



**HAL**  
open science

# Modélisation et commande de systèmes électriques : de leur structure optimale à leurs performances dynamiques

Delphine Riu

► **To cite this version:**

Delphine Riu. Modélisation et commande de systèmes électriques : de leur structure optimale à leurs performances dynamiques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2010. tel-00566876

**HAL Id: tel-00566876**

**<https://theses.hal.science/tel-00566876>**

Submitted on 17 Feb 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Institut Polytechnique de Grenoble

Mémoire pour obtenir le diplôme de  
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Génie Electrique

Préparée au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble

Présenté et soutenu oralement par

Delphine RIU  
Maître de Conférences Grenoble INP – ENSE<sup>3</sup>

le 16 Novembre 2010

Modélisation et commande de systèmes électriques : de leur structure optimale à leurs performances dynamiques

JURY

M. Daniel ROYE, professeur à Grenoble-INP - G2Elab	, Président
M. Stéphane ASTIER, professeur à l'INP Toulouse - Laplace	, Rapporteur
M. Alain BOUSCAYROL, professeur à l'Université Sciences et Techniques de Lille (USTL) – L2EP	, Rapporteur
M. Bernard MULTON, professeur à l'ENS Cachan - SATIE	, Rapporteur
M. Serge PIERFEDERICI, professeur à l'ENSEM – Green Nancy	, Examineur
Mme Marion PERRIN, ingénieur recherche CEA/INES	, Examinatrice
M. Jean-Luc SCHANEN, professeur à Grenoble-INP – G2Elab	, Examineur







## REMERCIEMENTS

En évitant de faire un inventaire à la Prévert, je voudrais remercier très sincèrement toutes les personnes qui m'ont aidée, conseillée ou soutenue depuis dix ans ... et celles dont l'amitié et le dynamisme rendent le quotidien d'un enseignant-chercheur un peu moins lourd à porter.

Merci donc à (dans l'ordre d'apparition) C. Schaeffer, R. Perret, D. Roye, M. Ivanès, N. Retière, R. Le Doeuff, M. Benkhoris, P. Guérin, R. Vidil M. Jacomino, N. Hadjsaid, S. Bacha, J.-L. Schanen, Y. Bultel, Y. Maréchal, F. Druart, E. Witrant et O. Sename. Merci notamment à Daniel d'avoir été et d'être toujours un exemple.

Merci également à tous les stagiaires, masters, ingénieurs et docteurs sans qui tous ces travaux auraient peut-être vu le jour mais avec une dynamique beaucoup, beaucoup plus lente !

Merci au personnel technique et administratif du laboratoire pour votre support et votre patience, et tout particulièrement S. Catellani, A. Labonne, J. Davoine, V. Danguillaume, C. Marcon, P. Eustache, C. Brun, M.-T. Loubinoux, F. François, J. Delaye, D. Collin, E. Riado et R. Atienza. Merci aux directions successives du laboratoire pour leur soutien financier des programmes de recherche dits « patinoire ».

Un remerciement spécial à Jean-Luc, Patrice, Cédric et Thierry pour votre *coaching* efficace durant la phase de rédaction de ce mémoire.

A mes deux petits monstres préférés, Olivier et Violette.



## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS .....	5
SOMMAIRE .....	7
AVANT-PROPOS .....	9
INTRODUCTION GENERALE .....	13
CONTEXTE : EVOLUTION DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET STRATEGIES DE GESTION ENERGETIQUE...	15
1. Evolution des systèmes d'alimentation électrique .....	15
1.1 Des systèmes d'alimentation plus électriques voire tout électriques .....	15
1.2 Un système d'alimentation multi-sources .....	16
1.3 Des étages d'alimentation continue DC de plus en plus présents. ....	18
1.4 Des incertitudes paramétriques rencontrées dès la phase de conception .....	20
2. Méthodes et outils pour le dimensionnement de systèmes électriques. Problématiques associées et positionnement. ....	20
2.1 Des outils de commande pour la gestion énergétique .....	21
2.2 Des outils de commande pour l'analyse dynamique du système.....	23
2.3 Des modèles dédiés au dimensionnement du système .....	24
3. Conclusion.....	25
A. LA ROBUSTESSE POUR L'INTEGRATION DE COMPOSANTS ET L'OPTIMISATION DES PERFORMANCES .....	31
1. Méthodologie de la commande robuste $H_\infty$ .....	32
1.1 Commande $H_\infty$ .....	32
1.2 Commande $H_\infty$ avec forme du correcteur imposée .....	36
1.3 $\mu$ -analyse et $\mu$ -synthèse.....	36
1.4 Méthodologie de conception robuste .....	39
2. La robustesse pour l'intégration de systèmes [M. SAUTREUIL] .....	40
2.1 Contexte de l'étude. Présentation du système étudié .....	40
2.2 Modélisation du système.....	41
2.3 Contrôle du système non soumis à des incertitudes de conception .....	42
2.4 Synthèse de la commande robuste .....	43
2.5 Perspectives de ce travail .....	46
3. Commande multivariable robuste de systèmes multisources [S. SAILLER, D. HERNANDEZ].....	47
3.1 Contexte de l'étude. Présentation du système étudié .....	47
3.2 Modélisation du système.....	48
3.3 Objectifs de commande .....	49
3.4 Robustesse en stabilité et en performances .....	50
3.5 Validation de la commande robuste de la gestion électrique.....	51
3.6 Perspectives de ce travail .....	51
4. Conclusion.....	52
B. LA COMMANDE OPTIMALE POUR UN DIMENSIONNEMENT ... OPTIMAL [R. VIAL] ? .....	55
1. Introduction. Présentation de la commande optimale.....	55
2. Présentation de la structure étudiée .....	56
3. De l'intérêt d'un dimensionnement énergétique intégrant des critères dynamiques.....	58
4. Méthodologie pour la commande optimale d'un système multi-sources évolutif dans le temps.....	60
4.1 Modélisation dynamique du système .....	60
4.2 Commande optimale d'un système multi-sources .....	61
4.3 Perspectives de ce thème .....	62
5. Conclusions.....	63
C. DE NOUVEAUX MODELES DYNAMIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT ET LA COMMANDE .....	67
1. Modèles actuels de (co)dimensionnement. Performances et limitations. ....	67
2. Etat de l'art sur les systèmes d'ordre non entier .....	69
2.1 Cadre applicatif des systèmes d'ordre non entier .....	69
2.2 Systèmes d'ordre non entier et diffusion.....	70



2.3 Application pour la modélisation des machines électriques en régime linéaire .....	72
3. Les systèmes d'ordre non entier : une réponse aux besoins de modélisation pour le dimensionnement ? .....	73
3.1 Etude des dispositifs électrochimiques [S. SAILLER].....	74
3.2 Modélisation de générateurs synchrones en régime de saturation [S. RACEWICZ].....	80
3.3 Modélisation simplexe de systèmes complexes [O. ENACHEANU, A. AMRANE].....	82
4. Conclusion.....	84
CONCLUSION ET PROJETS DE RECHERCHE .....	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	87
CURRICULUM VITAE.....	99
ACTIVITES D'ENCADREMENT .....	101
LISTE DES PUBLICATIONS.....	103
LISTE DES CONTRATS DE RECHERCHE ET INDUSTRIELS.....	107

## AVANT-PROPOS

### Quelques informations (pré)historiques ...

La grande majorité des travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG), devenu, depuis Janvier 2007, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) après un regroupement avec le Laboratoire de Magnétisme du Navire (LMN) et le Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques (LEMD). Mais revenons quelques années en arrière ...

Après des études d'ingénieur à l'ENS Ingénieurs Electriciens de Grenoble en spécialité « Commande et Actionneurs », j'ai ensuite effectué ma thèse au LEG sous la direction de MM. Marcel Ivanès et Nicolas Retière dans l'équipe Machines Electriques. Le sujet portait sur l'utilisation d'un nouvel outil mathématique, les systèmes d'ordre non entier, pour la modélisation du développement des courants induits dans les pièces conductrices de machines électriques. Ce sujet passionnant, bien que n'ayant pas de retombées industrielles directes, m'a conforté dans l'image que je voulais avoir de la recherche : un travail multidisciplinaire, avec un accent fort placé sur les études théoriques et l'expérimentation.

Après la thèse, je suis partie un an à Saint-Nazaire en contrat ATER au département de Génie Electrique du laboratoire IREENA. J'ai pu découvrir à cette occasion les différentes problématiques liées aux réseaux embarqués à bord des navires, et tout particulièrement celles liées à la pollution harmonique; l'objectif de ce post-doctorat était alors d'intégrer des modèles d'ordre non entier de générateur et de charges dans un outil de calcul de distorsion harmonique développé par P. Guérin [60].

Depuis Septembre 2003, je travaille au G2Elab dans l'équipe Systèmes et Réseaux Electriques (SYREL). Mes travaux de recherche se sont ainsi fortement réorientés vers les problématiques des systèmes, et plus seulement des composants, problématiques qui peuvent se résumer à trois mots clés : **modélisation**, **dimensionnement** et **contrôle/commande**. J'aurai l'occasion de revenir plus longuement sur ces activités dans ce mémoire.

Pour finir cette brève présentation personnelle, je ferai un petit bilan sur ces six années, à la fois sur le plan humain mais aussi, bien sûr, sur le plan scientifique.

Depuis 2003, j'ai encadré et encadre neuf thésard(e)s et douze stagiaires de Master Recherche de toutes nationalités (Syrie, Pakistan, Algérie, Iran, Vietnam, Congo, Pologne, Roumanie, Venezuela). En dehors de toute démagogie péremptoire et outre quelques soirées mémorables de correction de rapports de stage ou chapitres de thèse, je ne remercierai jamais assez tous ces étudiant(e)s que j'ai encadrés ou co-encadrés et qui ont – pour les premiers – essuyé les plâtres et ont souvent contribué à l'avancement du travail et à l'ouverture vers de nouvelles pistes de recherche.

Sur le plan scientifique, intégrer l'équipe SYREL en sortant d'une thèse spécialisée en Machines Electriques ne fut pas une gageure en soi, puisque j'avais suivi une formation solide en

systèmes électriques et en commande à l'ENSIEG. Il a cependant été nécessaire pour moi de définir très rapidement un axe de recherches qui me soit propre. A partir des travaux relativement amont de ma thèse portant sur l'utilisation de systèmes d'ordre non entier en génie électrique, j'ai ainsi continué à travailler sur ces modèles en élargissant le domaine d'application tout en cherchant à diversifier les études de systèmes aux analyses dynamiques en particulier, dans un cadre applicatif diversifié (ferroviaire, aéronautique, génération hybride). Actuellement, mes travaux convergent vers le co-dimensionnement de ces systèmes, axe de recherche mêlant à la fois la problématique de modélisation qui m'est proche à des aspects commande (commande robuste, optimale, prédictive). J'ajoute que cette recherche permet de recourir à des manipulations expérimentales qui me semblent primordiales pour valider certaines approches très « théoriques » et être confrontée aux « vrais problèmes ».

Ces travaux ont permis d'amorcer de fortes collaborations universitaires avec des chercheurs de LEPMI (Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces) et du GIPSA-lab (laboratoire Grenoble Image Parole Signal Automatique) de Grenoble et d'entretenir et enrichir des relations privilégiées avec ALTOM Transport et le CEA. Les thématiques abordées dans ce mémoire trouvent par ailleurs leur place dans l'Institut Carnot « Energies du Futur » dont fait partie le G2Elab.

### ... et quelques définitions

Avant d'entrer dans le cœur de mes travaux de recherche, il est important au départ de bien définir les différents termes qui seront repris dans ce mémoire. Certains mots-clés peuvent en effet avoir si ce n'est une définition différente au moins une signification très particulière suivant la personne à qui on s'adresse.

Mes activités de recherche s'orientent ainsi dans leur grande majorité vers le dimensionnement et la gestion énergétique de systèmes d'énergie électrique. J'entends par cette dernière, **gestion de la production d'énergie électrique** à partir de générateurs conventionnels (alternateurs) ou non (piles à combustible, stockage). Les objectifs de cette gestion consistent ainsi à associer la meilleure structure d'alimentation à la meilleure architecture de contrôle/commande pour respecter un certain cahier des charges de performances, de robustesse ou toute contrainte de fonctionnement (environnement, encombrement, sécurité, ... etc).

Même si le rendement énergétique des structures étudiées est analysé, ces travaux ne portent pas sur les aspects « maîtrise de l'énergie » qui sont parfois associés à la notion de gestion énergétique, mais dont les objectifs consistent à maîtriser la consommation d'un équipement au sens large et améliorer l'efficacité du consommateur. Cette maîtrise de l'énergie trouve un cadre applicatif privilégié dans le bâtiment. Secteur particulièrement énergétivore en France et dans la plupart des pays industrialisés, les recherches actuelles en génie électrique consistent essentiellement à mettre en œuvre des outils de supervision et de surveillance pour contrôler cette consommation comme l'illustre par exemple le projet Homes [67] développé sur le bassin grenoblois.

De plus, je me suis tout particulièrement intéressée aux réseaux de nature « spéciale » comme les **réseaux embarqués** (aéronautique, navals, automobile), **ferroviaires** ou **réseaux isolés**. La gestion énergétique de ces systèmes est cruciale dans la mesure où ils possèdent une faible

puissance de court-circuit et une énergie disponible limitée par leur temps de fonctionnement. Il est ainsi bien souvent nécessaire d'hybrider une ou plusieurs sources, de rationaliser le fonctionnement de chacune en fonction de ses performances et ses contraintes propres, satisfaire un cahier des charges de performances dynamiques et de valider le fonctionnement complet pour s'assurer que des interactions dynamiques ou harmoniques ne sont pas préjudiciables à la mission.

Ces travaux ne s'intéressent donc pas à la gestion énergétique des « grands » réseaux de distribution ou de transport, où les problèmes se posent plus en termes d'équilibrage de production entre producteurs et consommateurs pour éviter toute instabilité ou pannes généralisées (blackouts), d'analyse du réseau face à une insertion massive de générateurs d'énergie non conventionnels ou encore de gestion intelligente des réseaux électriques en usant des réseaux de télécommunications pour donner l'état du système et permettre un contrôle décentralisé [69] .

Enfin, je n'utiliserai pas la notion de « dimensionnement optimal » dans la mesure où ce terme désigne – dans la littérature - une optimisation multi-critères d'un modèle énergétique intégrant la plupart du temps des critères de coût (coût d'investissement du matériel, coût d'amortissement). Ces aspects économiques n'ont pour l'instant pas été abordés, même si mes recherches actuelles autour des moyens de stockage imposent petit à petit de s'intéresser aux politiques d'incitation économique pour intégrer ce coût et favoriser des technologies émergentes [2][51].



## INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes électriques subissent depuis plusieurs années des évolutions technologiques fortes qui complexifient leur fonctionnement et par conséquent leur dimensionnement. Le vecteur électrique prend ainsi une part de plus en plus importante parmi les autres vecteurs énergétiques (hydraulique et pneumatique notamment) pour l'alimentation des charges qui sont elles-mêmes de nature de plus en plus électrique [3][13][83][134]. Une réflexion profonde sur le choix des architectures d'alimentation électrique et de contrôle/commande doit donc être menée pour s'adapter à cette électrification des systèmes et respecter les contraintes dynamiques et harmoniques normalisées.

En parallèle, les systèmes d'alimentation électrique sont de plus en plus souvent des systèmes multi-sources, de nature diverse afin de rationaliser au mieux leur utilisation, si possible en assurant la fonction de stockage afin de gérer les phénomènes d'intermittence ou de secours. On parle alors d'hybridation de sources, qui permet de rationaliser l'utilisation de la source principale ou de fournir un complément de puissance lorsque cette dernière atteint sa puissance maximale, de récupérer de l'énergie lors des phases de freinage pour un véhicule ou de surproduction pour une source intermittente et, surtout, introduire un degré de liberté supplémentaire pour répartir au mieux les puissances en améliorant le rendement du système global. Compte-tenu des progrès obtenus dans l'augmentation des densités d'énergie des batteries [86][89] et les performances en densités de puissance et en cyclabilité des supercapacités [10], ces deux sources facilitent le développement de cette hybridation mais leur conception n'est pas aisée. Ainsi, leur dimensionnement doit permettre de maximiser les performances tout en limitant le nombre d'éléments, mais leur gestion doit intégrer une surveillance de leur état de fonctionnement interne (état de charge notamment) pour veiller à ne pas dégrader leur durée de vie et éviter tout accident. On est dans un cas précis où gestion énergétique et dimensionnement sont étroitement liés et doivent être traités conjointement.

Après avoir adopté une stratégie de gestion énergétique et une architecture d'alimentation, le processus classique de dimensionnement des sources et de l'architecture de contrôle/commande repose sur une méthodologie séquentielle consistant à améliorer par étapes successives un système pré-dimensionné. Hormis le temps de conception qui peut être relativement pénalisant pour un ingénieur compte-tenu des multiples allers-retours nécessaires avant de respecter toutes les contraintes liées au dimensionnement (contraintes du régime permanent, des régimes transitoires ou de défaut, normes de pollution harmonique), ce processus possède un certain nombre de limitations. Ainsi, les liens entre architecture de commande et dimensionnement du système ne sont pas toujours établis, alors que cette commande peut clairement amener des gains en termes de dimensionnement de sources (notamment sur la taille du stockage) et réciproquement, le choix de certains composants a un impact fort sur les performances dynamique du système. De plus, si le problème de contrôle n'est pas résolu, le concepteur est incapable de dire si le problème n'a effectivement pas de solution ou tout simplement, s'il ne l'a pas trouvé. La synthèse classique de correcteur est ainsi nécessairement sous-optimale [133].

De premières études permettent d'appréhender un dimensionnement global intégrant de multiples critères, grâce à l'utilisation de logiciels et d'algorithmes d'optimisation de plus en plus performants [101][120]. En attendant l'arrivée de véritables logiciels métiers permettant le dimensionnement complet d'un système électrique [150], il nous semble important de développer en parallèle des méthodologies de dimensionnement plus « artisanales » pour le concepteur de systèmes.

Les travaux présentés dans ce mémoire consistent ainsi à proposer de nouveaux outils issus de l'automatique pour faciliter le processus de dimensionnement de ces nouveaux systèmes d'énergie électrique en liant systématiquement architecture de contrôle/commande et choix ou intégration de composants. La commande robuste permettra d'optimiser les performances dynamiques d'un système soumis à des incertitudes liées à son environnement de fonctionnement. Notre choix s'est orienté vers la commande  $H_\infty$  qui a l'avantage d'offrir un cadre unifié à la fois pour l'analyse de robustesse et la commande. Nous nous sommes également intéressés à la commande optimale pour optimiser les performances énergétiques cette fois d'un système évolutif dans le temps (systèmes ferroviaires).

Tous ces travaux théoriques seront quasi systématiquement validés sur des démonstrateurs expérimentaux au sein du centre PREDIS<sup>1</sup> de Grenoble-INP.

Après un premier chapitre introductif sur le contexte général de ces travaux, les outils de commande utilisés pour améliorer le dimensionnement d'un système multi-sources et optimiser ses performances seront présentés dans la première partie. Nous aborderons ensuite, dans une deuxième partie, le choix de modèles dédiés à la commande et la gestion des systèmes électriques. Enfin, quelques perspectives de recherche seront présentées en conclusion de ce mémoire.

---

<sup>1</sup> Le centre PREDIS (Production d'Énergie DIStribuée) a pour objectif de proposer aux étudiants, chercheurs et industriels un ensemble de démonstrateurs autour des nouvelles technologies de l'énergie. Elle recense à l'heure actuelle des systèmes de génération renouvelable (panneaux solaires, émulateur d'éolienne, piles à combustible) et un réseau électrique reconfigurable permettant d'étudier à échelle réduite des réseaux de différente nature (réseau industriel, de distribution, ... etc). Des travaux en cours permettront en 2010 de disposer d'un bâtiment entièrement tourné vers l'habitat durable. Plus d'informations seront trouvées sur <http://grenoble-inp.fr/ense3/>.

# CONTEXTE : EVOLUTION DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET STRATEGIES DE GESTION ENERGETIQUE

## 1. Evolution des systèmes d'alimentation électrique

### 1.1 Des systèmes d'alimentation plus électriques voire tout électriques

Que ce soit dans le domaine des transports comme dans celui des applications stationnaires, le vecteur Energie électrique joue un rôle central dans la recherche actuelle d'efficacité énergétique des différents composants d'un système et du système dans son ensemble, dans un contexte sociétal de grand respect de l'environnement et des ressources naturelles.

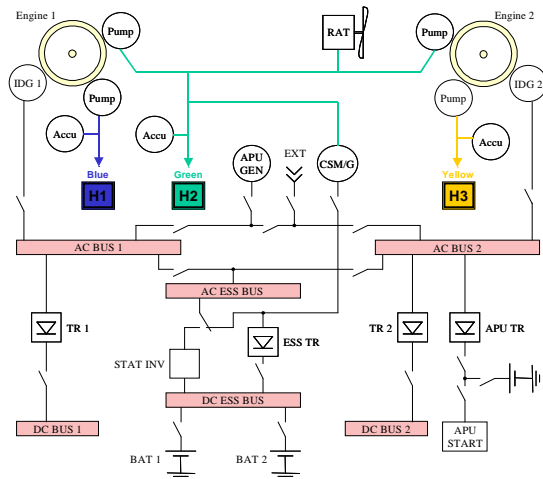
De plus, les systèmes embarqués actuels favorisent ce vecteur énergétique au détriment de ses concurrents plus classiques comme l'énergie hydraulique ou pneumatique, nécessitant des maintenances et des équipements plus lourds et coûteux. L'objectif est ainsi d'améliorer les économies d'énergie, les performances et la fiabilité du système tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre [75][86].

Le cas le plus emblématique de cette évolution vers le tout électrique concerne le domaine aéronautique ces vingt dernières années, notamment pour la génération de la puissance dite « secondaire » (hors propulsion), nécessaire à l'alimentation des gouvernes de vol, des appareils de navigation et de contrôle et de l'ensemble des charges assurant le confort des passagers (climatisation, éclairage, etc) [83].

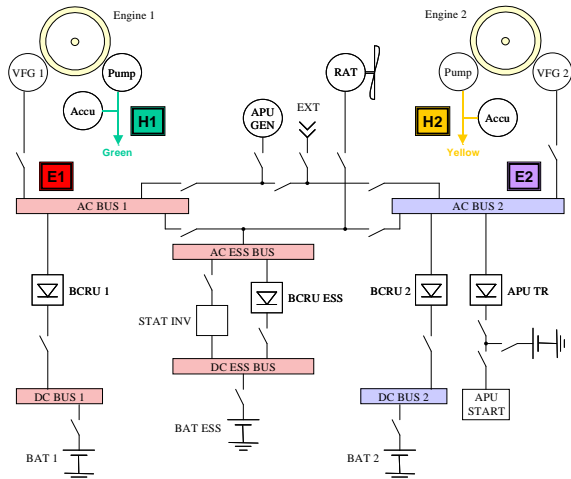
Ainsi, dans l'avion « à puissance hydraulique » (de type A330 ou A340), la puissance électrique installée est d'environ 300 kVA. Les circuits sont alimentés par des pompes hydrauliques entraînées par le réacteur. Le réseau électrique est alimenté par des IDG (*Integrated Drive Generator*), qui génèrent de la puissance électrique à fréquence fixe (400 Hz) à partir du compresseur haute pression des réacteurs. Le réseau peut également être alimenté en secours par des batteries ou un générateur de secours (CSM/G) de puissance relativement faible par rapport aux IDG.

Pour l'A380, de nombreuses innovations technologiques ont été accomplies pour favoriser la distribution électrique. Ainsi, le réseau de secours est désormais entièrement électrique, un tiers des actionneurs fonctionnent à l'énergie électrique et la génération est à fréquence variable (entre 360 et 800 Hz). Ceci a permis de réaliser des économies de masse et d'encombrement relativement importantes. Cependant, le fonctionnement à vitesse variable, qui dépend entièrement des conditions de vol, a nécessité une redéfinition complète des différents équipements notamment avec un interfaçage systématique à partir de convertisseurs d'électronique de puissance. Enfin, on voit apparaître une segmentation de la puissance embarquée, avec des étages de forte et moyenne puissances.





Architecture d'un biréacteur actuel A330 constitué de 3 circuits hydrauliques et d'un circuit électrique



Architecture d'un biréacteur de type A380 constitué de 2 circuits hydrauliques et d'un circuit électrique

**Figure 1 :** Evolution vers le tout électrique des réseaux d'alimentation aéronautique (un descriptif sémantique des différentes fonctions est disponible en Annexe 1)

Cette évolution ne devrait pas s'arrêter là. Les aviateurs espèrent ainsi des gains en masse substantiels en supprimant le prélèvement d'air pneumatique au niveau des turbines (le « *bleed* »), qui crée d'énormes pertes au niveau des turbines et par conséquent une consommation supplémentaire en carburant. Ce futur avion *bleedless* devrait voir la proportion d'actionneurs électriques encore augmenter puisque, avec la suppression du réseau pneumatique, le conditionnement d'air et le dégivrage seront de nature électrique et les générateurs principaux devront assurer le démarrage des réacteurs, puis fonctionner en générateurs électriques. De profonds changements structurels de la distribution de puissance sont donc attendus.

Ces changements se retrouvent également dans la grande majorité des applications de nature embarquée, que ce soit dans les domaines ferroviaire [3], naval [134], automobile [75][100] ou spatial [50], pour les applications civiles ou militaires.

## 1.2 Un système d'alimentation multi-sources

Les systèmes électriques sont de plus ou souvent alimentés par une source d'énergie principale (groupe diesel, panneaux photovoltaïques, pile à combustible, ...) hybridée par une ou plusieurs sources auxiliaires. Cela est tout particulièrement le cas des systèmes en partie ou totalement autonomes vis-à-vis du réseau de distribution électrique. L'hybridation permet ainsi de diminuer les contraintes sur la source principale, améliorer la gestion énergétique en ayant des moyens d'action supplémentaires et augmenter globalement les performances et le rendement du système ... du moins en théorie [22][59][113].

[52] donne une liste relativement complète des différents moyens de stockage, en citant les principaux critères de comparaison des différentes technologies suivant l'application visée. Ces technologies sont ainsi comparées suivant :

- des critères énergétiques : puissance et énergie disponibles ;
- des critères d'encombrement : puissances et énergies volumiques disponibles ;
- des critères d'autonomie par rapport à la puissance disponible ;

- des critères de coût restitué par rapport au coût de l'installation.

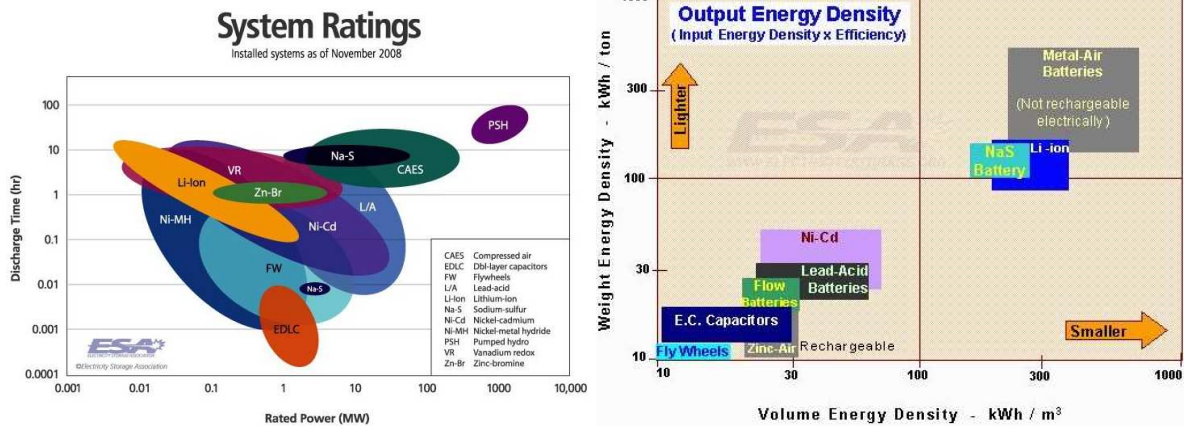


Figure 2 : Critères classiques de choix de technologies de stockage [30][52]

De nombreuses applications industrielles sont citées dans [50] pour illustrer les différentes solutions d'hybridation qui peuvent être proposées. Dans le cadre des études menées dans ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement aux dispositifs de stockage électrochimique (batteries et supercapacités).

Hormis les problèmes technologiques liés à chaque technologie de stockage (maturité du procédé, réalisabilité, packaging, sécurité, etc) ou à la surveillance de leur état de fonctionnement (état de charge et/ou vieillissement) qui ne seront pas repris dans ce mémoire, la maîtrise du fonctionnement du dispositif de stockage est un enjeu crucial avant leur déploiement massif au sein des systèmes électriques. Pour un système multi-sources, il convient ainsi de prendre en compte les caractéristiques intrinsèques et les conditions de fonctionnement les plus adaptées pour augmenter le bilan énergétique du système global sans dégrader la durée de vie des équipements les plus sensibles comme les batteries ou les piles à combustible [35].

La méthodologie de conception du système multi-sources doit donc intégrer le plus tôt possible ces contraintes dynamiques. Traditionnellement, le processus de dimensionnement consiste à définir l'architecture, dimensionner les différents composants du système et, enfin, proposer une gestion énergétique permettant d'assurer les performances du système et de réaliser la mission. [3] propose une méthodologie plus adaptée à l'hybridation des sources : la conception systématique fréquentielle [7][122][129], consistant à définir une stratégie de gestion fréquentielle avant de procéder au dimensionnement des différentes sources. Il est ainsi possible d'intégrer des contraintes technologiques et des critères de faisabilité au moment où l'on cherche à garantir certaines performances dynamiques. Cette gestion permet ainsi de définir les bande-passantes des correcteurs gérant les échanges énergétiques entre les différentes.

Nous partirons de cette gestion fréquentielle pour définir les références de chaque source de nos systèmes ; cependant, nous mettrons en œuvre des techniques permettant de conserver un lien plus fort entre dimensionnement et lois de commande.

### 1.3 Des étages d'alimentation continue DC de plus en plus présents.

L'alimentation des actionneurs électriques est désormais le plus souvent assurée par des convertisseurs d'électronique de puissance pour améliorer leurs performances dynamiques (pilotage du couple et du flux magnétique) et augmenter leur efficacité en ajustant le fonctionnement de la machine aux caractéristiques de la charge (meilleure disponibilité et récupération de l'énergie). Leur nombre varie entre quelques uns pour le véhicule classique, à plusieurs dizaines pour les systèmes aéronautiques et spatiaux, voire plusieurs centaines pour la station spatiale internationale [50].

La multiplication de ces actionneurs conduit alors à la mise en parallèle de nombreux bus continus, dont le nombre pourrait être réduit en choisissant une distribution uniquement en courant continu [110] :

- réduction de l'encombrement, de la masse et de la complexité du système ;
- amélioration du rendement global de conversion par réduction des pertes.

Par ailleurs, la récupération et le stockage de l'énergie par batteries et / ou supercapacités seraient facilités par une distribution via un bus continu commun.

Bien que la distribution électrique soit aujourd'hui majoritairement à courant alternatif, l'utilisation de bus continus pour la distribution de l'énergie n'est pas entièrement nouvelle. Ainsi, les liaisons longues distances aériennes ou sous-marines sont la plupart du temps de nature continue afin de réduire les pertes en ligne et les chutes de tension liées à un transit de réactif. A titre d'exemple, la liaison IFA 2000 de 73 km entre la France et l'Angleterre, constituée de quatre câbles bipolaires sous 270 kV, permet un transit de 2 GW avec un taux de disponibilité avoisinant les 98%.

D'autres situations privilégient l'utilisation d'une alimentation continue ; c'est ainsi le cas lorsqu'il est nécessaire d'interconnecter des réseaux alternatifs présentant des problèmes de synchronisation ou d'interconnexion (réseaux électriques chinois, indiens ou nord-américains). En Europe, les futures interconnexions entre la France, l'Italie et l'Espagne se feront vraisemblablement par des lignes HVDC (**H**igh **V**oltage **D**irect **C**urrent) afin de faciliter les échanges lors de périodes de surconsommation ou de sous-production.

A moyen terme, les liaisons continues permettraient d'améliorer l'insertion des énergies renouvelables dans le réseau électrique en limitant les pertes de conversion. Le projet Desertec dont l'objectif est de connecter plusieurs centrales solaires à concentration pour alimenter l'Afrique du Nord, l'Europe et le Moyen-Orient, repose sur une distribution à partir de liaisons HVDC (ce projet pourrait faire bénéficier l'Europe d'une énergie à hauteur de 17% de sa consommation).

D'autres projets visent à relier des éoliennes offshore avec des étages continus haute tension afin là encore de maximiser l'énergie récupérable. Ces applications sont possibles dès lors que les machines synchrones à aimants permanents se généralisent [142].

Proposer de nouvelles architectures de distribution à partir d'étages de conversion continue permettrait ainsi d'améliorer l'efficacité de ces systèmes et de réduire leur complexité.

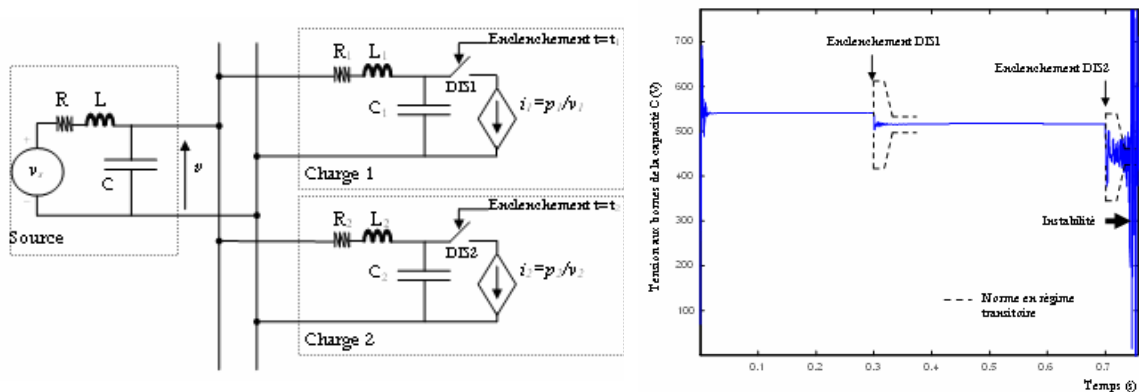
Les problèmes inhérents à ces nouvelles structures portent essentiellement sur :

(i) le choix du mode de conversion alternatif / continu dans le cas où la source principale resterait de nature alternative. Cette conversion peut être faite à partir de redresseurs à diodes ou commandés par IGBT, suivant les spécifications attendues en termes de réversibilité et de pollution harmonique. Les principaux critères pour choisir une structure de conversion plutôt qu'une autre sont liés :

- ✓ au positionnement des charges sensibles et par conséquent aux contraintes harmoniques à respecter sur l'étage alternatif ;
- ✓ au besoin de contrôler ou non la tension du bus continu ;
- ✓ à la fiabilité recherchée de la conversion ;
- ✓ à la puissance de dimensionnement du redresseur.

(ii) la méthodologie de dimensionnement notamment dans le domaine dynamique, qui doit être adaptée pour ces réseaux particuliers. En effet, mise à part la réalisabilité technologique de ces réseaux continus (niveaux de tension/courant, protections spécifiques), de forts couplages dynamiques peuvent apparaître entre les différents composants d'un réseau continu, pouvant conduire à des instabilités si aucune précaution n'est prise lors du dimensionnement de chaque sous-système [32][50][92].

A titre d'illustration, on considère un réseau continu constitué d'une source et de deux charges, chaque charge fonctionnant à puissance constante. On supposera que le concepteur de chaque charge connaît parfaitement le modèle de la source, mais ignore les paramètres de l'autre charge. Chaque charge est cependant conçue pour respecter une norme identique en régime transitoire, caractérisée par des pointillés sur la Figure 3. On constate cependant que lorsque les deux charges sont placées en parallèle, la norme n'est plus respectée et le système devient même instable. Il est donc nécessaire de stabiliser le système ... au niveau du système.



**Figure 3 :** Intégration de deux sous-systèmes au sein d'un même réseau respectant individuellement les mêmes performances dynamiques

D'autres instabilité peuvent apparaître, liées cette fois à la présence de charge à puissance constante (par exemple, les variateurs de moteurs), se comportant comme des résistances négatives au sens des petits signaux [13].

Le dimensionnement de ces réseaux tout ou en partie à courant continu doit donc être repensé pour intégrer à la fois des contraintes énergétiques liées à la surveillance de l'état de charge des moyens de stockage ou à l'optimisation du rendement, mais aussi des contraintes de performances dynamiques afin de garantir le bon fonctionnement du système pour tout point de fonctionnement.

#### **1.4 Des incertitudes paramétriques rencontrées dès la phase de conception**

Une tendance actuelle rencontrée chez les concepteurs de systèmes embarqués consiste à faire fabriquer les différents éléments du système par des équipementiers différents. Le concepteur a dès lors plus un rôle d'intégrateur de ces différents éléments, ce qui permet de réduire significativement le coût et le temps de conception.

En contrepartie, l'intégration ne garantit pas a priori les performances du système. Reprenons l'exemple de la Figure 3 ; si nous supposons que chaque charge a été conçue indépendamment par un équipementier pour respecter le même cahier des charges, l'intégration des deux charges pourra cependant conduire à une instabilité. D'autres incertitudes doivent également être anticipées lors de la phase de conception : tolérances des différents éléments du système, paramètres et structure de filtrage, état de fonctionnement des sources, etc. Ces incertitudes jouent sur la stabilité mais aussi sur les performances dynamiques du système [87].

La solution classique permettant au concepteur de lever ces incertitudes et garantir les performances de son système lors de l'intégration consiste à effectuer un grand nombre de simulations temporelles. Avec la présence de nombreux convertisseurs d'électronique de puissance, de nouveaux problèmes se posent pour effectuer ces simulations ; ainsi, avec des pas de simulation devant être adaptés aux temps de commutation (de l'ordre de la milliseconde), la convergence n'est pas acquise pour des durées de simulation longues.

Il convient ainsi de disposer de modèles simplifiés des différents éléments pour diminuer le temps de simulation et/ou d'une nouvelle méthodologie permettant d'intégrer ces incertitudes paramétriques dès la phase de conception dynamique du système.

A cet effet, les modèles moyens des convertisseurs d'électronique de puissance ont depuis longtemps été éprouvés pour la simulation et l'application de la théorie de contrôle classique des systèmes électriques [53][91][114][157]. De nouveaux outils destinés à garantir la robustesse du dimensionnement par rapport à la stabilité et aux performances du système constitueront le cœur de ce mémoire.

## **2. Méthodes et outils pour le dimensionnement de systèmes électriques. Problématiques associées et positionnement.**

Le dimensionnement au sens large d'un système électrique présentant les caractéristiques présentées au paragraphe 1 doit ainsi intégrer :

- (i) le choix de l'architecture de distribution et le dimensionnement en tant que tel des différentes sources et dispositifs de conversion ou d'adaptation ;

- (ii) la stratégie de gestion énergétique pour optimiser les flux énergétiques, augmenter la disponibilité des sources en rationalisant les plus sensibles (piles à combustible, dispositifs de stockage) et ainsi définir les lois de supervision du système ;
- (iii) le choix de l'architecture de contrôle/commande et la synthèse des correcteurs pour optimiser les performances dynamiques du système ;
- (iv) le dimensionnement éventuel de filtrage harmonique afin de limiter voire éliminer toute pollution harmonique ;
- (v) le plan de protections du système visant à éliminer les risques liées aux défaillances (courts-circuits, instabilités, ...).

L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est de faciliter le travail du concepteur pour trouver rapidement LA méthodologie de dimensionnement de son système en ce concentrant sur les points (ii) et (iii). Nous supposons donc que l'architecture des systèmes sera prédéfinie, en anticipant éventuellement les problèmes de filtrage harmonique (utilisation de redresseurs à MLI, filtres LC préalablement positionnés, ...). La plan de protection du système ne sera quant à lui pas abordé dans ce mémoire.

Comme nous l'avons vu, un des principaux problèmes à résoudre est celui de **l'intégration de sous-systèmes** (une source, un filtre, etc) plus ou moins **contraints** dans un environnement plus ou moins **certain**, pour vérifier des **performances dynamiques** données en intégrant éventuellement des **critères énergétiques globaux** (rendement maximal) ou environnementaux (réduction des émissions de gaz à effet de serre). Cette problématique pour le moins floue a priori, est explicitée ci-dessous, point par point, par rapport à l'état de l'art et dans l'ordre chronologique suivi classiquement par le concepteur.

## 2.1 Des outils de commande pour la gestion énergétique

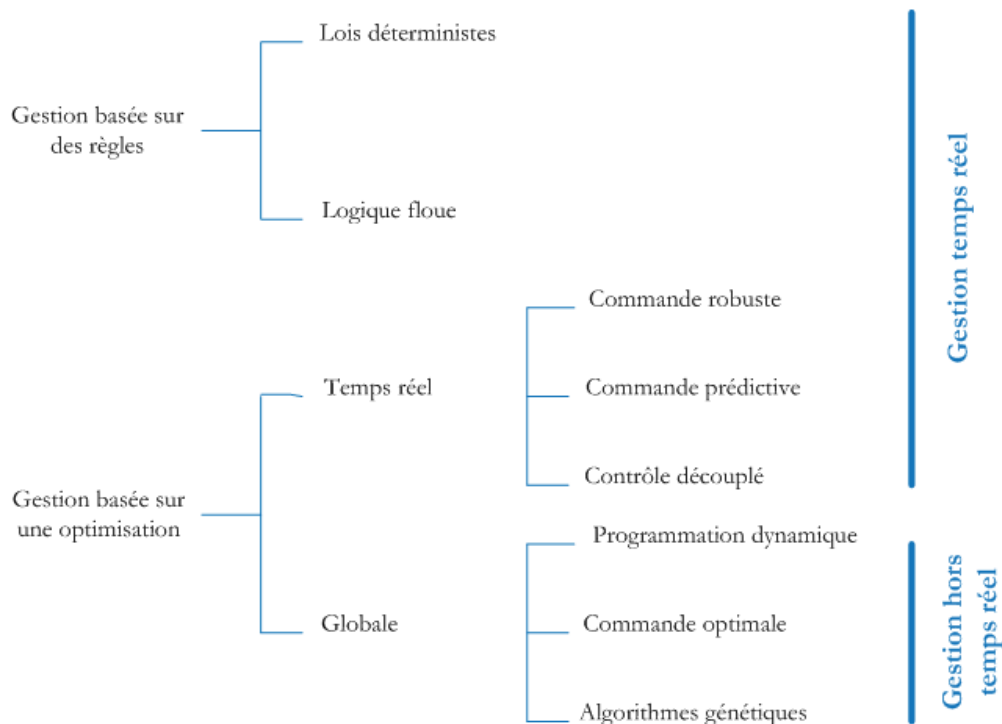
La gestion énergétique fait l'objet depuis quelques années de nombreuses publications, notamment dans le domaine du véhicule électrique, hybride ou non. Son objectif est de définir un premier dimensionnement des sources, ainsi que les références des différentes boucles de commande de manière à respecter les objectifs du cahier des charges et passer toutes les contraintes, notamment celles liées à la disponibilité et la protection des sources. Précisons, même si ce point peut sembler trivial, que la mise en place d'une stratégie de gestion énergétique visant à optimiser le rendement ne doit pas être confondue avec le choix d'une architecture de contrôle/commande visant à optimiser des performances, ces deux actions n'ayant pas du tout la même dynamique.

Pour les systèmes relativement simples, nous adopterons la démarche de [3] qui propose une conception énergétique séquentielle [7][129] plaçant une stratégie de gestion fréquentielle en prélude au dimensionnement des sources. L'objectif est ainsi de définir la fréquence de fonctionnement de chaque source à partir de ses caractéristiques intrinsèques et d'effectuer un

filtrage fréquentiel passe-bas du profil de charge à cette même fréquence pour déterminer le profil en puissance de chaque source. Il est alors possible de procéder au dimensionnement de chaque source. Outre la simplicité de la démarche, cette conception permet par ailleurs d'élargir la plage de solutions possibles, donc de rechercher un dimensionnement plus optimal, mais aussi d'améliorer la compatibilité entre les besoins de la charge et les contraintes sur les sources.

Pour les systèmes plus complexes, avec des profils de charge évolutifs dans le temps, de nombreuses méthodes issues de l'automatique sont appliquées pour optimiser les performances d'un système hybride en respectant un certain nombre de contraintes, mais à l'heure actuelle aucune ne semble avoir démontré sa supériorité et ne s'est imposée par rapport aux autres.

Suivant que cette gestion se fasse en ligne ou hors ligne (pour obtenir un dimensionnement préalable), les outils de gestion énergétique peuvent se différencier en deux catégories, soit en suivant des règles (à partir d'éléments déterministes ou de logique floue), soit à l'aide d'outils d'optimisation. Cette différenciation est représentée sur le diagramme ci-dessous [63][130]. Précisons que la démarche de [3] permet également d'optimiser le dimensionnement du système et d'être implantable en temps réel.



**Figure 4 :** Classification de stratégies de gestion énergétique

La stratégie à **base de règles** est d'amener le point de fonctionnement de la source principale à ses caractéristiques optimales, du point de vue rendement, économie d'énergie et émissions de CO<sub>2</sub> dans le cas d'une source « polluante ». Cette gestion est alors implémentée via des tables de données décrivant des conditions de fonctionnement (par exemple : si l'état de charge d'une batterie passe en dessous d'une certaine valeur, la source principale devra fournir une puissance supplémentaire pour la recharger) ou à partir de lois floues qui sont par définition robustes aux conditions de fonctionnement du système et adaptatives [26]. Cette dernière méthode rencontre un grand succès dans la littérature mais nécessite des temps de calcul plus importants lorsque le

système devient complexe et fortement contraint. Cette stratégie à base de règles est donc particulièrement indiquée dans le cas d'un système hybride parcourant à vitesse variable un trajet avec une part d'inconnue plus ou moins grande (cas du véhicule automobile par exemple).

La deuxième catégorie, qui est plus proche de mes activités, repose sur **l'utilisation d'algorithmes d'optimisation** pour résoudre des problèmes de gestion dynamique avec contraintes. La gestion en temps réel est assurée essentiellement par l'utilisation de commande robuste ou de contrôle prédictif. La première permet de s'affranchir de certaines incertitudes paramétriques ou dynamiques pour garantir des performances dynamiques. Le deuxième permet d'anticiper certaines limitations de fonctionnement comme par exemple un déficit en stockage ou une saturation sur le courant fourni par une source sensible [144].

Si le concepteur connaît préalablement le profil de puissance de la mission à réaliser, une approche globale d'optimisation peut être entreprise en se fondant sur la théorie générale de la commande optimale. C'est cette approche que nous privilégierons pour gérer l'énergie dans un système ferroviaire de type tramway où le trajet parcouru est plutôt connu à l'avance, même si le comportement du conducteur peut influencer sur le profil de puissance.

Le choix de la méthode de gestion énergétique est donc fortement lié à l'application étudiée, au cahier des charges fixé au préalable et à la nécessité ou non d'implanter cette stratégie en temps réel.

## 2.2 Des outils de commande pour l'analyse dynamique du système

### 2.2.1 Pour les performances dynamiques

De très nombreux ouvrages font référence pour décrire et illustrer les outils de commande issus de l'Automatique et destinés à satisfaire les performances dynamiques attendues [102] :

- régulation du système pour rejeter les perturbations,
- asservissement pour le suivi d'une référence.

Parmi toutes les techniques de commande, on peut différencier [9] :

- les techniques de commande non linéaires, comme la commande par modes glissants ou reposant sur une fonction de Lyapunov [114],
- les techniques de commande linéaires basées sur la linéarisation du système et l'analyse de petites variations [79][133].

Notre objectif n'est pas de reprendre ces références, mais de préciser notre cahier des charges pour cibler plus précisément le(s) outil(s) de commande qui sera(ont) le(s) plus approprié(s).

Afin de simplifier la démarche de conception, nous restreindrons le champ d'applications aux régimes **linéaires** correspondant au **domaine des petits signaux**. Il sera cependant nécessaire de vérifier lors de la phase d'analyse que les modèles et le contrôle seront valables pour de petites variations du point de fonctionnement, et d'étudier leur domaine de validité pour des variations de plus forte amplitude.



### 2.2.2 Pour l'intégration des sous-systèmes et la robustesse du dimensionnement

Les travaux sur le dimensionnement de réseaux continus ont porté essentiellement jusqu'aux années 1980 sur l'analyse de stabilité [85][97] ; ils ont ainsi conduit à la définition du critère de Middlebrook permettant de garantir la stabilité d'un système à partir de l'étude des seuls gains des impédances de chaque sous-système. Le principal inconvénient de ce critère est d'être **conservatif**, c'est-à-dire qu'il ne constitue qu'une condition suffisante pour garantir la stabilité d'un système.

Depuis, d'autres travaux ont permis de généraliser ce critère en définissant des spécifications (et finalement, de la robustesse) sur chaque sous-système pour garantir une stabilité au niveau « système » [153]. Très peu de travaux portent cependant sur des outils aptes à assurer la robustesse en stabilité d'un sous-système vis-à-vis de son environnement final de fonctionnement.

Pour les réseaux continus, les interactions filtre-convertisseurs sont la plupart du temps traitées en dimensionnant en conséquence les filtres en amont des convertisseurs alimentés par le réseau DC [73][97]. L'influence du contrôle des convertisseurs sur la stabilité globale du système n'est ainsi que rarement étudiée, mis à part dans [88] ou [149]. [115] et [116] illustrent cependant l'intérêt d'une commande découplée d'un système multi-convertisseurs raccordés sur un bus commun pour annuler l'impédance de sortie de la source d'énergie pour chaque convertisseur, permettant ainsi de garantir la stabilité du système.

Dans [136], l'auteur montre qu'il est possible de dimensionner la commande d'une source continue pour annuler les interactions déstabilisantes d'un ensemble filtre – convertisseur – machine sur une certaine bande passante, ce qui lui permet de diminuer le volume de certains éléments passifs. Comme le critère de masse peut être dans certaines applications très important à intégrer, notamment dans le domaine aéronautique, cette démarche consistant à travailler sur la commande pour garantir la stabilité et les performances, tout en gardant un lien fort avec le dimensionnement, semble être très pertinente.

Il faudrait en théorie appliquer l'ensemble des techniques de contrôle mentionnées dans la littérature pour savoir si la commande au sens large peut permettre de faciliter l'intégration de sous-systèmes. Nous nous focaliserons cependant sur la technique de **contrôle  $H_{\infty}$**  qui offre un cadre méthodologique et générique de conception dynamique comme nous le verrons dans la partie 1. Par ailleurs, l'analyse associée à cette technique de contrôle offre au concepteur une information claire et quantitative sur les **propriétés de robustesse** de son système, que ce soit par rapport à la stabilité ou aux performances dynamiques.

### 2.3 Des modèles dédiés au dimensionnement du système

Le dimensionnement d'un système électrique nécessite plusieurs niveaux de modélisation suivant les plages de temps étudiés et la précision recherchée, du modèle énergétique global au modèle dynamique fin de chaque composant.

La plupart des modèles mis en œuvre dans ce mémoire pour gérer efficacement les échanges énergétiques au sein d'un système électrique ou optimiser ses performances seront issus d'un moyennage des variables d'état pour modéliser les nombreux convertisseurs d'électronique de

puissance présents pour interfacer ou commander les sources. Même si cette modélisation sera systématiquement validée à travers des simulations topologiques ou des résultats expérimentaux, il est légitime de se demander si un modèle se prête plus particulièrement à l'établissement d'une stratégie ou d'une loi de commande.

[93] définit les spécificités d'un modèle de commande suivant : « une réécriture adéquate des modèles physiques (pour laquelle l'expertise du concepteur est essentielle) pour calculer les commandes ». Il est ainsi important d'intégrer dans la modélisation certains aspects ou paramètres physiques fondamentaux qui ne sont pas forcément des variables d'état, des grandeurs mesurables et/ou des grandeurs de sortie ... sans augmentation trop importante de l'ordre du système.

Pour les systèmes intégrant de nouvelles sources d'énergie ou des dispositifs de stockage, dont le comportement est difficilement modélisable ou fortement lié à des paramètres externes (température, pression) ou internes (vieillessement), les modèles doivent donc être adaptés pour optimiser leurs performances et celles du système [54]. Comme nous le verrons, le formalisme de la commande  $H_\infty$  permet de modéliser ces incertitudes de fonctionnement.

### 3. Conclusion

L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est de proposer un cadre méthodologique générique de dimensionnement dynamique de réseaux dont la particularité est de présenter des étages à courant continu, et ceci dans un contexte industriel. Dans cette méthodologie, une place forte sera offerte à la commande des convertisseurs d'électronique de puissance pour assurer les performances du système et garantir sa stabilité. Pour cela, l'approche privilégiée utilisera une technique de commande robuste, reposant sur des outils d'optimisation, la commande  $H_\infty$ . Cette méthode a par ailleurs l'avantage d'être synthétisée dans le domaine fréquentiel, ce qui semble être plus adapté aux besoins des concepteurs de systèmes [13].

De plus, des outils d'analyse de robustesse, que ce soit par rapport à la stabilité du système ou par rapport aux performances du contrôle seront mis en œuvre pour garder un lien fort avec le dimensionnement des différents composants. Précisons ici qu'il nous semble dès lors nécessaire de posséder une bonne connaissance du système et de ses différents constituants pour pouvoir utiliser les théories issues de l'automatique.

Notons que les commandes mises en œuvre dans ce mémoire seront valables pour de petites variations autour d'un point de fonctionnement, donc linéaires. Elles sont cependant adaptables pour des régimes dérivant lentement dans le temps sous l'influence de différents paramètres extérieurs (température, pression, etc). De nombreux travaux portent sur l'utilisation d'outils de commande non linéaires pour les systèmes présentant de fortes variations de fonctionnement ou pour les systèmes hybrides [116]. Ces outils n'ont pas été abordés dans le cadre de ces travaux, mais resteraient à comparer à notre approche notamment dans le cas de systèmes dont l'état évolue significativement avec les conditions extérieures (à l'instar d'une pile à combustible).

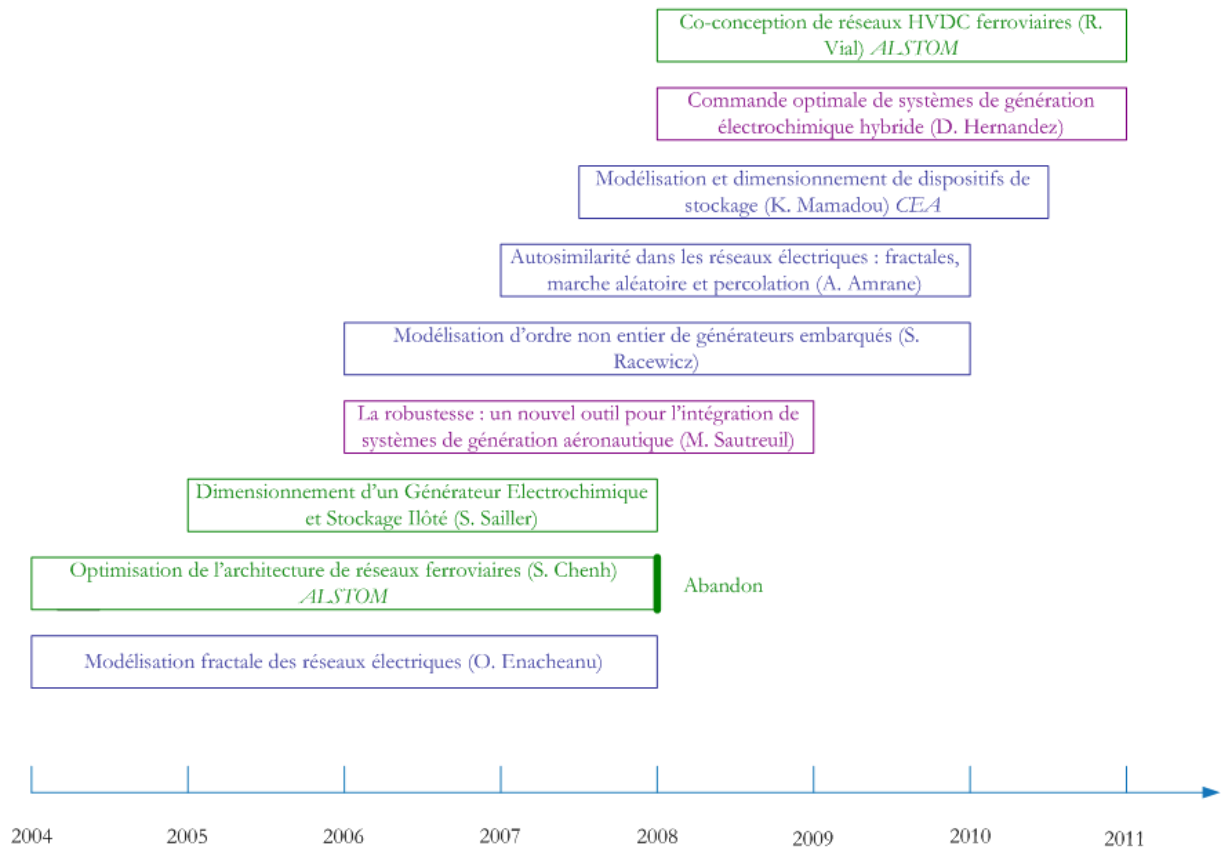
La question de la modélisation sera abordée dans une deuxième partie. Des modèles de connaissance fins mais d'ordre réduit permettront ainsi de modéliser certains phénomènes physiques internes ou externes aux sources présentes dans les systèmes, dans l'objectif d'améliorer le processus de co-dimensionnement.

L'originalité des travaux présentés porte essentiellement sur deux points :

- les études sont quasiment toutes orientées vers le co-dimensionnement, c'est-à-dire un dimensionnement mariant tous les aspects nécessaires à la définition d'une structure de puissance et de l'architecture du contrôle/commande. Cette démarche sera illustrée progressivement, de la thèse de S. Sailler, où un dimensionnement classique reposant sur un choix découplé de la structure et la commande, en passant par les thèses de M. Sautreuil et D. Hernandez, sur la commande robuste, et jusqu'à la thèse de R. Vial, pour laquelle plusieurs analyses tant en régime dynamique qu'en régime harmonique ont permis d'illustrer l'intérêt de cette approche. Pour mener ces études de co-dimensionnement, le choix du modèle est primordial afin d'intégrer tous les aspects techniques du dimensionnement : régime permanent, régime dynamique et régime harmonique. Le principal verrou scientifique est lié à l'ordre du modèle qui est nécessairement élevé dans cette approche et impose de fait des études de réduction d'ordre ... sans perte de lien avec les paramètres de dimensionnement.
- les techniques de réduction d'ordre mises en œuvre dans ces travaux font appel à un outil mathématique relativement original en génie électrique : les systèmes d'ordre non entier. Cet outil permet ainsi de réduire très significativement l'ordre d'un système dont le fonctionnement est régi par une équation de diffusion (champ magnétique, électrique, etc) tout en conservant un lien très fort avec la physique du système considéré. Ces modèles ont été mis en œuvre dans les thèses de O. Enacheanu, A. Amrane, S. Racewicz et S. Sailler.

Comme nous l'évoquerons en conclusion, il restera encore à marier ces deux aspects.

A titre d'illustration, la Figure 5 présente les principaux travaux de recherche qui me sont personnels ou qui sont issus des thèses pour lesquelles j'ai participé à l'encadrement ou que j'encadre actuellement. Les collaborations industrielles ou universitaires sont mentionnées en italique.



**Figure 5 :** Evolution des activités de recherche et des thèses encadrées (*en bleu, les activités de modélisation ; en violet, les activités en commande ; en vert, les activités « systèmes »*)



## **PARTIE 1 :**

### **OUTILS DE COMMANDE POUR LE DIMENSIONNEMENT DYNAMIQUE DE SYSTEMES ELECTRIQUES**

Le choix de l'architecture de commande et des correcteurs a une influence certaine sur les performances et la stabilité du système global et sur son bilan énergétique. La mise en œuvre de la commande est donc primordiale pour assurer le bon dimensionnement d'un système.

D'approche simple et aisée, la méthodologie séquentielle classique de dimensionnement est souvent longue à mettre en œuvre dans la mesure où de nombreux paramètres échappent au concepteur (incertitudes paramétriques, intégration de composants non connus, etc). Ce dernier doit donc procéder à un certain nombre d'itérations pour définir le (ou les) correcteur(s) qui respectera(ont) toutes les contraintes et attentes du cahier des charges ... sans garantie de non-existence si aucun correcteur n'est trouvé, ou, dans le cas contraire, que ce correcteur soit optimal.

L'objectif de la méthodologie présentée dans ce mémoire consiste donc à améliorer ce dimensionnement et réduire le temps de conception en recourant à des outils de commande plus avancés comme la commande robuste qui s'affranchit des incertitudes paramétriques.

En parallèle, pour mettre en œuvre une stratégie de gestion énergétique d'un système plus complexe ou pour lesquels les flux de puissance ne sont pas aisés à gérer, une autre commande sera appliquée pour optimiser un critère donné (par exemple, le rendement) tout en respectant de nombreuses contraintes de dimensionnement : la commande optimale.

REMARQUE. Nous présentons volontairement les travaux dans l'ordre inverse du processus de dimensionnement présenté en introduction car de nombreux outils de commande sont complémentaires entre la gestion énergétique et la commande de systèmes, mais seront plus détaillés pour cette dernière.



## A. LA ROBUSTESSE POUR L'INTEGRATION DE COMPOSANTS ET L'OPTIMISATION DES PERFORMANCES

La synthèse de correcteurs s'établit en règle général pour les paramètres nominaux du système considéré [102]. Cette synthèse peut ainsi s'établir dans un cadre trop simpliste, où de nombreuses dynamiques ont pu être négligées (par exemple celles intervenant hors de la bande passante du système asservi) ou quand des paramètres sont incertains voire indéterminés. Lors d'un dimensionnement dynamique classique (choix de l'architecture de commande et synthèse des correcteurs), l'analyse de robustesse s'établit ainsi en général a posteriori, à l'aide de simulations temporelles. On vérifie par exemple, en effectuant des modifications de point de fonctionnement, que le système reste stable (robustesse en stabilité) ou que le correcteur mis en œuvre maintient les performances dynamiques pour lesquelles il a été dimensionné, en régulation ou asservissement (robustesse en performances).

Il est cependant pertinent d'intégrer plus précocement cette analyse dans la mesure où elle permet de relier directement performances dynamiques (asservissement, rejet de perturbation) et paramètres du système [107]. L'intégration des dynamiques négligées dans la synthèse des correcteurs peut s'effectuer très simplement en améliorant le modèle d'analyse ; il est également possible de modéliser ces incertitudes sous une forme dite *non structurée* [133]. Nous nous intéresserons cependant plus à la robustesse de la commande vis-à-vis d'incertitudes paramétriques dites *structurées*; le modèle pour la synthèse possédera quelques paramètres incertains dans certains intervalles ou variant dans le temps [133]. L'annexe 1 présente la modélisation adaptée aux incertitudes.

La méthodologie présentée dans le premier paragraphe s'appuie sur la technique de commande  $H_\infty$ , dans la mesure où celle-ci permet de mettre en place une méthodologie générique de synthèse des correcteurs pour un système donné [46][155]. Les nombreuses itérations du processus classique de dimensionnement séquentiel sont ainsi évitées. Par ailleurs, de nombreuses fonctionnalités ont été développées dans le logiciel Matlab<sup>®</sup>, qui rendent beaucoup plus aisée la synthèse de cette commande [9][56]. Notons cependant que l'utilisation des outils numériques peut poser un certain nombre de problèmes de convergence [133].

Une analyse de robustesse adaptée à cette commande, la  $\mu$ -analyse, est ensuite utilisée pour caractériser la robustesse en stabilité et en performances du système. Là encore, cet outil permettra d'affiner les liens entre dimensionnement des composants et commande [48].

D'autres approches peuvent être utilisées dans le cadre de la commande robuste [18]. Mentionnons par exemple la commande par modèle interne, le placement de pôles robuste (par retour d'état ou de sortie), l'approche paramétrique (par utilisation du théorème de Kharinotov) et enfin la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) qui repose sur la synthèse de correcteurs d'ordre non entier [106]. Nous reviendrons sur cette dernière approche en conclusion de ce mémoire. Dans un étude portant sur la commande d'un bras articulé présentée dans [18], les auteurs montrent que ces commandes présentent des indices de performances



relativement identiques (environ 95%). Cependant, aucune démarche d'analyse aussi spécifique que la  $\mu$ -analyse n'est proposée pour aider le concepteur dans le choix des paramètres du système.

Pour une stratégie de gestion robuste aux incertitudes paramétriques, la commande  $H_2$  permet d'optimiser sur un cycle de fonctionnement un critère énergétique. Nous reviendrons sur ce point à la partie B.

Après quelques rappels sur la formulation de la commande robuste  $H_\infty$ , on illustrera son application pour la commande multivariable de systèmes multi-sources et l'intégration de composants dans un réseau.

## 1. Méthodologie de la commande robuste $H_\infty$

### 1.1 Commande $H_\infty$

Les techniques de commande multi-variable utilisant les normes  $H_2$  ou  $H_\infty$  sont nées dès lors qu'il fut important de désensibiliser des commandes aux incertitudes paramétriques. La commande  $H_\infty$  est par ailleurs une approche introduite grâce à la « théorie de la commande optimale » développée dans les années 60 [48].

La procédure de calcul de la norme  $H_\infty$  a été présentée par Zames et Francis en 1983. Dans cet article, le problème de minimisation de la fonction de sensibilité (fonction de transfert entre la perturbation et la sortie du système) par retour d'état est résolu par le calcul de la norme  $H_\infty$  en présence d'incertitudes paramétriques pour un système SISO. La résolution du problème pour les systèmes MIMO et le développement de méthodes numériques efficaces sera abordé plus tard [46][133].

#### 1.1.1 Principe de la commande

Dans le cas d'un système multivariable, la norme  $H_\infty$  de sa matrice de transferts  $G$  correspond à la valeur la plus élevée du gain du système sur l'ensemble des fréquences d'étude. On introduit alors la notion de valeur singulière du système  $\sigma_i(G)$  correspondant à la racine carrée des valeurs propres de  $G(j\omega)$  multipliée par sa transconjuguée [133]:

$$\sigma_i(G) = \sqrt{\lambda_i(G(j\omega)G(-j\omega)^\perp)} \quad (1)$$

pour  $i = 1, \dots, \min(\text{dimension des vecteurs d'entrée et de sortie})$

Cette valeur singulière est une généralisation de la notion de gain pour un système SISO (pour *Simple Input Simple Output*).

La norme  $H_\infty$  de la matrice de transferts  $G$  est ainsi égale à  $\|G\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} [\bar{\sigma}(G(j\omega))]$  où  $\bar{\sigma}(G)$  est

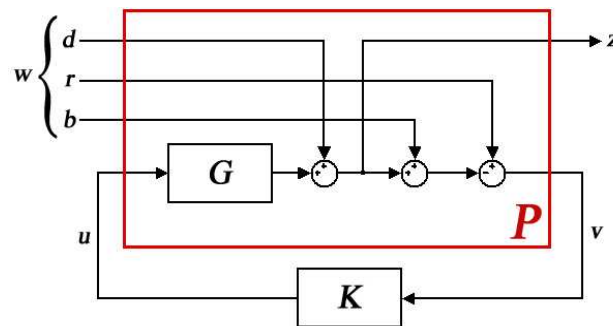
la plus grande valeur singulière.

L'idée est alors de **minimiser cette norme** pour améliorer la stabilité du système suite à une perturbation. Cela revient à minimiser l'énergie du système à proximité d'un pôle instable donc améliorer sa robustesse en stabilité.

La commande  $H_\infty$  est appliquée au système d'état de l'équation (2), correspondant à la représentation générale de commande de la Figure 6.

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= A.\Delta x(t) + B_1\Delta w(t) + B_2\Delta u(t) \\ \Delta z(t) &= C_1.\Delta x(t) + D_{11}\Delta\omega(t) + D_{12}\Delta u(t) \\ \Delta v(t) &= C_2.\Delta x(t) + D_{21}\Delta\omega(t)\end{aligned}\quad (2)$$

où  $x(t) \in \mathfrak{R}^n$  sont les variables d'état,  $w(t) \in \mathfrak{R}^r$  sont les variables externes (références :  $r$ ; perturbations :  $d$ , bruits :  $b$ ),  $u(t) \in \mathfrak{R}^m$  sont les entrées de contrôle,  $z(t) \in \mathfrak{R}^q$  est la sortie du correcteur et  $v(t) \in \mathfrak{R}^p$ , la variable mesurée de sortie.



**Figure 6 :** Configuration classique de commande pour la synthèse  $H_\infty$  (structure PK)

P correspond au modèle du système en boucle ouverte. K est le correcteur à synthétiser. Pour la suite, b sera toujours supposé nul (pas de bruit sur la grandeur mesurée).

### 1.1.2 Problèmes de sensibilité mixte

Le concepteur peut formaliser des performances attendues dans le domaine fréquentiel et les introduire dans la modélisation (2). Plusieurs gabarits de performances peuvent ainsi être définis pour respecter le cahier des charges fixé au préalable, suivant que l'on souhaite effectuer du rejet de perturbation de sortie ou d'entrée, une atténuation des bruits de mesure ou faciliter l'implantation pratique du correcteur en modérant la commande. Comme il n'est pas possible de respecter l'ensemble de ces besoins, un compromis doit être effectué. Ces compromis s'effectuent à partir de l'évolution des fonctions de sensibilité (S) et de sensibilité complémentaire du système (T) :

$$S = \frac{1}{1 + K.G} \quad T = \frac{K.G}{1 + K.G} \quad (3)$$

S représente ainsi le transfert entre la sortie et les perturbations (entre  $z$  et  $d$ ) et T, au transfert entre les références et la sortie.

Ainsi :

- minimiser  $S$  revient à assurer un bon asservissement et une bonne régulation (rejet de perturbation),
- minimiser  $T$  revient à insensibiliser le système aux bruits de mesure,
- limiter le transfert  $KS$  revient à limiter l'énergie de commande, donc à faciliter l'implantation pratique du correcteur.

Si l'on souhaite corréler plusieurs objectifs, on parlera alors de sensibilité mixte. Dans le cas où l'on veut rejeter les perturbations et limiter l'énergie de commande, on parlera de sensibilité « S/KS ». Les différentes structures de sensibilité mixtes sont décrites dans [133]. La structure S/KS est représentée sur la Figure 7. Elle correspond à l'ensemble des applications illustrées dans ce mémoire. Les transferts  $W_p$  et  $W_u$  correspondent aux spécifications fréquentielles recherchées ; ils sont décrits dans le paragraphe suivant.

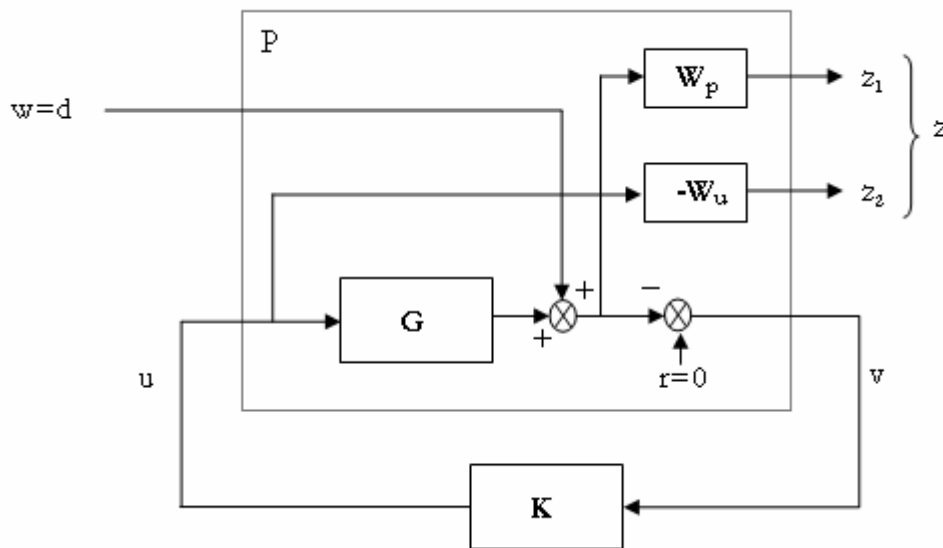


Figure 7 : Problème de sensibilité mixte S/KS

L'objectif de la commande H consiste ainsi à déterminer  $K$  pour minimiser la norme  $\left\| \begin{matrix} W_p \cdot S \\ W_u \cdot KS \end{matrix} \right\|_{\infty}$ . En pratique, on cherche à trouver numériquement une borne inférieure  $\gamma_{min}$  telle que :  $\left\| \begin{matrix} W_p \cdot S \\ W_u \cdot KS \end{matrix} \right\|_{\infty} < \gamma_{min}$ . Cette commande sous-optimale rend ainsi la théorie plus simple et les calculs numériques plus performants ... à condition que la borne inférieure ne soit « pas trop » grande. C'est cette notion d'appréciation qui oblige le concepteur à vérifier les performances de sa commande a posteriori.

### 1.1.3 Définition des gabarits de performances

Les gabarits ont généralement une structure du premier ordre pour les performances en sortie ( $1/W_p$ ) et les performances sur les signaux de commande ( $1/W_u$ ) :

$$\frac{1}{W_p(s)} = \frac{s + \omega_b \cdot \mathcal{E}_p}{s/M_p + \omega_b} \quad \text{et} \quad \frac{1}{W_u(s)} = \frac{\mathcal{E}_u \cdot s + \omega_{bc}}{s + \omega_{bc}/M_u} \quad (4)$$

Les différents paramètres de ces correcteurs sont choisis en fonction des gabarits fréquentiels à respecter. Dans le cas de performances en sortie définies sur la Figure 8, les paramètres  $M_p$ ,  $\epsilon_p$ ,  $\omega_b$  sont choisis de la manière suivante :

- $M_p$  correspond au gain maximal du transfert entre la tension au point de régulation et la perturbation correspondant à une variation de puissance de la charge, pour les hautes fréquences,
- $\epsilon_p$  correspond à l'erreur statique du même transfert,
- $\omega_b$  enfin correspond à la fréquence de coupure du gabarit.

On garantit ainsi certaines performances globales du système, l'équivalence entre gabarits fréquentiel et temporel n'étant pas parfaite.

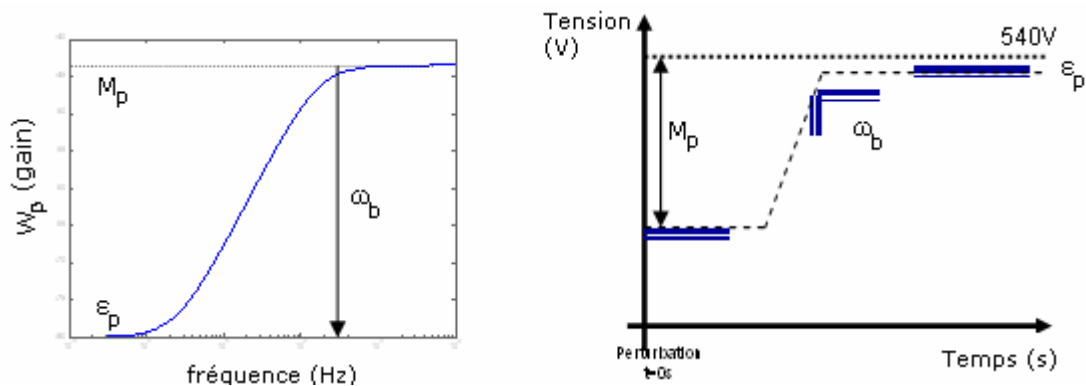


Figure 8 : Gabarits fréquentiel (à gauche) et temporel (à droite) sur les performances

#### 1.1.4 Méthodes de résolution

La résolution du problème numérique s'effectue en utilisant les équations de Riccati ou grâce aux inégalités matricielles linéaires (LMI<sup>2</sup>). Plus de détails sont fournis dans [133]. Cependant, la résolution des LMI conduit à des résultats plus précis, avec des performances de convergence plus importantes.

Ces techniques permettent ainsi de minimiser le temps de synthèse de la commande en optimisant directement les paramètres des correcteurs. Leur application repose cependant sur des calculs numériques posant parfois des problèmes de convergence.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, dans tous les cas, les techniques numériques ne permettent pas de trouver un optimum global. Il est donc nécessaire de valider les performances de la commande à l'aide de simulations temporelles.

Par ailleurs, il est relativement fréquent de trouver un correcteur qui soit instable ; sa dynamique doit donc être étudiée, d'autant plus que dans le cas d'applications sensibles, il est

<sup>2</sup> Les Inégalités Matricielles Affines ou LMI<sup>2</sup> (*Linear Matrix Inequality*) prennent une place de plus en plus importante pour la résolution des problèmes d'automatique modernes. Ce formalisme permet ainsi de résoudre de nombreux problèmes qui n'avaient pas trouvé de solution auparavant en utilisant notamment les méthodes du point intérieur. Il offre également un cadre très intéressant pour le concepteur, dans la mesure où toute modification du cahier des charges dynamiques peut être prise en compte automatiquement dans le formalisme. On appelle LMI le problème suivant ; étant données les matrices réelles, carrées et symétriques  $M_k$ , pour  $k = 1$  à  $n$ , il faut trouver les réels  $x_k$  tels que  $M(x) = M_0 + x_1 \cdot M_1 + \dots + x_n \cdot M_n > 0$ . Plusieurs interfaces permettent de résoudre des LMI comme la MLI Control Toolbox de Mathworks [56] ou l'interface YALMIP [112].

interdit d'utiliser des correcteurs instables pour des raisons pratiques d'implantation. On joue alors sur la valeur de  $\gamma_{min}$  afin de diminuer les contraintes sur la commande.

Enfin, l'ordre du correcteur est généralement élevé puisqu'il est égal à l'ordre du système plus celui des fonctions de pondération  $1/W$  utilisées. Des techniques de réduction d'ordre peuvent cependant être utilisées pour faciliter leur implémentation.

## 1.2 Commande $H_\infty$ avec forme du correcteur imposée

Il est possible en appliquant la commande  $H_\infty$  de synthétiser un correcteur avec une forme fixée à l'avance (PI ou PID). La méthodologie de synthèse doit cependant être adaptée.

Dans le cadre de ces travaux, nous avons imposé le correcteur sous la forme d'un Proportionnel-Intégral (PI). D'autres formulations permettent de synthétiser un correcteur avec un terme dérivé supplémentaire [154]. Pour le système considéré, l'objectif est donc de trouver un correcteur de la forme  $u(t) = F \cdot y(t)$  où  $F \in \mathfrak{R}^{m \times p}$  pour que le système en boucle fermée satisfasse certaines performances dynamiques.

Le correcteur PI multivariable est défini par :

$$u(t) = F_1 \cdot y(t) + F_2 \cdot \int_0^t y(\theta) \cdot d\theta \quad (5)$$

Le contrôle  $H_\infty$  du système est alors déterminé en résolvant la LMI suivante, qui est de fait bilinéaire (correspond ainsi à une BMI (*Bilinear Matrix Inequality*)) :

$$\begin{bmatrix} P \cdot A_{cl} + A_{cl}^T \cdot P & P \cdot B_{cl} & C_{cl}^T \\ B_{cl}^T & -\mathcal{I} & D_{cl}^T \\ C_{cl} & D_{cl} & -\mathcal{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

L'algorithme d'optimisation pour résoudre cette BMI est développé dans [66] pour un PID et a été adapté pour un correcteur de type PI.

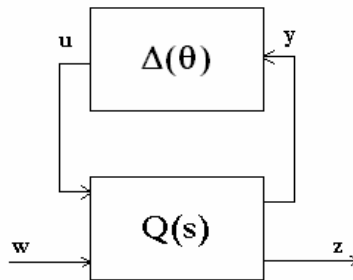
D'autres méthodes permettent également de synthétiser des correcteurs  $H_\infty$  d'ordre 1 ou 2. Les algorithmes correspondants sont décrits dans [62]. Bien sûr, ces correcteurs seront moins performants que le correcteur  $H_\infty$  déterminé sans imposer l'ordre du correcteur, car la résolution sera moins optimale. Ils sont cependant beaucoup plus simples à implanter en pratique.

## 1.3 $\mu$ -analyse et $\mu$ -synthèse

La commande  $H_\infty$  n'est pas dédiée intrinsèquement à la synthèse de correcteurs robustes. Il est ainsi nécessaire dans un deuxième temps d'effectuer une analyse de robustesse.

Les méthodes d'analyse diffèrent suivant le modèle choisi. Les modèles linéaires dépendant des paramètres (LPV) sont de deux types :

- soit ils font apparaître une dépendance affine des matrices d'état en fonction des paramètres ;
- soit, plus généralement, ils sont décrits par une représentation linéaire fractionnaire (LFR), faisant apparaître une dépendance plus rationnelle de la matrice d'état aux paramètres du système avec un schéma-bloc formé d'un bouclage entre un système linéaire à temps invariant (LTI)  $Q$  et une matrice  $\Delta$  de gains fonction des paramètres (Figure 9). Un exemple de mise en forme LFR pour des systèmes physiques simples (machine asynchrone) est décrit en [84].



**Figure 9 :** Modèle LFR pour les incertitudes paramétriques

L'analyse de robustesse en stabilité et/ou en performance s'effectue à l'aide de la valeur singulière structurée appelée également  $\mu$  pour les systèmes LFR. Cette grandeur permet de caractériser quatre états du système : sa stabilité, sa robustesse en stabilité, ses performances nominales et sa robustesse en performances [133].

Cette  $\mu$ -analyse correspond à une extension du théorème des petits gains pour des systèmes multivariables avec incertitude, théorème dont l'application dans ce cas de figure conduit à des résultats conservatifs. Cette technique comporte deux étapes présentées ci-dessous.

### 1<sup>ère</sup> étape : mise en forme structurée du problème

La mise en forme structurée permet de déterminer la robustesse en stabilité et en performances, à partir des relations entre les entrées  $w$  (références, perturbations) et les sorties externes  $z$  (sorties contrôlées, par exemple une mesure de tension) du système faisant clairement apparaître les incertitudes tant paramétriques que celles liées aux performances dynamiques recherchées. Cette mise en forme découle directement d'une Transformation Linéaire Fractionnelle F (LFT) [101].

La représentation donnée sur la Figure 10 à gauche permet de prendre en compte les performances du système en intégrant un gabarit fréquentiel  $1/W_{perf,D}$  dimensionné comme au paragraphe 1.1.3, sur chaque grandeur de sortie. On rappelle que  $P$  correspond au transfert entre  $w$  et  $z$  pour le régime nominal.

On fait également apparaître deux matrices diagonales pour modéliser les incertitudes du système :

- sur les performances du système :  $n$  incertitudes fictives ( $\Delta f_k$ ),
- sur les paramètres du système :  $m$  incertitudes réelles ou complexes ( $\delta_k$ ),
- sur les incertitudes non structurées (fréquentielles) :  $p$  incertitudes complexes ( $\Delta_k$ ).

Cette représentation fait alors apparaître deux blocs : un bloc « N » correspondant au système étudié et un bloc « Δ » correspondant aux incertitudes sur ce système (cf Figure 10 à droite). Le système est alors représenté par une LFR.

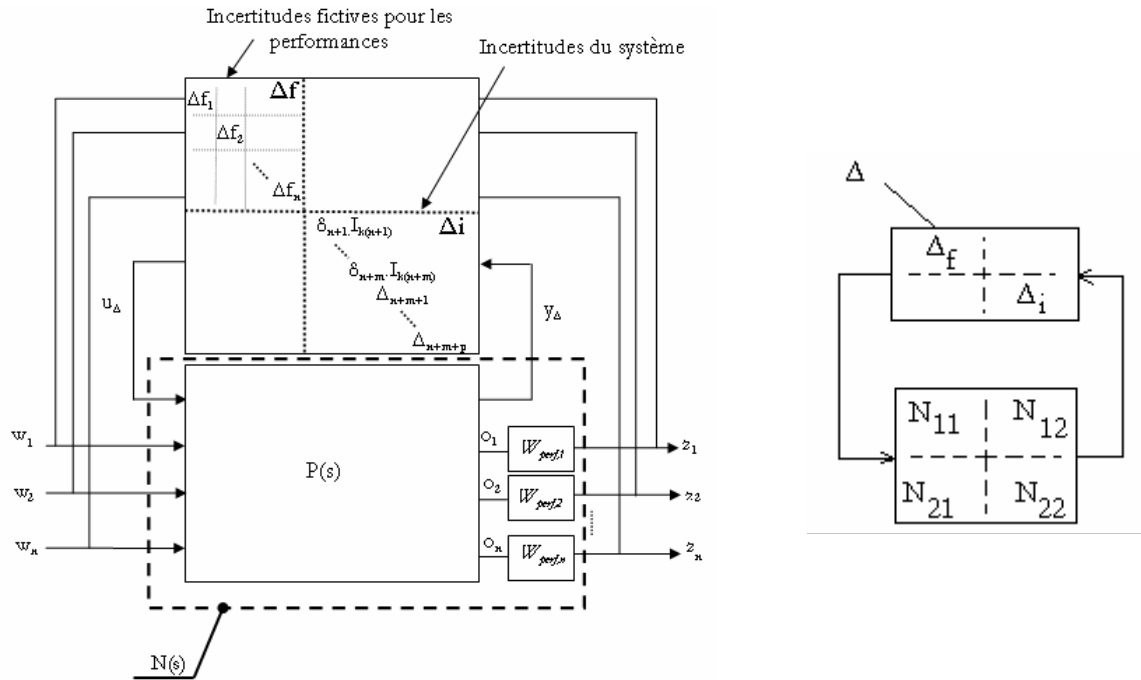


Figure 10 : Représentation structurée d'un système avec prise en compte des performances

## 2<sup>ème</sup> étape : Calcul de la valeur singulière structurée et interprétation

Dans le cas général, la valeur singulière structurée d'une matrice N par rapport à une structure Δ est définie par la relation suivante :

$$\mu_{\Delta}(N(j\omega)) = \frac{1}{\min_{\Delta} [\sigma_{\max}(\Delta) / \det[I - N \cdot \Delta] = 0]} \quad (7)$$

En général, il n'est pas possible de calculer la valeur exacte de  $\mu$ . On le borne donc avec des valeurs minimale ( $\mu_{\min}$ ) et maximale ( $\mu_{\max}$ ), qui sont très proches numériquement.

Appliqués au système représenté sur la Figure 10, les théorèmes de robustesse sont alors les suivants :

- (i) Stabilité nominale  $\Leftrightarrow$  N est stable de manière interne,
- (ii) Robustesse en stabilité  $\Leftrightarrow$  le système est stable au nominal et  $\forall \omega$ , on a  $\mu_{\Delta_{inc}}(N_{11}(j\omega)) < 1$ ,
- (iii) Performance nominale  $\Leftrightarrow$  le système est stable au nominal et  $\forall \omega$ , on a  $\mu_{\Delta_{pf}}(N_{22}(j\omega)) < 1$ ,
- (iv) robustesse en performance  $\Leftrightarrow$  le système est stable au nominal et  $\forall \omega$ , on a  $\mu_{\Delta}(N(j\omega)) < 1$ .

Une analyse de robustesse complète peut donc être menée à partir de l'évolution de cette valeur singulière structurée  $\mu$ . Le lien avec les paramètres du système est direct pour l'analyse de

robustesse en stabilité puisque le calcul du  $\mu$  est linéaire. Autrement dit, on peut obtenir directement la marge de stabilité maximale sur un paramètre à partir de la valeur maximale de  $\mu$ .

Pour la robustesse en performances, le calcul est non linéaire. Il est donc nécessaire de procéder par itérations pour déterminer la marge de stabilité maximale sur un paramètre pour garantir les performances du système.

#### **1.4 Méthodologie de conception robuste**

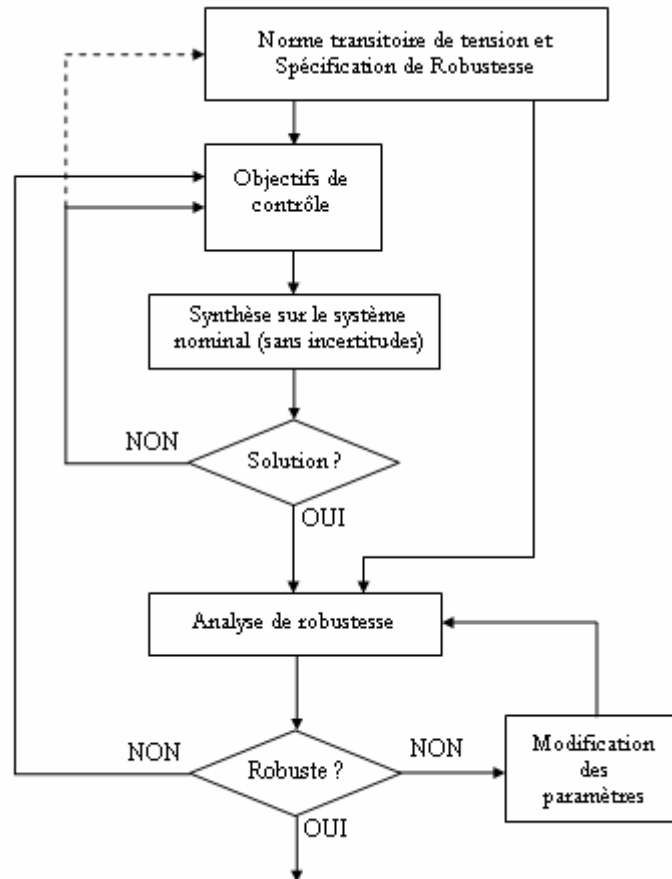
A l'issue de ces développements théoriques, une méthodologie de dimensionnement sur critères dynamiques intégrant de la robustesse est proposée (cf Figure 11).

La première étape pour le concepteur du système consistera à formaliser les objectifs de contrôle du système par des pondérations fréquentielles. Dans un premier temps, ces spécifications ne prendront en compte que des objectifs de performance nominale.

S'il n'est pas possible de trouver une commande qui satisfasse ces objectifs, le fait que la commande soit optimale nous indique qu'il n'est pas possible de respecter les performances qui ont servi de cadre à la commande. Ainsi, il sera nécessaire de revenir sur ces dernières et de les relâcher. Cette première étape peut d'ailleurs aider l'intégrateur système à préciser ces normes.

Une fois que les normes sont respectées pour le régime nominal, la robustesse du sous-système face aux incertitudes de conception est analysée. Si cette robustesse est satisfaisante, la conception dynamique l'est aussi. Sinon, le concepteur doit revenir sur la synthèse du correcteur de façon à rendre robuste le sous-système. Si une conception robuste est atteignable par le contrôle, une solution sera trouvée et la conception dynamique sera satisfaisante. Sinon, les paramètres du sous-système devront être modifiés de façon à obtenir une conception robuste, et ce au risque de dégrader d'autres paramètres externes (masse, harmoniques, etc).





**Figure 11** : Méthodologie de conception proposée

Cette démarche garantit ainsi que si un correcteur robuste est trouvé, alors il sera optimal grâce à l'utilisation des algorithmes d'optimisation utilisés pour la synthèse du contrôle.

REMARQUE : une technique de commande robuste, la  $\mu$ -synthèse permet théoriquement d'associer commande  $H_\infty$  et  $\mu$ -analyse en déterminant un correcteur qui minimise la valeur singulière structurée d'un système ; elle nécessite cependant quelques développements théoriques supplémentaires avant de pouvoir être utilisée dans la conception de systèmes. Quelques cas simplifiés d'étude pour la commande de convertisseurs cités dans [24], [28] ou [74] soulignent cependant sa pertinence pour des travaux futurs.

Toutes ces notions très théoriques sont illustrées ci-dessous pour optimiser les performances dynamiques de systèmes de génération hybride et de réseau DC et faciliter leur dimensionnement.

## 2. La robustesse pour l'intégration de systèmes [M. SAUTREUIL]

### 2.1 Contexte de l'étude. Présentation du système étudié

Comme nous l'avons déjà évoqué en introduction, la tendance actuelle est de simplifier la structure d'alimentation d'un réseau électrique aéronautique en alimentant la grande majorité des

consommateurs via un étage HVDC alimenté par un seul convertisseur AC/DC. Des gains de masse très importants sont ainsi espérés avec la suppression de nombreux étages AC/DC et DC/AC. Pour l'heure, les structures HVDC étudiées sont alimentées par un ATRU (auto-transformateur avec pont de diodes). Ce mode de conversion n'est cependant pas optimal de part sa masse et ses performances moyennes. Par ailleurs, il est apparu que la structure filtrait presque totalement les interactions entre génération et consommation, et donc effaçait l'apport de la commande sur les performances globales du système. Nous nous sommes ainsi tournés vers le système plus intéressant et plus prometteur présenté sur la Figure 12, en n'intégrant qu'une seule charge de 60 kW, i.e. un moteur commandé en courant via un onduleur.

La distribution électrique du système est ainsi assurée par un alternateur à rotor bobiné, 210 kVA, de fréquence variable entre 360 et 800 Hz. La tension alternative est ensuite redressée par un redresseur à diodes débitant sur une capacité de filtrage C, dont la tension est contrôlée via l'excitation de l'alternateur.

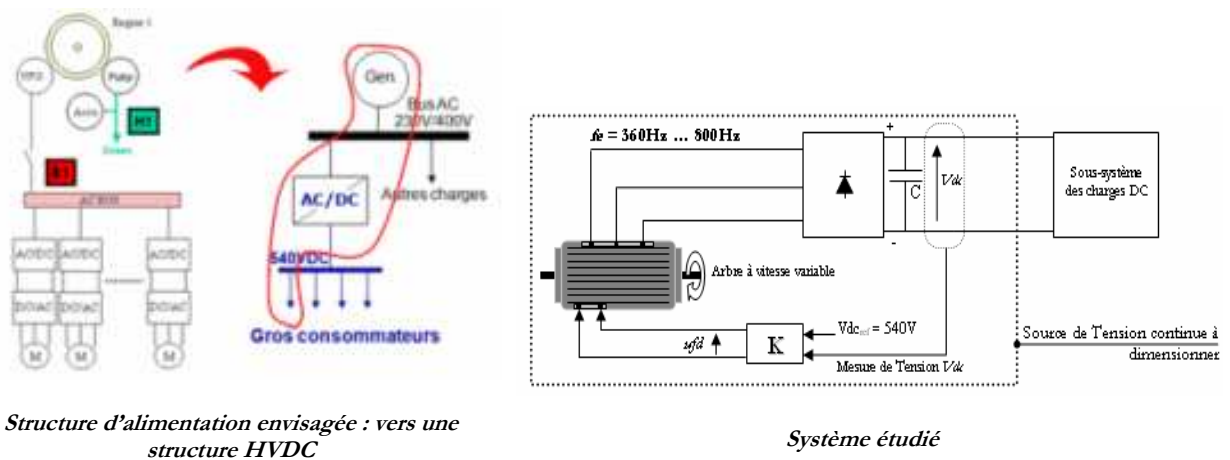


Figure 12 : Topologie du système étudié

Dans ce cadre, les contraintes jouant sur le choix de l'architecture de contrôle portent essentiellement sur des les performances à attendre mais aussi sur des critères de masse et d'encombrement. Des travaux au laboratoire ont permis d'optimiser la masse d'un système embarqué aéronautique en boucle ouverte tout en respectant des contraintes dynamiques et harmoniques, ceci en couplant les logiciels SABER (simulation temporelle d'un réseau électrique) et CADES, outil d'optimisation développé au laboratoire. Des courbes de Pareto entre la masse du système et les performances attendues peuvent alors être tracées [101].

L'idée serait alors de choisir un autre point d'optimisation masse/performances issu de ces courbes, quitte à dégrader la masse en relâchant certaines contraintes dynamiques, pour effectuer à nouveau la synthèse d'un correcteur par  $H_\infty$  puis l'analyse de robustesse en performances du système.

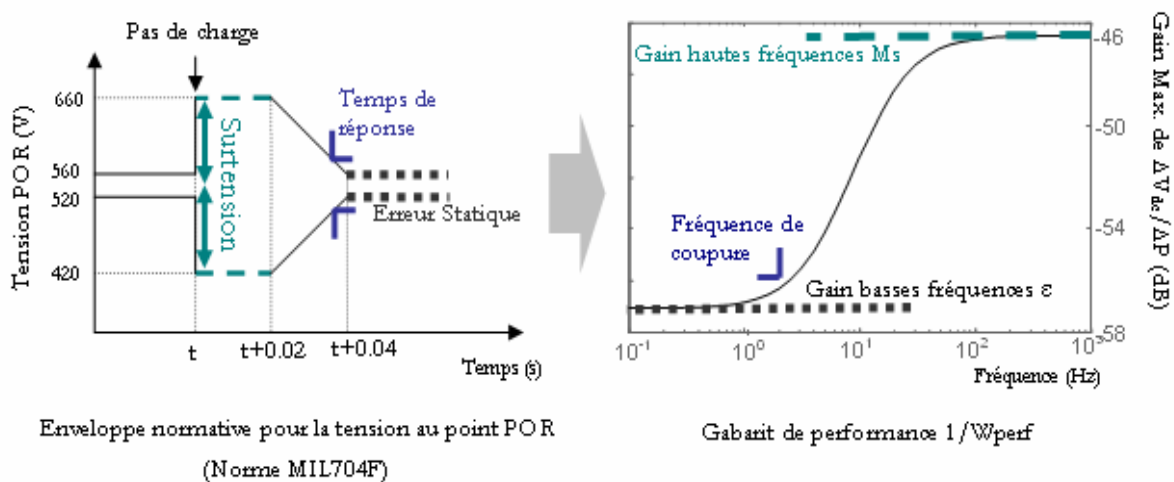
## 2.2 Modélisation du système

Avant d'appliquer notre démarche de dimensionnement de la commande, il est nécessaire de modéliser les différents composants du système en régime dynamique. Le redresseur à diodes est le plus simple mode de redressement mais reste relativement complexe à modéliser [114]. Des modèles analytiques simples existent dans le cas de redresseurs idéaux en tension ou en courant

[110] ou de redresseurs de tension avec source inductive [72]. Dans notre cas, l'angle de commutation ne respecte pas le domaine de validité de ce modèle ; nous avons ainsi eu recours à un modèle semi-analytique non linéaire du redresseur à diodes [72]. Il est ainsi considéré comme une combinaison d'un gain en tension pour déterminer la tension continue à partir de la tension alternative, et d'un gain en courant pour déterminer le courant alternatif à partir du courant continu. L'ensemble du système est ensuite modélisé sous forme d'équations d'état (la charge étant supposée à puissance constante) et linéarisé.

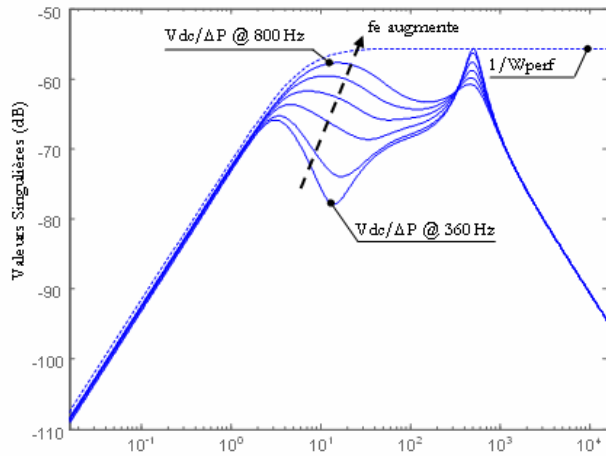
### 2.3 Contrôle du système non soumis à des incertitudes de conception

Dans un premier temps, la synthèse de la commande est effectuée pour respecter les performances dynamiques spécifiées par la norme, quel que soit le point de fonctionnement et notamment la fréquence de fonctionnement. Le problème de commande spécifié par la norme de la Figure 13 consiste ici à rejeter toute perturbation avec certaines performances ; le problème de synthèse mixte « S/KS » est ainsi particulièrement adapté. Il est cependant nécessaire de spécifier une pondération fréquentielle  $W_{perf}$  pour définir les objectifs de rejet de perturbation et une pondération  $W_u$  pour spécifier les contraintes d'implantation pratique du correcteur (dans notre cas, les limitations sur la tension d'excitation de l'alternateur et sa bande passante).

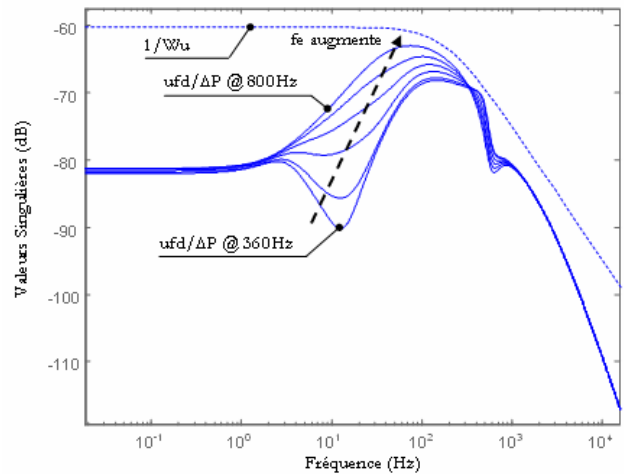


**Figure 13 :** Norme temporelle définissant les performances en rejet de perturbations du système. Traduction dans le domaine fréquentiel pour spécifier le gabarit  $1/W_{perf}$

Un premier correcteur  $H_\infty$  a été synthétisé pour un pire cas de fonctionnement pour une fréquence égale à 800 Hz. Les figures 13 et 14 ci-dessous illustrent les fonctions de transfert en boucle fermée  $V_{dc}/\Delta P$  et  $u_{fd}/\Delta P$  pour les différentes fréquences de fonctionnement du système, et sont comparées aux gabarits  $1/W_{perf}$  et  $1/W_u$ . Les normes en rejet de perturbations et les contraintes d'implantation pratique du correcteur sont donc bien respectées quelle que soit la fréquence du système.



**Figure 14 :** Performances obtenues avec le correcteur synthésisé à 800 Hz pour différents points de fonctionnement



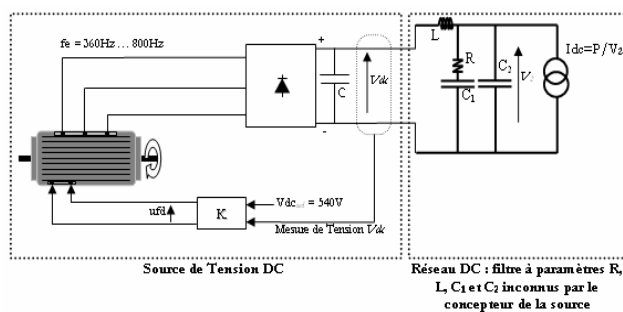
**Figure 15 :** Vérification des contraintes d'implantation du correcteur pour différents points de fonctionnement

Des simulations temporelles permettent dans un deuxième temps de valider cette synthèse des correcteurs en effectuant des pas de charges et en vérifiant que les normes en régime transitoire sont bien respectées.

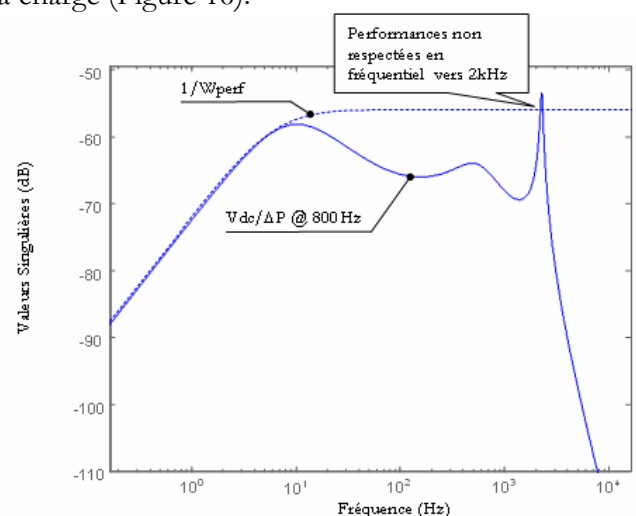
## 2.4 Synthèse de la commande robuste

### 2.4.1 Analyse des performances nominales du système

On suppose dans un deuxième temps que la charge n'est pas forcément connue, notamment les paramètres de son filtre d'entrée. Comme la plupart des problèmes de stabilité sont liés à des interactions filtre - convertisseurs, plus le dimensionnement de la source sera robuste par rapport aux paramètres de filtrage, plus cette source sera facilement intégrable au réseau. En reprenant le correcteur synthésisé au 3.3, l'analyse des performances en rejet de perturbations est effectuée avec les paramètres nominaux du filtre d'entrée de la charge (Figure 16).



**Figure 16 :** Source DC alimentant une charge incertaine (filtre d'entrée)



**Figure 17 :** Analyse des performances du système dans un pire-cas ( $f = 800$  Hz)

La Figure 17 montre ainsi que les performances nominales ne sont pas respectées autour de 2 kHz. Pour compenser ce pic, seuls les paramètres de la source peuvent être modifiés ; on ne peut donc jouer que sur les paramètres physiques ou sur la commande de la source pour résoudre ce problème.

La modification de la commande (préférable car ne jouant pas de manière décisive sur la masse) passe par une modification du gabarit de performances  $1/W_{\text{perf}}$  pour que celui-ci décroisse aux hautes fréquences. Malheureusement, le contrôle n'a pas d'influence sur les performances au-delà de 200 Hz dans le cas du système étudié. Seule la modification de la source, et notamment la capacité du redresseur, peut permettre de respecter les performances, et donc éventuellement d'être robuste en performances.

Ainsi, en augmentant la capacité de sortie  $C$  de 0,7 mF à 1 mF, la norme transitoire en tension est respectée pour le pire cas de fonctionnement mais pour les paramètres nominaux du filtre d'entrée de la charge. Il reste à analyser la robustesse en performances de la source vis-à-vis d'incertitudes sur ces paramètres.

#### 2.4.2 Analyse de la robustesse en performances

En supposant une incertitude de 15% sur les paramètres du filtre d'entrée de la charge, l'analyse de robustesse en performances est illustrée sur la figure pour  $C = 1$  mF (Figure 18). Le critère  $\mu_{\text{max}} < 1$  n'est donc pas respecté autour de 2 kHz. Comme le contrôle de la source est inopérant pour  $f > 200$  Hz, seule une modification de la source permettrait de modifier les performances en haute fréquence. La Figure 19, illustrant les bornes inférieure et supérieure de  $\mu$ , montre ainsi que la robustesse en performances est acquise en augmentant  $C$  à 1,5 mF ... ce qui pourrait de fait poser des problèmes de masse et/ou d'encombrement.

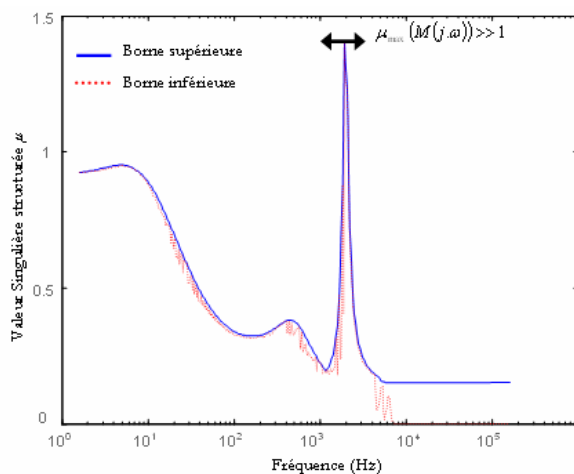


Figure 18 : Robustesse en performances pour  $C = 1$  mF

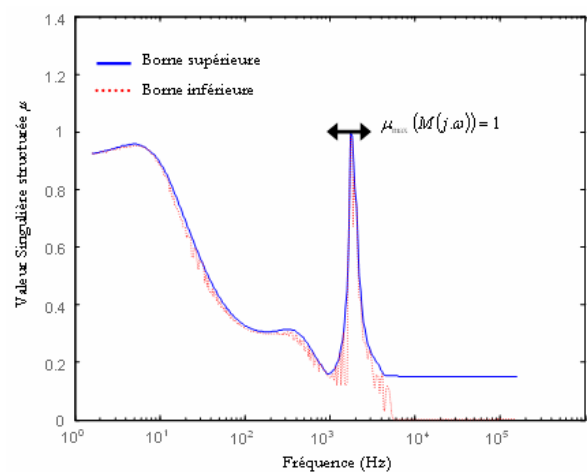


Figure 19 : Robustesse en performances pour  $C = 1,5$  mF

### 2.4.3 Influence sur la masse d'une spécification en robustesse

L'intégration d'une source sera facilitée en augmentant sa robustesse vis-à-vis des incertitudes de conception ; cependant, cette spécification de robustesse a entraîné dans cet exemple une augmentation de la capacité de la source et donc une augmentation de la masse.

A partir d'un modèle analytique définissant la masse de chaque composant du système étudié [101], la masse totale du système a été tracée sur la robustesse en performances recherchée.

La Figure 20 montre que la masse du système augmente avec le « niveau » de robustesse du dimensionnement suivant trois zones A, B et C :

Zone A : Si le dimensionnement est très robuste (par exemple à des incertitudes de plus de 45% sur les paramètres du filtre de charge), le système étudié est très facilement « intégrable » dans le réseau puisque ses performances dynamiques ne dépendent alors pas de l'environnement de fonctionnement final dans l'avion. En revanche, la masse du système est très élevée et augmente très rapidement avec la robustesse. Ainsi, choisir une solution dans cette zone ne semble pas satisfaisant pour des raisons de masse.

Zone B : Une faible spécification de robustesse (par exemple de 5% ou 10%) est respectée avec une valeur de capacité - et donc une masse - peu élevée. Mais nous ne sommes alors pas capables de garantir que la norme sera respectée lors de l'intégration de la source dans l'avion. Cet ensemble de solutions n'est donc pas satisfaisant.

Zone C : La solution à choisir est très probablement dans cette zone. La robustesse est relativement importante, et la masse augmente avec la robustesse mais dans des proportions moindres que dans la zone A.

En conclusion, il n'y a pas d'autres solutions pour respecter une spécification de robustesse que d'augmenter la masse pour le système étudié. Il s'agit donc de choisir le « niveau » de robustesse du dimensionnement de la source avec précaution.

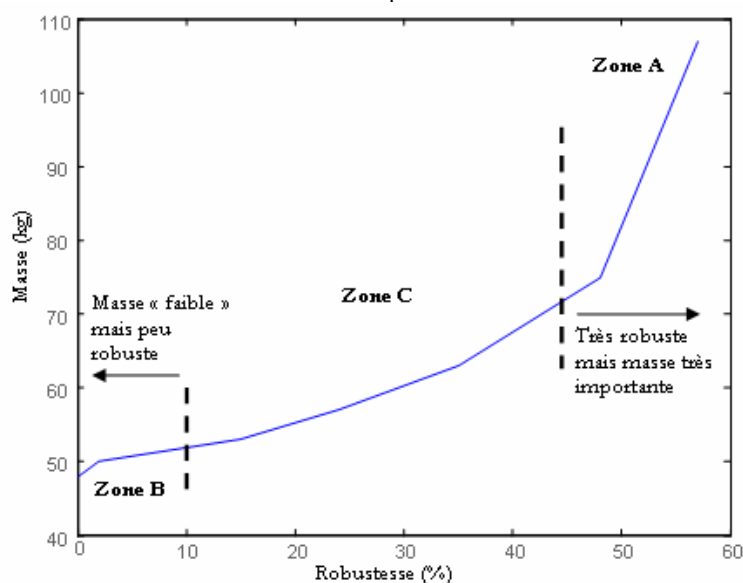


Figure 20 : Evolution de la masse en fonction des spécifications en robustesse pour les performances

#### 2.4.4 Influence de la norme sur la masse et la robustesse

La norme transitoire caractérisant le rejet de perturbations est adaptée des avions militaires et est donc susceptible de subir des modifications. Supposons qu'on puisse autoriser un dépassement et un temps de réponse augmenté d'un facteur X (en %) par rapport à la norme actuelle. Il est alors possible de tracer un plan définissant un compromis entre robustesse, spécifications des performances et masse. L'avionneur est alors capable d'évaluer le gain en masse qui peut être attendu d'un relâchement sur les normes et ce pour différents niveaux de robustesse.

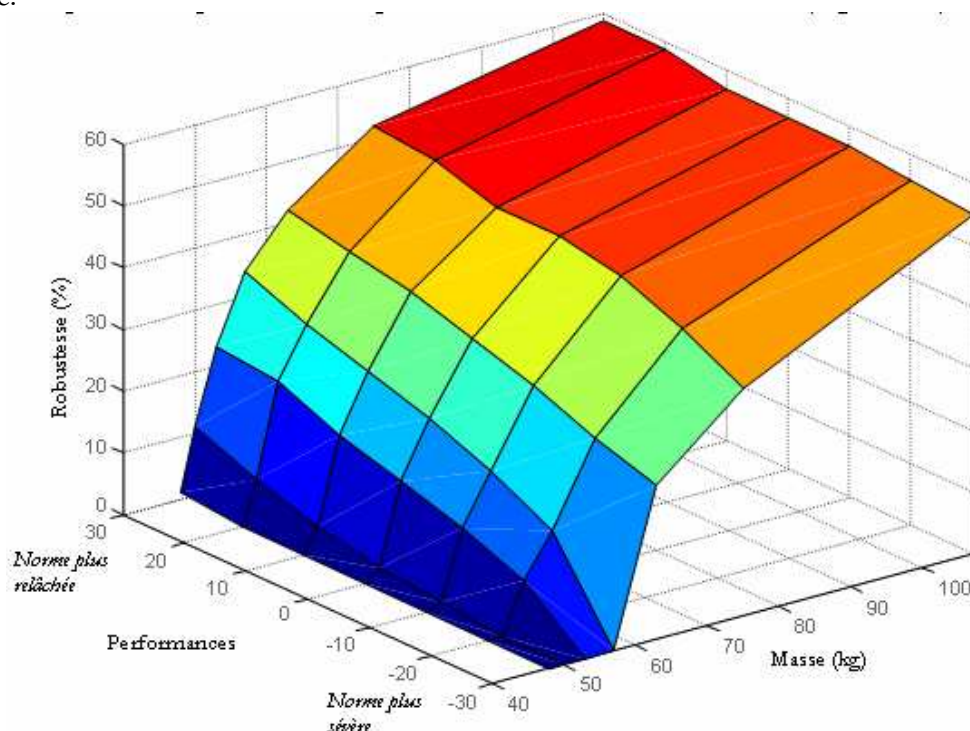


Figure 21 : Compromis masse / robustesse / performances

Si l'avionneur dispose de ces courbes, il sera ainsi capable d'évaluer les gains de masse à attendre en relâchant les normes (en supposant que l'avion puisse resté homologué !) en fonction du niveau de robustesse attendu. Le choix de ce dernier paramètre n'est cependant pas aisé puisqu'il joue très fortement sur la masse.

Cette application est cependant un bel exemple de co-conception commande – structure permettant l'intégration de composants dans un système en garantissant certains critères de performances et de robustesse.

#### 2.5 Perspectives de ce travail

Les perspectives de ce travail de thèse portent sur trois points :

- le critère de masse a été inclus pour analyser plus finement l'influence de la robustesse sur les performances du système. Il resterait à analyser de manière plus approfondie ces structures de conversion en intégrant des critères énergétiques (pertes, rendement) et harmoniques. Le choix d'une capacité de filtrage peut ainsi affecter la dynamique du système.

- la modélisation des incertitudes peut également être modifiée pour désensibiliser la méthode par rapport à une structure de filtre pré-définie. Des gabarits fréquentiels d'incertitude peuvent ainsi être introduits dans la méthode, mais le problème devient alors plus conservatif [133]. Le bénéfice de cette modélisation devrait alors être estimé vis-à-vis de la solution de contrôle retenue.
- Les résultats obtenus pour le dimensionnement d'un équipement intégré à un système, et notamment le compromis masse – performances – robustesse proposé ci-dessus, pourraient être généralisés au niveau du système complet. Le critère de robustesse pourrait être ainsi normalisé et appliqué à l'ensemble des équipementiers. Il resterait à l'intégrateur de spécifier correctement ce critère afin d'améliorer la fiabilité du système complet.

L'exemple qui suit propose l'étude d'une autre intégration : celle d'un dispositif de stockage pour l'hybridation d'une pile à combustible. Dans ce système multi-sources, multi-variables, l'objectif sera identique : étudier l'apport de la commande pour les performances dynamiques et le dimensionnement du système.

### **3. Commande multivariable robuste de systèmes multisources [S. SAILLER, D. HERNANDEZ]**

#### **3.1 Contexte de l'étude. Présentation du système étudié**

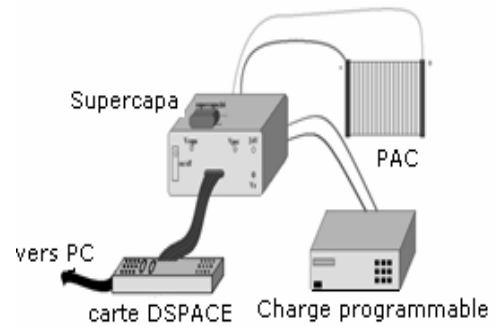
Dans le cadre du développement du centre PREDIS, nous avons développé un démonstrateur de génération électrochimique hybride (**GESI** pour **G**énérateur **E**lectrochimique et **S**tockage **I**solé) dans la thèse de S. Sailer, qui doit permettre :

- d'optimiser le rendement de cette structure de puissance,
- d'étudier le comportement d'une pile à combustible (PAC) de type PEM soumise à différentes sollicitations,

dans le cadre d'une application stationnaire (alimentation de site isolé ou alimentation de secours). Le démonstrateur GESI est constitué d'une pile et d'une supercapacité, interfacées toutes deux par un convertisseur DC/DC de type *boost* (Figure 22). La pile fournit une tension à vide de 15 V et de 12V en pleine charge (50 A). Elle est alimentée par un compresseur d'air et un réservoir d'hydrogène.

La supercapacité quant à elle a été dimensionnée pour fournir la puissance maximale de la mission considérée ; elle a une capacité de 58 F sous 15 V. Au début de cette étude, le convertisseur de la supercapacité a été conçu sans réversibilité, la recharge de la supercapacité se faisant via un autre hacheur flyback alimenté par la pile.





**Figure 22 :** Le démonstrateur GESI. Photo du banc de test (à gauche) et synoptique de la gestion électrique (à droite)

La puissance de dimensionnement du démonstrateur GESI a dès le début fait l'objet d'un compromis. Côté LEPMI, il était ainsi intéressant de disposer d'une pile « à cœur ouvert », i.e. dont les éléments constitutifs sont accessibles à la caractérisation et au diagnostic. Les puissances envisagées étaient alors plutôt modérées de manière à limiter le courant (quelques dizaines à centaines de Watts). Côté G2Elab, il était inenvisageable de limiter trop la puissance pour rationaliser la consommation énergétique de l'ensemble, les pertes dans les convertisseurs devenant beaucoup trop problématiques. Le consensus a alors porté sur un démonstrateur de puissance nominale égale à 500 W.

La conception de ce démonstrateur GESI a suivi la démarche classique, i.e. la gestion énergétique a suivi le dimensionnement des différents composants. L'objectif initial était de mieux comprendre les problématiques de la pile à combustible et de l'hybridation. Les travaux développés depuis dans la thèse de D. Hernandez consistent à redéfinir la stratégie de commande pour montrer les gains sur le dimensionnement du système (réduction du volume du stockage et du compresseur, meilleure utilisation de la PAC, etc).

De nombreuses références existent dans la littérature illustrant différentes stratégies de commande ou de gestion énergétique d'un système hybride PAC / dispositif de stockage, essentiellement dans le cadre d'applications « Transport » : [41], [57], [139] ou [144]. Nous avons privilégié l'approche robuste qui semble relativement originale dans ce cadre applicatif.

On ne s'intéresse dans un premier temps qu'à la commande robuste multivariable du système électrique. La gestion multivariable intégrant la fluïdique (compresseur d'air) est en cours de validation expérimentale.

### 3.2 Modélisation du système

Le modèle électrique du système étudié est représenté sur la Figure 23.a. Chaque source est modélisée par un modèle équivalent électrique dynamique classique (la Partie 2 de ce mémoire reprend ces différents modèles). Le courant de charge est considéré être la perturbation sur la sortie.

A partir des équations régissant le système, un modèle d'état continu non linéaire est déterminé. Après linéarisation, le modèle d'état mis en forme pour la synthèse du contrôle est déterminé sous la forme (6). Les entrées du système  $u(t)$  correspondent aux angles  $\alpha_{fc}$  et  $\alpha_{sc}$ , valeurs moyennes des fonctions de commutation des convertisseurs de la pile à combustible (FC) et de la supercapacité (SC). Le vecteur d'état du système est alors choisi par :

$$x = [i_{fc} \quad i_{sc} \quad v_{c_c} \quad v_{c_d} \quad v_{sc} \quad v_c]$$
 (8)

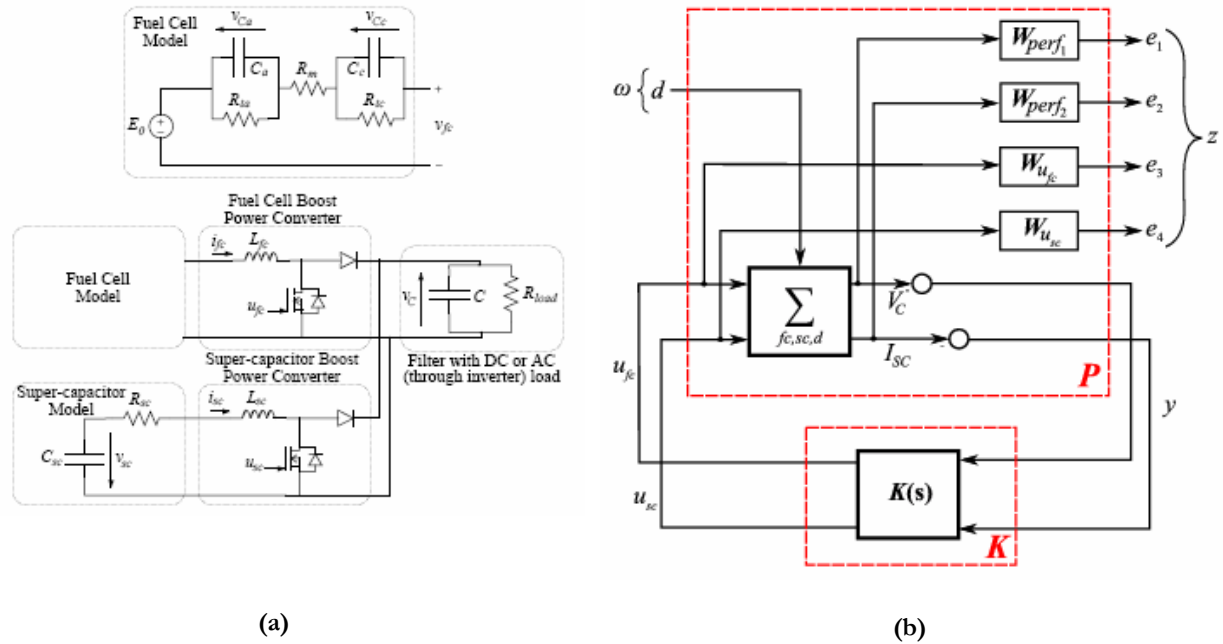


Figure 23 : Modélisation électrique et stratégie de contrôle multivariables pour le système hybride complet

### 3.3 Objectifs de commande

Les grandeurs de sortie du système sont la tension du bus continu  $V_c$  et le courant fourni par la supercapacité  $I_{sc}$ . L'objectif du contrôle est de maintenir cette tension constante et de contrôler ce courant pour pouvoir fournir les courants transitoires appelés par la charge. On rejette ainsi les perturbations en courant sur la pile qui peuvent endommager son fonctionnement [64]. Le PI multivariable synthétisé par la commande présentée au paragraphe 1.2 a pour objectif de maintenir la tension autour de sa valeur nominale à  $\pm 5\%$  près, avec un temps de réponse d'environ 500 ms. Des contraintes sont également définies par rapport à l'implantation pratique des correcteurs. La structure générale du contrôle est définie sur la Figure 22.b.

Le correcteur multivariable obtenu avec la formulation LMI conduit au correcteur suivant :

$$PI_{iLMI} = \begin{bmatrix} 0,0017 + 0,3937/s & 0,0031/s \\ 4,5432 + 103,0451/s & 0,5964 + 22,7415/s \end{bmatrix}$$
 (9)

D'autres correcteurs ont été synthétisés pour analyser les performances du correcteur multivariable :

- un correcteur  $H_\infty$  d'ordre 11,

- deux correcteurs  $H_\infty$  d'ordre réduit (1 et 2).

Dans un premier temps, les performances temporelles de notre stratégie de commande ont été comparées à deux stratégies classiques illustrées dans la thèse de S. Sailler et [145], qui consistent à contrôler la tension de sortie à travers une commande en courant de la supercapacité ou de la pile à combustible (Figure 24). Les correcteurs de ces stratégies ont été synthétisés par des techniques classiques de placement de pôles. Le scénario de simulation correspond à une augmentation de 5% de la tension de référence à  $t = 1$ s, et à une perturbation de 50% sur la charge à  $t = 2$ s. Le correcteur multivariable rejette ainsi beaucoup plus efficacement la perturbation, en ayant des performances en asservissement tout à fait correctes.

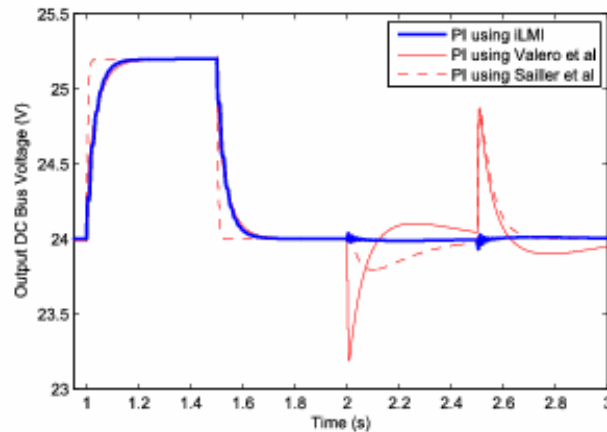


Figure 24 : Réponses en tension obtenues avec différentes stratégies de commande

Il est important de noter qu'aucune boucle de stabilisation n'est nécessaire avec le correcteur iLMI, contrairement aux autres stratégies de gestion. En effet, comme un zéro est introduit dans le modèle en boucle ouverte d'un correcteur, il est souvent nécessaire d'ajouter un filtrage passe-bas sur les boucles classiques afin d'éviter toute instabilité.

### 3.4 Robustesse en stabilité et en performances

La robustesse en stabilité et en performances a été analysée pour les 4 correcteurs robustes synthétisés. Les incertitudes sont modélisées cette fois-ci par un gabarit fréquentiel ; on peut ainsi analyser la robustesse de la structure sans que la structure des incertitudes ne soit figée comme c'était le cas dans l'exemple précédent avec les paramètres du filtre DC.

La Figure 25.a montre l'évolution de la grandeur singulière en fonction de la fréquence pour 10% d'incertitudes sur les capacités et les inductances, et 20% d'incertitudes sur les résistances. Ainsi, la robustesse en stabilité est garantie pour le correcteur multivariable obtenu et les correcteurs  $H_\infty$ . Avec une valeur maximale de 0,6 pour le PI multivariable, la stabilité en boucle fermée est garantie pour de larges incertitudes de  $(10/0,6)\% = 16,16\%$  pour les capacités et les inductances, et de  $(20/0,6)\% = 33,33\%$  pour les résistances.

Cependant, pour le taux d'incertitudes considéré, la robustesse en performances ne peut être évaluée puisque  $\mu_{max} = 1,6 > 1$ , sauf pour le correcteur  $H_\infty$  d'ordre 11 (cf Figure 25.b). Elle est

cependant garantie pour 5% d'incertitudes sur les capacités et inductances, et 10% pour les résistances.

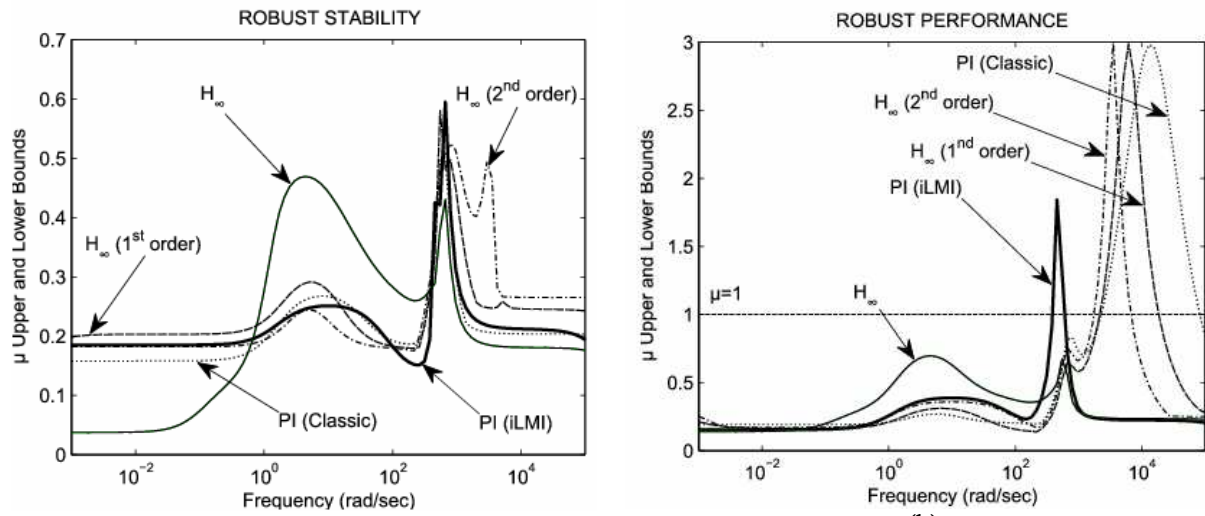


Figure 25 : Robustesse en stabilité (a) et en performances (b)

### 3.5 Validation de la commande robuste de la gestion électrique

Des premiers résultats expérimentaux sur le démonstrateur GESI ont permis de valider les résultats de simulation et donc la commande réalisée pour des petites variations de charge (5%).

A titre d'illustration, la Figure 25 montre la réponse du système dans le cas où la charge impose un fort appel de courant (variation de 100% de la charge nominale). Comme on peut le constater, le système reste stable avec des performances tout à fait correctes en régime transitoire, même si les résultats expérimentaux diffèrent légèrement des résultats de simulation notamment lors de l'appel de courant ; cela est vraisemblablement lié au comportement non linéaire de la pile.

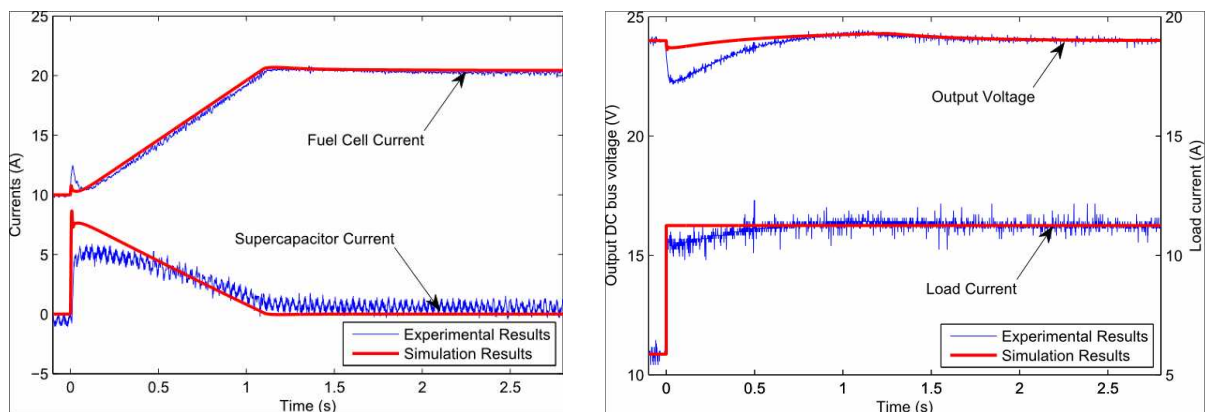


Figure 26 : Validation du dimensionnement dynamique en grands signaux

### 3.6 Perspectives de ce travail

Les axes de recherche qui vont être poursuivis durant la dernière année de thèse de D. Hernandez sont les suivants :

- le gabarit de performances défini sur la supercapacité n'a pas une fonction particulière pour l'instant, dans la mesure où le filtrage fréquentiel effectué sur le courant de

charge, qui sert à définir la référence du courant de la supercapacité, annihile ses effets. Cependant, on peut très bien envisager d'éliminer ce filtrage et d'introduire dans ce gabarit des spécifications fréquentielles particulières liées au fonctionnement intrinsèque de la source auxiliaire pour éviter par exemple de dégrader ses performances ou la vieillir prématurément. Le problème de commande devra cependant être adapté puisqu'on traitera dans un ce cas un problème de suivi de consigne et non pas de régulation ;

- la validation des apports en robustesse de la commande n'a pas été clairement illustrée notamment par rapport à certains paramètres de fonctionnement (pression, température, humidification) modifiant significativement les performances de la pile ; il sera intéressant de comparer notre approche à paramètres invariants dans le temps avec une commande robuste LPV permettant d'étendre la méthodologie linéaire aux systèmes non linéaires et variants dans le temps [156];
- la commande multivariable va être appliquée au système de gestion des gaz de la pile, dans la mesure où l'ensemble des auxiliaires d'une pile participe à hauteur de 20% des pertes totales du système [44]. Optimiser leur commande devrait ainsi nous permettre d'améliorer le bilan énergétique global du système [119];
- les liens avec le dimensionnement du système n'ont pas été explicités très clairement sauf à travers l'analyse de robustesse du système. Il reste à montrer que la commande multi-variable robuste apporte un réel gain sur le dimensionnement des équipements de stockage, et permet notamment de réduire la taille du stockage électrochimiques et le volume du compresseur. Disposant d'un modèle dynamique de compresseur dont les paramètres dépendent de ses dimensions géométriques [138], cette analyse devrait permettre de conclure quant à la co-conception commande – structure.

Une dernière étape de validation viendra conclure ces travaux quant à l'intérêt d'utiliser la commande robuste pour le dimensionnement de générateurs électrochimiques.

#### 4. Conclusion

La méthodologie de commande robuste présentée en première partie permet ainsi de satisfaire le cahier des charges que nous nous étions fixé : travailler sur la commande pour satisfaire des spécifications dynamiques, en garantissant la stabilité du système et en liant étroitement commande et dimensionnement du système. La commande  $H_\infty$  associée à la  $\mu$ -analyse permet ainsi d'offrir un cadre générique pour la synthèse des correcteurs, dont l'ordre peut être adapté en fonction des contraintes d'implémentation pratique.

Dans l'exemple du canal de puissance aéronautique, nous avons montré que cette commande ne pouvait être utilisée pour garantir de la robustesse au dimensionnement. Seule une modification de la structure permettait de garantir plus de robustesse, au détriment de la masse.

Dans l'étude de la génération hybride électrochimique, la commande a un rôle très important vis-à-vis de la robustesse. Il reste à analyser l'influence de la structure, notamment les éléments de stockage, vis-à-vis de cette robustesse et des performances.

Les perspectives qui me semblent les plus intéressantes, consisteraient à compléter la méthodologie proposée en intégrant des critères « supérieurs » permettant de définir les objectifs du contrôle. Ces critères supérieurs pourraient porter sur des critères énergétiques, de masse, ou d'encombrement. Ces critères seraient issus de simulations temporelles définissant des compromis entre ces critères et les performances dynamiques du système (à l'exemple de frontières de Pareto [150]).

Ainsi, à partir d'un point a priori optimal (noté par la suite PO), la méthodologie de commande robuste serait appliquée. Si aucun correcteur n'était trouvé, il serait nécessaire de revenir au choix du PO (aucun correcteur ne pouvant respecter ces performances dynamiques). Si un correcteur est trouvé, il est optimal et le concepteur peut passer à l'analyse de robustesse. Si les critères de robustesse sont vérifiés, le système sera optimal ou très proche de cet optimum vis-à-vis de la robustesse, des performances et du critère supérieur choisi. A contrario, si la robustesse n'est pas vérifiée, le concepteur devra soit revenir sur le contrôle, soit revenir sur le dimensionnement et dans ce cas prendre un autre PO. Cette méthodologie pourrait être informatisée, offrant dès lors un outil de conception robuste complet.



## B. LA COMMANDE OPTIMALE POUR UN DIMENSIONNEMENT ... OPTIMAL [R. VIAL] ?

### 1. Introduction. Présentation de la commande optimale

La gestion des échanges de puissance est un élément clé pour optimiser le rendement d'un système. Dès lors que plusieurs stratégies de gestion peuvent être proposées sans a priori sur leurs performances respectives pour un système donné, la commande optimale peut servir de référence pour comparer ces différentes stratégies de gestion en temps réel. Dans le cadre de nos travaux, cette commande a notamment été utilisée pour gérer l'énergie d'une nouvelle structure d'alimentation de tramway.

Le principe de commande optimale consiste à trouver une commande minimisant un critère donné. Cette commande a été établie dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, a eu ses heures de gloire dans les années 1960, mais reste encore un sujet de recherches dans le domaine de l'automatique, autour des techniques d'optimisation et des champs applicatifs.

Cette commande, appliquée aux systèmes linéaires, conduit aux commandes LQ (Linéaire Quadratique, lorsque le critère à minimiser est quadratique) ou commande LQG (Linéaire Quadratique Gaussienne), lorsque l'état du système n'est que partiellement mesuré.

Le problème de gestion dynamique peut ainsi être formulé sous la forme d'un problème d'optimisation dans lequel le système représenté par l'équation d'état (10) est contrôlé pour minimiser un critère coût (11) en respectant des contraintes d'égalité et d'inégalité (12) et (13) [104][128]. Nous nous placerons dans le cadre d'un horizon défini dans le temps ; ainsi, il sera possible de prendre en compte l'énergie électrique qui peut être temporairement stockée.

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (10)$$

$$J(x_0, t_0, u) \quad (11)$$

$$\psi(x, u, t) = 0 \quad (12)$$

$$\phi(x, u, t) \leq 0 \quad (13)$$

Le critère de choix peut être de plusieurs types, soit de Lagrange (pour un critère intégral, par exemple un calcul d'énergie), soit de Mayer (pour caractériser un état final). L'objectif est donc de trouver une commande  $\bar{u}$  qui minimise le critère choisi.

Deux formulations permettent alors de résoudre ce problème d'optimisation :

- le principe du minimum de Pontriaguine<sup>3</sup>, qui revient à minimiser l'Hamiltonien d'un système ; cette formulation est souvent désignée dans la littérature par le vocable « commande optimale ».
- le principe de Bellman<sup>4</sup> qui conduit à la programmation dynamique.

---

<sup>3</sup> Principe du minimum de Pontriaguine : La trajectoire optimale d'un système minimise son Hamiltonien  $H(x, u, p, t) = \phi(x, u, t) + p^T \cdot f(x, u, t)$  (égal à où p est appelé état adjoint)



Même si ces deux formulations nous semblent a priori intéressantes pour permettre d'optimiser les performances énergétiques d'un système ferroviaire, la programmation dynamique n'a pas pu être mise en œuvre compte-tenu de la complexité du système étudié.

Après une description rapide de la nouvelle structure proposée pour alimenter en continu un tramway, nous montrerons l'intérêt de la commande optimale pour optimiser la consommation énergétique et augmenter les performances dynamiques d'un système. C'est l'outil qui nous semble le plus à même d'améliorer la co-conception d'un système évoluant dynamiquement dans le temps, en liant étroitement tous les aspects de la gestion énergétique : dimensionnement, commande et efficacité énergétique.

## 2. Présentation de la structure étudiée

La réduction de la consommation énergétique est un enjeu majeur pour les constructeurs de systèmes de transport ferroviaire, désireux de diminuer les coûts d'investissement et d'exploitation de leurs réseaux. L'amélioration du rendement énergétique du système peut alors passer notablement par une meilleure récupération de l'énergie de freinage électrique.

Un réseau de tramway, bien qu'alimenté par un réseau de distribution classique, possède de nombreuses spécificités de par sa structure de conversion et la nature diverse de ses composants [99]. Leur étude se complexifie ainsi notablement par rapport aux réseaux classiques avec le déplacement d'un ou plusieurs tramways au cours du temps, avec des fonctionnements différents (freinage ou traction). Si du stockage est embarqué ou si une solution de « biberonnage » (recharge de stockage localisé dans les sous-stations) est pressentie, la stratégie de gestion énergétique peut devenir vraiment complexe à appréhender [11].

Le réseau d'étude correspond à la ligne d'essais de La Rochelle, représenté sur la Figure 27. Le véhicule était initialement alimenté sous 750 V DC par une sous-station non réversible (pont de diodes) de 900 kW située au point kilométrique PK 1222. De construction simple et robuste et de coût faible, cette solution présentait cependant des inconvénients : mauvaise qualité de tension sur le réseau DC, dissipation de l'énergie de freinage dans des rhéostats, pollution harmonique [99].

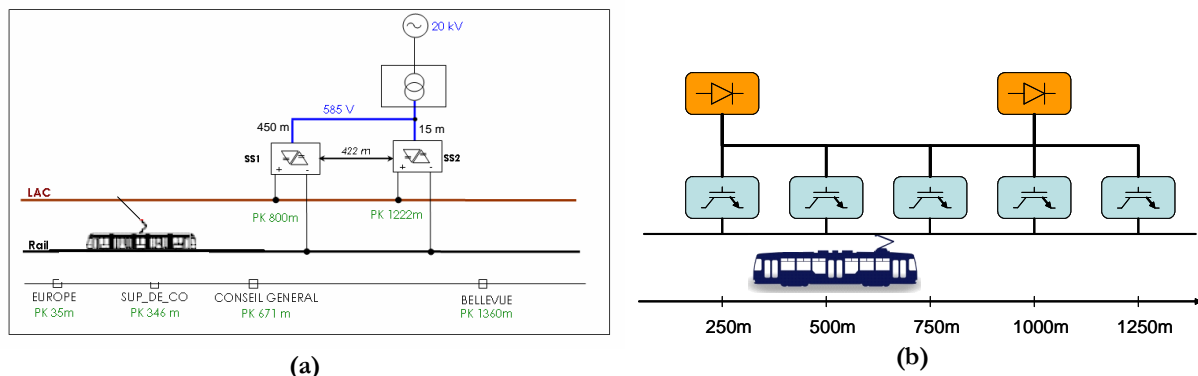
Après avoir étudié de nouvelles structures de conversion fondées sur des ponts en anti-parallèle (redresseur à thyristors pour la traction et onduleur à IGBT pour le freinage), nous avons proposé une nouvelle structure d'alimentation conçue à partir de convertisseurs DC/DC réversibles, alimentés par un ou deux redresseurs en tête d'installation [42]. L'utilisation d'un bus intermédiaire 1500 V (dont la valeur reste à valider vis-à-vis des performances et du bilan énergétique de l'ensemble) permet, en jouant sur la commande des hacheurs, de diminuer l'impédance apparente de la source alimentant un véhicule et donc, potentiellement, de favoriser les échanges entre tramways lorsqu'un véhicule est en traction et un ou d'autres en phase de freinage. La multiplication des convertisseurs DC/DC, de taille moins importante que les sous-

---

<sup>4</sup> Le principe d'optimalité de Bellman énonce que la trajectoire optimale sur l'espace de temps considéré  $[t_0, t_f]$  contient la trajectoire optimale sur  $[t_1, t_f]$  avec comme condition initiale  $x(t_1)$  où  $t_1 \in [t_0, t_f]$ .

stations très volumineuses actuellement utilisées, favoriserait également une meilleure tenue en tension de la Ligne Aérienne de Contact (LAC).

A contrario, cette solution de conversion devrait coûter plus cher que la structure classique. La standardisation des sous-stations devrait cependant permettre à moyen terme de réduire ce surcoût. La protection des sous-stations est également problématique en courant continu. Des études plus technologiques doivent donc être menées en parallèle avant d'envisager toute industrialisation ; nos travaux se sont néanmoins concentrés sur le dimensionnement du système de distribution.



**Figure 27 :** Ligne d'essais de La Rochelle deux structures étudiées : sous-stations AC/DC réversibles en freinage et sous-stations DC/DC

Une contrainte s'est cependant immédiatement imposée avant d'entreprendre toute optimisation des performances du système : la nécessité de développer un outil de simulation qui puisse intégrer les nombreuses spécificités d'un système ferroviaire :

- interactions temporelles de plusieurs sous-systèmes : motorisation des véhicules, distribution électrique, carrousel de déplacement des véhicules, comportement du conducteur, ... etc,
- dynamiques du système très variées : déplacement du véhicule, commandes en tension / courant des sous-stations, angles de commande des interrupteurs.

Même si de très nombreuses études ont été menées depuis les années 70 dans le domaine de la modélisation et de la simulation de réseaux ferroviaires, les résultats de simulations présentant un réseau de tramway dans son intégralité sont extrêmement rares ; la plupart du temps, les différentes parties du réseau sont étudiées séparément [12][143][147]. Par ailleurs, l'architecture d'alimentation électrique est suffisamment originale pour qu'on ne puisse pas utiliser des simulateurs existants sur le marché (par exemple, le logiciel ELBAS<sup>®</sup> développé par la société Alstom) ou développés dans d'autres laboratoires. Il a donc été nécessaire de construire notre propre outil de simulation de réseau ferroviaire permettant non seulement d'optimiser le dimensionnement du système sur des critères énergétiques, mais aussi de définir la structure de commande permettant d'optimiser ses performances. Cet outil n'est pas un simulateur ferroviaire, mais permet de définir et valider très rapidement une structure complète d'alimentation, celle-ci devant être ensuite validée soit expérimentalement, soit à l'aide d'outils de simulation temporelle topologiques (SABER<sup>®</sup> ou PSIM<sup>®</sup> par exemple).

Ce simulateur permet ainsi d'effectuer le calcul de trois étages différents mais fortement liés :

- le calcul de la cinématique du véhicule: profil de vitesse et de distance quand le véhicule se déplace d'un point à un autre, prise en compte des limitations et de la géométrie de la ligne,
- le calcul de la motorisation du véhicule : effort de traction, demandes en courant ou en puissance, part de stockage embarqué,
- le calcul du réseau d'alimentation électrique : tensions nodales, courants et puissances transitant dans les lignes.

Le calcul des différentes variables s'effectuent itérativement pour chaque pas de temps correspondant à une position du tramway. Ainsi, pour une position donnée, le simulateur détermine le courant de motorisation nécessaire à fournir l'effort demandé, puis détermine la répartition des tensions et courant côté réseau d'alimentation, ce qui permet d'affiner le modèle cinématique de calcul de vitesse, et ainsi de suite. L'outil est capable de converger très rapidement, et les temps de simulation restent très raisonnables ; ainsi, pour simuler un kilomètre et demi de voie (discrétisée par pas de 5m) avec un tramway en déplacement, il faut environ :

- 1 seconde en régime statique ;
- 15 secondes en régime dynamique ; ce temps augmente avec l'ordre du modèle moyen (il peut atteindre 22 secondes avec un modèle d'ordre 3) ;
- 40 secondes si l'on optimise le rendement énergétique en régime statique avec la fonction *fmincon* de Matlab<sup>®</sup>.

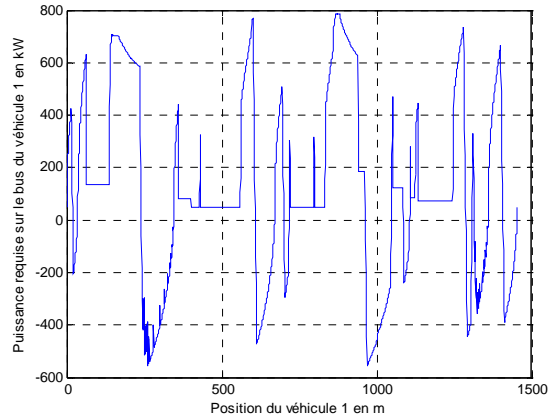
### 3. De l'intérêt d'un dimensionnement énergétique intégrant des critères dynamiques

Nous avons dans un premier temps effectué un dimensionnement statique optimal de la structure complète, sur un cycle de fonctionnement (aller simple d'un véhicule) pour évaluer rapidement et quantitativement les apports de la structure proposée.

Le réseau électrique est modélisé en régime statique par des matrices de conductance, dont les paramètres varient avec la position du tramway sur l'étage 750 V. Les convertisseurs sont modélisés par des transformateurs équivalents à courant continu, les courants et tensions étant simplement modulés par le rapport de transformation  $\alpha$ , l'angle de commande des hacheurs, entre l'entrée et la sortie. Enfin, le redresseur est modélisé par une simple source de tension avec une résistance série qui modélise l'empêchement pendant les commutations.

Si la modélisation mécanique du tramway est classique (modélisation effort/vitesse du véhicule dépendant de sa tension d'alimentation), la modélisation du conducteur est plus complexe. On peut considérer dans un premier temps que le conducteur peut moduler le couple maximal théorique suivant les besoins en traction ou en freinage. Les accélérations du véhicule doivent par ailleurs être limitées pour respecter le confort des passagers. Une modélisation plus complexe peut être introduite en utilisant un correcteur ou en mettant en œuvre une commande prédictive.

A l'issue de cette modélisation, le profil de puissance nécessaire pour l'alimentation du tramway peut être calculé pour une tension d'alimentation (Figure 28).

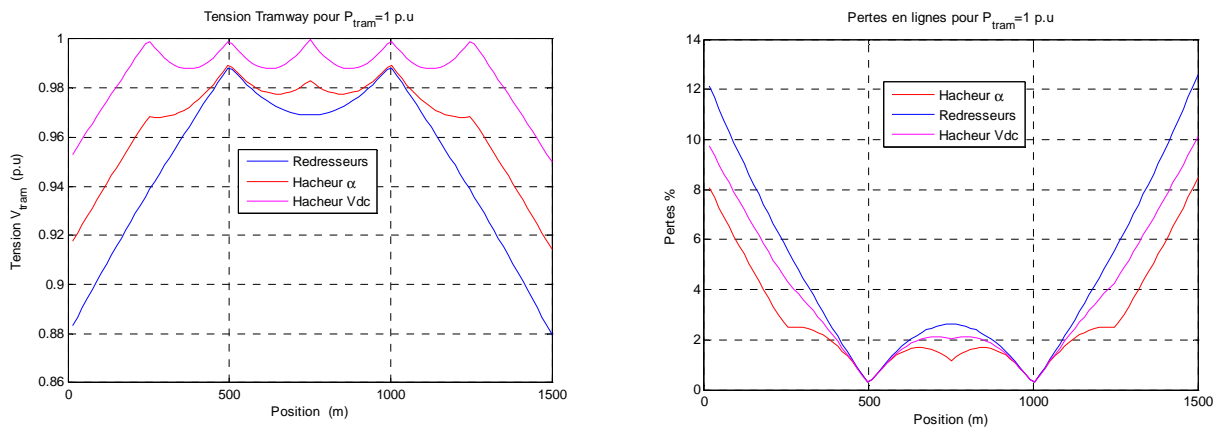


**Figure 28** : Profil de puissance appelé par le véhicule

L'outil de simulation peut alors être directement inclus dans une boucle d'optimisation statique pour minimiser les pertes du système, en jouant sur les angles de commande du redresseur et des convertisseurs DC/DC. On génère ainsi les références pour minimiser les pertes ; cette optimisation n'intègre pour l'instant pas de critères dynamiques et ne constitue donc qu'un outil de dimensionnement énergétique global.

A titre d'illustration, la Figure 29 montre l'intérêt de mener cette démarche d'optimisation (*Hacheur Vdc*) par rapport au dimensionnement de la structure sans considérations dynamiques (*Hacheur  $\alpha$* ). Les pertes sont ainsi réduites avec une tenue en tension plus qualitative. Les performances de la structure de conversion actuelle avec redresseurs sont également représentées. La structure d'alimentation continue apporte ainsi des gains significatifs sur la qualité de tension et le rendement du système.

Il reste cependant nécessaire d'améliorer la modélisation pour prendre en compte la dynamique de la structure pour valider le schéma de distribution proposé et analyser les performances temporelles du système.



**Figure 29** : Performances de la structure proposée. Apport de l'optimisation statique

La méthodologie fondée sur la commande robuste n'est pas satisfaisante dans la mesure où elle ne pourrait être appliquée que dans un « pire cas » de fonctionnement (deux tramways proches accélèrent en même temps, en étant éloignés des sous-stations).

De plus, lorsque le véhicule est hybridé avec une source de stockage embarqué, la gestion des échanges énergétiques doit être optimisée. Il est donc nécessaire d'introduire des critères énergétiques dans le dimensionnement du système. Enfin, il est indispensable d'intégrer la cinématique du ou des véhicules dans la mesure où elle influence fortement les performances du réseau électrique.

La commande optimale s'est donc imposée pour dimensionner au mieux le système. Le problème de l'implémentation pratique sera traité en conclusion de cette application.

#### 4. Méthodologie pour la commande optimale d'un système multi-sources évolutif dans le temps

Le principe du minimum de Pontriaguine conduit à la résolution d'un jeu d'équations appelées équations canoniques de Hamilton, régissant non seulement les dynamiques des variables d'état et des états adjoints pour tout instant  $t$  de l'intervalle d'étude :

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \dot{x} \quad (14)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\dot{p} \quad (15)$$

Des équations supplémentaires permettent de prendre en contact les états initial et final du système (ces équations sont appelées équations de transversalité). Enfin, une équation supplémentaire est utilisée :

- si aucune contrainte de type saturation n'est imposée sur la commande  $u(t)$  à l'instant  $t$  :

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad (16)$$

- si l'hamiltonien ne dépend pas explicitement du temps :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

Les algorithmes d'optimisation ne seront pas décrits dans ce mémoire. La méthode des variations en constitue le socle. On trouvera plus d'éléments théoriques dans [1].

##### 4.1 Modélisation dynamique du système

Pour analyser les performances dynamiques du système et montrer l'influence du contrôle sur le rendement énergétique du système, les modèles doivent être améliorés pour prendre en compte les dynamiques des composants.

Le réseau d'alimentation électrique (convertisseurs d'électronique de puissance et lignes de distribution) est modélisé en moyennant les différentes variables électriques à l'échelle de la période de commutation des convertisseurs. Un modèle complet linéarisé est alors construit et validé par rapport à une simulation temporelle effectuée dans un « pire cas ».

La dynamique de la cinématique est quant à elle modélisée à travers une représentation par bond graphs permettant de garder la causalité entre les différents éléments [39]. L'ensemble du système est ainsi représenté à travers une représentation d'état complète à partir de laquelle des simulations temporelles ou fréquentielles peuvent être menées très facilement.

#### 4.2 Commande optimale d'un système multi-sources

La commande optimale a dans un premier temps été appliquée sur la structure d'alimentation présentée sur la Figure 27.b.

L'intérêt de cette commande est cependant apparu très limité dans la mesure où la structure est déjà quasi optimisée. Ainsi, cette commande permet d'améliorer le rendement uniquement lorsque les sous-stations sont très éloignées, ce qui n'était pas l'objectif initial de la structure proposée.

Lorsque le véhicule intègre un dispositif de stockage embarqué, le problème est tout autre. En effet, il est nécessaire de gérer les échanges de puissance entre des sources très différentes tout en respectant un certain nombre de contraintes de nature énergétique cette fois (surveillance de l'état de charge du stockage à l'état initial et à l'état final ou minimisation des pertes par exemple).

Pour montrer l'apport de cette commande dans ce cas de figure, nous considérons un système simplifié constitué de la LAC alimentant un véhicule, composé d'un moteur de traction et d'un stack de supercapacités (Figure 30). Seul le convertisseur réversible interfaçant la supercapacité est contrôlé.

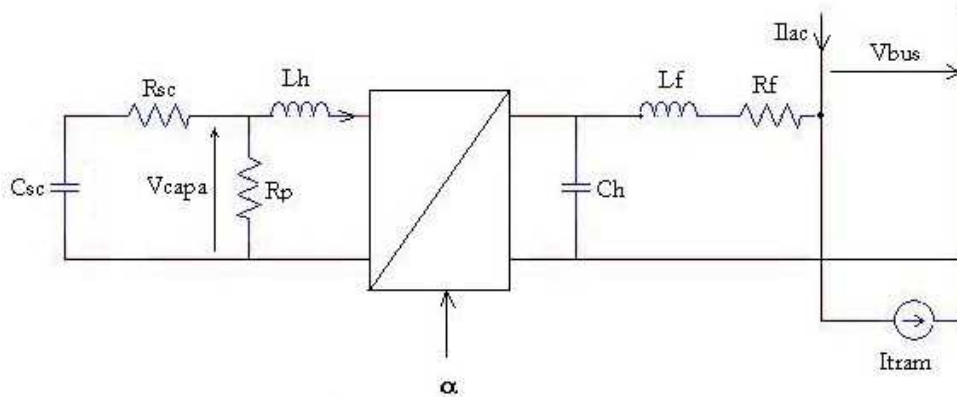
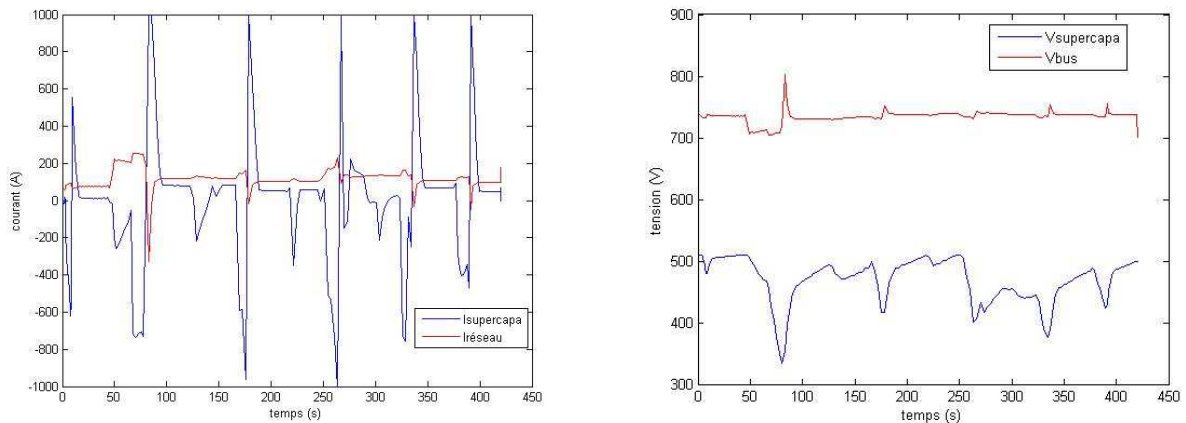


Figure 30 : Structure étudiée pour l'application de la commande optimale

La formulation du problème d'optimisation globale est alors la suivante :

- **Critères** : rendement énergétique ou tenue en tension sur la LAC
- **Contraintes** (initiales, finales, minimales et maximales sur le cycle de fonctionnement) :
  - ✓ Courant fourni par la LAC
  - ✓ Courant fourni par la supercapacité
  - ✓ Tension de la supercapacité (caractéristique de l'état de charge)
  - ✓ Plage de variation de la variable de commande

Les Figure 31.a et Figure 31.b représentent l'évolution des courants de la LAC ( $I_{lac}$ ) et de la supercapacité ( $I_{capa}$ ) d'une part, des tensions du bus continu ( $V_{bus}$ ) et de la supercapacité ( $V_{capa}$ ), d'autre part. Aucune saturation n'apparaît sur la grandeur de commande.



**Figure 31** : Evolution temporelle des variables électriques du système simplifié

Cette commande permet ainsi hors ligne de définir l'évolution que doit suivre la grandeur de commande pour maximiser le rendement tout en contraignant la source auxiliaire. Elle doit cependant être adaptée pour la gestion en ligne du système puisque dans ce cas, il est impossible de garantir que l'état de charge du stockage n'atteigne sa valeur minimale ou maximale sans connaître le parcours ni la valeur finale du stockage.

#### 4.3 Perspectives de ce thème

Les travaux de thèse de R. Vial devraient être complétés pendant sa troisième année par une étude très orientée vers le co-dimensionnement du système global, en établissant des liens forts entre les différents objectifs de dimensionnement (performances dynamiques, rendement énergétique, filtrage harmonique) et le modèle d'analyse.

L'implémentation pratique de la commande en temps réel et la validation de ces stratégies est également prévue à partir d'un démonstrateur à échelle réduite validant à la fois la structure et la commande proposées. L'objectif est ainsi de disposer de deux hacheurs en parallèle alimentant une charge programmable illustrant le déplacement du véhicule. Ce démonstrateur devrait nous

permettre de valider à plus long terme d'autres stratégies de commande qui ne seront pas abordées dans cette thèse, dans des cas applicatifs plus diversifiés de systèmes multi-sources.

Pour l'implémentation de la commande optimale, nous savons que cette commande ne peut être appliquée qu'hors ligne. [17], dans le cadre d'un véhicule hybride à pile à combustible, propose cependant une solution sous-optimale visant à adapter le paramètre de Lagrange en temps réel, qui pourrait être utilisée dans notre étude en fonction de la position du tramway (la minimisation de l'Hamiltonien est alors résolue en local). Une autre piste consisterait à appliquer une commande optimale linéaire (LQ) à chaque pas de temps et évaluer l'optimalité de cette solution sur tout un cycle de fonctionnement. Cela fera l'objet d'une étude en simulation avant implantation en temps réel sur le démonstrateur en cours de montage.

Par ailleurs le lien avec les paramètres du système n'a pas été illustré à travers une analyse de robustesse. Comme les commandes quadratiques (LQ et LQG) reposent sur un formalisme en boucle fermée, elles ont des propriétés intrinsèques de robustesse. Une commande multivariable robuste pourrait également être évaluée pour cette application multisources en tenant compte du déplacement du point de fonctionnement. La comparaison de ces différentes commandes nous permettra de conclure quant au choix de celle qui est la plus appropriée au système considéré, toujours dans une stratégie de co-dimensionnement.

## 5. Conclusions

Conclure sur l'intérêt d'une méthode de commande par rapport à une autre me semble encore impossible à ce stade des études pour faire du co-dimensionnement de système. Chaque méthode présentée dans ce mémoire a ses avantages et inconvénients que n'a pas l'autre ... et réciproquement !

Ainsi :

- l'approche robuste permet d'illustrer une démarche de co-conception fine liant commande et structure. Son formalisme n'intègre cependant pas de critères énergétiques, même si des adaptations sont possibles. Elle peut être implantée en temps réel et peut intégrer des évolutions de paramètres ou de suivi de consigne.
- l'approche optimale permet quant à elle ... d'optimiser sur tout un cycle de fonctionnement la gestion d'un système multiconvertisseurs. Le lien avec les paramètres du système doit cependant être plus clairement mis en évidence pour valider le dimensionnement du système proposé et montrer ses réels apports par rapport aux structures actuelles.

Des outils cependant existent ou pourraient être développés pour intégrer des critères énergétiques dans l'approche robuste, et de la robustesse dans l'approche optimale. Ceci nous permettrait de conclure sur la méthode la plus adéquate pour le dimensionnement dynamique et énergétique d'un système. Il resterait également à évaluer les autres stratégies de commande évoquées en début de chapitre et analyser les problèmes liés à l'implémentation pratique de ces



commandes. Les démonstrateurs associés à ces travaux devraient nous permettre de mieux appréhender ce dernier point.

Deux commandes me semblent particulièrement intéressantes pour avancer dans le co-dimensionnement des systèmes avec une génération hybride:

- la commande LPV (Linéaire à Paramètres Variants), déjà évoquée au paragraphe 3.6, qui permet d'étendre la méthodologie de commande robuste aux systèmes non linéaires ou dont les paramètres varient dans le temps [118][156]. Assimiler des non linéarités à des incertitudes pour la synthèse d'une commande robuste est possible, mais cela peut rendre l'approche conservative. Au prix d'une modélisation un peu délicate, cette commande LPV permet d'adapter le contrôleur au point de fonctionnement du système ou de faire évoluer les performances de ce dernier en fonction de l'état interne ou des paramètres externes.
- la commande LQG pour la gestion énergétique du système, puisqu'elle permet a priori d'intégrer de la robustesse dans la synthèse de la commande et des spécifications en performances dynamiques. Par ailleurs, cette commande pourrait être implantée sans difficultés majeures en temps réel. Il resterait à analyser cette commande pour essayer de quantifier effectivement cette robustesse.

La valorisation de ce travail pourrait se trouver dans l'intégration des outils numériques développés dans la plate-forme de conception CADES développée au G2Elab au sein de l'équipe MAGE. Les modèles des structures et des architectures de commande pourraient ainsi être « torturés » par des algorithmes d'optimisation pour aller plus loin dans le dimensionnement en s'affranchissant des problèmes d'optimisation. Cette intégration compléterait les résultats issus de la méthodologie dynamique proposée.

## **PARTIE 2 :**

# **OUTILS DE MODELISATION POUR LE (CO-)DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME ELECTRIQUE**

La problématique de modélisation est restée en retrait dans la mesure où, pour l'instant, les outils de commande mis en œuvre dans les différents systèmes étudiés utilisaient des modèles relativement classiques, fondés sur un moyennage à un ordre plus ou moins élevé des grandeurs électriques régissant le fonctionnement de convertisseurs d'électronique de puissance. Par ailleurs, toute commande digne de ce nom doit s'affranchir des incertitudes de modélisation dynamique des systèmes ... même si la commande est synthétisée sur la base du modèle le plus adéquat.

Dans cette partie, nous allons présenter de nouveaux outils de modélisation permettant dans un premier temps de tenir compte de phénomènes physiques régissant le fonctionnement intrinsèque de dispositifs électrotechniques et électrochimiques. Leurs principaux avantages sont liés à leur compacité et leur lien étroit avec la physique.

Si leur utilisation pour l'analyse et le dimensionnement est triviale, leur cadre d'étude pourra être étendu dans une démarche de conception de la commande, voire de co-dimensionnement.



## C. DE NOUVEAUX MODELES DYNAMIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT ET LA COMMANDE

### 1. Modèles actuels de (co)dimensionnement. Performances et limitations.

Il existe bien entendu pléthores de modèles dans la littérature, intégrant plus ou moins de phénomènes physiques, de complexité plus ou moins grande. Pour le dimensionnement classique d'un système électrique, plusieurs niveaux de modélisation sont utiles pour couvrir la plus grande plage de fréquences d'excitation du système [13]:

- modèles énergétiques des différents éléments (pertes, rendement) pour les stratégies de gestion énergétique ;
- modèle statique des différents constituants pour l'analyse en régime permanent des variables d'état : plan de tension, puissance de dimensionnement de la source, pertes en ligne, rendement, ...
- modèle dynamique pour l'analyse de performances dynamique du système : synthèse de correcteurs, stabilité, régulation et asservissement, régime de défauts, ...

Dans l'objectif d'évaluer finement les liens entre les paramètres du système et la commande mise en œuvre, pour améliorer le dimensionnement du système, c'est bien entendu sur l'étape de modélisation dynamique qu'il convient de s'arrêter.

Traditionnellement, c'est à partir des relations physiques caractérisant un composant ou un système qu'un modèle dédié à la commande est établi, sous forme soit de système d'état (pour établir une commande et effectuer une analyse temporelles), soit de fonctions de transfert pour une étude dynamique dans le domaine fréquentiel. Dans nos études, nous avons privilégié l'établissement des relations physiques à l'aide d'un moyennage des variables d'état à l'échelle de la période de commutations des convertisseurs d'électronique de puissance. Il est possible d'augmenter l'ordre de ce modèle afin d'augmenter la bande passante de validité de ce dernier.

D'autres approches plus récentes de modélisation dynamique à l'aide d'outils graphiques permettent au concepteur d'avoir une vision plus « physique » du système, ou d'offrir un formalisme de modélisation tout à fait adapté au développement de logiciels dédiés à la conception. Les bond graphs permettent ainsi de lier dynamiquement plusieurs variables multiphysiques [39]; cet outil nous a ainsi été particulièrement utile pour modéliser le réseau de tramway en liant grandeurs électriques et mécaniques. La description causale de ces bond graphs permet quant à elle de donner une description très proche de la physique mais beaucoup plus synthétique et plus uniforme que la représentation par schémas blocs, quelles que soient les variables considérées. Une analyse complète des autres méthodes graphiques (représentation macroscopique énergétique, diagrammes de flux de puissances notamment) est relatée dans [21].

Mis à part les modèles de type « boîte noire » (sans lien avec les paramètres du système) ou lorsque le système que l'on cherche à commander est tellement incertain qu'il faut mieux envisager une commande sans modèle, la plupart des modèles décrits plus haut permettent de faire une démarche de co-dimensionnement. Dans le cadre applicatif de l'hybridation d'une pile à combustible pour le transport, les nombreux travaux relatés dans [17], [33], [41], [63], [81], [111] ou [139] font ainsi le lien entre gestion énergétique et dimensionnement ou contrôle/commande et bilan énergétique, avec des modèles énergétiques graphiques ou à partir de fonctions de transfert.

Même si les modèles utilisés dans la première partie nous ont permis de réaliser des dimensionnements performants et robustes des systèmes étudiés, de sérieux problèmes persistent en termes de modélisation de systèmes électriques<sup>5</sup> :

- les systèmes étudiés peuvent être constitués de nombreux constituants. Dans certains cas, ils pourront même être considérés comme des systèmes complexes, c'est-à-dire des systèmes comportant un très grand nombre de paramètres où chacun a un rôle essentiel sur le comportement du système complet (à l'exemple des réseaux électriques où de multiples agents interviennent) ;
- certains constituants peuvent être eux-mêmes des systèmes complexes (par exemple, une pile à combustible) ;
- de nombreuses interactions existent entre les différents constituants du réseau, se propageant plus ou moins fortement suivant le dimensionnement du système. Ces interactions peuvent être liées à la pollution harmonique ou aux nombreuses boucles de commande présentes dans le système ;
- de nombreuses non linéarités de fonctionnement sont présentes, liées à la saturation des circuits magnétiques, des grandeurs de commande ou du comportement non linéaire des convertisseurs. Ces éléments ont une influence importante sur les performances dynamiques et le bilan énergétique du système étudié. A titre illustratif, [95] donne une idée de l'augmentation des pertes liées à la saturation de la machine.

La prise en compte de ces éléments a fait l'objet de nombreuses études, mais bien souvent elles conduisent à augmenter très significativement l'ordre du système, notamment lorsque certains composants sont décrits par des équations aux dérivées partielles (machines électriques, pile à combustible, ...). En parallèle avec cette augmentation de l'ordre, celle des incertitudes liées aux paramètres des modèles peut rendre l'analyse de robustesse effectuée dans la première partie extrêmement délicate.

Même si des techniques classiques de réduction d'ordre permettent de s'affranchir des problèmes de taille, notamment pour les systèmes linéaires, elles ne sont pas satisfaisantes dans notre étude car elles conduisent très souvent à une représentation mathématique de type boîte noire [49][82]. Le modèle ne représente alors le comportement du système qu'aux interfaces, en ne conservant que les modes les plus fortement commandables et observables.

---

<sup>5</sup> Nous n'aborderons pas dans ce chapitre les problèmes de modélisation liés au rendement énergétique de l'installation. Il est cependant nécessaire d'étudier avec grande attention certains constituants énergétiques (sources, stockage) afin de ne pas dégrader trop rapidement leurs performances. A ce sujet, la thèse de K. Mamadou permet de définir un nouvel indicateur utile pour le dimensionnement énergétique : le SOE (*State Of Energy*), permettant de connaître l'état d'énergie d'un moyen de stockage pour différentes conditions de fonctionnement en s'affranchissant de la double modélisation classique tension / SOC (*State of Charge*).

Nous nous sommes dès lors orientés vers une simplification plus structurelle des modèles.

Le principe de fonctionnement de nombreux composants de réseau ou système électriques repose sur une équation de diffusion : diffusion du champ magnétique pour un actionneur électrique dans un milieu ferromagnétique linéaire ou non; diffusion de charges électriques ou d'ions dans des composants électrochimiques. Ce phénomène étant de nature distribuée et théoriquement infinie, la modélisation de ces composants doit nécessairement être simplifiée dans le cadre d'une étude au niveau du système. Cette simplification ne doit cependant pas être trop grossière au risque de perdre le lien avec les paramètres de dimensionnement.

Nous avons ainsi développé des modèles directement à partir des équations aux dérivées partielles décrivant le comportement physique de ces dispositifs. De fait, les paramètres des modèles obtenus peuvent être reliés aux caractéristiques physiques et/ou géométriques du composant. Cela permet ainsi de mener des études fines de leur comportement pour la conception : fonctionnement dynamique, prise en compte de paramètres non électriques influençant le fonctionnement global du système (par exemple la pression ou la température des gaz alimentant une pile à combustible), voire surveillance de l'état (diagnostic, vieillissement).

Ces modèles intégrant connaissance et compacité reposent sur l'utilisation d'un outil mathématique encore assez original : **les systèmes d'ordre non entier**. Initiée durant ma thèse, l'utilisation de cet outil pour modéliser certains composants de systèmes électriques permet de concilier deux qualités généralement antagonistes : connaissance et compacité. Nous sommes ainsi parvenus à développer des modèles dont les paramètres sont directement liés aux caractéristiques géométriques et physiques du composant ou système étudié, tout en réduisant leur nombre par rapport aux modèles plus classiques. Le rapprochement avec la première partie sera analysé en conclusion.

## 2. Etat de l'art sur les systèmes d'ordre non entier

### 2.1 Cadre applicatif des systèmes d'ordre non entier

Un système d'ordre non entier est un système décrit par un équation différentielle faisant apparaître des dérivées non entières de variables d'état, ou par une fonction de transfert faisant intervenir des puissances non entières de l'opérateur de Laplace. Connus et formalisés depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle [103][117], ils ne sont réellement utilisés dans les sciences pour l'ingénieur que depuis une vingtaine d'années, date à laquelle A. Oustaloup a commencé à les utiliser pour synthétiser des commandes originales d'ordre non entier pour améliorer l'amortissement de véhicules automobiles [105]. C'est donc essentiellement en Automatique que ces systèmes ont vu leur utilisation particulièrement prometteuse à la fois pour la commande robuste mais aussi pour l'identification et le diagnostic de processus physiques.

Leur cadre applicatif s'est cependant élargi à des domaines aussi divers et variés que :

- la rhéologie avec des modélisations non entières de digues présentant de nombreuses porosités [108] ;
- l'électronique, toujours pour modéliser des porosités mais au niveau des électrodes cette fois, et la diffusion de composants sur plaques [131] ;
- la thermique, pour modéliser des phénomènes diffusifs sur des surfaces complexes [16];
- les dispositifs électrochimiques pour la mise en œuvre de commandes robustes d'ordre non entier [81].

Indépendamment de leurs propriétés de compacité dans le domaine fréquentiel, deux raisons principales ont justifié leur utilisation dans le cadre de ces travaux :

- ils possèdent un effet mémoire naturel, puisque la définition de la dérivée non entière d'une fonction permet de prendre en compte le passé global de cette fonction à partir de  $t = 0$ . Ainsi, dans un processus de relaxation de matériaux diélectriques organiques (en l'occurrence des polymères semi-cristallins), un modèle non entier du diélectrique a été mis en œuvre pour tenir compte de l'effet mémoire de la tension sur le processus [124].
- les modèles d'ordre entier ne permettent pas de modéliser simplement au niveau macroscopique des comportements microscopiques très complexes et des phénomènes internes fortement couplés.

## 2.2 Systèmes d'ordre non entier et diffusion

Nous allons tout d'abord légitimer l'utilisation de systèmes d'ordre non entier pour la modélisation de dispositifs diffusifs.

Les phénomènes de diffusion sont régis par une équation dite loi de Fick qui définit une relation de proportionnalité entre le flux d'une grandeur physique notée  $c$  et sa vitesse, le coefficient de proportionnalité ( $K$ ) étant appelé coefficient de Fick. Dans le cas d'une diffusion unidirectionnelle suivant la direction  $x$ , cette loi s'écrit alors :

$$\frac{\partial^2 c(x, t)}{\partial x^2} = K \frac{\partial c(x, t)}{\partial t} \quad (18)$$

Cette équation aux dérivées partielles (edp) d'ordre 2 dans l'espace et d'ordre 1 dans le temps, peut être approchée par une autre edp d'ordre 1 dans l'espace et d'ordre  $\frac{1}{2}$  dans le temps. Ainsi, dans le cas d'un problème de dimension finie où il existe une distance  $h$  pour laquelle  $c(h, t) = 0$  (voir Figure 32), le flux est également solution de l'équation (19) suivante :

$$\frac{\partial c(x, s)}{\partial x} = e^{\sqrt{sK}x} \cdot \coth[(x-h)\sqrt{sK}] c(x, s) \quad (19)$$

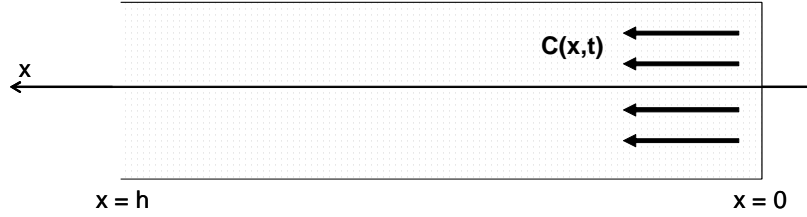


Figure 32 : Problème de diffusion dans un problème de dimension finie

Cette relation est obtenue à partir de la solution générale de la relation (18) décrite dans le domaine de Laplace, où  $s$  est l'opérateur de Laplace. Une telle équation ne pouvant être résolue analytiquement, une approximation fondée sur un développement limité à l'ordre 2 de la fonction cotangente hyperbolique peut être proposée :

$$\coth(x) \approx \frac{1 + x^2 / 2}{x} \approx \frac{\sqrt{1 + x^2}}{x} \quad (20)$$

Ce développement n'est bien sûr valable que pour les basses fréquences ; cependant, l'étude d'un équivalent de la fonction  $\coth$  pour les hautes fréquences montre que ce développement reste une bonne approximation. Il reste à étudier la validité de cette approximation pour les fréquences intermédiaires.

En reportant ce développement limité dans la relation (19) et en revenant dans le domaine temporel, on aboutit à la relation suivante :

$$e^t \frac{\partial c(x, \tau.t)}{\partial x} = \sqrt{\frac{k}{\tau}} \cdot \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} [e^t \cdot c(x, \tau.t)] \quad (21)$$

Cette relation fait ainsi clairement apparaître la définition temporelle d'un système d'ordre  $\frac{1}{2}$  implicite, puisqu'elle fait intervenir la dérivée d'ordre  $\frac{1}{2}$  du produit de la fonction  $c(x,t)$  avec une exponentielle. Dans le cas d'un objet de dimension infinie ( $h$  tend alors vers l'infini), la relation se « simplifie » sous la forme :

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = -\sqrt{K} \cdot \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} [c(x, \tau.t)] \quad (22)$$

La dérivée temporelle est ainsi toujours d'ordre  $\frac{1}{2}$  mais de nature explicite par rapport à la fonction  $c(x,t)$ .

Le caractère implicite ou explicite de la dérivée d'ordre  $\frac{1}{2}$  est finalement lié à la dimension finie ou non du problème considéré. Ainsi, pour des fréquences supérieures à  $1,115 / b^2 \cdot K$ , les deux approximations (21) et (22) sont égales à 1% près [117]. Physiquement, on retrouve le fait que pour les fréquences élevées, la grandeur  $c$  se répartit dans une zone de largeur étroite à  $x=0$  (correspondant à l'épaisseur de peau dans le cas de la diffusion du champ magnétique) ; la condition aux limites  $c(h,t) = 0$  « se déplace » ainsi avec l'augmentation de la fréquence.



### 2.3 Application pour la modélisation des machines électriques en régime linéaire

En électrotechnique, la grandeur  $\mathbf{c}$  va représenter le champ magnétique  $\mathbf{H}$  créé ou induit dans certaines pièces conductrices de composants électriques : pièces ferromagnétiques massives, barres de cage d'écuréuil de machines asynchrones ou d'amortisseurs de machines synchrones, câbles conducteurs, etc. Ainsi, les impédances analytiques :

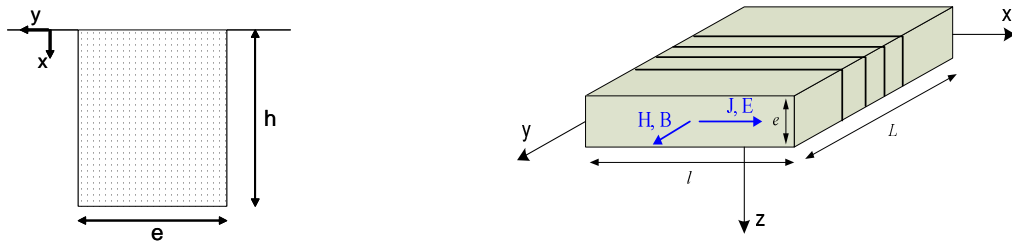
- d'une barre conductrice rectangulaire, modélisant une barre de cage d'amortisseur ou d'écuréuil,
- d'une tôle ferromagnétique, représentant une pièce massive ferromagnétique d'une machine électrique comme par exemple son rotor dont le rayon de courbure serait supposé infini par rapport aux autres dimensions,

peuvent être approximées par les impédances d'ordre non entier (23) et (24) :

$$Z_{barre}(\omega) = R_0 \sqrt{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad \text{où } \omega_0 = \frac{1}{\sigma \mu b^2} \text{ et } R_0 = \frac{L}{\sigma h e} \quad (23)$$

$$Z_{tôle}(\omega) = \frac{j L_0 \omega}{\sqrt{1 + j \frac{\omega}{\omega_{0,t}}}} \quad \text{où } \omega_{0,t} = \frac{1}{\sigma \mu \left(\frac{b}{2}\right)^2} \text{ et } L_0 = \frac{\mu b l}{L} n^2 \quad (24)$$

où les paramètres sont décrits sur la figure 32.



**Figure 33 :** Schémas d'une barre rectangulaire (à gauche) et d'une tôle ferromagnétique (à droite)

Les modèles d'ordre  $\frac{1}{2}$  ont été comparés à d'autres modèles plus classiques :

- un modèle analytique unidirectionnel et sans approximation faisant intervenir un terme en tangente hyperbolique de la fréquence [5] :

$$Z_{barre}^a(\omega) = R_0 \cdot \frac{\sqrt{j\omega/\omega_0}}{th\left(\sqrt{j\omega/\omega_0}\right)} \quad \text{et} \quad Z_{tôle}^a(\omega) = jL_0\omega \cdot \frac{th\left(\sqrt{j\omega/\omega_{0,t}}\right)}{\sqrt{j\omega/\omega_{0,t}}} \quad (25)$$

- des modèles approchés correspondant à des représentations distribuées du phénomène de diffusion. Plusieurs modèles existent soit sous forme de cellules (R,L) ou (R,C). Leur principal inconvénient est lié à la troncature nécessaire du nombre de cellules en fonction de la plage de validité fréquentielle désirée. Il est ainsi nécessaire d'utiliser un modèle d'ordre entier comportant 4 à 5 fois plus de paramètres que le modèle d'ordre  $\frac{1}{2}$  pour couvrir la même plage de fréquences.

Le phénomène de diffusion peut être ainsi modélisé dans le cas linéaire et unidirectionnel par des systèmes d'ordre  $\frac{1}{2}$  de nature implicite. Cette dépendance avait déjà été évoquée dans la littérature mais sans faire aucunement référence à la théorie générale des systèmes d'ordre non entier. Il est ainsi intéressant de retenir que les hypothèses permettant l'établissement de ces modèles sont peu nombreuses et surtout très classiques.

La réduction d'ordre par rapport aux modèles classiques est une conséquence inhérente à la compacité intrinsèque des systèmes d'ordre non entier dans le domaine fréquentiel.

Ces impédances d'ordre  $\frac{1}{2}$  ont ensuite été insérées dans les schémas équivalents de machines électriques synchrones et asynchrones en remplacement des cellules (R-L) classiquement utilisées pour étendre leur plage de validité fréquentielle. Cette modélisation d'ordre non entier est présentée en détail dans [125].

Retenons surtout que les schémas équivalents obtenus :

- ont des paramètres étroitement liés aux caractéristiques géométriques et physiques des composants (propriété vérifiée lors de l'étape d'identification),
- sont valables sur des plages de fréquences relativement larges, couvrant les zones de fonctionnement nominal et permettant de modéliser le comportement basses fréquences jusqu'à quelques milliers de Hertz de machines électriques,
- sont d'ordre réduit par rapport aux modèles équivalents classiques d'ordre entier (dans le cas d'un alternateur, on note une diminution d'un facteur 2 du nombre de paramètres).

Ces modèles ont été validés sur différents types de machines qui sont au cœur des systèmes et réseaux électriques : générateurs synchrones à rotor lisse ou saillant, moteurs asynchrones à doubles encoches ou encoches profondes, transformateurs, etc.

### **3. Les systèmes d'ordre non entier : une réponse aux besoins de modélisation pour le dimensionnement ?**

Ce paragraphe va synthétiser les différents travaux de modélisation d'ordre non entier effectués dans le cadre des thèses d' A. Amrane, O. Enacheanu, S. Racewicz et S. Sailler. Notre objectif consiste pour l'heure de proposer un outil de modélisation apte à répondre aux besoins exprimés en introduction de cette partie : représentativité physique et compacité. Le lien vers le co-dimensionnement sera plus spécifiquement abordé en conclusion et dans les perspectives de ce mémoire.

### 3.1 Etude des dispositifs électrochimiques [S. SAILLER]

Même si les technologies associées au développement des piles à combustible (PAC) ou de certaines batteries (Li-ion, redox) ne sont pas encore tout à fait matures, il convient de maîtriser ces nouveaux systèmes de génération électrochimique afin de garantir une qualité de tension et des performances optimales. Ces dispositifs se caractérisent cependant par une complexité de fonctionnement importante multi-physique et multi-échelle.

Notre objectif est donc de déterminer et valider des modèles à l'interface de deux disciplines, le génie des procédés/l'électrochimie et le génie électrique, qui soient à la fois suffisamment représentatifs des phénomènes électrochimiques intrinsèques au générateur mais également simples pour être intégrés dans des logiciels de simulation de systèmes.

#### 3.1.1 Modélisation d'une pile à combustible de type PEM

La complexité des phénomènes électrochimiques d'une PAC est telle qu'il est très difficile d'en tenir compte rigoureusement dans la définition de modèles, notamment lorsque l'on s'intéresse au fonctionnement d'une pile intégrée au cœur d'un système électrique.

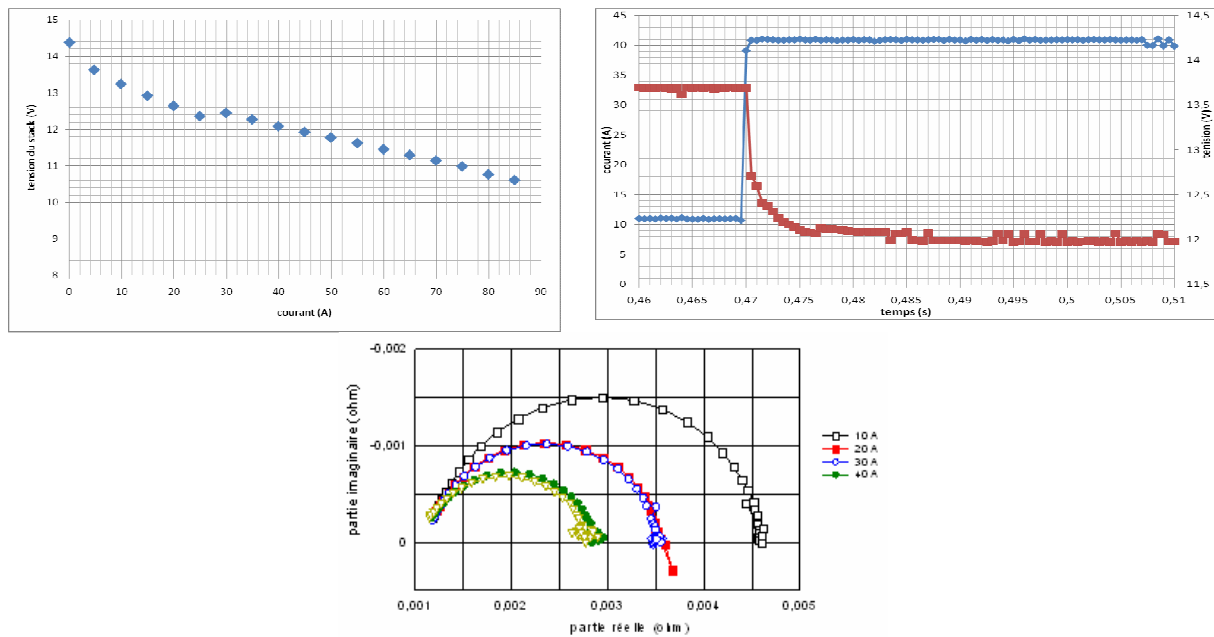
Deux catégories de modèles peuvent ainsi être définies :

- les modèles statiques, permettant de rendre compte de la courbe de polarisation et de la réponse à un échelon de courant d'une pile, associée ou non à un convertisseur d'électronique de puissance [14][37][37],
- les modèles dynamiques permettant de prédire le comportement transitoire d'une pile soumise à différents profils de charge [14][64][148]. Dans ce cas, on peut adopter soit une représentation de type circuit équivalent ou à l'aide d'outils graphiques, soit résoudre les équations aux dérivées partielles décrivant l'évolution spatio-temporelle des concentrations en gaz dans le cœur de pile.

Suivant le modèle concerné, l'identification de ses paramètres est effectuée à partir (cf Figure 34) :

- d'une courbe de polarisation du stack (relevé statique donnant la tension en fonction du courant),
- de réponses dynamiques à un échelon de courant,
- de relevés par spectrométrie d'impédance électrochimique (S.I.E.),

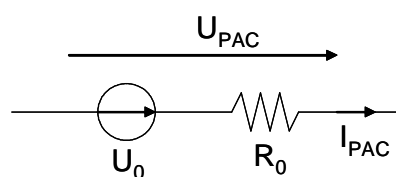
et ceci pour différentes conditions de fonctionnement de la pile (coefficient stoechiométrique en oxygène, température, pression des gaz).



**Figure 34 :** Relevés expérimentaux pour l'identification des différents modèles de pile à combustible : courbe de polarisation (en haut), réponse en tension à un échelon de courant (en bas à gauche), spectres d'impédances pour différents courants (en bas à droite)

La PAC peut être considérée en régime statique comme une source de tension non idéale, caractérisée par son potentiel électrochimique à l'équilibre ( $U_0$ ) associée à une chute de tension ohmique ( $R_0$ ). Ce premier modèle peut être amélioré pour tenir compte du comportement non linéaire de la pile aux faibles courants. La source et la résistance de la Figure 35 sont alors variables [43]. Les deux paramètres sont identifiés à partir de la courbe de polarisation : on estime la résistance à partir de la pente de la courbe pour tout point de fonctionnement, la tension de source étant identifiée pour minimiser les écarts.

Ce modèle permet de tenir compte des conditions de fonctionnement de la pile mentionnées ci-dessus.



**Figure 35 :** Modèles électrique pour le fonctionnement statique

Le modèle statique reste un modèle de comportement qui ne permet pas de remonter aux conditions de fonctionnement de la pile malgré ses paramètres physiquement représentatifs.

Des modèles par circuits électriques équivalents permettent alors de décrire de façon plus précise le comportement dynamique des piles en régime « petits signaux » pour un point de fonctionnement donné. Ce sont donc ces modèles linéarisés qui seront utilisés pour la synthèse de lois de commande.

Quand le transport de masse ne subit pas de limitations, la réaction d'oxydoréduction peut être représentée simplement par un ensemble de cellules (R-C). Cependant, lorsque les concentrations d'espèces gazeuses subissent de fortes variations au niveau des électrodes, cette modélisation n'est plus adaptée. La réaction redox est alors modélisée par un circuit équivalent

( $Z_f - C$ ) où  $Z_f$  est l'impédance faradique composée de deux termes : une résistance de transfert de charge  $R_{t_k}$  et une impédance de diffusion des espèces réduites au niveau de la cathode et oxydées au niveau de l'anode, appelée aussi impédance de Warburg [14]. La capacité  $C$ , notée  $C_{dk}$  par la suite, modélise les variations dynamiques des concentrations d'espèces gazeuses dans la double couche et les charges stockées au niveau des électrodes.

Le modèle présenté sur la Figure 36 permet de rendre compte du comportement dynamique de la pile. Outre la résistance de la membrane ( $R_m$ ), les différents paramètres de ce modèle, à savoir les résistances de transfert de matière pour l'électrode  $k$  ( $R_{t_k}$ ) et les impédances de Warburg pour la modélisation de la diffusion ( $Z_{Wk}$ ), sont explicités ci-dessous [14]:

$$R_{tk}(i) = \frac{1}{\frac{\partial j_k}{\partial \eta_k}} = \frac{1}{\gamma_k \cdot j_{ok} \cdot \frac{2,3}{b_k} \cdot \exp\left(\frac{2,3 \cdot |\eta_k|}{b_k}\right) \cdot \left(1 - \frac{i}{j_{tk}}\right)} \quad (26)$$

$$Z_{Wk}(i) = \frac{\frac{\partial j_k}{\partial \Gamma_k}}{\frac{\partial j_k}{\partial \eta_k}} = \frac{\delta}{n_e \cdot F \cdot D_k^{eff}} \cdot \frac{th[\sqrt{j\omega\tau_k}]}{\sqrt{j\omega\tau_k}}$$

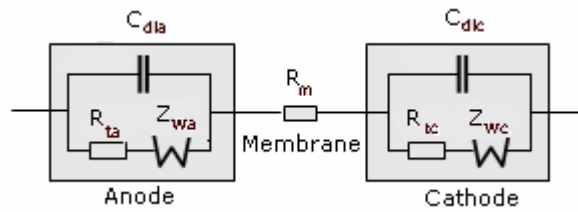


Figure 36 : Modèles électrique pour le fonctionnement dynamique « petits signaux »

A partir de l'expression (26), on peut alors introduire un nouveau modèle du Warburg basé sur les systèmes d'ordre non entier en effectuant la même approximation que celle présentée équation (20) :

$$Z_{Wk}^{1/2}(i) = \frac{A_k(i)}{\sqrt{1 + j\omega\tau_k}} \quad (27)$$

Les paramètres de ce modèle sont ainsi amenés à évoluer en fonction du courant de la pile et des conditions de fonctionnement (pression et température). Ce modèle a été identifié à partir des spectres obtenus par spectroscopie d'impédance (cf Figure 34). La résistance de la membrane est déterminée avec l'intersection du spectre avec l'axe de abscisses ; la somme des résistances de transfert correspond à l'écart des parties réelles entre le comportement basses et hautes fréquences. Enfin, les capacités sont identifiées à partir des fréquences caractéristiques du « sommet » des spectres. La principale difficulté réside dans la séparation des phénomènes intervenant au niveau de l'anode et de la cathode. Pour cela, il est souvent nécessaire d'estimer aux préalables ces variables à partir de valeurs bien connues des différents paramètres intervenant dans les relations (26).

Un modèle d'ordre  $1/2$ , valable pour différentes densités de courant, tenant compte des variations de température, de pression des gaz et du niveau d'humidification des membranes (ces paramètres influençant grandement les performances à court et long terme d'une pile à

combustible (rendement, vieillissement)) a donc été mis en oeuvre. Les spectres de la Figure 34 et ceux ci-dessous présentent ainsi la pertinence de ce modèle sur l'évolution du spectre d'une pile en respiration, pour différentes températures et pressions en gaz réactifs. Il est ainsi possible de suivre l'évolution des paramètres du modèle en fonction des conditions de fonctionnement. Ces travaux devraient ainsi permettre d'évaluer l'état de vieillissement de la pile.

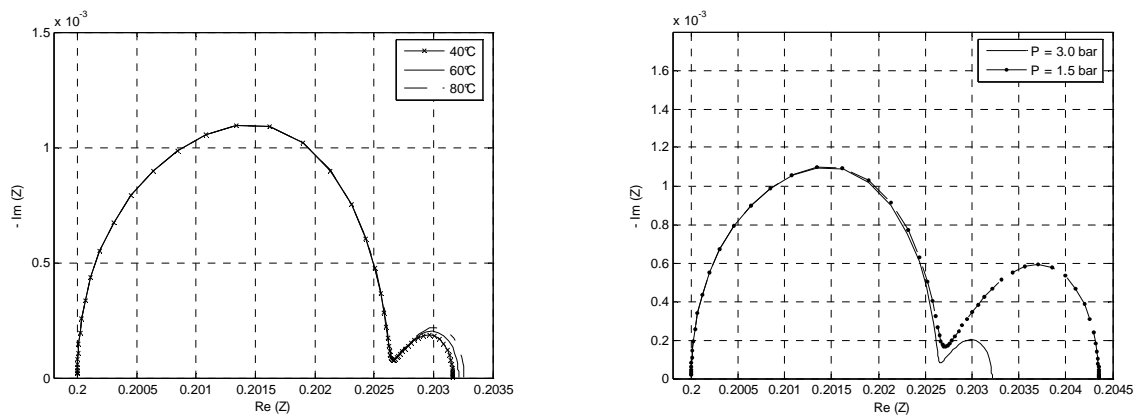


Figure 37 : Spectres d'impédances pour différents coefficients de stoechiométrie (à gauche) et températures (à droite)

### 3.1.2 Modélisation de stockage électrochimique

Pour ces dispositifs, les systèmes d'ordre non entier sont également introduits pour modéliser :

- la diffusion des espèces gazeuses au niveau des électrodes de batteries,
- la diffusion des charges électriques au niveau des électrodes de supercapacités.

Cette diffusion est essentiellement liée à la porosité des électrodes [36][81][131]. Dans le cas des supercapacités, les électrodes sont ainsi constituées de matériaux extrêmement poreux de manière à disposer de surfaces de contact très importantes, de l'ordre de  $10^3$  à  $10^5$  fois supérieures aux surfaces planes [27]. Il est suffisant de s'intéresser à la modélisation d'un seul pore puis de généraliser à l'électrode toute entière [40].

Comme pour la pile, deux catégories de modèles dynamiques existent dans la littérature ; ils reposent soit sur la résolution d'edp caractérisant la concentration en espèces chimiques (là encore, une connaissance fine des conditions initiale et aux limites est requise pour résoudre ces équations), soit sur des circuits électriques équivalents dont les paramètres sont identifiés à travers des mesures expérimentales.

Nous ne présenterons dans ce mémoire que des modèles dynamiques de supercapacités reposant sur la modélisation d'ordre non entier. Des travaux antérieurs ont déjà porté sur la modélisation d'ordre non entier de batteries NiMH [81] et ont montré leur intérêt pour analyser finement avec un nombre de paramètres réduit le fonctionnement d'une batterie. Des travaux plus récents ont permis d'étendre ces modèles à d'autres technologies de batteries [45].

Le modèle électrique le plus simple pour représenter le comportement d'une supercapacité associe en série une résistance et une capacité constantes [36], la résistance modélisant les pertes ohmiques dans l'électrolyte. Mais ce modèle ne traduit pas le comportement de la double couche

électrochimique. Des modèles basés sur la décomposition de cette couche en deux termes, l'un correspondant à une répartition linéaire des charges à la surface de l'interface (modèle de Helmholtz) et l'autre, à une répartition des ions suivant les lois de Boltzmann (modèle de Gouy et Chapman) [8], ainsi que sur la nature poreuse des électrodes, permettent d'améliorer ce premier modèle. Le modèle électrique complet est alors décrit sur la Figure 38.

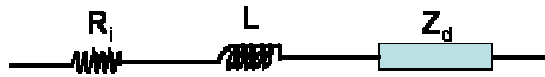


Figure 38 : Modèle électrique d'une supercapacité

La résistance  $R_i$  modélise les pertes Joule de l'électrolyte et des connections électriques et l'impédance  $Z_b$ , l'impédance de la double couche. L'inductance  $L$  est usuellement introduite dans le modèle pour améliorer la modélisation pour les fréquences intermédiaires. L'expression  $Z_d$  peut s'exprimer sous la forme [27][43] :

$$Z_d(j\omega) = \frac{\tau \cdot \coth(\sqrt{j\omega\tau})}{C \cdot \sqrt{j\omega\tau}} \quad (28)$$

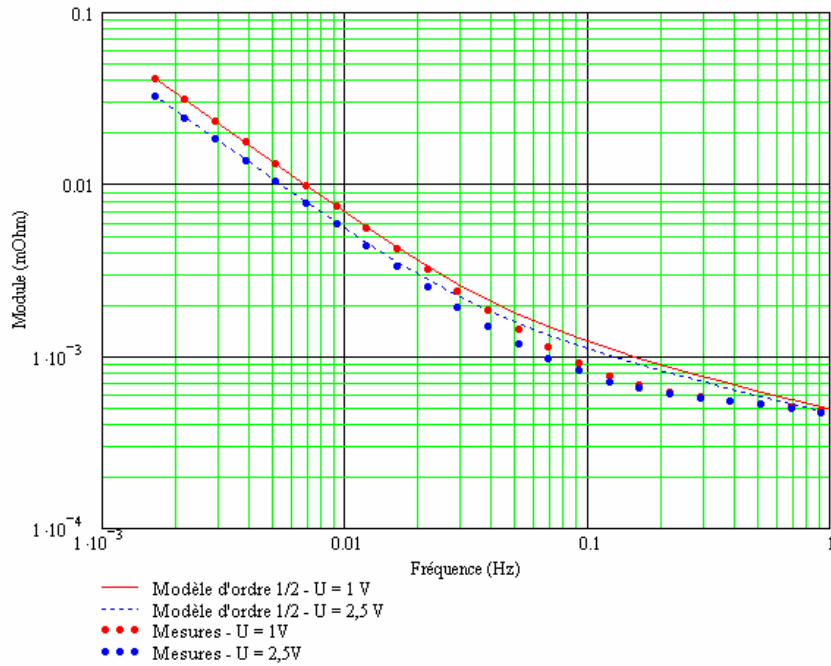
où  $\tau$  représente la constante de temps du phénomène de double couche et  $C$ , la capacité de double couche.

Les systèmes d'ordre non entier peuvent être utilisés afin d'implanter ce modèle de double couche dans des logiciels de simulation électrique. Le modèle d'ordre  $1/2$  de la supercapacité est alors donné par :

$$Z_d^{1/2}(j\omega) = \frac{\sqrt{1 + j\omega\tau}}{j\omega C} \quad (29)$$

On retrouve le comportement capacitif de la supercapacité pour les basses fréquences et les avantages liés aux systèmes d'ordre non entier : compacité (les modèles équivalents d'ordre entier comportent a minima six paramètres contre deux pour le modèle d'ordre non entier), représentativité physique et validation sur une plage de fréquences étendue. Comme pour la PAC, nous avons testé et identifié des supercapacités de 58 et 2400F (en collaboration avec l'institut ISEA d'Aachen et le LEPMI) à l'aide de spectroscopie d'impédances pour des fréquences variant entre 10 mHz et 1kHz, pour différentes tensions et températures.

La figure ci-dessous illustre la comparaison entre modèle et mesures pour différents niveaux de tension pour une capacité de 2400F. Notons que l'identification présentée a été réalisée sans insertion de l'inductance série. Cela permet ainsi d'identifier la capacité et la constante de temps de double couche aux basses fréquences.



**Figure 39 :** Comparaison du modèle d'ordre non entier et des mesures obtenues par SIE pour différents états de charge (1V et 2,5 V)

Entre 1 et 2,5 V, la capacité de double couche augmente de 2370 F à 3010 F ; on vérifie ainsi que cette capacité augmente significativement avec la tension, en concordance avec les données constructeurs. En complément, on peut établir une loi de variation empirique permettant de retrouver la valeur de la tension, donc de l'état de charge<sup>6</sup>, à partir de la capacité [27]. D'autres tests en température permettent d'évaluer l'influence de ce paramètre notamment sur les résistances du modèle (augmentation de la résistance de  $R_i$  mais diminution de la résistance de double couche<sup>7</sup>) et, en moindre proportion, sur la capacité de double couche. Là aussi, des modèles empiriques peuvent permettre de remonter à la température de fonctionnement à partir de la résistance.

Ainsi, l'identification des paramètres de la supercapacité, et notamment des paramètres du modèle d'ordre non entier, pourrait permettre de suivre ses performances et éventuellement remonter à son état de santé. Il resterait cependant à les intégrer dans un outil de simulation adapté pour valider les modèles sur des cycles de fonctionnement complet (les modèles ont déjà été validés mais sur des cycles de charge / décharge simplifiés) et les intégrer dans une stratégie de gestion énergétique.

<sup>6</sup> L'état de charge est défini par la relation  $SOC = \left( \frac{V_{sc}}{V_{scmax}} \right)^2$ , où  $V_{sc}$  et  $V_{scmax}$  sont les tensions aux bornes de la supercapacité respectivement à l'instant donné et maximale.

<sup>7</sup> Cette diminution avec l'augmentation de la température est liée à la diminution de la mobilité des ions au niveau de l'électrolyte.



### 3.2 Modélisation de générateurs synchrones en régime de saturation [S. RACEWICZ]

Très peu de modèles d'impédances permettent analytiquement de tenir compte de la saturation. La plupart du temps, la saturation est modélisée semi-empiriquement à travers la notion de saturation croisée, qui permet de lier l'évolution chaque flux des axes d et q aux courants [76][80]. D'autres travaux font référence à des modèles d'évolution du module de l'inductance d'une pièce ferromagnétique soumise à un courant magnétisant croissant [96].

Notre démarche a consisté à repartir du modèle d'ordre  $\frac{1}{2}$  modélisant une tôle ferromagnétique en régime linéaire, en adaptant les paramètres  $L_0$  et/ou  $\omega_0$  en fonction du courant traversant le bobinage d'excitation. Nous supposons ainsi que le modèle reste valable pour de faibles variations autour d'un point de fonctionnement magnétique.

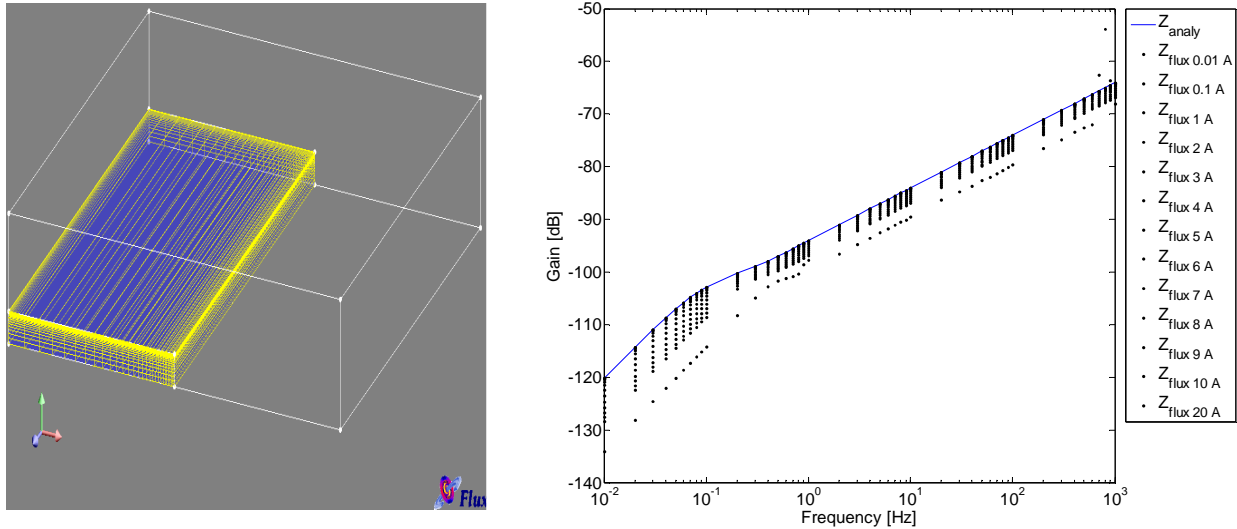
Le but recherché est donc de mettre en évidence l'évolution de l'impédance analytique d'une tôle ferromagnétique en présence de saturation et d'effet de peau, suivant:

$$Z_{tôle}^{1/2}(\omega, i) = \frac{jL_0(i)\omega}{\sqrt{1 + j\frac{\omega}{\omega_0(i)}}} \quad (30)$$

où  $i$  est le courant traversant l'enroulement. Une loi d'évolution des paramètres a ensuite été recherchée pour décrire l'évolution des paramètres du modèle en fonction de quelques caractéristiques physiques de la tôle.

Le modèle a été validé dans un premier temps à l'aide de simulations par éléments finis en utilisant le logiciel Flux<sup>®</sup>. Nous avons ainsi considéré une tôle entourée par une nappe de courant permettant de définir un point de fonctionnement magnétique. De petites variations autour de ce point de fonctionnement ont ensuite été modélisées et finalement, l'impédance de la tôle a été calculée pour chacun de ces points de fonctionnement.

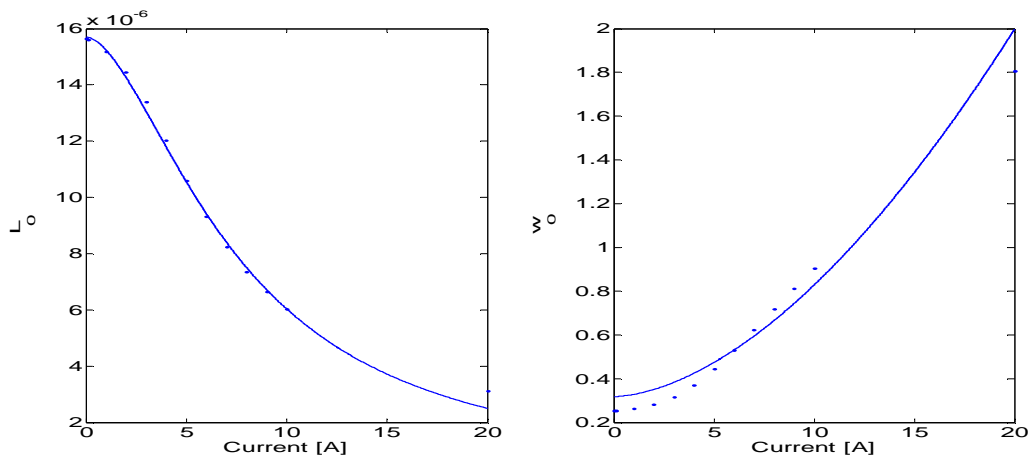
La Figure 40 ci-dessous illustre les résultats obtenus, avec en bleu l'impédance analytique de l'équation (25) obtenue dans le cas linéaire.



**Figure 40 :** Evolution de l'impédance d'une tôle ferromagnétique en fonction du courant et de la fréquence

Les paramètres  $L_0$  et  $\omega_0$ , identifiés respectivement à partir du comportement de l'impédance aux basses et hautes fréquences, sont représentés en fonction du courant  $i$  sur la Figure 41.

Il est ainsi possible de prendre en compte la saturation dans le modèle analytique de la tôle ... sans modifier la structure du modèle d'ordre  $\frac{1}{2}$ . De plus, nous retrouvons aussi l'évolution classique des paramètres d'une inductance en fonction du courant d'excitation : comme la perméabilité apparente décroît avec la saturation, on attend une diminution significative de l'inductance  $L_0$  et un accroissement de la pulsation de coupure  $\omega_0$ .

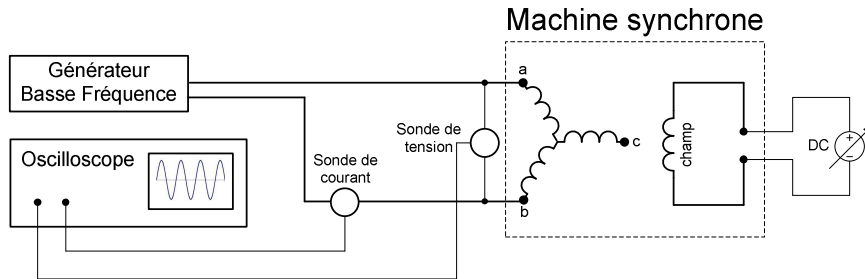


**Figure 41 :** Identification de  $L_0$  et  $\omega_0$  en fonction du courant

A partir de ces premiers résultats, nous avons remplacé dans les schémas équivalents d'ordre non entier de la machine synchrone les impédances d'ordre  $\frac{1}{2}$  modélisant les pièces massives par les modèles décrits dans l'équation (30) ; nous avons alors ré-identifié la machine à l'aide de tests SSFR<sup>8</sup> mais en alimentant en continu l'excitation de la machine afin de modifier son point de

<sup>8</sup> Les tests SSFR (StandStill Frequency Response) normalisés par la société IEEE, permettent d'obtenir les impédances opérationnelles d'une machine synchrone ou asynchrone en fonction de la fréquence lorsque le rotor de la machine est bloqué. Ces tests servent à identifier alors les éléments de modèles électriques équivalents [70].

fonctionnement magnétique (Figure 42). Nous avons supposé que seuls les paramètres magnétisants variaient avec l'état de saturation ce qui n'est pas tout à fait exact puisque des simulations par éléments finis montrent que les inductances de fuite et même les résistances varient avec la saturation.



**Figure 42 :** Banc expérimental de caractérisation SSFR en régime de saturation

Enfin, des simulations temporelles ont pu être menées à partir de la construction d'un modèle d'état généralisé linéaire d'ordre non entier. Ce modèle d'état est d'ordre élevé par rapport aux modèles classiques d'ordre entier, puisque la compacité du modèle d'ordre non entier disparaît dès qu'on revient dans le domaine temporel. La précision du modèle et son lien avec la physique restent cependant pertinents par rapport à notre démarche de dimensionnement.

Nous disposons ainsi d'un modèle d'état, certes d'ordre un peu élevé, mais qui permet de décrire les performances dynamiques du système en fonction de paramètres étroitement liés aux caractéristiques physiques de la machine (effet de peau, saturation). Une analyse fine de robustesse de la commande vis-à-vis de ces incertitudes paramétriques ou cet état de fonctionnement pourrait ainsi être menée sans aucune difficulté liée aux systèmes d'ordre non entier.

### 3.3 Modélisation simplexe de systèmes complexes [O. ENACHEANU, A. AMRANE]

Pour terminer ce mémoire, une autre application des modèles d'ordre non entier est illustrée pour modéliser la diffusion de l'énergie dans un système anisotrope : un réseau électrique. Les réseaux électriques présentent une structure de plus en plus complexe : nombreuses ramifications, présence de charges et sources multiples, présence de convertisseurs d'électronique de puissance. Dans ce cadre, il est souvent nécessaire de recourir à des techniques de réduction d'ordre pour modéliser les réseaux et les analyser [82][98].

On peut alors penser que la propriété de compacité des systèmes d'ordre non entier pourrait être utilisée pour la modélisation globale d'un réseau électrique. Mais comment faire le lien physique entre un réseau électrique et les modèles d'ordre non entier apparus en résolvant l'équation de diffusion du champ magnétique dans les machines électriques ?

Pour cela, nous sommes repartis de la théorie mathématique des objets fractals afin d'évaluer la pertinence d'utiliser cet outil de modélisation pour les réseaux électriques (le lecteur trouvera des généralités sur les outils fractals dans [34] ou [94]). Nous avons ensuite mené une étude

complète sur un réseau élémentaire de cellules (R-C) dont la structure ramifiée était inspirée du réseau fractal simple de Cantor, ceci afin de bien mettre en évidence les liens entre représentation géométrique, caractérisation et modélisation d'ordre non entier [90].

Nous avons ainsi montré que l'impédance de ce réseau présentait dans une certaine plage de fréquences, décrite par les paramètres physiques de ce réseau, un blocage de phase dont la valeur était directement liée à la dimension fractale ( $d_f$ ) du réseau ; l'impédance pouvait ainsi être décrite par un système d'ordre non entier d'ordre  $-(1-d_f)$ :

$$Z(\omega) \propto (j\omega)^{-(1-d_f)} \quad (31)$$

En dehors de cette zone, qui peut être cachée par les résonances du circuit, deux comportements asymptotiques prédominent : un comportement capacitif pour les basses fréquences et un comportement inductif pour les hautes fréquences.

Nous avons depuis mis en place des outils permettant de déterminer la dimension fractale de motifs / réseaux électriques réels. Ce calcul repose sur la méthode de comptage des boîtes, celles-ci correspondant dans le cas d'un réseau électrique à une bande passante fréquentielle. A titre d'illustration, la Figure 43.b représente la réponse fréquentielle du réseau électrique présenté sur la Figure 43.a.

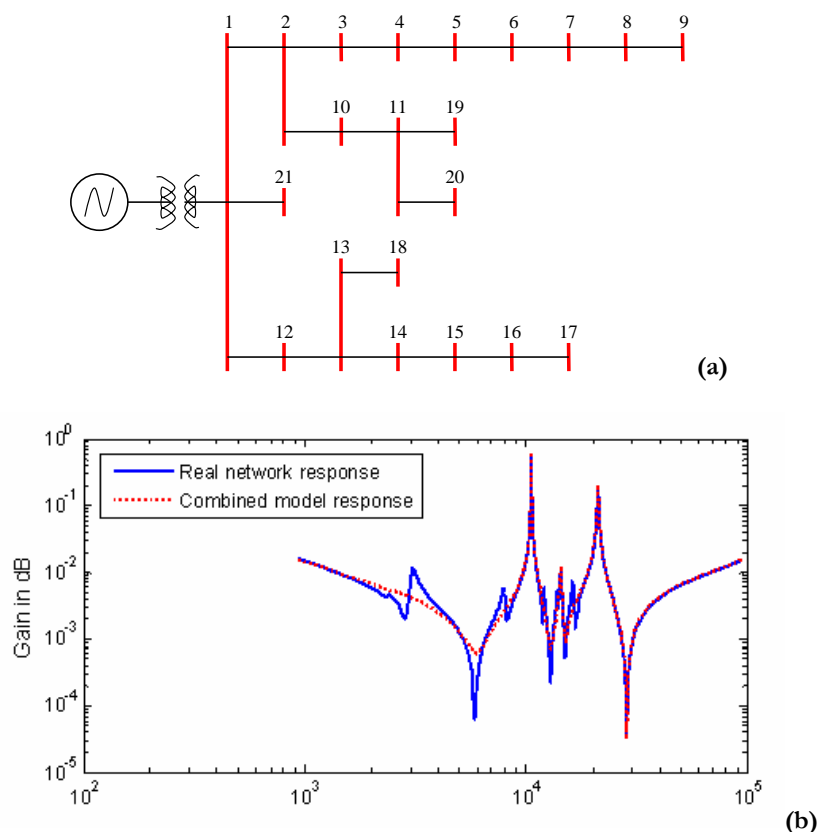


Figure 43 : Réponse fréquentielle d'un réseau électrique et modélisation fractale

Le modèle fréquentiel approché est caractérisé par l'équation :

$$Z(j\omega) = \left[ j\omega L + A.(j\omega)^{-(1-d_f)} + \frac{1}{j\omega C} \right] H(j\omega) \quad (32)$$

où  $d_f = 0,509$ . Le transfert  $H$  permet de modéliser les résonances et est identifié en soustrayant les comportements asymptotiques inductif et capacitif du réseau. Au final, par rapport à un modèle d'ordre entier classique utilisé pour modéliser le comportement du réseau sur la même bande passante, le nombre de paramètres nécessaire à sa caractérisation est nettement réduit. Le modèle fractal proposé, en incluant les résonances, comporte 24 paramètres alors que le modèle d'ordre entier en comporte 58. Par ailleurs, indépendamment des résonances, le modèle fractal a des liens très étroits avec la topologie et la physique du système.

Comme ces travaux relativement amont n'ont pas encore trouvé d'application dans l'analyse et la gestion d'un système de grande taille, nous n'irons pas plus loin dans la description de ces modèles. Ils pourraient cependant être utilisés pour l'analyse robuste du raccordement d'un groupe de génération à un réseau de grande taille, notamment avec des approches fréquentielles comme celles développées dans ce mémoire. Il faudrait cependant au préalable comparer cette approche avec les techniques classiques de réduction d'ordre de réseaux électriques par agrégation et évaluer les avantages des modèles fractals dans ce cadre d'étude.

#### 4. Conclusion

Les systèmes d'ordre non entier sont un outil de modélisation qui nous semble très intéressant pour répondre aux problématiques des systèmes électrotechniques complexes, avec leurs propriétés de compacité dans le domaine fréquentiel et leur très bonne représentativité physique. Ils ont ainsi montré leur apport pour la modélisation de dispositifs diffusifs (machines électriques, piles à combustibles, etc) ou de réseaux électriques pour lesquels de nombreuses études restent à mener avant de conclure quant à leur intérêt par rapport aux outils de modélisation classiques.

Il existe cependant certaines limitations freinant leur utilisation dans le domaine du génie électrique ; les réticences sont notamment liées à certains aspects théoriques liés à la dérivation non entière ou à leur compacité fréquentielle qui « explose » dans le domaine temporel. Le manque d'outils informatiques facilitant leur manipulation est également un point bloquant à leur plus large utilisation.

La principale perspective de travail de cette modélisation vise à utiliser ces modèles dans le cadre d'un co-dimensionnement. Nous avons en effet constaté à l'issue de la première partie, que les modèles utilisés pour appréhender à la fois le choix de la structure et de l'architecture de commande (voire du filtrage harmonique) étaient d'un ordre relativement élevé. Un important travail devra cependant être réalisé pour intégrer ces modèles d'ordre non entier dans un système électrique complet, même si le formalisme de chaque méthode proposée ne devrait pas être fortement modifié : les modèles d'état généralisés régissant des systèmes d'ordre non entier sont en effet assez effrayants par le nombre de variables d'état le constituant, mais restent tout à fait utilisables avec un outil de calcul comme Matlab<sup>®</sup>.

## CONCLUSION ET PROJETS DE RECHERCHE

Les principales activités de recherche que je mène depuis six ans sont présentées dans ce document et font apparaître un certain nombre de perspectives de recherche qui ne peuvent être placées sur le même plan ; ainsi chaque paragraphe intitulé « Conclusion et perspectives de travail » présentent des perspectives de recherche assez immédiates et je n'insisterai pas dessus. L'objectif de cette conclusion est de présenter deux projets de recherche complémentaires, plus généraux, permettant de poursuivre plus loin l'analyse de robustesse et lier les deux parties de ce mémoire.

Le premier axe de recherche consisterait ainsi à développer une **méthodologie de dimensionnement unifiée autour des systèmes d'ordre non entier** reposant sur la propriété de parcimonie des modèles.

Cette propriété peut en effet aider à relier la modélisation et la commande des systèmes. En effet, les outils de synthèse de correcteurs robustes auxquels nous nous sommes intéressés pour les réseaux à courant continu, sont d'ordre élevé, puisqu'ils doivent inclure l'ordre du système et celui du gabarit choisi pour caractériser ses performances. Pourquoi dès lors ne pas envisager de synthétiser un correcteur d'ordre non entier qui s'adapterait de manière optimale aux performances du système sur la base d'une modélisation qui s'inspirerait de celle présentée à la fin de la première partie ? La synthèse du contrôle permettrait ainsi d'intégrer un grand nombre de paramètres physiques avec un correcteur d'ordre réduit.

Des travaux ont montré qu'il était possible d'optimiser la forme du gabarit définissant la robustesse d'un correcteur de manière à éliminer au mieux l'influence des incertitudes paramétriques sur les performances du système. Ceci fait l'objet de la commande CRONE de troisième génération développée à l'IMS<sup>9</sup> et faisant déjà l'objet d'une implémentation pratique au GIPSA-lab de Grenoble, à travers la commande d'une transmission flexible et d'un bras souple. Il serait ainsi intéressant de comparer les performances d'un correcteur synthétisé par une approche  $H_\infty$  avec l'analyse de robustesse en performances, comme celle développée dans ce mémoire, avec celles issues d'une commande CRONE. Des collaborations pourraient ainsi permettre de conclure quant à l'intérêt des commandes d'ordre non entier sur les performances et la robustesse d'un système avec un nombre réduit de paramètres.

A titre d'exemple, la commande CRONE pourrait être intéressante pour tenir compte des incertitudes liées à l'état magnétique d'une machine, incertitudes modélisées dans le schéma équivalent par le modèle développé dans le thèse de S. Racewicz. Les travaux présentés dans [62] et [29] semblent montrer que cela serait tout à fait envisageable.

La méthodologie de conception robuste reposerait ainsi sur un formalisme fréquentiel unifié, permettant de garantir robustesse, et performances, à partir de modèles en lien fort avec la physique des différents composants.

---

<sup>9</sup> IMS : laboratoire de l'Intégration du Matériaux au Système : [www.ims-bordeaux.eu](http://www.ims-bordeaux.eu)

Le deuxième axe de recherche porterait sur la **robustesse liée à l'évolution de l'état de fonctionnement** de certains composants du système, notamment les dispositifs de stockage dont il faut surveiller l'état de charge ou le vieillissement, et la pile à combustible dont certains paramètres influencent considérablement les performances à court et moyen termes.

Plusieurs approches du problème existent ; on va par exemple chercher soit à adapter le correcteur ou les performances en fonction de la valeur de certains paramètres (approche « Système » de la commande LPV), soit à garantir le bon fonctionnement de ce composant évoluant dans le temps.

La première approche a déjà été présentée dans ce mémoire et devrait être traitée très prochainement pour le générateur électrochimique hybride GESI.

La deuxième approche, plus liée aux aspects de fiabilité ou sûreté de fonctionnement, est cependant proche de notre problématique. En effet, suivant les stratégies de gestion et les méthodes de commande mises en œuvre, les sollicitations de ces sources peuvent différer de manière assez importante. Par exemple, suivant la zone de fréquences caractérisant les sollicitations d'une batterie, ses performances sans doute et sa durée de vie peut-être en seront impactées.

S'il n'est pas possible de conclure quand au choix d'une stratégie de gestion pour optimiser certaines performances ou minimiser les pertes, la prise en compte de l'effet mémoire de différents composants comme les conditions de fonctionnement passées d'une batterie pourrait peut-être servir de juge de paix. Il me semble ainsi pertinent de comparer différentes stratégies de commande dynamique par rapport à un critère de fiabilité, qui peut dans certaines applications être prioritaires par rapport aux performances [58]. La sécurité de fonctionnement de systèmes intégrant des sources de stockage n'est pas nouvelle, mais le couplage avec les aspects de gestion énergétique semble relativement novateur.

Dans ce domaine, un important travail de modélisation est nécessaire pour associer un paramètre physique dynamique (par exemple une loi de commande) à une défaillance ou une perte d'efficacité d'un composant. La bibliographie recense un certain nombre de méthodes comme les réseaux de Pétri ou les réseaux bayésiens dynamiques qui me semblent pertinentes pour ce travail. Des collaborations avec des experts de la sûreté de fonctionnement et des défaillances de composants de stockage devront cependant être entreprises pour mener à bien ces travaux.

Pour les deux approches, il me semble important de poursuivre les travaux de **modélisation de dispositifs de stockage** notamment électrochimique. Compte tenu de la jeunesse technologique de ces composants, les modèles électriques et énergétiques de ces composants restent à améliorer, notamment pour intégrer les grandeurs thermiques ou des aspects liés à la technologie. L'objectif reste bien sûr à terme d'améliorer les stratégies de contrôle / commande mises en œuvre en intégrant ces modèles.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] sous la direction de **H. Abou-Kandil**, « La commande optimale des systèmes dynamiques », Traité IC2, série Systèmes automatisés, 2004
- [2] Site de l'ADEME : [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- [3] **F. Akli**, « Conception systémique d'une locomotive hybride », thèse de doctorat de l'INP Toulouse, 2008
- [4] **M. A. E. Alali**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat de l'Université L. Pasteur de Strasbourg, 2002
- [5] **P.L. Alger**, « Induction machines – their behaviour and uses », Gordon and Breach, New York, 1970
- [6] **A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue & al.**, « Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway », IEEE Transactions on XXX, Vol. , N°, pp. , April 2009
- [7] **S. Astier**, « Des machines à aimants permanents aux systèmes énergétiques autonomes. Systémique, électricité et développement durable », HDR de l'INP Toulouse, 2003
- [8] **M.Y. Ayad**, « Mise en oeuvre de supercondensateurs dans les sources hybrides continues », thèse de doctorat de l'INP Lorraine, 2004
- [9] **G. Balas, A. Packard, J. Doyle, K. Glover, R. Smith**, « Development of advanced control design software for researchers and engineers », IEEE American Control Conference, 1991
- [10] **P. Barrade, A. Rufer**, « Current capability and power density of supercapacitors: considerations on energy efficiency », proceedings of EPE conference, Toulouse, Sept. 2003
- [11] **P. Barrade, A. Rufer**, « Maquette de train alimenté par biberonnage : un outil d'enseignement et de recherche pluridisciplinaire », CETISIS, Toulouse, 2003
- [12] **R. Barrero, X. Tadoen, J. Van Mierlo**, « Quasi-static simulation methods for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles », IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2008
- [13] **F. Barruel**, « Influence des charges non linéaires sur le comportement et le dimensionnement d'un réseau de bord d'avion », thèse de doctorat de l'INPG, 2005
- [14] **M. Bautista, Y. Bultel and P. Ozil**, « Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Modeling: DC and AC Solutions », Trans IChemE, Part A, 82 (A7), pp. 907-917, July 2004
- [15] **F. Belhachemi**, « A physical based model of power electric double-layer supercapacitor », Industry Applications conference, Vol. 5, pp. 369-376, 2000
- [16] **A. Benchellal, T. Poinot, J.C. Trigeassou**, « Fractional modelling and identification of a thermal process », Journal of Vibration and Control, Vol. 14, N°9, pp. 1403-1414, 2008
- [17] **J. Bernard**, « Véhicule hybride à pile à combustible : dimensionnement et stratégie de commande », Doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007
- [18] sous la direction de **J. Bernussou**, Commande robuste, Hermès, 1996, ISBN 2-86601-500-2.



- [19] **O. Bohlen**, “Ageing behaviour of electrochemical double-layer capacitors”, Part. I, Experimental study and ageing model”, *Journal of Power Sources*, Vol. 172, pp. 468-475, 2007
- [20] **H. Bourles**, “Optimisation et commande optimale”, ENS de Cachan, 1996
- [21] **A. Bouscayrol** &al, “Different energetic descriptions for electromechanical systems”, EPE Conference, Toulouse, 2005
- [22] **Y. Brunet**, *Nouvelles technologies de l'énergie, stockage et technologie à émission réduite*, Hermès, 2007
- [23] **T. Brumleve**, “Transmission line equivalent circuit models for electrochemical impedances”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, No. 126, pp. 73-104, 1981
- [24] **J. Bu, M. Sznaier, W. Zi-Qin, I. Batarseh**, « Robust controller design for a parallel resonant converter using  $\mu$ -synthesis”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 12, N°5, pp. XXX, Sept. 1997
- [25] **H. Buhler**, “Réglage par logique floue”, Presses polytechniques et Universitaires Romandes, 1994
- [26] **S. Buller, E. Karden**, « Modelling the dynamic behaviour of supercapacitors using Impedance Spectroscopy”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, N°6, pp. 1622-1626, Nov. 2002
- [27] **S. Buller**, « Impedance-based simulation models for energy storage devices in advanced automotive power systems”, PhD from RWTH, Aachen, Germany, 2002
- [28] **S. Buso**, “Design of a robust voltage controller for a Buck-Boost converter using  $\mu$ -synthesis”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, N°2, March 1999
- [29] **A.J. Calderon, B.M. Vinagre, V. Feliu**, “Fractional order control strategies for power electronic buck converters”, *Signal Processing*, Signal Processing, Vol. 86, pp.2803-2819, 2006
- [30] **M.W. Carlen, T. Christen**, « Theory of Ragone plots », *Journal of Power Sources*, 2000
- [31] Site **CESA** (California Energy Storage Association) : <http://www.storagealliance.org/whystorage-resources.html>
- [32] **S. Chandrasekaran**, « Subsystem design in aircraft power distribution systems using optimization », PhD in Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State university, 2000
- [33] **K. Chen, P. Delarue, A. Bouscayrol, R. Trigui**, “Influence of control design on energetic performances of an electric vehicle”, *IEEE Trans. on XX*, Vol. , N°, 2007
- [34] **G. Cherbit**, « Fractals : dimensions non entières et applications », Masson, Paris, 1987
- [35] **T. Christen, C. Ohler**, « Optimizing energy storage devices using Ragone plots », *Journal of Power Sources*, 2002
- [36] **B.E. Conwayand, W.G. Pell**, “Power limitations of supercapacitor operation associated with resistance and capacitance distribution in porous electrode devices”, *Journal of Power Sources*, Vol. 105, pp. 169-181, 2002
- [37] **J.M. Corrêa**, “An electrochemical-based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 1103-1112, 2004
- [38] **J. Courault**, « Comparaison des réseaux alternatifs et continus du point de vue de leur stabilisation. Régimes transitoires et pollution harmonique », *REE n°9*, 2000

- [39] sous la direction de **G. Dauphin-Tanguy**, « Les bond graphs », Collection IC2, Hermès Science, 2000
- [40] **R. De Levie**, « Electrochemical response of porous and rough electrodes. Advances in Electrochemistry and Electrochemical engineering », Vol. 6, Wiley Interscience, pp. 329-397, 1967
- [41] **S. Delprat**, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles », Doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002
- [42] **E. Destobbeleer, M. Ostojski, V. Sabate**, « La MLI dans le redresseur d'entrée des locomotives alimentées en monophasé », RGE n°5, Mai 1992
- [43] **J.P. Diard, B. Le Gorrec, C. Montella**, Cinétique électrochimique, Hermann.
- [44] **M.D. Di Benedetto** &al, « Wireless ventilation control for large-scale systems : the mining industrial case », proc. of IEEE SECON Workshops, 2009
- [45] **T.K. Dong**, « Contribution à la modélisation dynamique des batteries Li-ion pour l'application photovoltaïque et stockage connecté au réseau », Thèse de l'INP Grenoble, 2010
- [46] **P. Dorato**, « A historical review of robust control », IEEE Control Systems magazine, 1987
- [47] **A. Drolia**, « An approach to connect ultracapacitor to fuel cell powered electric vehicle and emulating fuel cell electrical characteristics using switched mode converter », International Electronics CON conference, vol. 1, pp. 897-901, 2003
- [48] **G. Duc, S. Font**, « Commande  $H_\infty$  et  $\mu$ -analyse », Hermès, Paris, 1999
- [49] **G. Duc**, « Etude de grands systèmes par modèles agrégés et méthode de perturbation », Thèse de l'Université Paris XI, Orsay, 1981
- [50] **A. Emadi, M. Ehsani, J.M. Miller**, Vehicular electric power systems, Editions, ISBN
- [51] Site **CESA** (California Energy Storage Association) : <http://www.storagealliance.org/whystorage-resources.html>
- [52] Site **ESA** (Electricity Storage Association) : [www.electricitystorage.org/](http://www.electricitystorage.org/)
- [53] **I. Etxeberria-Otadui**, « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – Application à la qualité de l'énergie », thèse de doctorat de l'INPG, 2003
- [54] **Z. Feng**, « Développement d'un outil de dimensionnement du système hybride EnR-H2 pour PEPITE », mémoire de DRT de l'INPG, 2008
- [55] **X. Feng, J. Liu, F. C. Lee**, « Impedance specifications for stable DC distributed power systems, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 17, No. 2, pp. 157 – 162, 2002
- [56] **P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, M. Chilali**, « LMI Control Toolbox », the Mathworks, 1995
- [57] **M. Garcia Arregui**, « Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors », thèse de doctorat, INP Toulouse, 2007
- [58] sous la direction de **S. Gentil**, « Supervision des procédés complexes », Hermès, 2007
- [59] **H. Gualous**, « Stockage et gestion de l'énergie électrique dans les systèmes hybrides : applications au transport terrestre », HDR de l'Université de Franche-Comté, 2005

- [60] **P. Guérin**, « Contribution à l'étude des perturbations harmoniques des réseaux de bord des navires – Approches déterministe et stochastique », thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 1996
- [61] **S. Guffon**, « Modélisation et commandes à structure variable de filtres actifs de puissance », thèse de doctorat de l'INPG, 2000
- [62] **S. Gumussoy, D. Henrion, M. Millstone, M.L. Overton**, « Multiobjective robust control with HIFOO 2.0, proc. of the 6<sup>th</sup> IFAC Symposium on Robust Control Design, 2009
- [63] **W. Hancache**, « Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible », Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008
- [64] **J. Hamelin**, "Dynamic behaviour of a PEM fuel cell stack for stationary applications", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 625-629, 2001
- [65] **M. Harfman Todorovic, L. Palma, P. Enjeti**, "Design of a wide input range DC-DC converter with a robust power control scheme suitable for fuel cell power conversion", IEEE XXX, vol., pp. 374-379, 2004
- [66] **Y. He, Q.G. Wang**, "An improved iLMI method for static output feedback control with application to multivariable PID control", IEEE Trans. on Automatic Control, 51(10), p. 1678-1683, 2006
- [67] Projet **HOMES**. <http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/presse/dossiers/projet-homes.page>
- [68] **J. Horno, M.T. Garcia-Hernandez**, "Digital simulation of electrochemical process by the network approach", Journal of Electroanalytical Chemistry, No. 352, pp. 83-97, 1993
- [69] **IDEA (GIE)**, site internet : <http://www.g2elab.grenoble-inp.fr/recherche/gie-idea-groupement-d-interet-economique-inventer-la-distribution-electrique-de-l-avenir--197578.kjsp>
- [70] **IEEE Std**, StandStill Frequency Response tests procedure, 1995
- [71] Sites internet du projet **ITER** : <http://www.itercad.org/projet.php> et <http://www.iter.org/>
- [72] **I Jadric**, "Modeling and Control of a Synchronous Generator with Electronic Load", Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Jan 5, 1998
- [73] **L. Jang, K. Yungtaek, R.E. Erickson**, "Physical Origins of Input Filter Oscillations in Current Programmed Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 7, No. 1, Jan 1992
- [74] **L. Jong-Lick, L. Jiun-Shang**, « Robust controller design for a series resonant converter using  $\mu$ -synthesis », IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 14, N°5, Sept. 1999
- [75] **L. Jourdan**, « Stratégie de pré-dimensionnement de convertisseurs statiques : application à une alimentation 42V-14V réversible pour l'automobile », thèse de doctorat de l'UJF, Grenoble, 2002
- [76] **M. Kamoun, M. Pouloujadoff**, "Accounting of saturation and cross-saturation in a dynamic stability study", Electrical Power Systems, Res. 10, pp. 55-61, 1986
- [77] **K. Khang**, « Commandes robustes d'un actionneur synchrone », thèse de doctorat de l'INPG, 1996
- [78] **T. Khaorapong**, « Modélisation d'ordre non entier des effets de fréquence dans les barres rotatives d'une machine asynchrone », thèse de doctorat de l'INPT, 2001

- [79] B. Kisanin, G.C. Agarwal, « Linear control systems », Kluwer Academic and Plenum Publishers, ISBN 0-306-46743-7
- [80] K.P. Kovacs, “On the theory of cylindrical motor AC machine including main flux saturation”, IEEE Trans. on Power Apparatus, PAS-103, N°4, Sept. 1984
- [81] E. Kuhn, “Contribution à la conception optimale d’une motorisation hybride parallèle : choix d’un modèle d’accumulateur”, thèse de doctorat de l’Université Technologique de Compiègne, 2004
- [82] P. Kundur, « Power system stability and control », Electric Power Research Institute, Mc-Graw Hill Education, 1994
- [83] O. Langlois, « Conception d’un réseau de secours électrique pour l’aéronautique », thèse de doctorat de l’INPT, 2006
- [84] E. Laroche, « Robustness analysis of nonlinear systems – Application to induction motor », proceedings of IFAC World Congress., Prague, July 2005
- [85] L.R. Lewis, B.H. Cho, F.C. Lee, B.A. Carpenter, “Modeling, Analysis and Design of Distributed Power Systems”, IEEE Power Electronics Specialists Conf., 1989
- [86] J. Larminie, J. Lowry, «Electric vehicle technology », Wiley (2003), ISBN 0-470-85163-5
- [87] F.C. Lee, J.H.Q. Ly, “Stability Robustness Against Real Parameter Uncertainty of DC Electrical Power Conversion Systems”, Proc on the 1<sup>st</sup> regional Conference on Aerospace Control Systems”, May 1993
- [88] P. Liutanakul, « Stabilité des réseaux embarqués. Interaction puissance – structure – commande », thèse de doctorat de l’INPL, Janvier 2007
- [89] D. Linden, T. Reddy, “Handbook of batteries”, McGraw-Hill (2002), ISBN 0-07-135978-8
- [90] S.H. Liu, « Fractal model for the AC response of a rough interface », Phys. Rev. Lett., 55, pp. 529-532, 1985
- [91] A. Lopez de Heredia Bermeo, “Commandes avancées des systèmes dédiés à l’amélioration de la qualité de l’énergie”, thèse de doctorat de l’INPG, 2006
- [92] K.P. Louganski, “Modelling and analysis of a DC power distribution system in 21<sup>st</sup> century airlifters”, Msc in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State university, 1999
- [93] sous la direction de JP Louis, Modèles pour la commande des actionneurs électriques, Hermès, 2004.
- [94] B.B. Mandelbrot, « Les objets fractals : forme, hasard et dimension. Survol du langage fractal », Flammarion, Paris, 1989
- [95] A. Marino, « Caractérisation et modélisation des pertes magnétiques d’une machine asynchrone fonctionnant en charge », Thèse de doctorat de l’INP Grenoble, 2003
- [96] I. Mayergoyz, « Nonlinear diffusion of electromagnetic fields: with applications to eddy currents and superconductivity », Academic press, 1998
- [97] R.D. Middlebrook, « Input filter considerations in design and applications of switching regulators », Proc. IEEE IAS, pp. 366-382, 1976
- [98] B.C. Moore, “Principal component analysis in linear systems: controllability, observability and model reduction”, IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-26, n°1, pp. 17-32, 1981

- [99] E. Morin, « Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système », thèse de doctorat de l'UJF, 2005
- [100] B. Multon, « Motorisation des véhicules électriques », Techniques de l'Ingénieur, E3996, 2001
- [101] H. Nguyen, « Méthodes et outils pour la conception de composants intégrés dans un réseau électrique embarqué », thèse de doctorat de l'UJF Grenoble, 2009
- [102] N.S. Nise, « Control systems engineering », Addison-Wesley editions, 1995, ISBN 0-8053-5424-7
- [103] K.B. Oldham, J. Spanier, "The fractional calculus – theory and applications and differentiation and integration to arbitrary order", Academic Press, New-York, 1974
- [104] E. Ostertag, « Commande et estimation multivariables », TechnoSup, Ellipses, Paris, 2006
- [105] A. Oustaloup, « La dérivation non entière », Hermès, Paris, 1995
- [106] A. Oustaloup, B. Mathieu, « La commande CRONE – du scalaire au multivariable », Hermès 1999
- [107] A. Oustaloup, « La robustesse : analyse et synthèse de commandes robustes », Hermès, Paris, 1994
- [108] A. Oustaloup, J. Sabatier, X. Moreau, « From fractal robustness to the CRONE approach », Proceedings of ESAIM, 1998
- [109] E. Ostertag, « Commande et estimation multivariables », TechnoSup, Ellipses, Paris, 2006
- [110] N. Patin, « Analyse d'Architectures, Modélisation et Commande de Générateurs pour Réseaux Autonomes », thèse de l'ENS Cachan, Sept. 2006
- [111] A. Payman, S. Pierferici, F. Meiroby-Tabar, "Energy management in a fuel cell / supercapacitor multisource/multiload electrical hybrid system", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, n°12, pp. 2681-91, December 2009
- [112] D. Peaucelle, D. Henrion, Y. Labit, K. Taitz, « User's guide for SeDuMi interface », LAAS-CNRS, 2002
- [113] M.C. Pera, « Modélisation de systèmes de conversion d'énergie électrique complexes », HDR de l'Université de Franche-Comté, 2006
- [114] P. Petitclair, « Modélisation et commande de structures FACTS. Application au STATCOM », thèse de doctorat de l'INP Grenoble, 1997
- [115] S. Pierfederici, R. Meuret, F. Meiroby-Tabar, B. Davat, « Contribution à l'analyse de stabilité des systèmes distribués. Applications aux réseaux de bord d'avions », J3ea, vol.4, n°2, 2005
- [116] S. Pierfederici, « Synthèse des études menées sur les systèmes interconnectés », HDR de l'INP de Lorraine, 2007
- [117] I. Podlubny, "Fractional Differential Equations", Mathematics in Science and Engineering, Vol. 198, Academic Press, New-York, 1999
- [118] C. Poussot-Vassal, « Commande robuste LPV multivariable de châssis automobile », thèse de doctorat de l'INPG, 2008
- [119] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng, "Control of Fuel Cell Power Systems", Advances in Industrial Control, Springer, 2004

- [120] S. Ragon & al, "Optimal design of a power distribution subsystem", AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Jan. 2000
- [121] D.A.J. Rand, R. Woods, R.M. Dell, Batteries for electric vehicles, John Wiley, ISBN 0 86380 2052
- [122] J. Regnier, « Conception de systèmes hétérogènes en génie électrique par optimisation évolutionnaire multicritères », thèse de doctorat, INP Toulouse, 2003
- [123] N. Retière, « Etude de défauts dans les associations onduleur – machine asynchrone. Exemple d'un chaîne de traction », thèse de doctorat de l'INPG, 1997
- [124] M.E. Reyes-Melo, J.J. Martinez-Vega, C.A. Guerrero-Salazar, U. Ortiz-Mendez, « Application of fractional calculus to modelling of relaxation phenomena of organic dielectric materials », IEEE International Conference on solid dielectrics, Toulouse, 2004
- [125] D. Riu, « Modélisation d'ordre  $\frac{1}{2}$  des machines électriques », thèse de doctorat de l'INPG, 2001
- [126] L.C. Rosario, P.C.K. Luk, « Implementation of a modular power and energy management structure for battery – ultracapacitor powered electric vehicles », IET Hybrid Vehicle Conference, p. 141-156, 2006
- [127] J. Sabatier, « La dérivation non entière en modélisation et commande robuste », HDR de l'Université de Bordeaux 1, 2008
- [128] A.P. Sage, C.C. White, « Optimum systems control », Prentice Hall, 1977
- [129] R. Saisset, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques », thèse de doctorat, INP Toulouse, 2004
- [130] F.R. Salmassi, "Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison and future trends », IEEE Trans. on vehicular technology, Vol. 56, No.5, Sept. 2007
- [131] W. Scheider, "Theory of the frequency dispersion of electrode polarization. Topology of networks with fractional power frequency dependence", J. Phys. Chem., 79, pp. 127-136, 1975
- [132] K. Sik Kim, L. Benguigui, M. Marinov, "The fractal structure of Seoul's public transportation", Cities, Vol. 20, n°1, pp.31-39, Feb. 2003
- [133] S. Skogestad, I. Postlethwaite, "Multivariable feedback control. Analysis and design", John Wiley & sons, 2<sup>nd</sup> edition, 2005
- [134] J.P. Sorrel, « Architectures, conception et protection des réseaux de distribution, REE n°9, 2000
- [135] G. Stein, M. Athans, "The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 32, no. 2, 1987
- [136] S.D. Sudhoff, K.A. Corzine, S.F. Glover, H.J. Hegner, H.N. Robey Jr, "DC Link Stabilized Field Oriented Control of Electric Propulsion Systems", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, March 1998
- [137] K.-W. Suh, A.G. Stefanopoulou, "Coordination of converter and fuel cell controllers", International journal of energy research, vol. 29, 2005, pp. 1167-89
- [138] K.W. Suh, "Modelling, analysis and control of fuel cell hybrid power systems", PhD from University of Michigan, 2006

- [139] P. Thounthong, "Control strategy of fuel cell / supercapacitor hybrid power sources for electric vehicle", *Journal of Power Sources*, vol. 158, pp. 806-814, 2006
- [140] P. Thounthong, S. Rael, B. Davat, "Test of a PEM fuel cell with low voltage static converter", *Journal of Power Sources*, 2005
- [141] P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Sethakul, S. Pierfederici, B. Davat, "Fuel cell power regulation based-on differential flatness theory for high-power",
- [142] Projet TWENTIES. <http://www.rte-france.com/fr/actualites-dossiers/a-la-une/l-union-europeenne-soutient-la-recherche-pour-l-accueil-de-l-energie-eolienne-sur-le-reseau>
- [143] Y.S. Tzeng, R.N. Wu, N. Chen, "Unified AC/DC power flow for DC system simulations in DC electrified transit railways", *IEE Power Applications*, vol. 142, No.6, November 1995
- [144] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, H. Peng, « Current management in a hybrid fuel cell power system : a model-predictive control approach », *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 14 (6), pp.1047-1057, Nov. 2006
- [145] I. Valero, « Commande de pile à combustible », thèse de doctorat de l'INP Grenoble, 2006
- [146] P. Venet, « Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie », HDR Université Claude Bernard – Lyon 1, 2007
- [147] A. der Vernassian, G.B. Charehpetian, "Decoupled AC/DC load flow for Monte-Carlo simulation of metro power systems", *Iranian Journal of Science and Technology, TransactionsB*, Vol. 28, No. B3
- [148] S. Walkiewicz, Y. Bultel, B. Le Gorrec, J.-P. Diard, "Modeling impedance diagrams of fuel cell", 4<sup>th</sup> International Symposium on Electrocatalysis, Dusseldorf, September 2002
- [149] C. M. Wildrick, F. C. Lee, B. H. Cho, B. Choi, "A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 10, No. 3, pp. 280 – 285, 1995
- [150] F. Wurtz, "Conceptions de la conception pour le génie électrique: de l'approche « Objets –Savoirs – Méthodes – Outils » à l'approche « Systèmes – Connaissances – Compétences - Organisations », HDR Grenoble-INP, 2008
- [151] D. Yu, S. Yuvarajan, "Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, vol. 142, pp. 238-242, 2005
- [152] G. Zames, B. Francis, "Feedback, minimax sensitivity and optimal robustness", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-28, N°5, May 1983
- [153] J.M. Zhang, XG. Xie, DZ. Jiao, Z. Qian, « Stability Problems and Input Impedance Improvement for Cascaded Power Electronic Systems », *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC'04*, Feb. 2004
- [154] F. Zheng, Q.G. Wang, T.H. Lee, "On the design of multivariable PID controllers via LMI approach", *Automatica*, 38, 517-526, 2002
- [155] K. Zhou, J.C. Doyle, K. Glover, « Robust and Optimal control », Prentice Hall, New-Jersey, 1995
- [156] A. Zin, « Sur la commande robuste de suspensions automobiles en vue du contrôle global de chassis », thèse de doctorat de l'INPG, 2005

- [157] H. Zhu, «New multi-pulse diode rectifier average models for AC and DC power systems studies », PhD from Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005





## **ANNEXES**

### **ACTIVITES DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT**



## CURRICULUM VITAE

### Emploi actuel

---

Maître de Conférences 63<sup>ème</sup> section à l'Institut Polytechnique de Grenoble (Grenoble-INP)  
Nomination au 1<sup>er</sup> Septembre 2003

### Cursus universitaire

---

- 1999 - 2002 : **Thèse** au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (futur G2Elab)  
Modélisation des courants induits dans les machines électriques par des systèmes d'ordre un demi
- 2002 - 2003 : **A.T.E.R.** à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (actuelle Polytech'Nantes)  
Recherche effectuée à IREENA – Saint-Nazaire
- Depuis 2003 : **Maître de Conférences** à l'ENS Energie, Eau, Environnement (ex ENSIEG) – Travaux de recherche effectués au G2Elab

### Titres universitaires

---

- Juin 1999 : **Ingénieur de l'ENSIEG** - *Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble – INPG* – Option Commande et Actionneurs
- Sept. 1999 : **DEA de Génie Electrique** – *Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble* – Modélisation d'un four à arcs électriques en collaboration avec Pechiney.
- Déc. 2001 : **Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble** – *Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble* – Modélisation des courants induits dans les machines électriques par des systèmes d'ordre un demi – Directeurs de thèse : Marcel Ivanès et Nicolas Retière  
Jury : Alain Oustaloup (président et rapporteur), Innocent Kamwa (rapporteur), Robert Perret (examineur), Marcel Ivanès et Nicolas Retière.

### Publications

---

- Participation à des ouvrages : **1**  
Articles de revue **acceptés et publiés : 6**  
Articles de congrès internationaux **acceptés et publiés : 28**  
Articles de congrès nationaux **acceptés et publiés : 3**  
Articles de revue **soumis : 3**

## **Encadrements de Thèse et de Masters**

---

Thèses encadrées : **5** (dont 4 soutenues et 1 abandon en fin de 4<sup>ème</sup> année)

Thèses en cours d'encadrement :

**2** démarrées en 2007

**2** démarrées en 2008

Masters Recherche encadrés depuis 2003 : **11**

## **Responsabilités d'enseignement et de recherche**

---

Membre de la CSE 63<sup>ème</sup> section MEGE

Responsable du projet ANR Jeunes Chercheurs « MODECO »

Co-responsable du projet BQR INPG « GESI »

Co-responsable du projet BQR Grenoble-INP « COGESI »

Nombreuses participations à des contrats de recherche : programmé européen MOET, contrats de recherche avec Alstom T&D, contrat avec Schneider Electric.

Responsable de l'option PDSE de l'ENSIEG (jusqu'en 2007)

Responsable de l'option OSA et de la troisième année de la filière SEM (2007-2009)

Responsable de la filière Systèmes Energétiques et Marchés de l'Ense3 depuis 2009.

Membre du Conseil et du Conseil restreint de l'Ense3 depuis 2008.

## ACTIVITES D'ENCADREMENT

### Thèses

[2004-2007-1] Octavian ENACHEANU, « Modélisation fractale des réseaux électriques ». Bourse MENRT (Enc. : N. Retière (50%) – D. Riu (50%))

[2004-2007-2] Sylvie CHENH, « Optimisation de l'architecture des réseaux de tramway du futur », contrat CIFRE ALSTOM (Enc. : N. Retière (50%) – D. Riu (50%))

[2005-2008] Sébastien SAILLER, « Génération Electrochimique et Stockage Ilôtés », bourse MENRT / contrat BQR (Enc. : D. Riu (50%) – F. Druart (50%))

[2006-2009-1] Matthieu SAUTREUIL, « Etude de stabilité de réseaux d'avion HVDC », contrat MOET (Enc. : N. Retière (50%) – D. Riu (50%))

[2006-2009-2] Szymon RACEWICZ, « Identification et modélisation des machines synchrones fonctionnant comme starter – générateur », thèse en co-tutelle avec Gdansk, contrat MOET (Enc. : N. Retière (33%) – P. Chrzan (33%) – D. Riu (33%))

[2007-2010-1] Anis AMRANE, « Autosimilarité des réseaux et dispositifs électriques », bourse MENRT fléchée (Enc. : N. Retière (50%) – D. Riu (50%))

[2007-2010-2] Kelli MAMADOU, « Optimisation et participation des dispositifs de stockage dans les systèmes photovoltaïques », ADEME/ CEA (INES) (Enc. : Y. Bultel (33%) – E. Lemaire (33%) - D. Riu (33%))

[2008-2011-1] Rémi VIAL, « Co-conception de réseaux HVDC », bourse MENRT/contrat Carnot (Enc. : N. Retière (50%) – D. Riu (50%))

[2008-2011-2] David HERNANDEZ, « Commande optimale de générateurs électrochimiques », bourse MENRT/ contrat BQR (Enc. : O. Sename (50%) – D. Riu (50%))

**Démarrage de 2 thèses en Octobre 2010.**

### Thèse CNAM

[2006-2007] Christophe RIGONI, Conception et installation d'un réseau industriel dans le cadre de la plate-forme PREDIS

### MASTER Recherche

[2000] Said BENZAZA, « Modélisation d'un four à arcs électriques » (Enc. : M. Ivanès (20%) – D. Riu (80%))

- [2004-1]** Yasser DIAB, « Modélisation fractionnaire des diodes PIN » (Enc. : JL Schanen (10%) – D. Riu (90%))
- [2004-2]** Tien DIEP THANH, « Modélisation fractionnaire des transformateurs par des systèmes d'ordre  $\frac{1}{2}$  » (Enc. : D. Riu (100%))
- [2004-3]** Siméon DIAMPENI KIMBAKALA, « Architectures optimales d'un réseau électrique de bâtiment » (Enc. : N. Retière (40%) – D. Riu (60%))
- [2005-1]** Muhammad USMAN IFTHIKAR, « Modélisation fractionnaire de pile à combustible » (Enc. : Y. Bultel (10%) – D. Riu (90%))
- [2005-2]** Szymon RACEWICZ, « Modélisation des machines synchrones par des systèmes d'ordre  $\frac{1}{2}$  » (Enc. : N. Retière (20%) – D. Riu (80%))
- [2006-1]** Mathieu SAUTREUIL, « Etude statique et dynamique d'un réseau de tramway » (Enc. : S. Chenh (20%) - D. Riu (80%))
- [2006-2]** Petre ENCIU, « Apport de la modélisation fréquentielle à l'analyse des défauts dans les réseaux électriques » (Enc. : O. Enacheanu (50%) – D. Riu (50%))
- [2007]** Amir AHMIDI, « Apport des outils stochastiques pour l'analyse de stabilité d'un réseau électrique » (Enc. : M. Sautreuil (50%) – N. Retière (25%) – D. Riu (25%))
- [2008-1]** David HERNANDEZ, « Commande robuste d'un système aéronautique embarqué » (Enc. : M. Sautreuil (50%) – N. Retière (25%) – D. Riu (25%))
- [2008-2]** Rémi VIAL, « Nouvelles structures de conversion pour une meilleure récupération énergétique. Application aux réseaux de tramway » (Enc. N. Retière (20%) – D. Riu (80%))
- [2009]** Jean-Vallère VIALLET, « Commande optimale d'un système aéronautique alimenté par pont redresseur à MLI » (Enc. : M. Sautreuil (50%) – N. Retière (25%) – D. Riu (25%))

## LISTE DES PUBLICATIONS

### Ouvrages

[O-2005] D. Riu, N. Retière, « Modelling of diffusion equation using implicit half-order systems», Fractional differentiation and its applications, participation à un chapitre, 2005, ISBN 3-86608-026-3

### Revue internationale

[RI-01] D. Riu, N. Retière, « Modélisation des machines électriques par des systèmes d'ordre un demi », Revue Internationale de Génie Electrique, 2002

[RI-02] D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, « Diffusion phenomenon modelling by half-order systems: application to squirrel-cage induction machine », Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242-245, 2002, pp. 1243-45

[RI-03] D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, « Induced currents modeling by half-order systems – Application to hydro- and turbo-alternators », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, No. 1, March 2003, pp. 94-99

[RI-06] M. Usman Iftikhar, D. Riu, F. Druart, S. Rosini, Y. Bultel, N. Retière, “Dynamic modelling of proton exchange membrane fuel cell using non-integer derivatives”, Journal of Power Sources, Vol. 160, Issue 2, October 2006, pp. 1170-1182

[RI-08] D. Riu, N. Retière, O. Enacheanu, “Stability study of electrical power systems modelled with half-order systems”, Journal Européen des Systèmes automatisés JESA, Vol. 42, 6-8, 2008, pp. 911-922

[RI-10-1] D. Hernandez, D. Riu, O. Sename, F. Druat, « A robust multivariable approach for hybrid fuel cell supercapacitor power generation system », special issue “Fuel Cells”, EPJ Applied Physics, *accepté pour parution en Décembre 2010*

[RI-10-2] R. Vial, D. Riu, N. Retière, “Optimal design of a new HVDC supply network for light rail system”, IEEE Transactions on Power Electronics, *en soumission*

[RI-10-3] A. Amrane, D. Riu, N. Retière, “Fractal geometry applied to electrical power networks modelling”, International Journal of Electrical Power and Electrical Systems, *en soumission*

[RI-10-4] M. Sautreuil, D. Riu, N. Retière, O. Sename, « Robust control for optimal design of aircraft power distribution subsystems », Special session “The more electric aircraft: power electronics, machine and drives”, IEEE Trans. on Industrial Electronics”, *en soumission*

### Conférences internationales

[CI-00] D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, « Electric machine modeling by half-order systems », ICEM'00, Helsinki, Finlande,

[CI-01-1] D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, « Turbine generator modeling by non-integer order systems », IEMDC'01, Cambridge, Massachussets, 19-21 Juin 2001



- [CI-01-2]** D. Riu, N. Retière, « Half-order system modeling of hydro and turbo alternators », UPEC'01, Swansea, 2001
- [CI-01-3]** D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, « Diffusion phenomenon modelling by half-order systems », JEMS'01, Grenoble, 2001
- [CI-02]** D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, « Modélisation fractionnaire des machines électriques tournantes : de leur caractérisation fréquentielle à leur réponse temporelle », CIFA'2002, Nantes.
- [CI-03]** D. Riu, P. Guérin, N. Retière, « Transformer modelling by half-order systems », EPE'03, Toulouse, 2-4 Septembre 2003
- [CI-04-1]** D. Riu, N. Retière, « Implicit half-order systems utilisation for diffusion phenomenon modelling », IFAC FDA'04, Bordeaux, 22-24 Juillet 2004
- [CI-04-2]** D. Riu, N. Retière, D. Linzen, « Half-order modelling of supercapacitors », EPE'PEMC, Riga, Lettonie, Septembre 2004
- [CI-06-1]** S. Racewicz, M. Michna, D. Riu, P.J. Chrzan, « Identyfikacja parametrów maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi metoda częstotliwościowa », XLI<sup>nd</sup> International Symposium on Electrical Machines SME 2006, 3-6 July, Cracow, Poland
- [CI-06-2]** S. Racewicz, D. Riu, N. Retière, P.J. Chrzan, « Half-order modelling of turboalternators – An adapted method of parameter identification », International Conference on Electrical Machines, 2-5 September, Chania, Crete
- [CI-06-3]** O. Enacheanu, D. Riu, N. Retiere, « Fractional order and fractal modelling of electrical networks », Fractional Differential Applications IFAC FDA'06, 17-19 July 2006, Porto, Portugal
- [CI-06-4]** O. Enacheanu, D. Riu, N. Retiere, P. Enciu, « Identification of fractional order models for electrical networks », IECON, 7-10 November, Paris, France
- [CI-07]** S. Chenh, M. Sautreuil, D. Riu, N. Retière, « Quasi-static decoupled load-flow modelling of a power supply network with AC-DC converters applied to light rail systems », EPE'07, Aalborg, Denmark, Sept. 2007
- [CI-08-1]** O. Enacheanu, D. Riu, N. Retière, « Half-order modelling of electrical networks – Application to stability studies », IFAC'08, 2008, Séoul, Corée du Sud, Juil. 08
- [CI-08-2]** S. Sailler, F. Druart, D. Riu, P. Ozil, « Simulation of PEMFC – Supercapacitor hybrid system », 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering ESCAPE, Lyon, France
- [CI-08-3]** S. Racewicz, D. Riu, N. Retière, G. Meunier, P. Labie, P. Chrzan, « Half-order analytical modelling of ferromagnetic sheet – Validation with finite elements simulation », Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits EPNC'08, Lille, France, 2-4 Juillet 2008.
- [CI-08-4]** M. Sautreuil, N. Retière, D. Riu, O. Sename, « A Generic Method for Robust Performance Analysis of Aircraft DC Power Systems », IECON, 10-13 Novembre 2008, Orlando, Etats-Unis
- [CI-08-5]** D. Hissel, C. Turpin &al, “A review of existing modelling methodologies for PEM fuel cell systems”, FDFC, 10-12 Décembre 2008, Nancy, France
- [CI-09-1]** D. Hernandez, M. Sautreuil, N. Retière, D. Riu, O. Sename, “A new methodology for aircraft HVDC power systems design”, IEEE ICIT'09, Melbourne, Australie, 9-12 Février 2009.

**[CI-09-2]** S. Racewicz, D. Riu, N. Retière, P. Chrzan, « Non linear half-order modelling of synchronous machine », International Electric Machines and Drive Conference IEEE IEMDC'09, Miami, Etats-Unis, 3-6 Mai 2009.

**[CI-09-3]** M. Sautreuil, O. Sename, D. Riu, N. Retière, “Performance Specifications and Analysis of a Variable Speed Synchronous Generator with a Diode Rectifier for the All Electric Aircraft Using the  $H_\infty$  Control Approach”, European Control Conference, ECC'09, Budapest, Hongrie, 23-26 Août 2009

**[CI-09-4]** B. Davat &al, “Fuel cell-based hybrid systems », Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, Lille, 1-3 July 2009

**[CI-10-1]** D. Hernandez, O. Sename, D. Riu, « A robust multivariable methodology approach: application to a hybrid fuel cell/supercapacitor power generation system », ECCE'2010-01-04, Atlanta, USA, 12-16 Septembre 2010

**[CI-10-2]** M. Sautreuil, N. Retière, D. Riu, O. Sename, “A generic design method for robust performances and integration of Aircraft DC power systems”, IEEE ISIE'10, Bari, Italie, 3-7 Juillet 2010

**[CI-10-3]** D. Hernandez, O. Sename, D. Riu, F. Druart, “On the robust control of DC-DC converters: Application to a hybrid power generation system”, IFAC Symposium on System, Structure and Control, SSSC'10, Ancona, Italie, 15-17 Septembre 2010

**[CI-10-4]** R. Vial, D. Riu, N. Retière, « Simulating calculations and optimization design of a new HVDC supply power for light rail system”, IEEE IECON'10, Phoenix, USA, 7-10 Novembre 2010

**[CI-10-5]** D. Hernandez, D. Riu, O. Sename, F. Druart, « Robust Optimal Control Strategies for a Hybrid Fuel Cell Power Management System”, IEEE IECON'10, Phoenix, USA, 7-10 Novembre 2010

**[CI-10-6]** A. Amrane, N. Retière, D. Riu, « New modelling of electrical power networks using fractal geometry », IEEE ICHQP, Bergamo, Italie, 26-29 Septembre 2010

### Conférences nationales

**[CN-01]** D. Riu, « Modélisation des courants induits dans les machines électriques par des systèmes d'ordre  $\frac{1}{2}$  », JCGE'01, Nancy, 2001.

**[CN-07-1]** S. Sailler, J. Deseure, F. Druart, D. Riu, P. Ozil, « Effects of feeding stoichiometry on PEMFC performances : water management », congrès de la Société Française de Génie des Procédés, 2007

**[CN-07-2]** O. Enacheanu, D. Riu, N. Retière, « Modélisation fractionnaire d'une machine synchrone – Application aux études de stabilité », Electrotechnique du Futur, Toulouse, 2007

**[CN-08]** A. Amrane, D. Riu, N. Retière, « Modélisation fractale des réseaux électriques », JCGE'08, Lyon, 2008

**[CN-10]** D.Riu, C. Clastres, F. Jousset, R. Vial, A. Teninge, H. Chenailier, « Projet intégrateur « Efficacité énergétique dans l'habitat », CETSIS'10, Grenoble, 2010

## Autres (et principales) publications

[AP-02] D. Riu & P., « Olivier », Avril 2002

[AP-06] D. Riu & P., « Violette », Décembre 2006

## **LISTE DES CONTRATS DE RECHERCHE ET INDUSTRIELS**

### **ANR Jeunes Chercheurs MODECO (2005-2008) BQR INPG (2005-2007) – Projet classé 1<sup>er</sup> par le CS de l'INP**

Ces deux projets nous ont permis de financer un contrat de thèse et un contrat de post-doctorat afin notamment d'entretenir une collaboration naissante entre le LEPMI et le LEG autour de la modélisation des générateurs électrochimiques et de mettre en place le démonstrateur GESI dans le cadre de la plate-forme PREDIS.

### **Contrat FREMM – SCHNEIDER ELECTRICS (2005-2007)**

Ce projet portait sur l'analyse dynamique et harmonique d'un réseau embarqué à bord d'une frégate militaire. Il a permis le financement de deux stagiaires PFE pour mener l'étude mais n'a pas pu être valorisé en raison d'une défection d'un des partenaires.

### **Contrat CIFRE – ALSTOM (2004-2007) PREDIT STEEM (2006-2008)**

Ces contrats ont permis de financer les travaux de thèse de S. Chenh ainsi que trois stages de fin d'études autour de la modélisation, l'analyse et l'optimisation énergétique de réseaux de tramway.

### **Contrat Européen MOET (2005-2008)**

Ce contrat nous a permis de financer deux thèses, l'une (M. Sautreuil) portant sur la conception et l'analyse du réseau électrique embarqué et l'autre (S. Racewicz, en co-tutelle avec l'Ecole Polytechnique de Gdansk) autour de la modélisation et la commande des sources embarquées.

### **BQR INPG (2008-2010) - Projet classé 1<sup>er</sup> par le CS de l'INP**

Ce contrat, en collaboration avec le GIPSA-lab et le LEPMI va nous permettre, via le financement de la thèse de D. Hernandez, d'améliorer le rendement énergétique du système de génération électrochimique hybride en intégrant une commande performante incluant les paramètres électriques et fluidiques.

### **Projet Carnot EnergieDC (2008-2011)**

Ce contrat, dans le cadre du Carnot « Energies du futur », va nous permettre à travers la thèse de R. Vial, de développer une co-conception optimale d'un réseau présentant une structure HVDC.



## **RESUME**

Les systèmes d'énergie électrique embarqués ou semi autonomes connaissent des évolutions marquées. Parmi elles, on peut citer l'introduction massive d'électronique de puissance permettant d'améliorer significativement les performances via leur commande et l'interfaçage de sources de stockage.

A contrario, de nombreux problèmes se posent lors du dimensionnement et du choix de l'architecture de commande du système : quelle stratégie de gestion énergétique doit-on mettre en œuvre au préalable pour optimiser les flux et le dimensionnement des sources ? Quelle commande permet d'intégrer à la fois des critères de performances dynamiques, de stabilité et de robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques inhérentes à un processus de dimensionnement ? Enfin, quels outils et modèles doit-on mettre en œuvre pour garder un lien fort entre paramètres du système et critères de performances tout au long de ce processus ?

Les travaux présentés dans ce mémoire proposent des premières réponses à ces questions, via l'utilisation de techniques de commande avancées comme la commande optimale ou la commande robuste.

Des outils originaux de modélisation, basés sur les systèmes d'ordre non entier seront également présentés pour la modélisation de dispositifs diffusifs (machines électriques, générateurs électrochimiques) ou modélisés par des équations aux dérivées partielles.

## **MOTS-CLES**

Commande multivariable, robustesse, commande optimale, co-dimensionnement, systèmes d'ordre non entier, réduction d'ordre