drawn from the analysis of the system; they will be discussed briefly as follows.

Firstly, we have an over actuation of the system (2 outputs, 4 inputs). And all the actuators have an impact on the outputs (states are reachable).

However some specifications have to be made. The interactions are only present for some cases. An analysis of the operating conditions has been done.

Several approaches can be used to deal with this problem: logical (actuator prioritizing), theoretical (decoupling)...

C. Control Laws Development

During the last decades, with the uprising of digital and computational technologies, the development of control applications, once unknown, are now emerging. New modeling, control, estimation and monitoring strategies are being studied.

It is important to note that advanced control have different meanings accordingly to the user (researcher, professor or engineer). It also is more than just the use of state of the art software or the use of a complex algorithm. It is central to understand the process and its dynamics.

The current control laws are based on regulating the coolant temperature in a set of constraints. The cooling system needs attention and adjustments to compensate for the changing conditions during the driving cycle (slopes, stops, highway or city driving ...).

In our study, the optimal control laws to be determined must be able to fulfill the system's constraints; but also coordinate (organize, class ...) in a logical or efficient way the command routines. Moreover, they can be exploited in order to reduce the energy used while still maintaining appropriate control. It needs to be noted that automatic control doesn't imply better fuel consumption just in the case it is specifically conceive for this purpose.

1) Modeling

Models of the different components of the cooling system have been built, but they haven't been validated yet. The system dynamics were determined using the following expression:

$$\alpha_m V_l \rho_0 dT = \sum_i q_{mi} dt - \rho_l dV_l + \frac{V_l \rho_0}{n} dP \quad (1)$$

$$c_{vl} m_l dT + \left(c_{vl} \frac{V_l \rho_0}{\beta_m} dP - \alpha_m c_{vl} V_l \rho_0 dT + c_{vl} \rho_l dV_l \right) T - \dot{Q} = V dP + \sum_i q_{hi} dt \quad (2)$$

Which are issued from energy and mass balance equation in each component.

MATLAB-SIMULINK models have been built, but they haven't been validated yet.

2) Dynamic Programming (DP) Optimization

DP solves problems where decisions are made in succeeding stages. For each stage, the possible commands are evaluated using a cost function which implies the current and previous (expected) cost. The expected cost of a future or past stage is known.

A recursive function is used and it simplifies our optimization problem since it divides a global problem in different steps to be optimized.

The purpose of this step is to determine the actual gain of an advanced control strategy for the system. DP will determine the ultimate solution for a given cycle for instance. Currently we are not able to embed such a solution in a real time controller (calculation time, data needed,...).

A simple DP algorithm has been developed and efforts are being made to upgrade its performance.

3) Receding Horizon Optimization

A second approach will be to test the RHC method. It is a method that, at each sampling instant, calculates the current control input by solving an open-loop optimal control problem. This method has being introduced in the industry recently. This method is also called Model Predictive Control since it uses a model of the system to predictive future states.

The following requirements need to be clearly stated:

- The prediction method
- The time horizon
- The constraints

One of the mayor drawbacks of the development of this technique to real world applications relies mainly on the needed computational time. So this approach has been mainly used for slow system with large sampling times (seconds, minutes, hours). New improvements in chips, ECUs... will expand its reach.

The first prediction method to be used it's a simplified DP algorithm.

D. Discussion

As stated earlier, the first simulations have been done, however only simple assumptions have been made (constant heat input, not all dynamics of the components are used). Results are not representative yet.

III. PERSPECTIVES

A. Expected Results

The Volvo Group is interested in the results of this thesis, advancements are presented regularly and the main outputs will be to provide a global view of the system and its interactions which is currently not available and will prevent issues in tests.

Also we will determine possible gains of an advanced control strategy using the DP algorithm. This result will be an ideal that will not be reachable in a real time application due to uncertainties (traffic, driver, weather...).

Finally, it is expected to propose and test new concepts for an optimal control. These can vary from defining new set of rules for the actuators to developing a model based controller.

B. Conclusions

The current component installation specifications (flow rate and pressure) do not allow an optimization of the system. It is necessary to know heat transfer needs (cooling or heating). We need to change the way of working in order to improve the knowledge of the system

Component dynamics influence the system (viscous clutch vs Electric fan), but not the results of the structural analysis

According to the literature a fuel consumption gain exists if whole vehicle thermal management control is applied and the analyses in this work will enable us to estimate the maximum gain this will be for current architecture.

In reality this gain will not be completely achieved due to uncertainties and constraints outside our control.

C. Next Steps

To continue with the development of my work, I will keep gathering details on current control issues. This will be useful to test whether or not the new concepts will outperform the current laws.

The validation of the MATLAB/SIMULINK Models is an ongoing activity, and should be carried out in the following months.

Then using the DP algorithm and updating it with the driving cycles, heat inputs (need to build estimated data), and components dynamics.

Also I will review of new Control concepts such as iPID, MPC

Finally, I will focus on the development and Implementation of the new control strategy into the provided simulation platform.

REFERENCES

- [1] Wambsganss, M., "Thermal Management Concepts for Higher-Efficiency Vehicles", SAE paper no. 1999-01-2240, 1999.
- [2] Allen, D. and Lasecki, M., "Thermal Management Evolution and Controlled Coolant Flow", SAE paper no. 2001-01-1732, 2001.
- [3] Setlur, P., Wagner, J., Dawson, D., and Chen, J., "Nonlinear Controller for Automotive Thermal Management Systems", proceedings of the 2003 American Control Conference, Denver, Colorado, 2003.
- [4] Bhat, N., Joshi, S., Shiozaki, K., Ogasawara, M., Yamada, M. and Somu, S., "Adaptive Control of an Externally Controlled Engine Cooling Fan-Drive", SAE paper no. 2006-01-1036, 2006.
- [5] Salah, M., Mitchell, T., Wagner, J. and Dawson, D., "Nonlinear-Control Strategy for Advanced Vehicle Thermal-Management Systems", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 57, no.1, 2008.

NOMENCLATURE

q_m	Mass flow	[kg/s]
ρ	Density	[kg/m ³]
α	Isobaric dilatation factor	[K ⁻¹]
β	Isochoric compressibility factor	[Pa ⁻¹]
C_v	Pressure Constant specific heat	[J/(kg.K)]
q_h	Enthalpy flow	[J/s]
P	Pressure	[Pa]
Q	Heat Flux	[J]
T	Temperature	[K]
V	Volume	[m ³]

Diagnostic of doubly-fed asynchronous wind generator

VU Hoang Giang

Prof. Hassan Hamouri, Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés;

HDR. Hamed Yahoui, Laboratoire Ampère

Abstract— There is a constant implementation of wind generators all around the world due to the fear of decline in fossil energy and its corresponding increasing cost. The difficulty to access the high tower engine and a scattered location within a wind farm of several wind generators will give an important role to the maintenance costs of wind energy plant. Therefore, and due to the importance of condition monitoring and fault diagnosis in wind generator, this work is intended to propose an original way to monitor the whole power drive engine by measuring the electromagnetic field of the DC bus of a doubly-fed wind generator system. First, after a brief status describing different types of faults and their generated signatures, a survey on the classical diagnostic methods based on mechanical, electrical and electromagnetic measurements is made. Second, a new measurement method for spectral analysis of the whole electrical drive by the measurement of the electromagnetic field emitted by the dc bus is investigated. During the research, a demonstrator will be used with dedicated sensors for the measure of electromagnetic field emitted on the DC bus surface. It will show how relevant signatures could be used for spectral analysis of the power drive.

Résumé— Il ya une progression constante des éoliennes partout dans le monde en raison du coût croissant de l'énergie fossile. L'instrumentation spécifique qu'il faudrait mettre en place pour chaque composantes de l'éolienne donnera un avantage certain pour la recherche d'un système faible cout de diagnostic en ligne de l'état de l'éolienne. Par conséquent, et en raison de l'importance de la surveillance de l'état et diagnostic de pannes dans le générateur, ce travail vise à proposer une façon originale de surveiller l'ensemble du moteur d'entraînement et de son électronique de puissance par la mesure du champ électromagnétique sur le bus DC (barres) d'une machine à double alimentation. Tout d'abord, après un bref état décrivant les différents types de défauts et leurs signatures générées, une enquête sur les méthodes de diagnostic classiques basées sur des mesures mécaniques,

électriques et électromagnétiques a été faite. En second lieu, un nouveau procédé de mesure pour l'analyse spectrale de l'ensemble de l'entraînement électrique par la mesure du champ électromagnétique émis par le jeu de barres est étudiée. Au cours de la recherche, d'un démonstrateur sera utilisé avec des capteurs dédiés à la mesure de champ électromagnétique émis sur la surface du bus continu. Elle montrera comment les signatures pertinentes pourraient être utilisés pour l'analyse spectrale de l'unité de puissance. L'originalité consiste à utiliser un observateur du couple de la machine pour assurer le suivi des signatures qui sont fonction du point de charge.

I. INTRODUCTION

Wind power generation has been extensively developed worldwide. In the year 2010, the cumulative wind capacity reached worldwide about 197GW, after around 159GW in 2009 [1], [2]. It is also showed a fastest growth rate of windpower in 2009 at 31.7%, [1]. The global cumulative capacity is expected to reach about 1420GW in 2030 and 1834GW in 2050 (based on moderate scenario), [3].

In the development, the operation and maintenance of the wind power generation system have been received much attention. The objective of the thesis is to develop a diagnostic of doubly-fed induction machine (DFIG) of wind power generation system. The main idea is that the system can be monitored by measurement of the electromagnetic field of the dc bus.

The DFIG based prototype is one of the leading technologies for wind power systems as it is known with several advantages. Firstly, the DFIGs own several key advantages of adjustable speed generators (ASGs) that they are able to provide simple pitch control with longer time constant, reduce mechanical stress, absorb the gusts of wind, and reduce acoustic noise. Furthermore, the active and reactive powers can

be bidirectional controlled with the voltage source inverter, [4], and improve the power quality by restricting the torque pulsation due to the elasticity of the wind turbine system. Secondly, comparing to direct-in-line converter based ASGs, the DFIGs also offer more advantage that the power electronics equipments just handle a fraction (typically 25%) of total system power. As a result, it is not only allowed to reduce the inverter cost, but decrease the losses in the power electronic equipments, [5]. It can be said that the tendency development of wind power generation is indispensable, and the DFIG-based wind power system has been the most appropriate prototype.

The test bench emulating the DFIG based wind power generation system is developed. The system mainly includes the dc machine emulating the wind turbine and the induction machine, which is connected to the grid via two ways. The first route is directly from stator and the other is through a back-to-back power converter with DC link in the middle. The converter is coupled with the grid by a LCL filter, which is used to eliminate the harmonics penetrating into the grid. In addition, A MatlabTM/SimulinkTM/Real-Time WorkshopTM toolbox, developed by Triphase, is used to couple the host PC to the physical components of the system by the Internet protocol (TCP/IP).

Parameters of induction machine are very essential for mathematics analysis and control of the system. Some experiments have been carried out in order to estimate the parameters. Several techniques have been applied, and the comparison is then made to select the most reasonable parameters. Ultimately, the validation of the identified parameters is implemented on the basis of simulations and experiment data.

Once the parameters are known, the control of DFIG system is designed in order to control the dc bus voltage and the speed of the induction machine based on grid voltage orientation and stator flux orientation, respectively.

During the investigation of the system, it is interesting to note that the mechanical load torque is necessary to be obtained as it is in a direct relation to the power generated by the wind power system. Unfortunately, the torque sensor is costly and the installation of the sensor is complicated in most situations. Therefore, it strongly makes sense to be able to estimate the load torque based on the measurement of other variables such as stator current with/without measuring rotor position. To achieve this purpose, the observers which are utilized to observe many variables of the DFIG have been developed. In addition, evaluating the properties of the induction machine model derives a possibility to develop a local observer, which is presented in [6], in order to estimate many different parameters of the machine which will be used for the diagnosis of the machine.

The DFIG system using the back-to-back power converter, in terms of structure, is identical to the induction machine drive with active IGBT/Diode rectifier. Therefore, the investigation of monitoring of the induction machine derived from the dc bus completely gives us the same methodology for the DFIG system. Therefore the analysis of dc bus electromagnetic field will be carried out in order to obtain the indicators of the faults in the induction machine.

II. SECOND PART

The test bench designed for the study of doubly fed induction machine in the wind power system is based on the prototype shown in Fig.1, [7].

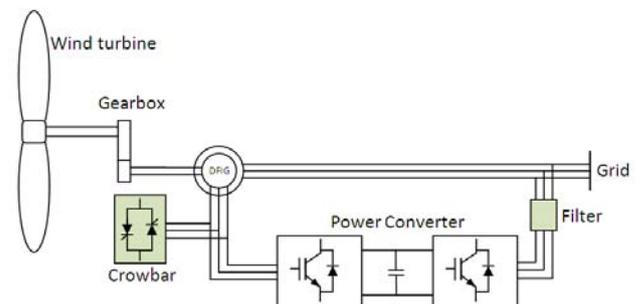


Fig.1. Typical configuration of a DFIG based wind power generation system, [8]

REFERENCES

- [1] World Wind Energy Association, "World wind energy report 2010", *World Wind Energy Association*, 2011.
- [2] Global Wind Energy Council, "Annual market update 2010", *Global Wind Energy Council*, 2011.
- [3] Global Wind Energy Council, "Global wind energy outlook 2008", *Global Wind Energy Council*, 2008.
- [4] H. G. Vu, H. Yahoui, Th. Chorot, H. Hammouri, "Control reactive power of Voltage Source Inverter (VSI)", *International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 25-27 June 2012.
- [5] Muller S., Deicke M. and De Rik W., "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE Industrial applications magazines.* - **2002.** - 3 : Vol. 8. - pp. 26-33.
- [6] H. Hammouri, H. G. Vu, H. Yahoui, "Local observer for innitesimally observable nonlinear system", *International Journal of Control*, 2013.
- [7] Yahoui, H.; Vu, H.-G.; Teisseire, G. & Hammouri, H., "Web-based training of wind power generation system: A labs platform available in a new master dedicated to the green energy sector, *23rd EAEEIE Annual Conference*, 2012
- [8] Olimpon Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, and Mike Hughes Phill, *Wind Energy Generation Modelling and Control*, Ltd. John Wiley and Sons, Eds.: John Wiley and Sons, Ltd., 2009.