

Rapport de synthèse

présenté à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

en vue d'obtenir

L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

par

Alain BOUSCAYROL

Docteur en Génie Electrique de l'INP Toulouse

FORMALISMES DE REPRESENTATION ET DE COMMANDE

APPLIQUES AUX SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

MULTIMACHINES MULTICONVERTISSEURS

Soutenance le 22 décembre 2003, devant le jury composé de :

Professeur Louis-A. DESSAINT	Rapporteur
Professeur Jean-Paul LOUIS	Rapporteur
Professeur Jean-Pierre ROGNON	Rapporteur
Professeur Jean-Paul HAUTIER	Directeur de Recherche
Professeur Bernard De FORNEL	Examinateur
Professeur Betty LEMAIRE-SEMAIL	Examinateur
Professeur Francis PIRIOU	Examinateur
Professeur Alfred RUFER	Examinateur

Titre

FORMALISMES DE REPRESENTATION ET DE COMMANDE DES SYSTEMES ELECTROMECHANQUES MULTIMACHINES MULTICONVERTISSEURS

Résumé

De nombreux systèmes utilisent plusieurs entraînements électromécaniques, c'est à dire une répartition de l'énergie sur plusieurs chaînes de conversion. Les divers actionneurs sont alors de dimensions réduites et les contraintes sur les divers éléments sont plus faibles que pour un actionneur unique. La disponibilité et la fiabilité de l'ensemble sont ainsi augmentées. De plus, lors d'une mise en défaut d'une composante, un fonctionnement en marche dégradée est souvent possible. Mais ces systèmes demandent une commande plus complexe des divers entraînements. Par ailleurs, les diverses chaînes de conversions se perturbent les unes les autres, ce qui peut occasionner des dysfonctionnements, voire des détériorations.

Ces systèmes, utilisés depuis de nombreuses années dans l'industrie, ont d'abord été considérés comme des ensembles d'entraînements indépendants. Leur commande a alors été composée d'entités séparées. Mais les diverses contraintes inhérentes à cette distribution d'énergie ont dû être prises en compte, ce qui a été réalisé progressivement, au cas par cas.

Un groupe national de réflexion a été organisé en 1998 dans le cadre du GdR SDSE, afin d'étudier ces systèmes, ce qui a mené à la dénomination de Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM). Les éléments clefs de la répartition d'énergie ont été définis comme éléments de couplage, reliant plusieurs chaînes de conversion. Cette démarche commune, si elle s'intéressait à des systèmes déjà connus, a débouché sur une nouvelle vision de ces systèmes et de leur gestion. Les études qui ont suivi, allaient le prouver, avec le développement de structures particulières, d'analyses spécifiques, et de lois de commandes originales.

A l'heure actuelle, la démarche classique d'étude des SMM est liée à une approche réductionniste : l'étude du système se déduit directement de celle de ses composantes. Mais les SMM ne peuvent pas se résumer à une association simple de machines et de convertisseurs. Ce concept est à l'origine de l'approche systémique entreprise dans nos travaux : les associations des composantes ont un impact sur l'ensemble.

Le L2EP a utilisé cette approche systémique pour développer une démarche de structuration de la commande des tels systèmes. Ces travaux ont abouti à la Représentation Energétique Macroscopique (REM) dont **la notion centrale est alors l'énergie**. Cette vision souligne les manipulations d'énergie de tels systèmes. Les commandes déduites correspondent alors à une gestion optimisée de l'énergie au plus près des éléments qui la transforment.

Afin de situer le travail proposé, le premier chapitre fait un bref récapitulatif des modélisations et commandes des systèmes électromécaniques. Le deuxième chapitre est consacré à la REM, outil de description synthétique des systèmes électromécaniques. Une Structure Maximale de Commande (SMC) se déduit naturellement de la REM à l'aide de règles d'inversion. Les divers concepts de REM et de SMC sont illustrés au chapitre III à l'aide d'un exemple issu d'applications pratiques : de la modélisation de ses composantes à la commande en temps réel (plate-forme expérimentale SMM du L2EP). Le dernier chapitre ouvre une discussion sur les améliorations du formalisme et sur son extension à d'autres applications.

Remerciements

L'ensemble des activités scientifiques présentées dans ce mémoire a été réalisé au sein du L2EP, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, dirigée par le Pr. Jean-Paul HAUTIER.

Je remercie M. Bernard de FORNEL, Professeur à l'INP de Toulouse, d'avoir accepté de présider mon jury. J'ai eu la chance de le côtoyer lors de mon doctorat au LEEI, il restera un modèle de rigueur scientifique et d'ouverture d'esprit.

Je remercie MM. Louis-A. DESSAINT, Professeur à l'ETS de Montréal, Jean-Paul LOUIS, Professeur à l'ENS Cachan, et Jean-Paul ROGNON, Professeur à l'INP de Grenoble, d'avoir accepté de rapporter sur ce mémoire malgré leurs nombreuses responsabilités. Les discussions scientifiques qui ont suivi amèneront à mieux positionner ce travail.

Je remercie M. Alfred RUFER, Professeur à l'EPF Lausanne, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Les collaborations en cours sur l'utilisation des formalismes proposés devraient prolonger nos échanges.

Je remercie M. Francis PIRIOU, Professeur à l'USTL, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Ses discussions constructives ont fait progresser ma vision des choses.

Je remercie Mme Betty LEMAIRE-SEMAIL, Professeur à Polytech'Lille, responsable de l'équipe "Commande" du L2EP, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Son soutien permanent des activités de formalisation a conforté le travail entrepris.

Je remercie, enfin, M Jean-Paul HAUTIER, Professeur à l'ENSAM, d'avoir été mon directeur de recherche, et d'avoir vraiment joué ce rôle par ses discussions scientifiques passionnées, ses encouragements et ses travaux de formalisation, bases de la renommée de l'équipe "Commande" du L2EP.

Un tel travail ne saurait être sans les interactions bénéfiques de nombreux membres du L2EP et aussi ceux de l'opération SMM des GdR SDSE et ME²MS. Mes pensées se tournent plus particulièrement vers Philippe DELARUE, Maître de Conférences à Polytech'Lille, et Eric SEMAIL, Maître de Conférences à l'ENSAM, qui ont su m'offrir de réelles complicités et complémentarités scientifiques. Interaction est vraiment le maître mot de nos collaborations.

Le service électrotechnique de l'USTL fonctionne vraiment en équipe pédagogique, avec une évolution constante des enseignements, en adéquation avec nos activités de recherche. Je remercie ses acteurs d'avoir su me permettre de travailler dans un tel état d'esprit et notamment d'intégrer la REM dans diverses formations.

Je dédie plus particulièrement ce travail à ma femme, Christine, et mes enfants, Martin et Gauthier, pour lesquels, avoir un enseignant-chercheur passionné à la maison, n'est toujours facile.

Sommaire

Sommaire

AVANT PROPOS

INTRODUCTION 1

Chap - I. MODELISATIONS ET COMMANDES DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES 7

Résumé	9
I. 1. Problématique de la commande des systèmes électromécaniques	11
I. 1. 1 Problématique des systèmes électromécaniques	11
I. 1. 2 Problématique de la commande	13
I. 2. Outils de modélisation des systèmes électromécaniques	14
I. 2. 1 Approches traditionnelles	14
I. 2. 2 Approches par graphes	17
I. 2. 3 Bilan des divers outils	21
I. 3. Commandes des systèmes électromécaniques	21
I. 3. 1 Approche globale : le principe d'asservissement global	21
I. 3. 2 Approche locale : le principe d'inversion	24
I. 3. 3 Bilan des deux approches	27
I. 4. Limites des outils classiques	27
I. 4. 1 Spécificités des SMM	28
I. 4. 2 Intérêt d'une représentation plus synthétique	28

CHAP - II. OUTILS DE REPRESENTATION ET DE COMMANDE DE SMM 31

Résumé	33
II. 1. La systémique, point de départ	35
II. 1. 1 L'approche systémique	35
II. 1. 2 Complémentarité avec l'approche cartésienne	38
II. 1. 2 Apports de l'approche systémique pour les SMM	38

II. 2. La Représentation Energétique Macroscopique	40
II. 2. 1 Les différents éléments de la REM	40
II. 2. 2 Les règles d'association	44
II. 2. 3 L'extension aux SMM	47
II. 3. La Structure Maximale de Commande	52
II. 3. 1 Extension du principe d'inversion	53
II. 3. 2 La résolution des couplages des SMM	55
II. 3. 3 Les structures pratiques de commande	58
II. 4. Bilan critique de la REM	61
II. 4. 1 REM, qu'est-ce que c'est ?	61
II. 4. 2 REM, quelles implications ?	62
II. 4. 3 REM, quelles limites ?	64
II. 4. 4 REM, quelles applications ?	66
CHAP - III. EXEMPLE D'APPLICATION AUX COUPLAGES MULTIPLES	67
<hr/>	
Résumé	69
III. 1. Description du système	71
III. 1. 1 Systèmes industriels avec couplages	71
III. 1. 2 Déduction d'un système d'étude	76
III. 2. REM du système étudié	77
III. 2. 1 REM des éléments constitutifs	77
III. 2. 2 REM du système global	86
III. 2. 3 Analyse des contraintes	88
III. 3. SMC du système étudié	90
III. 3. 1 SMC du système de traction	91
III. 3. 2 Emulateur de couplage mécanique	95
III. 3. 3 Validations expérimentales	96
III. 4. Bilan et extensions	104
III. 4. 1 Bilan de l'étude réalisée	104
III. 4. 2 Extension à d'autres systèmes	107

CHAP - IV. EXTENSIONS ET PERSPECTIVES DE LA REM **109**

Résumé	111
IV. 1. Perspectives à court terme	113
IV. 1. 1 Vers une amélioration du formalisme	113
IV. 1. 2 Vers l'application aux systèmes dégradés	115
IV. 1. 3 Vers l'application aux systèmes multi-sources	116
IV. 2. Perspectives à long terme	118
IV. 2. 1 Vers une extension des niveaux de modélisation	118
IV. 2. 2 Vers l'application aux réseaux électriques	119
IV. 2. 3 Vers la conception de systèmes	121
IV. 3. Quelle politique de diffusion et de développement ?	123
IV. 3. 1 Quels sont les freins à la diffusion ?	123
IV. 3. 2 Comment assurer la diffusion de la REM ?	124
IV. 3. 3 Comment assurer les extensions de la REM ?	126
IV. 4. Quel avenir pour la REM ?	127

CONCLUSION **129**

POST PROPOS **135**

ANNEXES **139**

Annexe « Petit Lexique de Systémique »	141
Annexe « Thème SMM du L2EP »	147
Annexe « Opération SMM des GdR »	153
Annexe « Transfert pédagogique »	157
Annexe « Plate-forme expérimentale SMM du L2EP »	163
Annexe « Différentes représentations d'un système »	169
Annexe « Curriculum Vitae »	175

BIBLIOGRAPHIE **191**

Avant Propos

Avant Propos

La rédaction d'un mémoire scientifique est un moment privilégié pour un enseignant chercheur. Il permet de rendre compte non seulement d'un travail scientifique qui a atteint une certaine maturité, mais aussi d'une vision de la recherche qui s'est affinée au cours du temps. Cette rédaction se doit, de plus, d'être un élément de diffusion et de réflexion sur le travail effectué.

Le travail scientifique exposé concerne le développement de formalismes de représentation et de commande pour les systèmes électromécaniques possédant plusieurs machines électriques et/ou convertisseurs statiques. Nous essayerons d'en dégager l'intérêt.

Ce travail a été réalisé dans un esprit d'ouverture et d'interactions par un ensemble d'acteurs, chacun ayant eu une influence sur le résultat final. Cette philosophie de travail a d'abord été appliquée dans le thème SMM de l'équipe "Commande" du L2EP, avec ses permanents impliqués (J. P. Hautier, Ph. Delarue, Bruno François et E. Semail), chercheurs actifs qui ont cimenté la structure par leur travail sur le formalisme, ses doctorants (B. Vulturescu, J. Pierquin, S. Charlemagne, X. Kestelyn et J. N. Verhille) qui ont réalisé les pierres de base sur des applications particulièrement délicates, et même certains DEA et stagiaires qui ont su s'investir avec enthousiasme et efficacité. Notre implication dans les projets SMM des GdR SDSE¹ et ME2MS² a été de même nature, ce qui n'a pu se faire qu'avec des partenaires qui étaient dans le même état d'esprit, nos collègues du LEEI, du GREEN, du LESiR-SATIE et du GE44. Il est difficile d'imaginer ce que serait le travail présenté dans ce mémoire sans ces interactions locales et nationales !

Afin d'en faire un outil de travail, de diffusion et de réflexion, ce mémoire est rédigé en quatre parties : un contexte, un développement théorique, une application pratique et un bilan. Les divers travaux effectués au cours de ces quelques années ne sont abordés qu'en annexes, afin de laisser une place suffisante à une explication détaillée des formalismes proposés et à une illustration par un exemple non trivial.

¹ Groupe de Recherche "Sûreté et Disponibilité des Systèmes électriques" du CNRS (1998-2001, dirigé par J. P. Rognon)

² Groupe de Recherche "Maîtrise de l'Energie Electrique, du Matériau au Système" (2002-2005, dirigé par F. Bouillault)

Introduction

Introduction

Depuis plus d'une vingtaine d'années de nombreux travaux sur la commande des actionneurs électriques ont été réalisés afin d'augmenter leur performance, leur robustesse et leur fiabilité [DEFORNEL 76] [PIETRZAK 88] [BOSE 93]. En effet, les évolutions conjuguées de l'électronique de puissance et de l'informatique industrielle ont permis à ces actionneurs de prendre une part toujours croissante dans le domaine industriel, grâce à l'amélioration de leur rendement, leur performance, leur disponibilité, etc [LEONHARD 91] [HOLTZ 93] [STEFANOVIC 92] [LORENZ 94] [CARON 95]. Le nombre conséquent d'habilitations à diriger les recherches concernant la commande de tels actionneurs [LEMAIRE 97], [FADEL 97], [ROBYNS 00], [ROBOAM 00], [MENDES 00], [MEIBODY-TABAR 00], [MONMASSON 02], [BETIN 03], [FRANÇOIS 03], en est une bonne illustration. On peut ainsi considérer que, mis à part quelques problèmes technologiques à affiner, comme les commandes sans capteurs mécaniques [SCHAUDER 92], [LEVI 02], le panel de commande pour les actionneurs les plus courants est maintenant très complet. Le travail présenté concerne les systèmes dits "multimachines multiconvertisseurs" et utilise avec avantage les outils développés pour des actionneurs "monomachines monoconvertisseurs". Ce travail est essentiellement focalisé sur les problèmes liés aux associations d'éléments classiques.

De nombreux systèmes utilisent plusieurs entraînements électromécaniques afin de réaliser une fonction globale. L'énergie est alors répartie sur plusieurs chaînes de conversion, ce qui offre plusieurs avantages. D'abord, les divers actionneurs sont de dimensions réduites par rapport à un seul actionneur global, ce qui permet une répartition physique plus aisée et l'utilisation de composants plus standards. Ensuite, les contraintes sur les divers éléments sont plus réduites, la puissance totale étant répartie sur chaque actionneur ; la disponibilité et la fiabilité de l'ensemble sont ainsi augmentées [JAHNS 80]. Enfin, lors d'une mise en défaut d'une composante, un fonctionnement en marche dégradée est souvent possible. Prenons l'exemple d'un système de traction ferroviaire. A puissance égale, l'utilisation de plusieurs moteurs permet un encombrement réparti et plus adapté aux dimensions des motrices. A tension d'alimentation égale, les courants des machines seront plus faibles qu'avec un seul moteur, les contraintes sur les composants et les effets de CEM sont alors réduits. Enfin si l'un des entraînements tombe en panne, les autres peuvent assurer une traction, sans doute à vitesse réduite, mais qui permet d'arriver à bon port.

Mais ces systèmes ont aussi un certain nombre d'inconvénients. Le premier est relatif à la complexité de leur commande. En effet, une coordination des divers entraînements est à réaliser afin d'assurer leur coopération par rapport à la fonctionnalité globale [VALENZUELA 01] [PEREZ 03]. La

possibilité de marche en mode dégradé ne fait qu'augmenter cette complexité. Par ailleurs, les diverses chaînes de conversions se perturbent les unes les autres, ce qui peut occasionner des dysfonctionnements, voire des détériorations. Dans l'exemple du train, le patinage d'un seul boggie doit être maîtrisé pour assurer la continuité du mouvement global. De plus, des oscillations mécaniques locales peuvent se répercuter sur d'autres parties mécaniques, allant jusqu'au filtre électrique d'entrée [ESCANÉ 99].

Ainsi, ces systèmes sont utilisés depuis de nombreuses années dans l'industrie : traction ferroviaire [KETTLER 95], [STEIMEL 96] [KURTZ 99] et automobile [MAGGETO 92], [MULTON 01], propulsion navale [MICHAUX 97] [FILLIAU 01], industrie textile et papetière avec système de transport de bande [JAEGO 99], [KOÇ 00], industrie métallurgique avec laminoirs [HO 99] [SONG 00b] [LEIRENS 02], etc. Ces systèmes ont d'abord été considérés comme un ensemble d'entraînements indépendants [BODSON 94]. Leur commande a alors été composée d'entités séparées. Mais les diverses contraintes inhérentes à cette distribution d'énergie ont dû être prises en compte, ce qui a été réalisé progressivement, au cas par cas [WU 88] [KAWAKAMI 94], [HORI 98], [JEON 99], [SAKAI 00], [MA 01], [MATSUMOTO 01], [MATSUSE 02].

Malgré leurs apparentes différences, il existe un point commun fort entre ces divers systèmes. Ils assurent tous une répartition d'énergie autour de plusieurs chaînes de conversion. Un groupe national de réflexion a été organisé en 1998 dans le cadre du GdR SDSE, afin d'étudier ces systèmes (voir Annexes "Projet SMM des GdR"). Un vocabulaire commun a tout d'abord été mis en place, ce qui a mené à la dénomination de Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM) : systèmes composés de plusieurs machines électriques et/ou convertisseurs statiques, ne pouvant être réduits à des sous-systèmes indépendants. Un premier formalisme de représentation (formalisme SMM) a ensuite été développé afin d'assurer une classification de ces systèmes [SMM 00a]. Les éléments clefs de la répartition d'énergie ont été définis comme éléments de couplage, reliant plusieurs chaînes de conversion. On peut considérer que cette démarche commune, si elle s'intéressait à des systèmes déjà connus depuis de nombreuses années, a débouché sur une nouvelle vision de ces systèmes et de leur gestion [SMM 00b]. Les études qui ont suivi, allaient le prouver, avec le développement de structures particulières [FRANÇOIS 99], [ESCANÉ 99], [DEOLIVERA 00], d'analyses spécifiques [MOUBAYED 99], [SEMAIL 00], [SMM 01] et de lois de commandes originales [PEÑA 02], [SMM 02], [BOUSCAYROL 03]. Ce groupe de travail a mené à l'organisation d'une session invitée SMM lors de la conférence internationale ElectrIMACS 2002 (Montréal), avec notamment une participation de collègues étrangers [BARRADE 02], [SCHROEDL 02], [LYRA 02], [GOSHN 02]. On peut de plus noter la présence d'une session "multimachines" lors du dernier congrès EPE 2003 (European Power Electronics) [LEVI 03] [KLUMPNER 03] [SIALA 03]. La thématique SMM correspond donc à une préoccupation des communautés scientifiques nationale et internationale.

A l'heure actuelle, la démarche classique d'étude des SMM est liée à une approche réductionniste¹ : l'étude du système se déduit directement de celle de ses composantes. Mais les Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs ne peuvent pas se résumer à une association simple de machines et de convertisseurs. Ce concept est à l'origine de l'approche systémique* entreprise dans nos travaux : l'étude du système ne peut se réduire à celle de l'étude de ses composantes.

La systémique a été développée dans les années 40 par la rencontre entre la biologie et l'électronique, qui allait déboucher sur la cybernétique*, la bionique*, l'automatique*, etc [ALLAIN 01]. Elle fut ensuite plus appliquée aux sciences humaines et sociales qu'aux sciences techniques [DEROSNEY 75], [LEMOIGNE 90]. Dans cette approche, le système est perçu comme un ensemble d'éléments en interactions, organisés en fonction d'un but. Par opposition à une approche réductionniste, l'association d'éléments est considérée comme une partie intégrante du système, qui fait émerger certaines propriétés tout en annihilant d'autres.

Quelques utilisations de la systémique dans les sciences techniques ont cependant émergé à la fin des années 90. Le "Laboratory of AI research" de l'Université de l'Ohio (USA), travaille sur la représentation des systèmes en vue de leur analyse et de leur conception avec une organisation en plusieurs niveaux d'abstraction et la prise en compte des interrelations entre objets [CHANDRASEKARAN 00]. La causalité entre variables des divers objets est une notion centrale dans cette approche [IWASAKI 94]. Le "Powertrain Control Research Laboratory" (Université de Wisconsin-Madison, USA) propose une démarche de conception de systèmes mécaniques à l'aide de fonctions macroscopiques [RUBIN 97], basées sur le principe de l'interaction et de la causalité naturelle (intégrale). On peut aussi citer les travaux de l'équipe Système du LEEI, au cours desquels la systémique est utilisée dans une démarche de conception de systèmes avec actionneurs électromécaniques [CHAPOULIE 99], [ASTIER 03] ou de convertisseurs statiques [PIQUET 03]. D'autre part, le LEG a entrepris une démarche constructiviste dans le cadre de conception de machine [WURTZ 03]. On peut remarquer que la commande n'est pas abordée dans ces diverses études.

Parallèlement à ces travaux, le L2EP a utilisé cette approche systémique pour développer une démarche de structuration de la commande des systèmes "monomachines monoconvertisseurs" [BOUSCAYROL 97]. Ces travaux ont abouti à la première version de la Représentation Energétique Macroscopique (REM) appelée alors "Macro-modèles" [BOUSCAYROL 00], dont la notion centrale est la différenciation entre élément accumulateur d'énergie ou non-accumulateur. Si la représentation SMM, développée par le projet du GdR SDSE, a permis de bien caractériser les répartitions d'énergie au sein de systèmes multimachines multiconvertisseurs, elle ne permettait pas d'en déduire de manière systématique une structure de la commande. Une fusion des deux formalismes (Macro-modèles et SMM) a alors été opérée par les membres du thème SMM du L2EP, ce qui a mené à la REM de deuxième génération. **La notion centrale est alors l'énergie.** Cette vision macroscopique permet de

¹ Voir l'Annexe "Petit lexique de systémique" pour les mots associés à un astérisque (*)

souligner les manipulations d'énergie de tels systèmes (accumulation et répartition). Les commandes déduites correspondent alors à une gestion optimisée de l'énergie au plus près des éléments qui la transforment. L'enjeu est donc de réaliser une meilleure utilisation de l'énergie électrique dans les SMM, tout en assurant les mêmes performances dynamiques voire de meilleures.

Cette étude de SMM a été réalisée dans le cadre de l'équipe "Commande" du L2EP, dirigée par le Pr. J. P. Hautier, puis par le Pr. B. Lemaire-Semail, équipe reconnue par ses formalisations et outils en vue de la commande des systèmes électriques. Ce mémoire s'insère donc logiquement dans la poursuite de cette démarche méthodologique.

Afin de situer le travail proposé, le premier chapitre fait un bref récapitulatif des modélisations et commandes des systèmes électromécaniques, notamment le Graphe Informationnel Causal qui est le premier formalisme ayant amené une véritable structuration de la commande des systèmes. Ce chapitre permet de montrer l'intérêt de développer un formalisme de représentation et de commande pour les SMM.

Le deuxième chapitre est consacré à la Représentation Energétique Macroscopique, outil de description synthétique des systèmes électromécaniques. Une Structure Maximale de Commande (SMC) se déduit naturellement de la REM à l'aide de règles d'inversion. L'application de cette méthodologie aux SMM permet de structurer leur commande avec une gestion optimisée de l'énergie.

Les divers concepts de REM et de SMC sont illustrés au chapitre III à l'aide d'un exemple issu d'applications pratiques et possédant divers types de couplages. L'étude du système est alors réalisée de la modélisation de chacune de ses composantes à l'implantation de sa commande en temps réel. Les résultats, obtenus sur la plate-forme expérimentale SMM du L2EP, montrent que la méthodologie proposée est réellement utilisable pour des applications industrielles.

Le dernier chapitre ouvre une discussion sur les améliorations du formalisme et sur son extension à d'autres applications. Une réflexion est menée sur la diffusion de ces outils et sur leur développement, qui ne pourront se faire qu'avec de nouveaux partenaires et de nouvelles applications.

Enfin, de nombreuses annexes permettent de situer le travail effectué par le thème SMM du L2EP, les opérations SMM du GdR SDSE et du GdR ME²MS. Le transfert pédagogique de la REM et la plate-forme expérimentale SMM y sont aussi présentés. Enfin, un curriculum vitæ permet de mieux situer mes implications personnelles dans cet ensemble.

**Chap - I. Modélisations et commandes
des systèmes électromécaniques**

Chap - I. Modélisations et commandes des systèmes électromécaniques

Résumé du chapitre

Ce chapitre a pour objet de faire un bilan sommaire des techniques utilisées pour la commande des systèmes électromécaniques et des modélisations qui sont préalablement réalisées dans ce but. Cette partie doit ainsi servir de contexte aux outils proposés pour la modélisation et la commande des Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM) (Chap. II).

La problématique de la commande des systèmes électromécaniques sert d'abord de préliminaire (§I.1). Divers outils utilisés pour développer une modélisation en vue de la commande sont ensuite rappelés (§ I.2), une place particulière étant réservée au Graphe Informationnel Causal (GIC). La commande de tels systèmes est ensuite abordée en faisant apparaître deux catégories : une démarche plutôt globale et une démarche plus locale (§ I.3). Ces divers outils ayant fait leurs preuves dans les cas classiques, leurs limites sont alors discutées quant à leur utilisation pour des SMM (§ I.4).

I. 1. Problématique de la commande des systèmes électromécaniques

I. 1. 1. Problématique des systèmes électromécaniques

I. 1. 2. Problématique de la commande

I. 2. Outils de modélisation des systèmes électromécaniques

I. 2. 1. Approches traditionnelles

I. 2. 2. Approches par graphes

I. 2. 3. Bilan des divers outils

I. 3. Commandes des systèmes électromécaniques

I. 3. 1. Approche globale : le principe d'asservissement global

I. 3. 2. Approche locale : le principe d'inversion

I. 3. 3. Bilan des deux approches

I. 4. Limites des outils classiques

I. 4. 1. Spécificités des SMM

I. 4. 2. Intérêt d'une représentation plus synthétique

I. 1. Problématique de la commande des systèmes électromécaniques

Ce paragraphe a pour objet de rappeler les difficultés rencontrées lors de la commande des systèmes électromécaniques. Cette partie, quoique relativement classique, doit permettre de juger de la pertinence des outils utilisés pour modéliser et commander de tels systèmes.

Dans un premier temps, les caractéristiques des systèmes électromécaniques sont rappelées afin de définir le cahier des charges de leur commande. Dans un second temps, les phases de mise en œuvre de la commande sont analysées.

I. 1. 1. Problématique des systèmes électromécaniques

La plupart des systèmes électromécaniques ont initialement été considérés linéaires, continus, stationnaires, et de paramètres bien connus. Cette vision idéale a permis de développer des structures de commande relativement simples. Cependant, les hypothèses simplificatrices induites par ces modélisations ont dû être revues pour améliorer les performances des entraînements.

Systèmes pluridisciplinaires — Les entraînements électromécaniques sont des systèmes pluridisciplinaires par excellence : électronique de puissance (alimentations variables), électrotechnique (machines électriques), mécanique, mais aussi instrumentation (capteurs), automatique (commande), informatique industrielle (microprocesseurs pour la mise en œuvre...) etc. Cette juxtaposition de disciplines est délicate lorsqu'on désire obtenir un système performant. Une interdisciplinarité (voir Chap. II) est alors nécessaire : il est indispensable d'établir des liens entre les diverses parties pour en assurer un fonctionnement cohérent.

Systèmes hybrides — L'électronique de puissance confère un caractère hybride à ces systèmes [HAUTIER 89] [HAUTIER 99]. En effet, si les autres parties du processus sont de nature continue, les convertisseurs statiques sont basés sur des fonctionnements discrets et non linéaires (ouvertures et fermetures d'interrupteurs) avec des commandes spécifiques (Modulation de Largeur d'Impulsion par exemple [HOLTZ 92]). Ce mode opératoire peut s'avérer difficile à gérer, notamment si la fréquence de commutation n'est pas assez élevée par rapport aux fréquences naturelles des autres composantes. En effet, les constantes de temps des machines électriques sont relativement faibles par rapport à celles d'autres types de processus. Il est à noter que l'étude de ce type de système hybride fait l'objet d'un projet du GdR actuel d'Automatique.

Il est aussi bon de rappeler que la mise en œuvre de la commande par microprocesseur induit également un caractère hybride à l'ensemble du système. Cependant, les performances toujours

croissantes de l'électronique numérique, tant en temps de calcul qu'en mémoire disponible, réduisent l'effet de cette discrétisation pour les systèmes électromécaniques.

Systemes non-linéaires — Outre les non-linéarités intrinsèques aux interrupteurs des convertisseurs statiques, les machines électriques possèdent des non-linéarités au travers de leurs caractéristiques magnétiques [SLAMA 85] [LEMAIRE 97]. En effet, ce phénomène est si délicat qu'il est impératif de contrôler les variables internes que sont les flux pour éviter un rendement catastrophique, voire la détérioration de la machine (courants trop importants). Ce phénomène est d'autant plus gênant que ces caractéristiques non linéaires dépendent du point de fonctionnement, de la température, et peuvent être modifiées par les harmoniques issues de l'électronique de puissance [CLENET 01]. Certaines commandes prennent en compte la saturation magnétique [HOFMANN 95] [LEVI 02].

Dans certains systèmes, les différentes constantes de temps (électriques, magnétiques, mécaniques, thermiques) sont suffisamment découplées pour considérer des sous-systèmes dynamiquement indépendants les uns des autres. Cependant, ce n'est pas toujours le cas et une non-linéarité extrinsèque peut apparaître. Le cas de la machine asynchrone est un exemple significatif : la vitesse de rotation peut être considérée comme un paramètre pour les modes électromagnétiques dans le cas d'un bon découplage ; elle rend le modèle non-linéaire dans le cas contraire.

De plus, de nombreuses non-linéarités sont souvent à prendre en compte dans les parties mécaniques. La loi de contact roue route d'un véhicule [HORI 98] ou la caractéristique de couple d'une turbine éolienne [MILLER 97] en sont des exemples flagrants.

Systemes non stationnaires — Une autre difficulté récurrente est celle de la non-stationarité des paramètres des modèles de certaines composantes de puissance.

Pour les machines, la température et le niveau de flux influent de manière assez marquée sur les résistances et inductances. De nombreuses lois de commande ont été développées pour pallier ces variations paramétriques : commande robustes [FONT 97] commandes adaptatives [ELBULUK 02] etc. En effet, les commandes dynamiques des machines à courant alternatif (contrôle vectoriel par exemple) sont assez sensibles à certains paramètres [LORENZ 94].

Pour les systèmes mécaniques, les variations de masse (véhicules...), de contact (usinage...), d'état de surface de contact (traction...) rentrent dans le cadre de non-stationnarités [LEE 93] [BONAL 98].

Systemes bruités — Outre le bruit inhérent à toute commande, les systèmes électromécaniques sont particulièrement affectés par les bruits de mesures. En effet, la proximité de l'électronique de puissance (avec ses commutations) n'est pas sans impact sur les signaux de mesures.

Des structures stochastiques ont ainsi été développées pour prendre en compte ces phénomènes, notamment lors des phases d'estimation par Filtre de Kalman par exemple [DU 95][PIETRZAK 00].

I. 1. 2. Problématique de la commande

La mise en œuvre de la commande d'un système fait appel à des interfaces spécialisées (capteurs, convertisseurs, timers...) et des organes de commande. Malheureusement, cette mise en œuvre pose un certain nombre de problèmes qui nuisent à la qualité de la commande, soit pour des raisons technologiques soit pour des raisons de minimisation des coûts.

Discrétisation et quantification — La commande numérique a remplacé avantageusement la commande analogique pour les systèmes les plus délicats à gérer ou les plus complexes [VASSEUR 98]. Cependant, le temps de calcul, inhérent à la réalisation numérique de tout algorithme, impose un temps de retard entre la mesure et l'application de la commande [BÜHLER 82]. Ce temps de retard peut parfois être incompatible avec les dynamiques propres du système (une autre solution de mise en œuvre est alors à trouver). La commande est alors discrétisée (découpage temporel), ce qui peut faire appel à d'autres techniques de synthèse que celles dédiées aux processus continus.

De plus, toute grandeur de commande est l'objet d'un codage. Le traitement numérique de l'information fait ainsi appel à la quantification des diverses grandeurs. Ce découpage en amplitude influe naturellement sur la précision des variables, donc des résultats obtenus. Lors de l'acquisition, la quantification des grandeurs est un facteur prépondérant qui dépend de la qualité et du coût des capteurs que l'on est prêt à utiliser.

Mesures et estimations — Certaines grandeurs nécessaires à la commande ne sont pas mesurées, soit parce que la grandeur n'est pas mesurable (force électromotrice par exemple), soit parce qu'un capteur fiable sans coût prohibitif ne peut pas être utilisé (capteur de couple par exemple), soit parce qu'une politique de réduction des coûts mène à une réduction du nombre de capteurs (suppression du capteur de vitesse par exemple). Dans ce cas, la grandeur doit être reconstituée (estimée) à partir de grandeurs mesurables. De nombreuses techniques ont été utilisées dans cet esprit pour la commande des machines : estimateurs ou observateurs de flux [VERGHESSE 88] [ORLOWSKA 89] [PIETRZAK 00], commandes sans capteurs mécaniques [SCHROEDL 92][ROBOAM 00]... Ces algorithmes d'estimation induisent des erreurs supplémentaires, surtout s'ils sont basés sur des modèles construits avec des hypothèses simplificatrices.

Notion de robustesse — La notion de robustesse est une notion centrale pour la qualité de la commande d'un système. La robustesse d'une commande est l'aptitude de celle-ci à réaliser le cahier des charges malgré les erreurs de modélisation, les perturbations non prises en compte, les non-stationarités, etc, mais aussi les erreurs induites par la mise en œuvre de la commande elle-même.

Avant l'implantation, des tests de robustesse sont alors nécessaires pour déterminer si la plage de validité de la commande est en adéquation avec les incertitudes de sa modélisation et les phénomènes négligés. Certaines méthodes de synthèse sont d'ailleurs basées sur l'incertitude paramétrique du processus [FONT 97] [ROBYNS 00].

I. 2. Outils de modélisation des systèmes électromécaniques

Toute commande est basée sur une représentation du processus voire de ses incertitudes. Les modèles les plus détaillés (équations de Maxwell par exemple) sont évités pour la détermination d'une loi de commande, car ils induisent des temps de calcul incompatibles avec une implantation temps réel. De plus, ces modèles trop fondamentaux ne correspondent pas à l'esprit de définition d'une loi de commande qui, par essence, vise à imposer un comportement à l'ensemble ou à chacun des sous-ensembles du système, sans action directe sur leurs mécanismes physiques internes. C'est la raison pour laquelle, les modèles définis en vue de la commande impliquent une simplification implicite liée à la globalisation du comportement, alors représenté par des relations entrées-sorties fondées essentiellement sur les variations énergétiques.

La réalisation d'une bonne commande dépend donc de la qualité du modèle utilisé qui se trouve étroitement attachée aux hypothèses simplificatrices qui lui sont associées. De plus, l'identification des paramètres du modèle est une phase importante pour définir la qualité du modèle [BORNE 92]. C'est en revenant sur ces simplifications de modèle et sur la précision de l'identification que l'on pourra améliorer les performances de la commande.

En fait deux types de modèles peuvent être utilisés dans une démarche de commande. Un premier modèle suffisamment simplifié permettant de réaliser une commande dont le temps d'exécution est compatible avec les dynamiques du système étudié et avec les organes de mise en œuvre à disposition. Un second modèle plus précis peut être utilisé en simulation pour déterminer la robustesse de la commande développée par rapport aux phénomènes négligés.

Les hypothèses de modélisation définies, plusieurs types de représentation peuvent être mis en application pour modéliser un même système, des expressions mathématiques aux descriptions purement graphiques. Nous nous intéressons dans ce paragraphe à ces divers outils de représentation en vue d'analyser leur utilisation pour développer une loi de commande.

I. 2. 1. Approches traditionnelles

Les approches classiques partent d'une modélisation mathématique issue des lois de la physique qui régissent les divers constituants du système. Ces équations mathématiques sont ensuite organisées

d'une certaine manière afin de représenter l'association des diverses composantes. Il est clair que les modèles continus linéaires et stationnaires sont les plus simples à représenter par des équations.

Modèle d'état — Le modèle d'état d'un système fait ressortir les variables d'état du système, c'est à dire les variables qui sont liées à l'énergie et qui, de ce fait, régissent le comportement dynamique du système. En effet, la variation d'énergie ne peut pas être instantanée. Ce type de modélisation fait appel à une forme générale différentielle du premier ordre, couramment rencontrée sous le vocable de formalisme d'état. Des extensions à des systèmes discrets ou non linéaires ont été réalisées [FOSSARD 97]. Ce formalisme utilise des représentations matricielles afin de condenser la représentation.

Les variables d'état ne sont en fait que des variables intermédiaires qui font le lien entre les variables d'entrée et de sortie. Leurs évolutions conditionnent ainsi l'évolution des sorties en fonction des sollicitations des entrées, car ces variables d'état sont liées à l'énergie et constituent ainsi la mémoire du système.

La représentation d'un tel système correspond à des équations matricielles associées à une description par schémas blocs (Fig. I. 1) :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \underline{x} = [A] \underline{x} + [B] \underline{u} \\ \underline{y} = [C] \underline{x} + [D] \underline{u} \end{cases} \quad (1)$$

Avec \underline{x} le vecteur d'état, \underline{u} le vecteur d'entrée (ou de commande), \underline{y} le vecteur de sortie, $[A]$ la matrice dynamique, $[B]$ la matrice de commande, $[C]$ la matrice d'observation et $[D]$ la matrice de transmission directe (nulle dans la réalité des systèmes physiques).

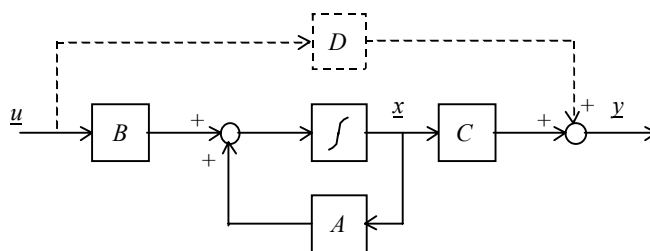


Fig. I. 1 : Représentation par schéma-blocs d'un modèle d'état

Cette représentation organise le système en exprimant la sortie en fonction des entrées (avec les variables d'état comme intermédiaires incontournables), ce qui suppose d'avoir déterminé initialement les entrées et les sorties du système. Ce choix nécessite l'expertise préalable du système, et n'est pas dénué de subjectivité de la part du modélisateur. Il faut remarquer que la modélisation d'état est basée

implicitement sur le principe de la causalité intégrale : une sortie ne peut être qu'une fonction intégrale des entrées. Ces notions fondatrices du GIC seront analysées dans l'un des paragraphes suivants. Ces deux notions, relations entrée – sortie et causalité intégrale, sont d'ailleurs mises en exergue dans la représentation par schéma bloc.

Cette modélisation offre une vision globale du système, qui se focalise surtout sur les variables d'entrée et de sortie. Les variables d'état peuvent en effet être choisies en dehors de considérations physiques du moment que l'ordre du système est respecté. Plusieurs solutions sont ainsi possibles et, là encore, le choix du modélisateur est prépondérant [HAUTIER 97]. Cette vision globale est à la base de la puissance de cet outil. En effet, à l'aide de propriétés mathématiques de ces systèmes d'état, de nombreuses informations peuvent être déduites du modèle : comportement dynamique, stabilité, commandabilité, observabilité... Mais, d'un autre côté, cette vision globale peut conduire à une perte de la réalité physique dans le cas d'un système d'ordre élevé.

Une utilisation de ce type de représentation pour modéliser des systèmes électromécaniques demande ainsi une interaction entre l'automatique et le génie électrique (interdisciplinarité¹) afin d'obtenir une modélisation juste, sans contresens physique. Concernant les systèmes électromécaniques, la représentation d'état est souvent utilisée pour les modèles des machines à courant alternatif afin d'en étudier le comportement dynamique et la robustesse [PIETRZAK 88] [VULTURESCU 98b].

Représentations par fonction de transfert — La représentation par fonction de transfert est basée sur la transformation de Laplace. Cet outil mathématique permet de manipuler de manière simple les relations entre variables, alors représentées par des équations différentielles invariantes, afin d'en étudier les interactions et les évolutions.

Les sorties du système sont exprimées en fonction des entrées au travers d'une fonction appelée fonction de transfert :

$$Y(p) = F_1(p)U_1(p) + F_2(p)U_2(p) \quad (2)$$

Avec $Y(p)$ la transformée de Laplace associée à la sortie $y(t)$, $U_i(p)$ celle associée à l'entrée $u_i(t)$, et $F_i(p)$ la fonction de transfert entre $y(t)$ et $u_i(t)$.

Cette représentation est plus focalisée sur les relations entre entrées et sorties. La notion de variable d'état est moins centrale, bien que présente. La notion de causalité intégrale est, elle aussi, sous-jacente (numérateur d'ordre inférieur à l'ordre du dénominateur pour les systèmes physiques). Une représentation par schéma-blocs est aussi associée à ce type de modélisation (Fig. I. 2).

¹ Voir l'annexe « Petit lexique de systémique »

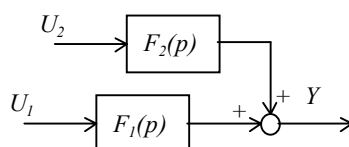


Fig. I. 2 : Représentation par schéma-blocs d'un système modélisé par fonction de transfert

Contrairement à la représentation d'état, la représentation par fonction de transfert est souvent liée à des représentations locales qui s'enchaînent. En effet, elle est essentiellement associée à des fonctions de transfert du premier ou du second ordre pour en faciliter l'utilisation. On peut noter qu'il existe des relations de passage d'un modèle d'état à un modèle par fonction de transfert et vice-versa. Il faut souligner qu'elle n'est valable que pour des systèmes linéaires continus. De plus, certaines propriétés (modes inobservables ou ingouvernables) peuvent être masquées par l'approche fonction de transfert [FOSSARD 97].

L'utilisation des fonctions de transfert est plus généralisée que celle des représentations d'état dans le domaine du Génie Electrique. En effet leur manipulation est plus simple quand on prend les hypothèses les plus réductrices et lorsque le nombre d'entrées et de sorties n'est pas trop élevé, ce qui est le cas pour les systèmes électromécaniques.

I. 2. 2. Approches par graphes

Les approches classiques donnent des informations tant quantitatives que qualitatives sur les systèmes à modéliser. Dans le cas de systèmes complexes, d'autres approches ont été développées pour se focaliser sur l'aspect qualitatif. La notion de graphe apparaît alors naturelle pour informer sur les relations de cause à effet entre les variables du processus.

Graphes de liens (ou Bond-Graph) — Les graphes de liens ont été développés dans les années 60 [PAYNTER 61] pour mettre en exergue les échanges énergétiques entre les composantes d'un système. Il représente un langage graphique unifié des transferts de puissance [DAUPHIN 99]. Des systèmes très hétérogènes peuvent ainsi être représentés avec ce même outil.

Un lien entre deux objets est caractérisé par une variable de flux et une variable d'effort dont le produit exprime la puissance instantanée échangée. Des terminaisons spécifiques indiquent le stockage d'énergie potentielle (élément C, comme condensateur), cinétique (élément I, comme inductance) ou la dissipation (élément R, comme résistance). Des convertisseurs idéaux (conservation de puissance) sont introduits TF (transformateur, pas de changement de nature² des variables) et GY (gyrateur, changement de nature des variables). Enfin des jonctions entre éléments complètent les relations de base : jonction 0 à effort commun (équivalent à une mise en parallèle en électricité, avec une tension

² Nature cinétique (ou flux) ou potentielle (ou effort) , voir chapitre II.

commune à plusieurs branches) et jonction 1 à flux commun (équivalent à la mise en série, avec un courant commun).

Deux informations complémentaires sont portées sur ces graphes. D'une part, l'orientation des flèches indique le flux de puissance (on est alors en droit de se poser la question de la réversibilité). D'autre part, des traits verticaux indiquent la causalité qui peut être analytique (élément R), intégrale ou dérivée [FAVRE 97] [DAUPHIN 99]. Des chemins de cause à effet en sont déduits selon une causalité intégrale préférentielle, mais pas obligatoire.

L'exemple du graphe de liens d'une machine à courant continu est proposé à titre d'illustration (Fig. I. 3). Un mode de fonctionnement moteur a été choisi pour le transfert de puissance (de l'alimentation vers la charge). On constate qu'il y a deux stockages d'énergie cinétique au travers de l'inductance L et de l'inertie J et aussi deux éléments de dissipation, la résistance d'induit R et le frottement visqueux f . Le graphe nous renseigne ainsi sur les échanges d'énergie entre les composantes du système, mais aussi avec l'environnement (dissipation d'énergie).

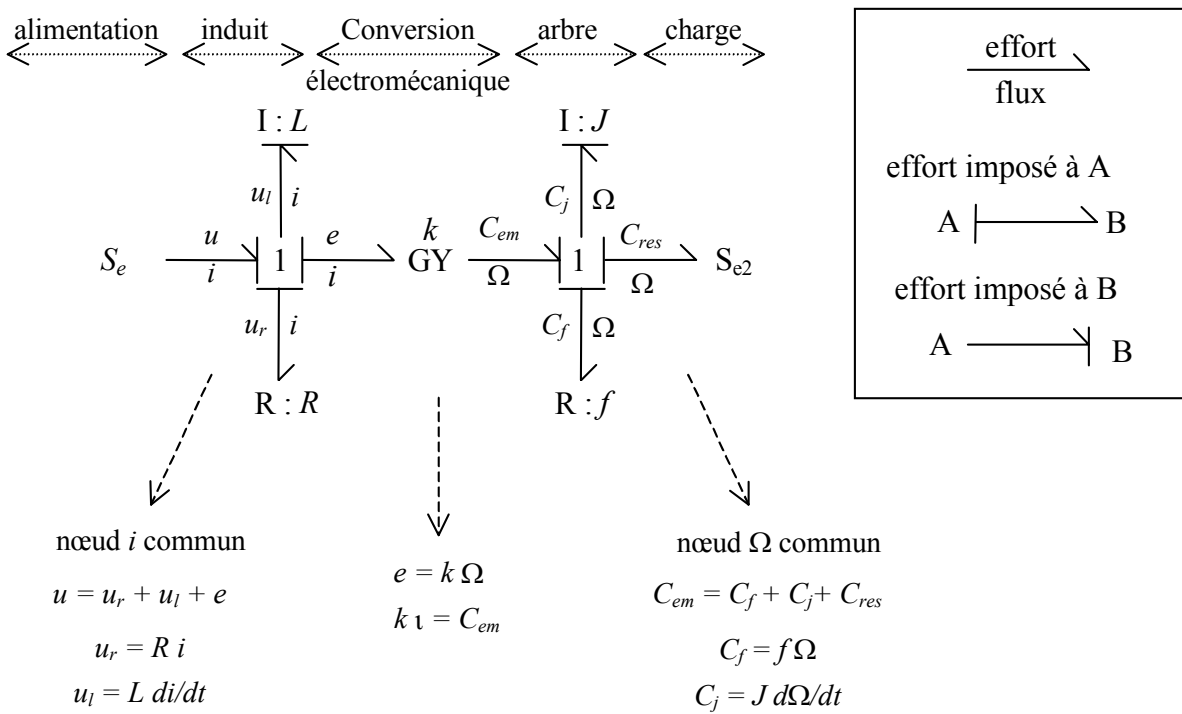


Fig. I. 3 : Graphe de liens d'une machine à courant continu

Les nombreux travaux et applications des Bond-Graph ont permis de développer des règles pertinentes quant à l'analyse du système, la réduction d'ordre, etc. Cependant, il a été surtout développé pour la conception et la modélisation, sans objectif de commande, même si un Bond-Graph peut mener à une représentation d'état, qui elle-même peut mener à une commande globale (voir § I.3). L'utilisation de la causalité dérivée, si elle permet une description topologique du système sans problème de représentation, s'éloigne en effet de la réalité physique, dont la causalité ne peut être

qu'intégrale (notion d'énergie ou de variable d'état). La déduction d'un graphe de commande s'avère, de ce fait, compromise (voir le paragraphe suivant sur le GIC). De plus, il faut aussi noter le problème posé par la causalité dérivée lors de la simulation du système : lorsque le logiciel de simulation l'admet (solveur spécifique), le temps de calcul est conditionné par la convergence de la résolution de la dérivation, qui n'est pas naturelle.

La représentation par graphe de liens d'applications électromécaniques a fait l'objet de quelques études. Elles sont surtout liées à une modélisation fine [LOCHOT 99] [GANDANEGARA 01] ou à de la conception [ASTIER 03]. Ce type de représentation a surtout trouvé une application privilégiée dans le domaine de la mécanique [FAVRE 97]. Quelques travaux sur la commande des systèmes ont cependant été initiés à l'aide des graphes de liens [ANDOULSI 01].

Graphe Informationnels Causal (GIC) — Le graphe informationnel causal organise les variables énergétiques d'un assemblage d'objets dont on possède la connaissance fonctionnelle [HAUTIER 96]. Les entrées et sorties de chaque objet sont définies selon leur propre causalité d'une part, selon le contexte de leur association d'autre part. Cet outil graphique permet ainsi de s'affranchir des relations entre les variables afin d'avoir une vision d'ensemble plus synthétique, ce qui justifie le terme "informationnel" dans sa désignation. A partir du graphe obtenu, une méthodologie d'inversion permet de déduire facilement une structure de commande en fonction du cahier des charges (voir § 1.3.2).

La construction d'un graphe informationnel causal modélisant un processus est basée sur le strict respect du principe de causalité des systèmes physiques. Une relation entrée-sortie caractérise un objet physique, représenté par un processeur (objet virtuel dont le graphisme est une bulle). Les relations utilisées se classent en deux catégories : les relations rigides et les relations causales.

Une relation indépendante du temps lie instantanément l'entrée et la sortie : la relation est dite rigide, il n'y pas de cause et d'effet a priori. La représentation choisie pour le processeur possède une double flèche caractérisant la nature réversible (au sens causal) de la relation dont la causalité est externe, imposée par celles des objets qui lui sont connectés.

Une relation dépendante du temps ou strictement causale est caractérisée par une entrée et une sortie bien définies, respectivement la cause et l'effet. La causalité naturelle pour les systèmes physiques est la causalité intégrale induite par l'accumulation d'énergie (notion de variable d'état). La représentation choisie possède une simple flèche caractérisant la nature non réversible de la relation dont la causalité est interne, indépendante de l'interconnexion entre les objets du système. On déduit que ce sont ces objets qui imposent la causalité aux objets caractérisés par des relations rigides.

Chaque entité physique est décrite par un ou plusieurs processeurs connectés. Diverses relations physiques peuvent être concaténées dans un même processeur afin d'augmenter la lisibilité du graphe global. Diverses règles de construction ont été explicitées pour déterminer le GIC d'un système [HAUTIER 99]. Cette représentation n'est pas limitée aux relations linéaires continues. La méthode amène une représentation globale simplifiée et homogène du processus et de sa commande,

indépendamment de la nature de la relation caractérisant chaque objet (fonction non linéaire, non stationnaire, discrète, séquentielle...). Les variables sont soit de nature potentielle (équivalent aux efforts en bond-graph) soit de nature cinétique (équivalent aux flux).

Ce type de modélisation correspond à une description locale des diverses composantes du système. Le système est ainsi caractérisé par une suite de relations de cause à effet, qui découlent de l'analyse de ses constituants physiques. On peut remarquer que l'on retrouve la notion de gyrateur et de modulateur (transformateur en bond-graph) qui consistent en des associations particulières de processeurs rigides [HAUTIER 96].

L'exemple de la machine à courant continu est repris à titre d'illustration (Fig. I. 4). Par rapport au bond-graph, le sens de transfert de la puissance n'est plus indiqué. On admet de ce fait une possible réversibilité énergétique (le GIC en mode générateur est le même). Des boucles de rétroactions apparaissent nettement entre composantes du système par rapport aux Bond-Graph. Cependant les opérations énergétiques (type de stockage et dissipation) ne sont plus explicitées de manière aussi claire. Enfin, la nature des variables (potentielle ou cinétique) n'est pas explicitée : elle est liée à la connaissance intrinsèque du modélisateur.

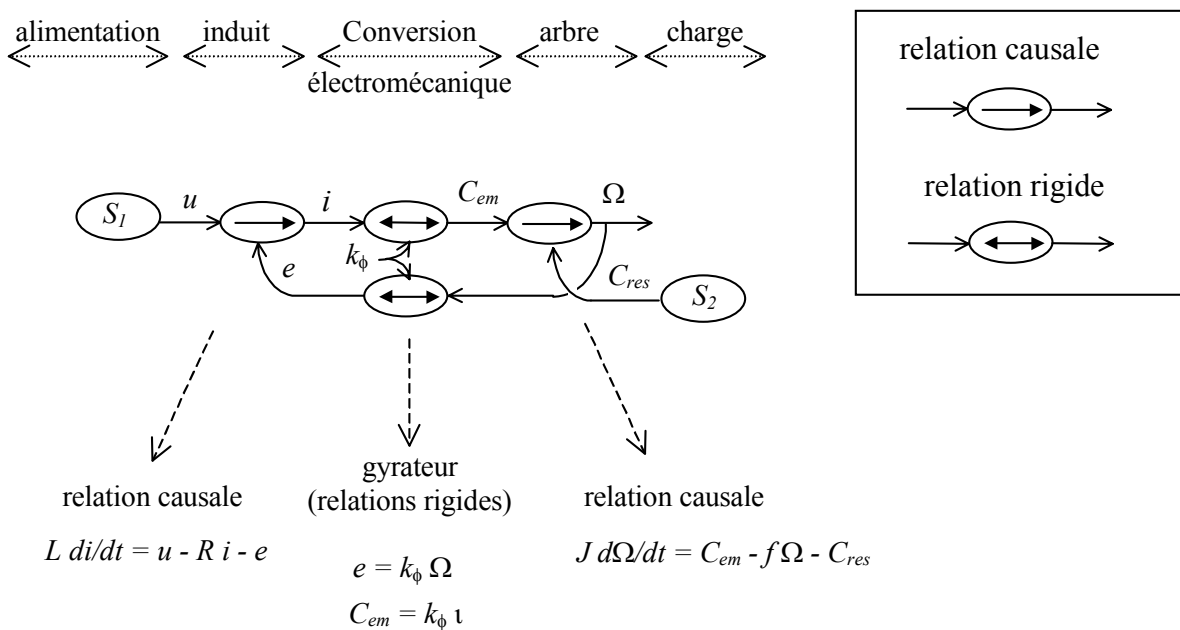


Fig. I. 4 : Graphe Informationnel Causal d'une machine à courant continu

Ce type de modélisation a été utilisé pour la modélisation et la commande de convertisseurs statiques [HAUTIER 99], [GUILLAUD 01], de machines électriques [CARON 95], [DEGOBERT 97], de machines outils [BARRE 95], [DUMETZ 98], d'actionneurs piézoélectriques [GIRAUD 02] etc. Elle prend tout son intérêt lors de la détermination de la structure de commande des systèmes étudiés (voir § 1.3.2).

I. 2. 3. Bilan des divers outils

Les approches classiques ont démontré leur intérêt et leur puissance pour l'étude des actionneurs simples. De nombreux travaux ont été réalisés par le passé sur ces outils en leur apportant des règles d'analyse et d'étude pour les cas les plus variés. Ces approches ont de plus l'avantage de posséder des informations tant qualitatives que quantitatives.

Les approches par graphe sont plus intéressantes dans le cas de systèmes plus étendus ou plus hétérogènes. En effet, ces approches se focalisent sur les informations qualitatives qui permettent de mieux appréhender le système dans un premier abord. Après l'analyse globale du système ainsi modélisé, de ses flux énergétiques et de ses chaînes de cause à effet, un retour aux outils plus classiques permet alors de prendre en compte les informations quantitatives pour les exploiter. On peut remarquer que les graphes de liens mettent en avant les conversions énergétiques, ce qui en fait plus un outil de conception, et le GIC met plus en avant les variables énergétiques, ce qui en fait plus un outil de commande.

Nous considérons donc ces deux approches complémentaires, voire indissociables, pour une étude pertinente d'un système qui commence à être complexe, en vue de sa commande. Les approches classiques peuvent alors constituer un niveau détaillé des diverses composantes du système. Les approches par graphes constituent alors un niveau plus abstrait de la globalité du système, c'est à dire des échanges entre ses composantes. Cette vision d'outils de modélisation, hiérarchisés selon le degré de finesse, est à la base de la méthodologie associée à la Représentation Énergétique Macroscopique (voir Chap. II).

I. 3. Commandes des systèmes électromécaniques

La commande des systèmes électromécaniques est ici classée en deux catégories. La première est liée aux modélisations globales et vise à utiliser des outils parfois complexes permettant de résoudre plusieurs problèmes à la fois. On utilisera dans ce mémoire le terme de « commande globale ».

Le second type de commande est régi par le principe d'inversion après décomposition du système en fonctionnalités élémentaires. Chaque bloc de commande a alors pour objectif d'inverser la fonctionnalité de l'élément de base qui lui est associé. On parlera ainsi d'« approche locale ».

I. 3. 1. Approche globale : le principe d'asservissement global

Les commandes globales s'appliquent nécessairement dans le cas d'une modélisation globale du système. A partir de l'analyse de celui-ci, des outils les plus variés sont mis en œuvre pour réaliser le

cahier des charges en prenant en compte les caractéristiques du système. Ces outils sont souvent assez complexes dès lors que le système est d'ordre élevé, non-linéaire, non-stationnaire ou soumis à des perturbations stochastiques. On parle alors d'asservissement global, où la sortie et/ou les états font l'objet de mesures (ou estimations) qui vont être utilisées pour suivre la référence malgré diverses perturbations.

Commande d'état — La commande d'état est en fait la commande qui illustre le mieux le concept de commande globale. Elle utilise à profit la modélisation par représentation d'état.

La structure la plus générale de ce type de commande définit le vecteur de réglage \underline{u} en fonction de l'écart de consigne \underline{e} et du vecteur d'état \underline{x} :

$$\underline{u} = [H]\underline{e} - [K]\underline{x} \quad (3)$$

Une nouvelle équation d'état va fixer les propriétés dynamiques de l'ensemble en boucle fermée (processus et sa commande). Il faut alors déterminer les matrices $[H]$ et $[K]$ pour obtenir les propriétés désirées (stabilité et dynamique). Plusieurs méthodes sont possibles, notamment celles de placement de pôles ou de placement des vecteurs propres [FOSSARD 97]. On parle de commande par retour d'état ou de commande modale.

Malgré sa synthèse parfois très lourde, ce type de commande est particulièrement adapté aux systèmes multi-entrées multi-sorties surtout si les couplages internes sont forts (pas de décomposition possible en sous-systèmes mono-entrées mono-sorties indépendants). Toutefois, l'accessibilité aux variables d'état est nécessaire, ce qui n'est pas toujours le cas sur les systèmes physiques. La mise en œuvre d'un observateur d'état est alors requise, ce qui augmente le temps de calcul, pouvant parfois devenir prohibitif.

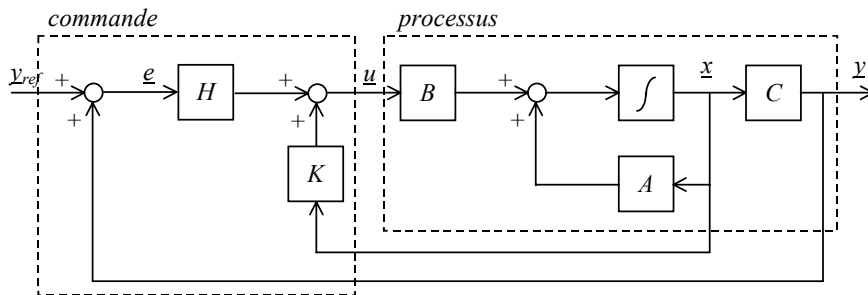


Fig. I. 5 : Représentation par schéma-blocs d'une commande d'état

Quelques commandes d'état ont été appliquées pour les machines électriques [GRELET 97] [YANG 01]. Mais c'est surtout dans le domaine de l'estimation des flux par des observateurs

[ORLOWSKA 89] [PIETRZAK 00] ou des commandes sans capteurs mécaniques qu'une modélisation d'état est utilisée [SCHAUDER 92] [ROBOAM 00].

Autres commandes — D'autres types de commandes et les outils associés rentrent dans cette démarche. Nous en présentons quelques-uns à titre d'illustration.

La commande par correcteur RST correspond tout à fait à une démarche globale. La structure même des trois parties est définie en fonction de la fonction de transfert globale désirée [GENTIL 03]. La synthèse sera ensuite réalisée afin de conférer les propriétés désirées à cette fonction de transfert de boucle fermée.

La notion de robustesse a conduit à utiliser assez rapidement des techniques de commandes adaptatives pour les actionneurs électromécaniques [LANDAU 79]. La commande à modèle de référence en est l'exemple le plus révélateur. Un modèle global du processus et de sa commande est utilisé, et des correcteurs adaptatifs ont pour but d'adapter la commande pour converger vers ce modèle [ZHEN 98] [ELBULUK 02]. On peut aussi citer la synthèse "H infini" dont l'objectif est de synthétiser globalement la commande en fonction d'un critère qui doit être respecté sur une plage de variation paramétrique définie [FONT 97].

Les commandes plates [FLIESS 95] ont été appliquées récemment au domaine des machines électriques. Elles mènent en fait à définir des trajectoires de références adaptées en fonction des diverses dynamiques du système pour ne pas les solliciter. Nous avons appliqué ce type de commande pour un système enrouleur dérouleur de bande textile [CHARLEMAGNE-03a]. Dans ce cas, un modèle global est également utilisé afin de définir une trajectoire avec un certain nombre de dérivées finies.

Les premières applications de la logique floue et des réseaux de neurones pour les systèmes électromécaniques ont été réalisés dans une démarche globale. Elles ont ensuite été focalisées sur les parties du système les plus délicates (non-linéarités, méconnaissance du modèle) [BÜHLER 97] mais toujours dans l'état d'esprit de l'asservissement global du sous-système considéré. En effet, la partie considérée est prise dans son ensemble sans les considérations énergétiques qui lui sont propres. Nous verrons dans la partie bilan que cela correspond à mixer les deux approches locales et globales [FORGEZ 98]. Ces techniques sont maintenant davantage utilisées pour assurer une supervision de ces systèmes [BERTEREAU 01] [GENTIL 03].

Les commandes à modes glissant, notamment les commandes directes du couple [TAKAHASHI 86] [DEPENBROCK 88] et ses dérivées [CHAPUIS 96] [ROBOAM-00b] [MONMASSON 01], illustrent bien le concept de commande globale. En effet, dans le cas de correcteurs à hystérésis, la gestion de la machine mais aussi de l'onduleur sont réduites à des simples fonctions.

De nombreux autres types de commande peuvent être associés à cette démarche : linéarisation entrée-sortie, commande optimale [BORNE 90], commande à modèle interne [MORARI 89] [HARNEFORS 98], commande à modèle de comportement [BARRE 97] [HAUTIER 97] etc.

Philosophie de l'approche globale — La démarche de commande globale a pour objectif de considérer le système dans sa globalité et de prendre ainsi en compte les interactions entre ses diverses composantes. Elle fait appel à des théories automatiques élaborées qui permettent de résoudre des problèmes complexes. Le cahier des charges de la commande du système est ainsi respecté malgré les divers inconvénients liés à la modélisation ou à la mise en œuvre de la commande. On peut remarquer de plus, que la résolution globale de la commande mène à une réduction du nombre de capteurs et parfois du temps de calcul (moins d'opérations que les commandes globales, mais ces opérations sont souvent beaucoup plus complexes !).

Cependant, comme elle est basée sur un modèle global, elle en possède les inconvénients. En effet, si la modélisation fait disparaître les variables énergétiques locales, la gestion du système peut s'en trouver altérée. Par exemple, on a vu émerger des commandes de machines asynchrones sans boucle de courant : comment alors assurer une limitation en cas de dysfonctionnement et éviter une détérioration des enroulements ? L'expertise du système est alors très importante pour éviter ce genre de disconvenues.

I. 3. 2. Approche locale : le principe d'inversion

L'approche locale consiste à définir la commande d'un système à partir des lois de commande de chacun de ses constituants. Elle repose donc plus sur une modélisation locale.

Le principe d'inversion est alors appliqué aux divers constituants du système. Ce principe a été en fait surtout explicité par les utilisateurs du GIC [HAUTIER 96]. S'il est souvent sous-jacent à d'autres modélisations locales (fonctions de transfert par exemple), il est à la base de déduction d'un graphe de commande à partir d'un GIC de modélisation.

Nous verrons, de plus, que contrairement à l'approche globale, la sortie n'est pas nécessairement mesurée. Les asservissements sont locaux et répondent à des tâches bien précises de gestion d'énergie.

Le principe d'inversion — Le principe d'inversion a été développé avec l'approche GIC [HAUTIER 96] : « pour obtenir le bon effet, il faut appliquer la bonne cause ». En d'autres termes, pour une relation entrée-sortie, imposer la sortie désirée passe par appliquer l'entrée appropriée. La commande devant définir cette entrée appropriée (entrée de réglage) à partir de la sortie désirée (consigne ou référence), elle doit ainsi inverser la relation entrée-sortie du processus. Trois inversions de base peuvent être définies : les autres possibilités en sont déduites.

Une relation rigide mono-entrée est inversible mathématiquement et physiquement si elle est bijective. En effet, l'entrée et la sortie sont reliées par une relation indépendante du temps, qui n'induit pas de retard entre la sollicitation et le résultat. Si nous reprenons l'exemple d'une relation rigide

simple, l'entrée e_{reg} à appliquer pour la sortie désirée s_{ref} , s'obtient par inversion directe de la relation mathématique entre ces variables :

$$s(t) = k e(t) \quad \Rightarrow \quad e_{reg}(t) = \frac{1}{k} s_{ref}(t) \quad (4)$$

La représentation de cette inversion est similaire à celle du processeur rigide, faisant apparaître une flèche bidirectionnelle (Fig. I. 6.a).

Une relation causale mono-entrée exprime une causalité intégrale entre l'entrée et la sortie. Sa relation inverse correspondrait à une causalité dérivée, qui n'est pas physique. L'inversion d'une telle relation n'est donc pas physiquement réalisable. En effet, ce type de relation est lié à l'énergie et indique un régime transitoire pour passer d'un état de stabilité à un autre.

Pour contourner cette difficulté d'inversion, on utilise alors un asservissement de la sortie dont le correcteur (de causalité intégrale) aura pour but de minimiser l'écart entre sa référence et sa mesure. Un régime transitoire est alors nécessaire conformément au transit d'énergie. Si, dans le cas d'une relation rigide connue, aucun capteur n'était nécessaire, dans le cas d'une relation causale, la sortie doit nécessairement être mesurée (ou estimée). Si nous prenons une relation causale générique, l'entrée de réglage est obtenue par un asservissement de la sortie mesurée s_{mes} à sa référence s_{ref} :

$$s(t) = k \int e(t) dt \quad \Rightarrow \quad e_{reg}(t) = C [s_{ref}(t) - s_{mes}(t)] \quad (5)$$

avec $C[s_{ref} \sim s_{mes}]$ la fonction correcteur.

La représentation de cette inversion est similaire à celle du processeur rigide, faisant apparaître une flèche unidirectionnelle et la mesure de la sortie (Fig. I. 6.b).

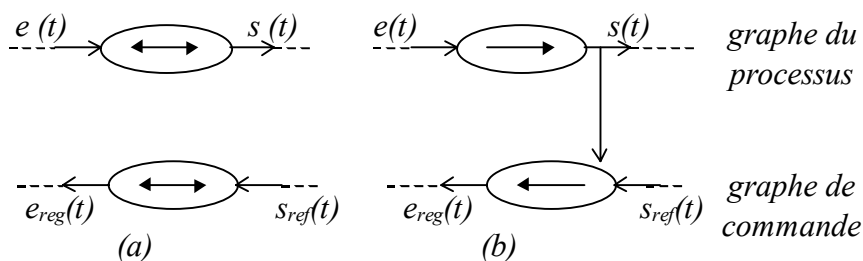


Fig. I. 6 : Inversion des CIG : (a) processeur rigide, (b) processeur causal

Certaines sorties dépendent de plusieurs entrées. Dans le cas de commandes classiques, l'une des entrées est choisie comme moyen d'action pour faire évoluer la sortie. De ce fait les autres entrées deviennent des entrées de perturbation : elles font évoluer la sortie de manière non désirée. Le GIC

requiert de prendre en compte ces entrées afin de mieux maîtriser la sortie. Prenons par exemple une relation rigide avec deux entrées. Si l'entrée e_1 est choisie comme entrée de réglage, alors elle est obtenue directement par inversion :

$$s(t) = e_1(t) + e_2(t) \quad \Rightarrow \quad e_{1-reg}(t) = s_{ref}(t) - e_{2-mes}(t) \quad (6)$$

Cela implique une mesure de l'entrée e_2 . Le rejet de cette perturbation est ainsi réalisé à l'aide d'une opération explicite.

Les commandes déduites par GIC ont permis de développer des solutions originales et performantes de commande de convertisseurs statiques [GUILLAUD 01], de filtres actifs [WULVERYCK 00], de machines électriques [DEGOBERT 00], de machines outils [DUMETZ 98], d'actionneurs piézoélectriques [GIRAUD 02], de systèmes de traction [PIERQUIN 02a] etc.

Autres commandes locales — Le principe des commandes à boucles imbriquées correspond souvent à une commande locale déduite par inversion. L'idée est de décomposer le système le plus possible afin de maîtriser au mieux les diverses variables internes et d'augmenter la robustesse de l'ensemble [BERTRAND 97]. Il faut cependant noter que cette démarche découle à l'origine d'une approche plus globale. De ce fait, elle apparaît beaucoup plus intuitive, notamment sur la prise en compte ou non des perturbations : la compensation de la f.e.m d'une machine à courant continu est rarement discutée sauf rares exceptions [LOUIS 99]. Les commandes à boucles imbriquées et avec découplage sont les commandes les plus utilisées en commande de machines. En effet, elles permettent d'intégrer aisément les limitations nécessaires des grandeurs sensibles (courants et tensions notamment).

L'approche GIC pousse à son maximum la formalisation de commandes à gestion locale : le système est décomposé au maximum, et toutes les opérations possibles (gains, asservissement, rejet explicite de perturbation) sont mises en évidence, discutées puis réalisées si jugé nécessaire.

Philosophie de l'approche locale — On démontre que toute relation peut se décomposer en une combinaison des trois relations étudiées (causale, rigide, multi-entrées). Un graphe de commande se déduit alors de manière systématique du GIC du processus.

La commande obtenue contient un maximum d'opérations et de mesures (les grandeurs non mesurables étant abordées dans un second temps, voir Chap. II). En fait, cette démarche vise à maîtriser l'énergie au mieux dans chaque composante du système. Les opérations de limitation de grandeurs sensibles sont alors immédiates et directes. De plus, il est reconnu qu'une telle décomposition de la commande augmente la robustesse globale du système [GENTIL 03].

Dans une phase d'implantation de la commande, certaines opérations sont simplifiées ou supprimées en fonction d'hypothèses bien définies. Par exemple, si l'entrée de perturbation e_2 est de valeur faible devant l'entrée de réglage e_1 , on peut ne pas la compenser. On part de la commande la plus complète vers une commande simplifiée.

Il est aussi à noter que la notion d'asservissement est introduite d'une manière tout à fait originale : élément pour inverser une relation physiquement non inversible (on parle d'inversion indirecte). Cette deuxième manière d'aborder cette notion, est tout à fait complémentaire de la manière classique, ce qui en fait un atout pédagogique indéniable.

1. 3. 3. Bilan des deux approches

Les deux approches présentées ont des visions duales et complémentaires basées sur la globalité ou la décomposition du système en fonctionnalités locales. L'avantage de la démarche globale est la prise en compte des interactions entre les diverses composantes du système. L'intérêt de la démarche locale est la gestion optimale de l'énergie au plus près des éléments qui lui sont liés. On peut d'ailleurs penser que la commande optimale correspond à un savant mélange des deux approches : trouver la partie à sensible du système pour y appliquer un asservissement global. Pour les systèmes électromécaniques classiques, ces deux approches ont souvent été combinées ou ont abouti à des solutions similaires. En fait, l'expertise des systèmes électromécaniques classiques est si bonne dans la communauté Génie Electrique, que l'étude d'un système dans sa globalité ou par l'association de fonctionnalités revient à la même chose : on a déjà en tête toutes les contraintes.

C'est à mon avis la raison pour laquelle, le GIC et le principe d'inversion ne se sont pas développés dans notre communauté ces dernières années, malgré une approche originale et une démarche systématique. En effet, les solutions dégagées ne se démarquaient pas assez des autres solutions, ni par leurs structures, ni par leurs performances.

On peut cependant remarquer que lors de l'étude de systèmes interdisciplinaires, le GIC a permis de trouver assez rapidement des solutions tant originales que performantes : dynamiques élevées pour machines outils [DUMETZ 98], anti-patinage pour véhicule [PIERQUIN 01], commandes découplées pour actionneurs piézoélectriques [GIRAUD 02], etc. La phase de développement initial sur des actionneurs classiques portent maintenant tous ses fruits sur des systèmes moins standards ou pluridisciplinaires.

1. 4. Limites des outils classiques

Les divers outils de modélisation et de commande ont tous fait leurs preuves par rapport à des applications ou des problématiques que nous nommerons « mono-machine mono-convertisseur ». Ils

ont d'ailleurs, pour certains, été discutés lors d'inter GdR entre les communautés d'Electrotechnique et d'Automatique. Cependant, l'objet de ce mémoire concerne les systèmes multimachines multiconvertisseurs, c'est à dire des systèmes électromécaniques avec un plus grand nombre de composantes de puissance. Après une caractérisation de tels systèmes, nous montrerons les limites des outils classiques et l'intérêt d'une représentation supplémentaire, mais aussi complémentaire aux outils précités.

I. 4. 1. Spécificités des SMM

Les systèmes multi-machines multi-convertisseurs sont des systèmes composés de plusieurs machines électriques et convertisseurs électriques et mécaniques qui ne peuvent pas être considérés comme des sous-systèmes indépendants. En fait la conversion d'énergie, en fonction d'un but, est décomposée en plusieurs chaînes énergétiques, couplées en certains points. Lorsque ces couplages ne sont pas négligeables, les SMM ne peuvent plus être considérés comme des sous-systèmes mono-machines mono-convertisseurs indépendants [SMM 00a]. S'ils ont été considérés comme tels par le passé, notamment pour la simplicité des commandes que cela induisait, ces couplages sont de plus en plus pris en compte face à l'exigence de dynamique et de précision. La globalité du système doit alors être considérée, ou du moins les interactions entre les sous-systèmes.

Cette prise en compte des couplages a commencé à se faire au cas par cas. En France, une opération du GdR SDSE³, puis du GdR ME2MS⁴ (voir Annexe « projet SMM des GdR ») a permis de développer une étude plus large de ces systèmes [SMM 00b]. Les principales applications étudiées dans ce cadre concernent la traction ferroviaire [PEÑA 02], [BOUSCAYROL 02b], la traction automobile électrique [DEOLIVERA 01], [PIERQUIN 02], la propulsion navale via les machines polyphasées [SEMAIL 00], [HADIOUCHE 01b] [MARTIN 02], [ROBERT 02].

I. 4. 2. Intérêt d'une représentation plus synthétique

Nous avons vu que l'étude de systèmes plus larges a mené au développement de l'approche par graphe qui permet de se focaliser, à un moment donné, sur les informations qualitatives. Il est évident que les modélisations classiques ne répondent pas au critère de lisibilité lorsque le système présente un ordre élevé (voir Annexe "Différentes représentations d'un système"). Sans aller bien loin, qui ne perdrait pas les réalités physiques dans une matrice dynamique d'ordre 10 ? Ou alors, quel non-spécialiste arrive-t-il à bien comprendre le fonctionnement d'un modèle de machine asynchrone un peu sophistiqué avec une représentation par fonctions de transfert ou schéma-blocs ? Ce type de

³ Groupe de Recherche du CNRS « Sécurité et Disponibilité des Systèmes Electriques » (1998-2001)

⁴ Groupe de Recherche du CNRS « Maîtrise de l'Energie Electrique, du Matériau au Système » (2002-2005)

modélisation contenant trop d'information, on se retrouve alors avec des schémas possédant beaucoup de blocs, un grand nombre de variables et de trop nombreuses liaisons.

Si la modélisation par graphe peut permettre une vision plus synthétique des systèmes mono-machines mono-convertisseurs, on tombe rapidement dans le même travers que les schémas-blocs, dès que le système comprend deux actionneurs. En effet, ces graphes ont été développés pour analyser de manière fine les systèmes et contiennent de ce fait un grand nombre d'informations. Cette caractéristique en fait d'ailleurs leur force : même en occultant les informations quantitatives, on retrouve quand même les principales propriétés⁵ du système.

Un niveau supplémentaire de modélisation est alors d'un grand intérêt dès lors que l'on étudie des SMM. Ce niveau de représentation doit être suffisamment synthétique pour offrir une vision globale du système. On s'efforcera d'ailleurs de faire ressortir les diverses composantes du système (une machine par exemple) pour les localiser aisément. Ce niveau de modélisation doit contenir suffisamment d'information pour offrir une vision juste du système : les propriétés essentielles ne doivent pas être occultées. On s'efforcera de faire ressortir les variables énergétiques qui sont les clefs de la bonne gestion du système. Ce niveau de modélisation doit pouvoir aisément être connecté avec les autres niveaux de modélisation. On s'efforcera de faciliter les transitions inter-niveaux qui sont nécessaires. Ce niveau de modélisation doit permettre de proposer une structure de commande à la manière du GIC. On s'efforcera d'organiser la commande elle-même en plusieurs niveaux, ce qui semble naturel pour de tels systèmes.

C'est avec ce cahier des charges, que la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) a été développée (voir Chap. II). Elle se veut ainsi un outil complémentaire aux outils classiquement utilisés.

⁵ On verra de plus au chapitre II, que le principe de totalité de la systémique indique qu'une remise en cause de certaines propriétés locales est possible.

**Chap - II. Outils de représentation et de commande
de systèmes multimachines multiconvertisseurs**

Chap - II. Outils de représentation et de commande de systèmes multimachines multiconvertisseurs

Résumé du chapitre

Ce chapitre propose une démarche originale pour la représentation et la commande des Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM). Les outils "classiques" montrent en effet des limites pour l'étude de ces systèmes (Chap. I).

L'approche systémique (§ II.1) est ainsi utilisée pour développer divers outils de représentation imbriqués (§ II.2). Outre une représentation synthétique basée sur des concepts énergétiques, une méthodologie de structuration de commande de tels systèmes est proposée (§ II.3). L'intérêt et les limites de la méthodologie sont enfin abordés (§ II.4).

La démarche théorique de ce chapitre sera illustrée dans le chapitre suivant (Chap. III) au cours duquel un exemple complexe de SMM sera traité depuis sa modélisation jusqu'à la mise en œuvre de sa commande.

II. 1. La systémique, point de départ

II. 1. 1. L'approche systémique

II. 1. 2. Complémentarité avec l'approche cartésienne

II. 1. 3. Apports de l'approche systémique pour les SMM

II. 2. La Représentation Énergétique Macroscopique (REM)

II. 2. 1. Les différents éléments de la REM

II. 2. 2. Les règles d'association

II. 2. 3. L'extension aux SMM

II. 3. La Structure Maximale de Commande (SMC)

II. 3. 1. Extension du principe d'inversion

II. 3. 2. La résolution des couplages des SMM

II. 3. 3. Les structures pratiques de commande

II. 4. Bilan critique de la REM

II. 4. 1. La REM, qu'est-ce que c'est ?

II. 4. 2. La REM, quelles implications ?

II. 4. 3. La REM, quelles limites ?

II. 4. 4. La REM, quelles applications ?

II. 1. La systémique, point de départ

Ce paragraphe a pour objet d'introduire l'approche systémique qui est à la base des outils développés au L2EP pour l'étude des SMM. Cette approche transdisciplinaire * est surtout utilisée en écologie [DEROSNEY 96], [ALLAIN 01], en management et qualité pour l'industrie [REBIS 03], en psychanalyse, en sciences animales [SAUVAT 03], en science de l'éducation [REBIS 03], mais peu en sciences technologiques.

Afin de faciliter la lecture, les termes spécifiques à la systémique, associés à un astérisque *, sont définis dans un lexique (voir Annexe « Petit lexique de Systémique »). Le lecteur est invité à s'y reporter.

II. 1. 1. L'approche systémique

Système et systémique — Le système *, concept central de l'approche systémique, est un ensemble d'éléments en interactions dynamiques, organisés en fonction d'un but [DEROSNEY 75]. Ce système interagit avec des environnements qu'il peut influencer et qui peuvent l'influencer.

La systémique étudie les éléments d'un système, non pas comme des éléments isolés, mais comme des éléments en interactions correspondant à une entité globale. Contrairement à l'approche réductionniste * (le système se réduit à ses composants les plus simples), la systémique correspond donc à une approche holistique * (le système est une entité possédant des propriétés non réductibles et non déductibles de celles de ses éléments).

Historique de la systémique [ALLAIN 01] — L'approche systémique a été initiée dans les années 40, par la rencontre entre la biologie et l'électronique qui va mener à la cybernétique * ou l'étude des régulations chez les êtres vivants et les machines avec idées de boucles, de rétroactions, de régulations (N. Wiener, mathématicien, 1948). Cette démarche a ouvert les voies de l'automation * et de l'informatique. Dans les années 50, les notions de mémoire, de reconnaissance et d'adaptatif ouvrent des voies à la bionique *, la robotique et l'intelligence artificielle. Un premier pas est franchi mais l'approche systémique n'est pas encore définie.

En 1950, L. Von Bertalanffy, un biologiste, va exprimer le premier réel concept de systémique avec la notion de système ouvert *. Ces systèmes échangent de la matière, de l'énergie ou de l'information avec leurs environnements contrairement aux systèmes fermés, base de l'approche analytique classique (conservation de l'énergie par exemple).

Au cours des années 50-60, des domaines très variés sont abordés, biologie, écologie, entreprise, ingénierie industrielle, sociologie, sciences politiques et psychiatrie. Par exemple, un groupe de

chercheurs devient célèbre pour une thérapie systémique (G. Bateson, anthropologue, 1959). Une vision synthétique des problèmes complexes est ainsi envisagée.

Dans les années 70, les concepts théoriques sont mieux explicités. J. de Rosnay invente la notion de "macroscope", outil idéal pour l'étude des systèmes complexes, par opposition au microscope pour l'étude de l'infiniment petit et du télescope pour l'étude de l'infiniment grand [DEROSNAY 75]. J. L. Le Moigne définit la théorie du système général [LEMOIGNE 77].

Caractérisation du système — Un système est un ensemble d'éléments en interactions dynamiques, organisé en fonction d'un but [DEROSNAY 75]. Il se caractérise par sa frontière (limite avec l'environnement), sa finalité, son évolution, son organisation, sa structure et ses processus (activités et interactions).

La première qualité d'un système ouvert est sa capacité d'adaptation aux changements de son environnement, pour assurer sa survie, son fonctionnement. Ces adaptations se font par rétroaction *, mode de régulation * du système. Les flux entrant et sortant sont faits de matière, d'énergie et d'information.

Les composantes du système sont ainsi considérées comme des fonctions. Si nécessaire, un sous-système peut être considéré comme un système, les autres sous-systèmes devenant de fait des environnements. La brique de base est alors considérée comme une boîte noire * : le niveau d'information pour lequel il n'est pas pertinent d'accéder en fonction de l'objectif défini ; seules les entrées et les sorties sont alors considérées.

L'interaction * entre deux éléments est basée sur la causalité circulaire * : ils s'influencent mutuellement. La rétroaction * est ainsi une caractéristique essentielle du système, qui induit en particulier sa stabilité. On parle ainsi d'homéostasie *, i. e. l'aptitude à fonctionner malgré les variations des environnements.

Une autre caractéristique importante d'un système semble être ses éléments de stockage et de réservoir. En effet, ces éléments vont permettre et conditionner l'évolution du système.

Représentation du système [SAUVAT 03] — La représentation du système peut être réalisée de deux manières différentes. Une représentation structurelle met en avant la structure des divers éléments. Une représentation fonctionnelle met en avant des fonctions caractérisant le système. On retrouve les deux grandes catégories de logiciels graphiques de simulation [BOUSCAYROL 03a]. Les logiciels "circuit" (SPICE, PSim, SABER...) possèdent des bibliothèques structurelles d'éléments à associer via des liens physiques. Les logiciels "systèmes" (Matlab-Simulink...) possèdent des bibliothèques de fonctions à assembler via des variables communes.

La représentation idéale d'un système est mécaniste (explicative ou analytique), stochastique (prise en compte des moyennes, mais aussi des variations) et dynamique (prise en compte de l'évolution

temporelle). Cependant, selon la complexité * du système, elle peut être réduite à un modèle empirique (boîte noire *), déterministe, statique.

Organisation du système [SAUVAT 03] — Quelle que soit la représentation adoptée, elle doit comporter une organisation spatiale et une organisation temporelle. L'organisation spatiale consiste en un empilement de niveaux, du plus global (niveau descriptif) au plus analytique (niveau explicatif). Les changements de niveau ou changement d'échelle sont souvent effectués par une alternance entre démarches ascendante et descendante. Concernant l'organisation temporelle, il faut remarquer que le niveau global a la dynamique la plus lente. Mais elle est directement issue des dynamiques rapides des sous-niveaux. La gestion temporelle du système fait alors apparaître des aspects de stratégie * (gestion à long terme, niveau global) et de tactique * (gestion à court terme, niveaux sous-jacents).

Le principe d'équifinalité * — Un même système peut réaliser ses buts à partir de différentes conditions initiales et de différents moyens. Il n'y a donc pas de solution unique ou exclusive. Ce principe est surtout utilisé dans les sciences humaines où les systèmes correspondent plus à des concepts qu'à des entités matérielles.

Le principe de totalité * — Le caractère holistique * de la systémique est exprimé par le principe de totalité. Les propriétés propres de chaque élément du système ne suffisent pas à le caractériser. En effet, l'association des éléments peut annihiler certaines de ces propriétés, et en faire apparaître d'autres. C'est la raison pour laquelle, le système doit être étudié dans son ensemble.

La transdisciplinarité — La systémique a pour vocation la transdisciplinarité *, i.e. le développement de concepts nouveaux regroupant plusieurs disciplines. Il est à noter que la pluridisciplinarité * ne correspond pas à une approche systémique puisqu'elle s'apparente à une approche réductionniste : les différentes parties sont étudiées séparément par des spécialistes de chaque discipline. L'interdisciplinarité * en revanche peut être suffisante car elle implique des interactions entre disciplines.

La subjectivité — La systémique souligne la subjectivité des modèles et représentations introduites. Ils sont le fait d'un observateur qui poursuit ses propres finalités. Une telle modélisation n'est donc pas exhaustive [REBIS 03].

Pilotage d'un système — Il dépend de la représentation qui en a été faite [REBIS 03] et donc de la qualité du "modélisateur" [SAUVAT 03]. Le pilotage du système nécessite le contrôle de ses relations avec ses environnements, de ses activités internes, l'analyse des performances pertinentes pour

l'objectif et la vérification de l'atteinte de cet objectif. L'organisation hiérarchique du pilotage dépend du degré de spécificité requis à chaque niveau : apparition des notions de stratégie * et de tactique *.

II. 1. 2. Complémentarité avec l'approche cartésienne

L'approche cartésienne ou analytique — Elle correspond à la vision classique de la science. Cette approche linéaire est basée sur le concept de séparabilité : le système est ramené à ses éléments constitutifs les plus simples. Cette fragmentation induit la pluridisciplinarité mais pas l'interdisciplinarité. Elle est régie par une logique d'exclusion, contrairement à la systémique qui est régie par une logique de complémentarité.

En revanche, l'approche analytique mène à une connaissance des détails qui est à la base de l'essor même de la science. De plus, elle donne un modèle unique au système.

Complémentarité des deux approches — Les deux approches ne sont pas antagonistes mais complémentaires [DEROSNAY 75]. L'approche systémique englobe l'approche analytique, sans pouvoir s'en passer. Les éléments du système sont ainsi caractérisés plus par leurs fonctions, qui ne pourront découler souvent que d'une première étude analytique.

II. 1. 3. Apports de l'approche systémique pour les SMM

Pourquoi la systémique n'est-elle pas utilisée ? — Les systèmes étudiés en Génie Electrique jusqu'à présent correspondent le plus souvent à des systèmes pour lesquels la démarche analytique est suffisante. En effet, les études portent le plus souvent sur des entités ou objets simples (machines électriques, convertisseurs statiques, transformateurs...) dont la physique est relativement bien connue. Divers niveaux de modélisation ont ainsi été proposés avec des degrés de finesse en accord avec leur finalité : des éléments finis pour l'analyse et la conception [CLENET 01] aux modèles électriques équivalents pour la commande en temps réel [LEMAIRE 97].

Vers des applications pluridisciplinaires — La première remarque que l'on peut faire est une évolution de la recherche en Génie Electrique vers des applications nécessitant d'autres disciplines. Par exemple, le développement des actionneurs piézo-électriques demande des connaissances en matériaux et en tribologie [GIRAUD 02], la mise au point de nouvelles machines outils demande des connaissances en mécanique et en automatique [DUMETZ 98], etc. Il est clair que la pluridisciplinarité qui est de mise actuellement, doit être dépassée pour aller vers l'interdisciplinarité, voire la transdisciplinarité.

L'étude des SMM, caractérisés par des couplages électriques, magnétiques et mécaniques, rentre tout à fait dans cette problématique. Diverses compétences sont donc nécessaires, notamment une

connaissance mécanique poussée pour l'étude de systèmes de traction par exemple [BOUSCAYROL 02c]. Les divers couplages d'un même système étant souvent interdépendants (cas de la traction ferroviaire par exemple, [PENA 02]), une étude pluridisciplinaire n'est pas suffisante.

Vers des systèmes plus complexes — La tendance actuelle est d'avoir une vision plus large des systèmes électromécaniques. Un moteur n'est plus considéré comme une entité à part entière, mais comme un élément associé à son alimentation, sa "charge" mécanique et sa commande. La conversion électromécanique est ainsi de plus en plus envisagée d'une source d'origine vers un élément de réception. Par exemple, un système de conversion d'énergie éolienne est étudié en prenant en compte ses diverses composantes : la turbine, la machine électrique, les divers convertisseurs statiques, les divers filtres, le transformateur, la commande [BOUSCAYROL 02a]. Une volonté forte apparaît pour maîtriser les conversions électromécaniques par l'étude détaillée des fonctions locales et la prise en compte des fonctionnalités globales des divers éléments. On peut ainsi citer à juste titre l'actuel GdR (Groupe de Recherche du CNRS) de la communauté "Génie Electrique" : "Maîtrise de l'Energie Electrique du Matériau au Système" (dirigé par le Pr. F. Bouillaut, 2002-2005).

Les SMM correspondent à des systèmes avec un certain nombre de composantes de puissance dont les couplages imposent des contraintes fortes. Le projet SMM du GdR (Voir Annexe « Opération SMM des GdR ») a démontré qu'une étude globale est nécessaire, même si l'approche réductionniste a prévalu par le passé. Ce projet s'est clairement positionné dans une démarche holistique * [SMM-00a].

Vers des systèmes multifonctionnels — Une autre tendance du Génie Electrique est de proposer des systèmes "multifonctionnels". On peut citer par exemple, la volonté d'établir des systèmes à fortes redondances pour augmenter la fiabilité d'une fonctionnalité. Les actionneurs de l'aéronautique en sont un exemple révélateur [MONMASSON 02]. Les connaissances acquises dans les systèmes électromécaniques ou électriques permettent maintenant d'envisager des modes de marche dégradée lors d'une mise en défaut de l'une (voire plusieurs) des composantes. Par exemple, la montée en puissance des études sur les machines polyphasées [SEMAIL 00] est liée à la possibilité d'assurer un fonctionnement acceptable malgré l'absence d'une phase. Ces deux aspects ont été soulignés par le thème central du précédent GdR de notre communauté : "Sûreté et Disponibilité des Systèmes Electriques" (dirigé par le Pr. J. P. Rognon, 1998-2001).

Les fonctionnements en marche dégradée sont l'une des caractéristiques importantes des SMM. En effet, l'utilisation de plusieurs chaînes de conversion couplées permet d'envisager des solutions "secondaires" en cas de défaillance de l'une des chaînes [SMM-03]. Plusieurs solutions sont ainsi envisageables pour arriver au même but, conformément à l'approche systémique (principe d'équifinalité).

Vers des systèmes plus perturbateurs — L'augmentation des systèmes d'électronique de puissance dans une même application n'est pas sans inconvénients. En effet, si les convertisseurs statiques permettent une modulation de l'énergie électrique avec de faibles pertes, les commutations des interrupteurs induisent des perturbations harmoniques. Ces phénomènes sont nocifs quant à la qualité de l'énergie et perturbent les signaux de mesure et de commande. L'électrification croissante des systèmes embarqués rentre tout à fait dans ce cadre : les perturbations induites sont d'autant plus gênantes que le système est autonome et que la source de puissance est limitée.

Les SMM n'échappent pas au problème. En effet, les couplages électriques assurent une transmission des perturbations d'une chaîne de conversion sur les autres [SMM-00b]. Si les perturbations électriques sont évidentes pour notre culture, on peut remarquer que ces contraintes se retrouvent en mécanique : les effets de vibrations d'un boggie sur un autre lors du patinage d'une roue en traction ferroviaire en sont une bonne illustration [ESCANE 00].

II. 2. La Représentation Energétique Macroscopique (REM)

Afin de répondre aux nouvelles contraintes d'étude de systèmes électromécaniques plus complexes, une représentation synthétique a été proposée. Elle n'a pas pour vocation de remplacer les représentations classiques, mais plutôt de les compléter par une vision plus globale, conformément à l'approche systémique. En effet, comme nous le verrons à la fin de cette partie, la REM peut être considérée comme une encapsulation de représentations plus conventionnelles et plus locales, déduites d'une approche analytique. Il faut insister sur la notion de représentation qui n'est, en fait, qu'une organisation d'une modélisation donnée. Cette démarche s'insère logiquement dans celle de formalisation des commandes de système du L2EP, des premiers travaux sur les convertisseurs statiques [HAUTIER 89], au développement du Graphe Informationnel Causal [HAUTIER 96], [GUILLAUD 00].

Il faut noter que l'objectif de cette partie est de donner les éléments caractéristiques de la REM et de la situer par rapport à d'autres types de modélisation. Une description détaillée est donnée dans la littérature [BOUSCAYROL-00], [SMM 00a], [BOUSCAYROL 02b] et le cours du DESS GR2E et du DEA Génie Electrique de Lille est disponible sur le serveur web <http://www.univ-lille1.fr/l2ep/smm-tp.htm> [BOUSCAYROL 03a].

II. 2. 1. Les différents éléments de la REM

Cet outil de représentation reflète le travail collectif de l'opération SMM de l'équipe Commande du L2EP depuis 1998 (voir Annexe « Thème SMM du L2EP »).

La REM (Représentation Energétique Macroscopique) est une description graphique d'un système de conversion d'énergie. Les divers éléments du système seront ainsi décrits par des pictogrammes spécifiques reliés par des flèches symbolisant les variables d'interaction entre ses diverses composantes, i.e. leurs échanges énergétiques. Cette description rentre tout à fait dans l'approche systémique : un système est un ensemble d'éléments interagissant entre eux et avec l'environnement.

Dans le but d'une application à des systèmes complexes, les formes et couleurs des divers pictogrammes sont définies avec précision. En effet, une vue d'ensemble doit permettre de localiser rapidement les éléments clefs du système.

Conversion d'énergie entre deux sources — Les systèmes étudiés consistent à convertir la forme de l'énergie entre une source génératrice et une source réceptrice. Les sources seront ainsi considérées comme des environnements du système de conversion, qui pourra alors être décomposé en éléments en interaction. La notion de transfert d'énergie est donc au cœur de l'étude.

Principe d'action et réaction — Ce principe est un concept fondateur de la représentation développée. Il peut s'énoncer comme suit :

***Toute action d'un environnement sur un système,
induit une réaction du système sur cet environnement.***

La réciproque est bien évidemment vraie : une action du système induit une réaction de l'environnement. On peut illustrer ce principe par un exemple simple d'un générateur de tension alimentant une charge passive : le générateur impose une tension à la charge qui induit alors un courant de circulation entre les deux éléments, notamment dans le générateur possédant ses propres limitations.

Etant donné qu'un système peut se décomposer en sous-systèmes dont les autres éléments deviennent des environnements, ce principe est étendu aux éléments constitutifs du système.

Ce principe a l'avantage de mettre en avant la notion de réaction qui est parfois négligée dans une démarche analytique et locale. Par exemple, lors de la modélisation d'une machine à courant continu, on considère souvent le courant d'induit comme une variable intermédiaire en omettant, pour les besoins de l'étude, cette réaction sur le système d'alimentation.

En considérant la définition de la puissance instantanée échangée entre deux éléments (produit d'une variable cinétique et d'une variable potentielle), les variables d'action et de réaction sont explicitées comme suit :

***Toute action de nature potentielle d'un élément sur un second
induit une réaction de nature cinétique, et vice-versa.***

***La puissance instantanée échangée correspond
au produit de la variable d'action par celle de réaction.***

L'exemple du générateur de tension et de sa charge illustre bien ces notions : la puissance $p = ui$ est induite par la variable potentielle d'action, la tension u , et la variable cinétique de réaction, le courant i .

Notion de source — Les sources d'énergie sont donc considérées comme des environnements. Elles peuvent être définies comme des éléments imposant des variables d'état (leurs sorties) sur le système. Cette définition est à rapprocher de la notion de source en Electronique de Puissance [FOCH 89] et ne doit pas être confondue avec celle d'un générateur. En effet, les sources sont par définition génératrices et/ou réceptrices d'énergie.

Les sources constituent donc des éléments terminaux de la représentation. Elles sont représentées par des pictogrammes ovales de couleur verte qui ne possèdent qu'un seul vecteur d'entrée et qu'un seul vecteur de sortie.

Notion d'accumulateur d'énergie — Le GIC a l'avantage de mettre en évidence les relations causales, c'est à dire celles qui figent la causalité intrinsèque d'un processeur. Cette notion est fondamentale car elle induit la notion d'accumulation d'énergie avec tout ce qu'elle implique : la variable énergétique ne peut être qu'une sortie de l'élément, elle ne peut pas subir de discontinuité, l'élément va imposer un régime transitoire et donc un temps de réponse dans la chaîne de conversion. Cette notion est à rapprocher de celle de stockage et de réservoir que l'approche systémique considère comme des éléments clefs pour l'évolution du système.

Un élément d'accumulation est défini pour prendre en considération cette fonction de stockage temporaire d'énergie (effet tampon). Comme cet élément a pour objectif de relier au moins deux autres éléments, il possède un vecteur d'entrée et un vecteur de sortie en amont (vecteurs d'action et de réaction avec l'élément amont), un vecteur d'entrée et un vecteur de sortie en aval (vecteurs d'action et de réaction avec l'élément aval).

Cet élément d'accumulation est représenté par un pictogramme rectangulaire orange possédant une barre oblique caractéristique de la rupture de la conversion instantanée.

Notion de convertisseur idéal d'énergie — Le GIC met aussi en exergue l'association de processeurs rigides assurant la conversion d'énergie : les modulateurs et les gyrateurs. Cette notion est ici étendue.

Un élément de conversion convertit de l'énergie sans accumulation d'énergie. Il relie ainsi deux sources équivalentes en assurant une modulation d'une des variables sans prélèvement de puissance. On lui associe de plus, une variable de réglage qui permet de modifier le taux de conversion.

Un élément de conversion est représenté par un pictogramme orange dont la forme dépend de la nature de conversion :

- un pictogramme carré pour une conversion électro-électrique,
- un pictogramme circulaire pour une conversion électromécanique,
- un pictogramme triangulaire pour une conversion mécano-mécanique.

Chaque élément de conversion possède en amont un vecteur d'entrée et un vecteur de sortie, en aval un vecteur d'entrée et un vecteur de sortie. De plus, s'il existe un vecteur de réglage, il constitue une entrée supplémentaire perpendiculaire aux autres variables.

Chaîne de conversion électromécanique — Une chaîne de conversion électromécanique générique peut alors être définie afin d'illustrer les concepts précédents. Elle est constituée d'une source électrique, d'une source mécanique, des trois éléments de conversion (électrique, électromécanique et mécanique) et de divers éléments d'accumulation assurant une adaptation entre les autres éléments (Fig. II. 1).

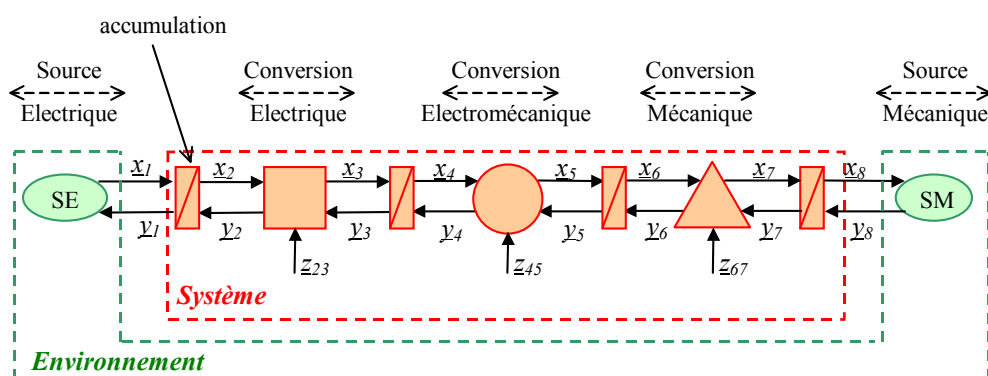


Fig. II. 1: REM d'une chaîne de conversion électromécanique

Les divers éléments sont reliés par des variables d'action et de réaction. Il est à noter que les causalités intrinsèques des éléments d'accumulation fixent leurs sorties (principe de cause à effet), et de ce fait les entrées et sorties des autres éléments. Conformément à la notion d'entrée et de sortie, mais aussi à celle de la causalité intégrale comme seule causalité physique, les entrées et sorties de chacun des éléments sont inchangées, quel que soit le sens de transfert de l'énergie.

Considérons que la source électrique SE est génératrice d'énergie, et que la source mécanique SM est réceptrice. On peut alors définir une chaîne d'action de SE vers SM constituée des vecteurs \underline{x} successifs (voir Fig. II. 1). La chaîne de réaction est alors constituée de la suite des vecteurs \underline{y} . Les vecteurs \underline{z} correspondent aux vecteurs de réglage. Si à un autre moment, SE devient réceptrice et SM génératrice, la chaîne d'action est alors composée des vecteurs \underline{y} et la chaîne de réaction des vecteurs \underline{x} . Cependant, tous les éléments conservent les mêmes entrées et les mêmes sorties : leur causalité

intrinsèque n'a pas changé, mais on découvre qu'une entrée d'action (ou principale) devient entrée de réaction (ou secondaire ou de perturbation), etc. Ainsi, il ne faut pas confondre action et entrée, réaction et sortie.

Notation des variables — Il est clair que dans un SMM, le nombre de variables tend à devenir important et qu'une organisation mnémotechnique est un palliatif efficace à une lecture simplifiée. Afin de faciliter l'identification des objets, mais aussi de souligner leurs causalités, l'indice d'une variable sera associé au nom de l'élément qui la génère. Dans l'exemple précédent, \underline{x}_I sera ainsi remplacé par \underline{x}_{SE} (\underline{x} sortie de SE).

II. 2. 2. Les règles d'association

Ce paragraphe est consacré à la construction de la REM d'un système physique. Dans un premier temps, les éléments constitutifs sont caractérisés en sources, éléments de conversion ou d'accumulation. Les diverses entités sont ensuite connectées en fonction de liens physiques entre les objets qu'ils représentent. Mais certaines connexions posent des problèmes. Des règles spécifiques ont dû être définies afin de prendre en compte les divers cas d'association rencontrés dans toute modélisation.

Outre leur caractère pragmatique, ces règles sont aussi une illustration concrète de la démarche systémique. En effet, comme nous le verrons dans les exemples présentés, un système (ou sous-système) ne peut se réduire à l'association simple des ses éléments constitutifs. Ces associations vont à la fois faire émerger de nouvelles propriétés et disparaître certaines caractéristiques "locales".

Association directe — L'association directe entre deux éléments est relativement évidente. Elle est conditionnée par la correspondance de leurs vecteurs d'interaction : la sortie d'action du premier correspond à l'entrée d'action du second ; l'entrée de réaction du premier correspond à la sortie de réaction du second (par exemple, une bobine alimentée par une source de tension).

Un corollaire peut se déduire de cette règle d'association évidente, lors d'une phase de conception : si l'on ne peut pas connecter les deux éléments, il faut insérer entre eux un élément assurant une adaptation (par exemple, un condensateur à connecter à une source de tension demande un élément intermédiaire d'adaptation). Ce corollaire n'est pas sans faire penser aux règles de connexions des sources en Electronique de Puissance [FOCH 89]. Il a été, de plus, fort bien illustré par une démarche de conception en Electronique de Puissance, basée sur une approche de type puzzle [PIQUET 01].

Cependant, la représentation proposée ne s'intéresse, pour le moment, qu'à des systèmes déjà conçus. Un problème d'association de modèle d'éléments déjà physiquement connectés ne pourra alors venir que d'un problème de modélisation, comme nous allons le voir ci-dessous.

Règle de concaténation — Prenons tout d'abord un exemple concret afin d'illustrer la difficulté de modélisation de certaines associations. Considérons une machine à courant continu, alimentée par un hacheur, une bobine de lissage étant en série avec l'induit afin de limiter le taux d'ondulation du courant. Le hacheur est considéré comme une source équivalente de tension. La REM de la machine à courant continu est composée d'un élément d'accumulation électrique (enroulement d'induit), un élément de conversion, et d'un élément d'accumulation mécanique (arbre) [BOUSCAYROL 00]. La bobine est un élément d'accumulation (stockage d'énergie cinétique). Leur association ne peut pas être directe (Fig. II. 2).

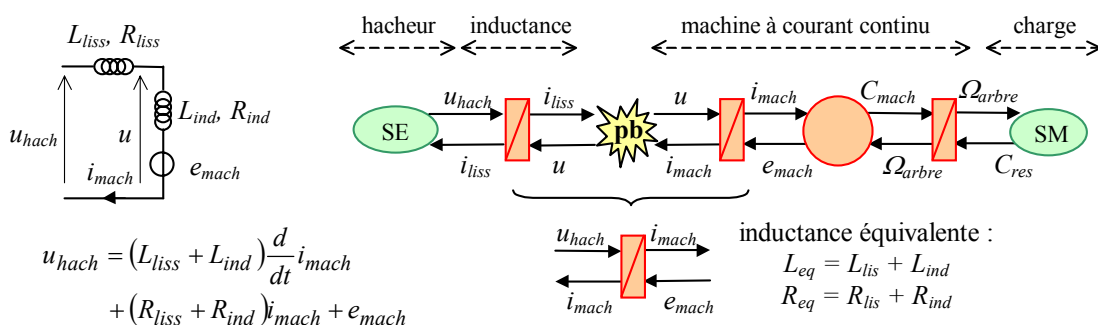


Fig. II. 2 : Illustration de la règle de concaténation

Cela vient du fait qu'un élément d'accumulation impose sa variable d'état aux éléments qui lui sont connectés. Dans ce cas, comme le courant est commun à la bobine de lissage et à l'enroulement, il ne peut y avoir qu'une seule variable d'état : cette association ne peut donc être représentée que par un seul élément d'accumulation obtenu par concaténation¹ des deux éléments précédents. La résolution du problème est évidente lorsque l'on pose les modèles mathématiques associés. Une bobine équivalente, d'inductance égale à la somme des inductances des deux éléments, est alors définie. Cette association nécessaire n'est pas sans rappeler le principe de totalité de la systémique : le sous-système, inductance et enroulement, possède une propriété globale qui fait disparaître la propriété locale de chaque élément.

La règle de concaténation peut ainsi s'exprimer comme suit [BOUSCAYROL 00] :

L'association de deux éléments d'accumulation peut être réalisée par concaténation pour résoudre un conflit de variable d'état.

¹ Nous utilisons ici la définition préconisée en informatique : création d'une entité globale à partir de deux entités initiales.

L'élément équivalent est alors caractérisé par des paramètres obtenus par concaténation des paramètres des éléments initiaux. D'autres exemples peuvent être trouvés dans [BOUSCAYROL 03a]. Une démarche analogue est déjà appliquée en mécanique [RUBIN 97].

Règle de permutation — Prenons un autre exemple pour illustrer cette règle. Considérons l'arbre d'une machine connecté à celui d'une charge à entraîner à l'aide d'un réducteur supposé idéal. La REM de ce système fait apparaître deux éléments d'accumulation (les arbres, accumulation d'énergie cinétique) et un convertisseur mécanique (le réducteur). Leur association directe n'est pas possible (Fig. II. 3) [BOUSCAYROL 02c]. En fait, on a le même problème de variable d'état que précédemment. Mais cette fois, il est masqué par le réducteur : les vitesses des arbres sont différentes (rapport de réduction), mais ne peuvent pas être imposées indépendamment. Un seul élément d'accumulation est alors à considérer. Pour faire une concaténation, il faut au préalable assurer une permutation entre l'arbre 2 et le réducteur par exemple (Fig. II. 3). Il faut alors trouver l'ensemble arbre - réducteur équivalent qui produirait le même effet (même variables d'interaction avec les objets connectés). Les équations mathématiques des deux éléments nous permettent de trouver aisément la solution. L'inertie de l'arbre fictif intègre alors le rapport de réduction au carré.

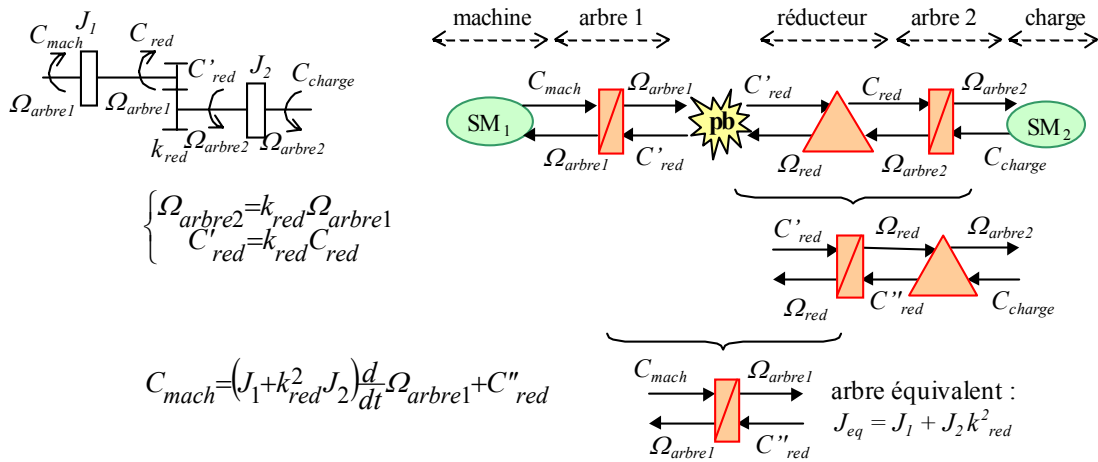


Fig. II. 3 : Illustration de la règle de permutation

La règle de permutation peut ainsi être exprimée comme suit :

Un élément d'accumulation et un élément de conversion peuvent être permutés à condition qu'ils produisent le même effet sous les mêmes sollicitations.

Cette règle de permutation n'est pas sans rappeler la règle de l'impédance équivalente ramenée au primaire d'un transformateur. La règle de permutation peut être considérée comme une extension de cette règle d'impédance équivalente, qui est aussi utilisée, souvent implicitement, en mécanique

[RUBIN 97]. En fait, elle est généralisable dans n'importe quelle discipline, à condition que la structure équivalente se comporte de manière identique à la structure initiale.

Utilisation des règles — Il est clair que les règles de concaténation et de permutation peuvent mener à une perte de lisibilité du système considéré, contrairement à l'objectif poursuivi. On doit ainsi se limiter à ne les utiliser que pour résoudre des conflits de modélisation. De ce fait la règle de permutation ne sera utilisée que pour permettre une concaténation.

II. 2. 3. L'extension aux SMM

Ce paragraphe reflète le travail collectif du projet SMM du GdR SDSE et du GdR ME²MS (Voir Annexe « Opération SMM des GdR »). En effet, la REM initiale avait pour vocation de représenter des conversions d'énergie d'une source génératrice vers une source réceptrice. Dans le cas de systèmes multimachines multiconvertisseurs, la chaîne énergétique est décomposée en plusieurs chaînes. Ces systèmes sont caractérisés par des éléments spécifiques, dits de couplage, dont l'objectif est de répartir ou de rassembler l'énergie [SMM 00a]. De nouveaux éléments sont ainsi à prendre en compte.

Il faut noter que le formalisme SMM, s'il fait bien apparaître les éléments de couplage, ne fait pas initialement de distinction entre élément d'accumulation et élément de conversion. Cette distinction est en fait essentielle pour la structuration de la commande des SMM selon le principe d'inversion, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

Notion de couplage — Les systèmes multimachines multiconvertisseurs sont caractérisés par le couplage de plusieurs chaînes de conversion. C'est la raison pour laquelle ils comportent plusieurs éléments de conversion, c'est à dire plusieurs convertisseurs statiques et/ou plusieurs machines électriques.

Des éléments spécifiques de couplage ont pour but d'assurer ces interconnexions entre chaînes de conversion. Certains ont pour objectif de répartir l'énergie d'une chaîne en amont commune vers plusieurs chaînes en aval : élément de couplage amont. L'élément dual, élément de couplage aval, rassemble l'énergie de plusieurs chaînes en amont vers une chaîne commune en aval.

Dans les conversions électromécaniques, trois types de couplages sont définis : couplages électrique, magnétique (pour les machines électriques) et mécanique. Un élément de couplage peut en fait être considéré comme plusieurs éléments de conversion qui partagent une même ressource physique commune [SMM 00a]. Cela induit des variables communes dans la chaîne commune. Par exemple, une machine asynchrone double étoile correspond à un élément de couplage magnétique : chaque étoile statorique peut être assimilée à une machine asynchrone triphasée ; les deux machines fictives induisent un flux commun dans la carcasse magnétique commune [MOUBAYED 99].

La représentation de tels éléments utilise alors des pictogrammes imbriqués pour symboliser cette mise en commun d'éléments de conversions. Par exemple, la machine asynchrone double étoile sera représentée par un double cercle (conversions électromécaniques) avec une intersection symbolisant la partie commune. On représente autant de pictogrammes imbriqués que de chaînes interconnectées à une chaîne de conversion commune (voir exemple ci-dessous).

Il faut enfin noter qu'une simplification (non prise en compte) de certains couplages est possible [SMM 00b]. En effet, pour un système à couplages multiples, il peut s'avérer judicieux de se concentrer sur certains couplages dans un premier temps. Une hypothèse de simplification doit alors être explicitée.

Prise en compte de l'accumulation d'énergie — Le formalisme SMM, développé par le groupe SMM du GdR, ne fait aucune distinction entre éléments de conversion et éléments d'accumulation. Or cette différenciation entre éléments stockant ou non de l'énergie, est à la base de la structuration des commandes par le principe d'inversion. C'est la raison pour laquelle, ces éléments sont introduits ici. On peut considérer que la REM présentée dans ce paragraphe est une fusion entre la REM initiale (chaîne unique de conversion) et le formalisme SMM.

Un élément d'accumulation induit une variable énergétique qui ne peut pas subir de discontinuité (variable d'état). Afin de bien séparer la notion de couplage de la notion stockage, nous considérerons que les couplages ne seront réalisés que par des éléments de conversion (sans accumulation d'énergie). Ce choix s'avèrera judicieux lors de la mise en place de règles systématiques pour structurer la commande de tels systèmes (voir § II.3.).

Un composant assurant à la fois une accumulation d'énergie et un couplage sera ainsi décomposé en deux éléments distincts, l'un de couplage, l'autre d'accumulation. Par exemple, la mise en série de deux induits de machine à courant continu sera représentée par un élément d'accumulation équivalent (règle de concaténation, résolution du conflit de variable d'état) et un élément de couplage (Fig. II. 4). Ce dernier correspond en fait à l'association série des deux enroulements. On verra par la suite que ces couplages représentent souvent la mise en série (variable cinétique commune) ou la mise en parallèle (variable potentielle commune), tant dans le domaine électrique que dans d'autres domaines.

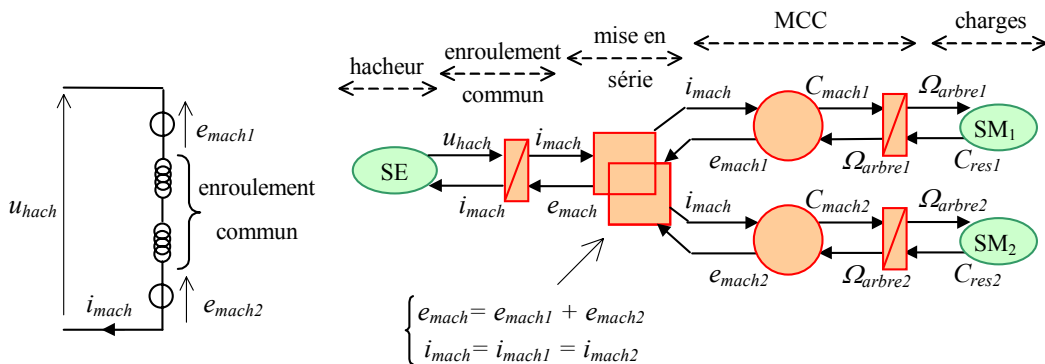


Fig. II. 4 : REM de la mise en série des induits de deux MCC

Exemple de représentation SMM — Un exemple concret est donné afin d'illustrer les concepts et représentations développés pour les SMM. Nous considérons le système de traction du métro VAL 206 (Véhicule Automatique Léger) qui a l'avantage de posséder tous les types de couplages [BOUSCAYROL 02b]. Ce système de transport urbain a été mis en place à Lille en 1982. Cette structure de métro équipe, entre autres, les villes de Toulouse, Chicago, Taïpeh et le site de l'aéroport d'Orly.

Des rails de distribution alimentent chaque voiture par une tension continue de $V_{DC} = 750 V$. Des frotteurs assurent un contact permanent avec les rails d'alimentation. Un filtre L, C limite la circulation des harmoniques de modulation dans les rails de distribution. La tension de sortie de ce filtre u_{filtre} , est distribuée en parallèle sur trois hacheurs. Le premier convertisseur DC/DC alimente par sa tension modulée u_{hi} , les inducts de deux machines à courant continu connectés en série (Fig. II. 5). Chacun des deux autres hacheurs, de type 4 quadrants (structure 2/2), sont associés aux inducteurs des deux machines. Ces machines à courant continu à excitation séparée entraînent les deux bogies par l'intermédiaire d'une chaîne mécanique de transmission complexe. Les roues utilisent des pneumatiques. Une rame est en général composée de deux voitures, mais par souci de simplification nous nous intéresserons qu'à une seule voiture.

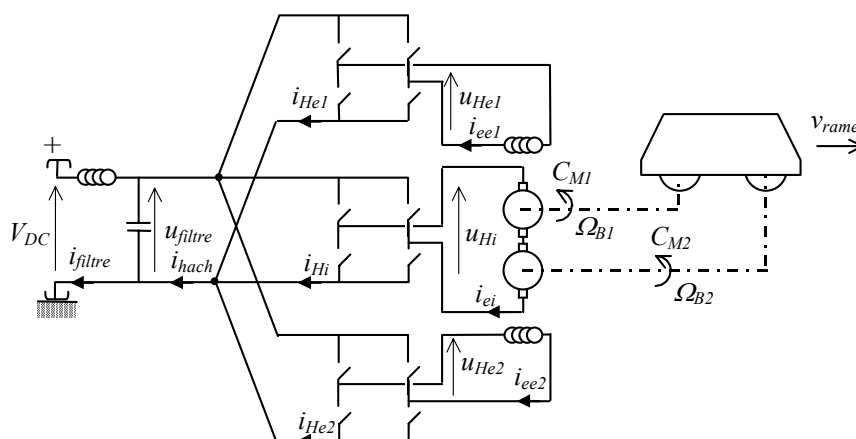


Fig. II. 5 : Synoptique de la partie électrique de la traction du VAL 206

La REM du système (Fig. II. 6) a été développée en collaboration avec Siemens Transportation Systems. Les détails de la construction de cette représentation se trouvent dans [BOUSCAYROL 02b]. Une thèse entre le L2EP et STS vise à affiner cette représentation (notamment sur la transmission mécanique) et à proposer des solutions de commande originales pour augmenter le confort des passagers et le rendement énergétique de l'ensemble [VERHILLE 03].

Le rail est assimilé à une source électrique (SE), qui délivre la tension V_{DC} et absorbe le courant i_{filtre} . Le filtre d'entrée est composé d'une inductance et d'un condensateur. Il est représenté par un

élément d'accumulation global (deuxième ordre) dont les variables d'état sont régies par les équations suivantes :

$$\begin{cases} C \frac{d}{dt} u_{filtre} = i_{filtre} - i_{hach} \\ L \frac{d}{dt} i_{filtre} = V_{DC} - u_{filtre} \end{cases} \quad (1)$$

Cet élément d'accumulation impose la tension u_{filtre} au reste du circuit qui réagit par la circulation d'un courant i_{hach} .

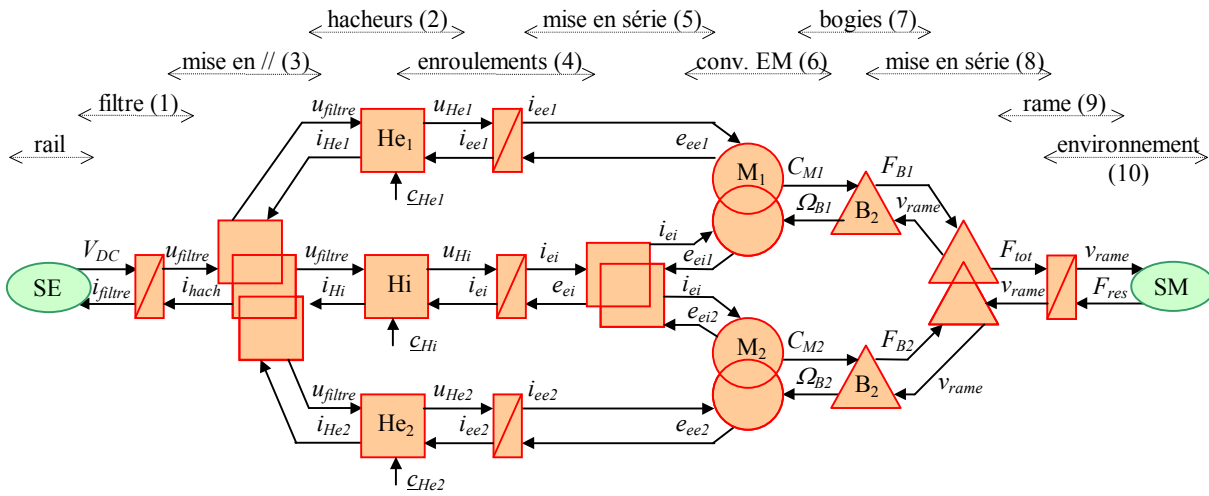


Fig. II. 6 : REM du métro VAL 206 simplifié (avec le numéro des équations associées)

Les divers hacheurs (conversion électrique) sont modélisés de manière identique dans un premier temps². Une fonction de modulation m_{Hk} est définie en fonction des fonctions de connexions c_{ij} (ordres de commutation) [GUILLAUD 94] [HAUTIER 99]. Ce coefficient relie alors les tensions et les courants en amont et en aval des hacheurs :

$$\begin{cases} u_{Hk} = m_{Hk} u_{filtre} \\ i_{Hk} = m_{Hk} i_{ek} \end{cases} \quad \text{avec } m_{Hk} = c_{11} - c_{21} \quad \text{et} \quad \begin{cases} k \text{ n}^\circ \text{ du Hacheur} \\ i \text{ n}^\circ \text{ de la cellule de commutation} \\ j \text{ n}^\circ \text{ de l'interrupteur} \end{cases} \quad (2)$$

Ces divers hacheurs sont alimentés en parallèle par le filtre. Cette mise en parallèle correspond à un élément de couplage électrique (mise en commun de points de connexion) dont la variable commune est la tension (variable potentielle) :

² En réalité, le hacheur d'induit est un hacheur entrelacé. Sa modélisation montre qu'il doit être représenté par deux hacheurs couplés [Mer-03]. Ce degré de finesse n'est pas pris en compte ici.

$$\begin{cases} u_1 = u_2 = u_3 = u_{\text{filtre}} \\ i_{hach} = i_{He1} + i_{He2} + i_{Hi} \end{cases} \quad (3)$$

Les divers enroulements sont représentés par des éléments d'accumulation dont la variable d'état est le courant :

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = u_{Hk} - e_k \quad (4)$$

Les induits des deux machines étant connectés en série, leurs enroulements possèdent le même courant. La règle de concaténation est alors appliquée pour ne faire apparaître qu'un seul élément d'accumulation. La mise en série correspond à un élément de couplage électrique dont la variable commune est le courant (variable cinétique) :

$$\begin{cases} i_1 = i_2 = i_{ei} \\ e_{ei} = e_{ei1} + e_{ei2} \end{cases} \quad (5)$$

La conversion électromécanique est représentée par un élément de couplage car, à partir de deux chaînes électriques, on débouche sur une seule chaîne mécanique. Les relations classiques de la machine à courant continu expriment ce couplage (hypothèse de linéarité) :

$$\begin{cases} C_M = k_M i_{ee} i_{ei} \\ e_e = k_M i_{ee} \Omega_B \end{cases} \quad (6)$$

La transmission mécanique est ici, représentée par un simple élément de conversion qui prend en compte les rapports des divers réducteurs et le rayon moyen de la roue, par le coefficient de modulation m_{bog} :

$$\begin{cases} \Omega_{Bk} = m_{bogk} v_{rame} \\ F_{Bk} = m_{bogk} C_{Mk} \end{cases} \quad (7)$$

Un modèle plus complexe a en fait été réalisé, en prenant en compte le glissement roue rail [VULTURESCU 02] et la transmission mécanique de manière plus fine [VERHILLE 03].

Les forces de traction F_{Bk} sont alors associées via le châssis de la rame pour obtenir la force de traction globale F_{tot} . Cette association est représentée par un élément de couplage mécanique similaire à un couplage électrique série³ car la variable commune est la variable cinétique à savoir la vitesse de la rame v_{rame} :

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = v_{rame} \\ F_{tot} = F_{B1} + F_{B2} \end{cases} \quad (8)$$

La rame est considérée comme un élément d'accumulation dont la variable d'état est la vitesse linéaire v_{rame} :

$$M \frac{dv_{rame}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad (9)$$

Enfin, l'environnement du métro est assimilé à une source mécanique (SM) qui impose une force de résistance à l'avancement de type [PROVOOST 98] :

$$F_{res} = a + bv_{rame}^2 \quad (10)$$

La REM fait ainsi apparaître 4 couplages, dont certains sont très contraignants. Par exemple, la mise en série des induits des machines impose le même courant d'induit dans les deux machines, ce qui affectera l'indépendance des deux chaînes de conversion.

Le système possède 3 vecteurs de réglage (les fonctions de connexion de chaque hacheur) afin de maîtriser la vitesse de la rame. La commande d'un tel système n'est pas aussi évidente que celle d'un entraînement mono-entrée mono-sortie.

On voit aussi apparaître des "boucles de puissance" qui pourraient mener à une instabilité. Par exemple, le patinage d'un bogie, répercuté par le double couplage mécanique et électrique, peut induire un patinage du second bogie si des précautions ne sont pas prises [ESCANE 99].

II. 3. La Structure Maximale de Commande (SMC)

La méthodologie proposée a pour objectif de structurer la commande d'entraînements plus ou moins complexes. Elle est basée sur le principe d'inversion explicité par le GIC. Les règles énoncées mènent à une structure possédant un maximum de capteurs et d'opérations, ce qui justifie son

³ On peut noter qu'en mécanique ce couplage est qualifié de parallèle selon une définition plus structurelle.

appellation de structure maximale de commande. La solution théorique obtenue doit alors être aménagée dans un second temps afin de proposer une solution plus pratique et en tenant compte d'impératifs économiques (suppression de capteurs par exemple).

Comme dans le paragraphe précédent, seules les notions essentielles de la SMC sont présentées. Une description détaillée est donnée dans les articles [BOUSCAYROL 00], [SMM 02], [SMM 03] et le cours du DESS GR2E et du DEA Génie Electrique de Lille, disponible sur Internet (<http://www.univ-lille1.fr/l2ep/smm-tp.htm>) [BOUSCAYROL 03a].

II. 3. 1. Extension du principe d'inversion

Les règles présentées dans cette partie reflètent le travail collectif de l'opération SMM de l'équipe Commande du L2EP (voir Annexe « Thème SMM du L2EP »), qui a consisté en une extension des travaux du laboratoire développés sur les GIC [HAUTIER 96], [GUILLAUD 01].

La SMC est directement issue d'une inversion de la REM du système considéré. Les pictogrammes associés sont tous des parallélogrammes bleus car tous les blocs de commandes ne manipulent que de l'information. Les traits continus représentent les variables d'action à maîtriser et les traits discontinus celles de perturbation dont l'effet doit être aussi limité que possible. Nous verrons que ces rejets explicites de perturbations ne sont pas toujours indispensables.

Application aux éléments d'accumulation — Un élément d'accumulation contient une relation causale. Conformément aux règles introduites par le GIC (cf. Chap. I.), cette relation n'est pas physiquement inversible. Son inversion est alors indirectement assurée par un asservissement qui, en minimisant l'écart entre la sortie et sa référence, définit l'entrée d'action à appliquer (valeur de réglage). De plus, l'entrée de réaction (celle issue de l'élément aval) est une entrée de perturbation. Son action étant à minimiser, une opération explicite de rejet de perturbation (compensation, linéarisation...) est à réaliser.

L'inversion d'un élément d'accumulation consiste donc en deux fonctions : un asservissement et un rejet de perturbation. Il nécessite deux mesures, celle de la sortie et celle de l'entrée de réaction.

Le pictogramme de cette inversion sera un parallélogramme avec une barre oblique possédant trois entrées (mesure de la sortie, valeur de référence, mesure de l'entrée de perturbation) et une sortie (valeur de réglage de l'entrée d'action). Des exemples seront donnés lors de l'inversion d'une chaîne électromécanique.

Application aux éléments de conversion — Un élément de conversion ne comporte que des relations rigides (sans causalité intrinsèque). Ces relations étant physiquement inversibles (cf. Chap. I.), leur inversion ne nécessite pas d'asservissement a priori. Plusieurs inversions sont possibles car un élément de conversion possède trois entrées : celle d'action, celle de réaction et celle de réglage. On

peut remarquer que la sortie d'action n'est généralement pas reliée à l'entrée de réaction (cf. les gyrateurs et modulateurs du GIC). Pour imposer la sortie, on peut donc jouer soit sur l'entrée d'action soit sur l'entrée de réglage. Lorsque l'une de ces deux entrées est choisie, l'autre devient alors une entrée de perturbation dont il faut minimiser l'effet.

L'inversion d'un élément de conversion est représentée par un parallélogramme bleu avec deux entrées (la référence et la mesure de l'entrée de perturbation) et une sortie (la valeur à imposer de l'entrée choisie) ; une seule mesure est donc à réaliser. Des exemples seront donnés dans le paragraphe suivant.

SMC d'un système électromécanique — La SMC d'une chaîne de conversion électromécanique se décompose en plusieurs étapes.

La première consiste à réaliser la REM du processus.

La seconde, demande de définir la chaîne de réglage en fonction du système et du cahier des charges. Cette chaîne relie l'entrée de réglage choisie pour faire évoluer sur le système (souvent les ordres de commutation d'un convertisseur statique) à la variable à maîtriser (celle qui est imposée sur l'une des sources). Attention, il faut différencier la chaîne d'action (qui dépend du sens de transfert énergétique) de celle de réglage (qui est indépendante du sens de transfert de l'énergie).

La troisième étape consiste à définir la chaîne de commande, par inversion de la chaîne de réglage. Les divers éléments de la REM sont alors "inversés" selon les règles définies précédemment. On obtient ainsi la structure maximale de commande, qui suppose toutes les variables directement mesurables.

La quatrième étape va mener à une structure de commande simplifiée selon des hypothèses bien explicitées (souvent liées au type d'application)

La cinquième étape aborde l'estimation des grandeurs non mesurées.

La sixième étape consiste à définir des blocs dits de stratégie qui permettent de relier les références "physiques" à celles du cahier des charges. Ces trois dernières phases ne seront abordées que dans la partie dédiée aux structures pratiques de commande.

L'avant dernière étape consiste en la synthèse des correcteurs en utilisant les techniques de l'Automatique.

Et enfin, une étape de mise en œuvre prend en compte les contraintes de la technologie retenue (discrétisation temporelle par exemple pour une commande numérique).

Comme illustration, cette méthodologie est appliquée au système générique de la Fig. II. 1. Considérons que la variable à maîtriser soit celle imposée à la source mécanique \underline{x}_8 . et que le vecteur de réglage soit celui du convertisseur électrique \underline{z}_{23} . La chaîne de réglage est alors composée de \underline{z}_{23} , \underline{x}_3 , \underline{x}_4 , \underline{x}_5 , \underline{x}_6 , \underline{x}_7 et \underline{x}_8 (Fig. II. 7). La chaîne de commande relie alors \underline{x}_{8-ref} à \underline{z}_{23} au travers de trois asservissements (mesures nécessaires de \underline{x}_8 , \underline{x}_6 et \underline{x}_4) et de 6 rejets de perturbation (mesures de \underline{y}_8 , \underline{z}_{67} , \underline{y}_6 , \underline{z}_{45} , \underline{y}_4 et \underline{x}_2 , traits discontinus).

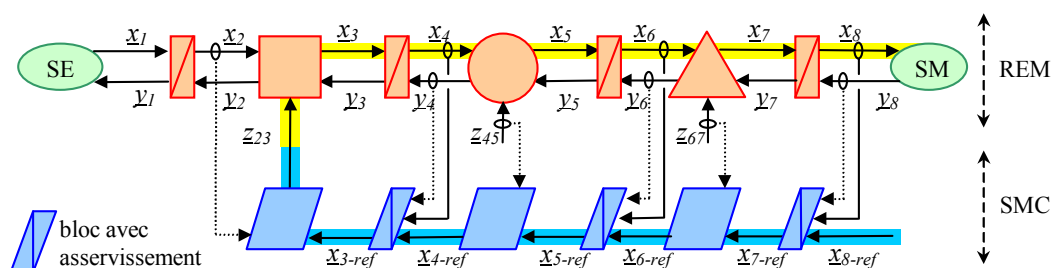


Fig. II. 7 : SMC d'une chaîne de conversion électromécanique

II. 3. 2. La résolution des couplages des SMM

Les règles présentées dans cette partie reflètent le travail collectif du projet SMM du GdR (voir Annexe « Opération SMM du GdR ») [SMM 01], [SMM 02]. Les SMM étant caractérisés par leurs éléments de couplage, le principe d'inversion est maintenant étendu à ces éléments de distribution d'énergie.

On peut noter, au préalable, que la séparation entre les éléments d'accumulation et les éléments de couplage (proposition réalisée au § II.2.), nous permet d'aborder aisément la problématique de commande des SMM.

Différents types de couplage — Pour la commande des SMM, on distingue deux types de couplages. Un couplage amont a pour objectif de distribuer l'énergie d'une source d'énergie (réelle ou équivalente) en amont de l'élément vers plusieurs sources en aval. Un couplage aval a la fonction duale de rassembler l'énergie de plusieurs sources en amont vers une source unique en aval.

La dénomination "amont" ou "aval" est basée sur un sens privilégié de transfert énergétique. Les systèmes étudiés étant pour la plupart bidirectionnels au sens énergétique du terme, cette dénomination doit, en fait, être plutôt assimilée à une convention (de la même manière que lorsque l'on choisit une convention récepteur électrique pour une charge globalement consommatrice).

Résolution d'un couplage amont par critère de pondération — Dans ce cas de figure, l'entrée d'action génère n sorties d'action (avec n le nombre de chaînes en aval). Un problème de bijectivité se pose alors : comment générer plusieurs sorties avec une seule entrée ?

Lors de l'inversion de la chaîne, plusieurs références arriveront donc au bloc de commande chargé de gérer l'élément de couplage amont. Afin de résoudre le problème de bijectivité, un critère de pondération est introduit : une référence est obtenue par pondération des références réelles en leur associant un facteur de pondération à chacune d'entre elles. La référence pondérée sert alors pour définir l'entrée de réglage à appliquer sur l'élément.

Prenons l'exemple d'un hacheur alimentant en parallèle n charges [YE 00]. Plusieurs références de tension peuvent alors être demandées au hacheur en fonction des demandes de chaque charge. La référence pondérée peut s'exprimer par la relation :

$$u_{pond-ref} = \sum_{j=1}^n k_j u_{j-ref} \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1 \quad (11)$$

Plusieurs remarques peuvent alors être faites. D'abord, on peut considérer des facteurs de pondérations k_j variables au cours du temps [PENA 02]. De plus, lorsque l'un des facteurs est unitaire (les autres sont alors nuls), on obtient une commande maître esclave [BOUSCAYROL 94b], commande très utilisée en pratique. Elle correspond à contrôler seulement l'une des chaînes en aval et à imposer aux autres la valeur désirée par cette chaîne "maître". On trouve aussi quelque fois une commande appelée commande "moyenne" [ESCANÉ 99] lorsque tous les facteurs sont égaux à $1/n$.

Résolution d'un couplage aval par critère de répartition — Un couplage aval est caractérisé par une sortie d'action générée par n entrées d'action (suite aux multiples chaînes en amont). Une autre question se pose : comment coordonner les entrées pour produire la bonne sortie ?

Lors de l'inversion de la REM, le bloc associé à l'élément de couplage doit fournir n entrées de réglage à partir d'une seule référence. Un critère de répartition est alors introduit. Chaque entrée de réglage est obtenue en considérant une part seulement de la référence.

Prenons par exemple une chaîne de traction de plusieurs moteurs pour un véhicule [BOUSCAYROL 02b]. Les quatre forces de traction induisent la force de traction globale qui impose la vitesse linéaire. A partir de la référence de la force globale, les forces de traction de chaque entraînement sont obtenues comme suit :

$$F_{j-ref} = k_j F_{ref} \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1 \quad (12)$$

Parmi les commandes les plus utilisées, on peut citer les commandes basées sur l'équi-répartition pour lesquelles les facteurs de répartition sont tous égaux à $1/n$.

Cette relation gère le cas d'entrées additives. Pour le cas d'entrées multiplicatives (voir plus bas l'exemple de la machine à courant continu), le critère peut s'exprimer par :

$$F_{j-ref} = k_j \sqrt[n]{F_{ref}} \quad \text{avec} \quad \prod_{j=1}^n k_j = 1 \quad (13)$$

Exemple de SMC pour un SMM — L'exemple de la traction du VAL 206 est repris afin d'illustrer ces divers concepts. En effet, sa REM possède les deux types de couplages, amont et aval.

La SMC obtenue par inversion de la REM (Fig. II. 8) fait apparaître, entre autres, quatre asservissements (vitesse, courant d'induit et deux courants d'excitation) et quatre blocs de gestion de couplage. Elle souligne aussi les capteurs nécessaires dans sa version maximale.

Concernant les blocs de gestion des couplages, ils font apparaître les facteurs liés aux critères de pondération et de répartition. Le couplage mécanique aval est résolu par un critère de répartition des forces de traction :

$$\begin{cases} F_{B1-ref} = k_{F1} F_{tot-ref} \\ F_{B2-ref} = k_{F2} F_{tot-ref} \end{cases} \quad \text{avec} \quad k_{F1} + k_{F2} = 1 \quad (14)$$

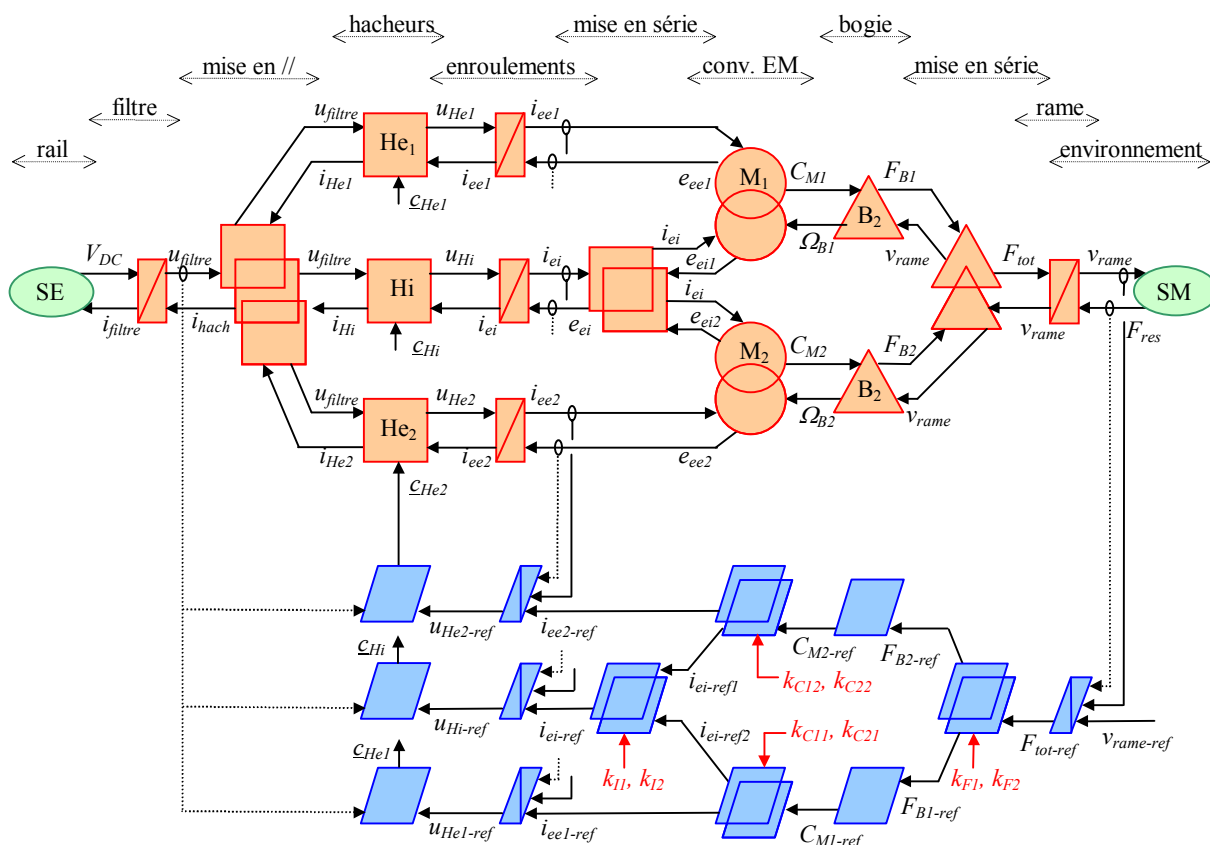


Fig. II. 8 : SMCdu VAL 206 simplifié

En pratique, une gestion d'équi-répartition des forces est implantée ($k_{F1}=k_{F2}=1/2$). Le second couplage à gérer est de type couplage magnétique aval. Il est résolu à partir de l'équation du couple de la machine (6) :

$$\begin{cases} i_{ei-ref} = k_{C1} \sqrt{\frac{1}{k_M} C_{M-ref}} \\ i_{ee-ref} = k_{C2} \sqrt{\frac{1}{k_M} C_{M-ref}} \end{cases} \text{ avec } k_{C1} k_{C2} = 1 \quad (15)$$

Dans la réalité, ce critère correspond à une gestion adaptée du flux en fonction de la vitesse. Lorsque la tension maximale est atteinte, une réduction du flux, via le courant d'excitation, permet alors de continuer à faire croître la vitesse de rotation. Si la détermination des facteurs de répartition est délicate (voir chap. III), on peut déjà remarquer qu'ils évoluent en fonction du point de fonctionnement : ils ne sont donc pas constants.

Cette structure théorique montre la complexité de la commande d'un tel système. Les facteurs de pondération et de répartition indiquent de réels degrés de liberté pour la gestion du système. Si certains choix semblent évidents, ce n'est pas le cas de tous (par exemple la gestion du flux pour la machine). Une expertise est alors nécessaire pour choisir des critères appropriés.

La structure pratique implantée sur le système réel peut se déduire de cette SMC par des simplifications adaptées et de choix de critères bien définis [VERHILLE 03]. En fait la détermination de critères peut se faire au travers de blocs de stratégie (voir paragraphe suivant).

II. 3. 3. Les structures pratiques de commande

Cette partie est consacrée à la mise en pratique de la SMC qui est en fait une structuration théorique de la commande réelle. En effet, elle est basée sur l'hypothèse d'accès direct à toutes les variables, elle conduit à un grand nombre d'opérations, elle ne fait apparaître que des variables physiques et non conceptuelles comme la puissance par exemple. Les divers points étudiés dans ce paragraphe ne sont qu'abordés, car ils ne constituent que des extensions de la REM et de la SMC.

Simplifications et réduction de la SMC — Diverses simplifications peuvent se déduire de la SMC [BOUSCAYROL 02a]. Elles visent à réduire le nombre de capteurs et le nombre d'opérations mathématiques à effectuer par l'organe de commande (microprocesseur par exemple).

La méthodologie proposée est basée sur un rejet explicite des variables de perturbation (compensation, linéarisation dynamique) et nécessite donc leur mesure. Il est tout d'abord évident que si la perturbation n'est pas prépondérante (en amplitude ou en dynamique), son rejet n'est pas forcément nécessaire. D'autre part, ces perturbations peuvent aussi faire l'objet de rejets implicites au travers d'un correcteur. Ce dernier aura alors la double fonction de poursuite et de régulation. Une structure de correction adaptée et une synthèse spécifique peuvent en découler. Par exemple, la compensation de la force électromotrice d'une machine à courant continu est souvent réalisée de

manière intrinsèque par le correcteur de courant, de forme proportionnelle et intégrale. Le rejet est suffisant tant que la dynamique de vitesse reste suffisamment faible devant celle du courant, sinon la compensation directe devient judicieuse.

Par ailleurs, on peut envisager la fusion d'un certain nombre de blocs afin de simplifier la mise en œuvre de la commande en temps réel. Ainsi, il est évident qu'au lieu de réaliser plusieurs gains successivement, on peut en utiliser un global. On peut de même regrouper un gain et un correcteur. Ces fusions de blocs sont si évidentes qu'elles sont souvent devenues implicites pour l'initié, mais elles représentent une perte de lisibilité qui peut être délicate. Par exemple, qui fait encore apparaître une référence de couple et une référence de courant i_{sq} dans un contrôle vectoriel de machine asynchrone ? Cette simplification s'avère gênante dans une démarche pédagogique ou générique. Nous proposons en fait de ne réaliser ces simplifications que dans un second temps.

Permutation et fusion de blocs — Il peut s'avérer judicieux de faire une permutation de blocs, notamment des couplages si la fonctionnalité globale n'est pas remise en cause. Lors d'un couplage amont, le bloc de gestion de couplage peut être permuté avec des blocs précédents qui lui fournissent ses références [PENA 02]. Dans ce cas, la pondération doit être reportée tant sur les références des blocs précédents que sur ses mesures [SMM 02]. Cette permutation peut être réalisée de blocs en blocs.

Le cas le plus remarquable concerne la modélisation des machines polyphasées [SEMAIL 01a] [MARTIN 02], [SEMAIL 03]. Si ce concept a nécessité l'utilisation d'une généralisation de la méthode des vecteurs d'espace [SEMAIL 00], la REM a fait apparaître de manière explicite le déplacement des couplages. A l'aide d'une transformation matricielle, le couplage magnétique initial complexe est transposé en un couplage simple électrique et un couplage simple mécanique. De ce fait, des machines fictives équivalentes (monophasées ou bi-phasées) apparaissent alors sans aucun couplage magnétique entre elles, mais la fonctionnalité globale est bien sûr identique.

Chaînes d'estimation — Les grandeurs non mesurées (parce qu'elles ne sont pas mesurables ou parce que l'on veut éviter un capteur) doivent être reconstruites à partir de grandeurs mesurées. On parle alors d'estimateur (boucle ouverte) ou d'observateur (boucle fermée) [VERGHESE 88] [PIETRZAK 00]. Des blocs supplémentaires doivent alors être rajoutés. Ils seront représentés par des parallélogrammes (ne manipulant que de l'information) de couleur mauve (à différencier avec le bleu de la commande). De nombreux travaux ont été réalisés sur ces structures d'estimation. Il n'est donc pas nécessaire de développer ce point. Cependant, il faut noter que de telles structures peuvent s'insérer dans la méthodologie.

Dans le même ordre d'idée, les commandes à modèles peuvent être avantageusement représentées par REM, en séparant les parties processus, modèle, commande principale (inversion du modèle) et correcteur de comportement (inversion de l'écart processus modèle). Ce type d'étude a été réalisé dans

la thèse de B. Vulturescu sur la commande à modèle de comportement appliquée aux SMM [VULTURESCU 02].

Blocs de stratégie — Comme nous l'avons vu précédemment, certaines références ou critères restent à définir après obtention de la SMC. On se réfère alors à la systémique qui différencie deux niveaux de gestion, la tactique (gestion locale) et la stratégie (gestion globale). La SMC correspond en fait au niveau tactique : l'inversion de chaque élément, pas à pas, correspond à une gestion optimale de l'énergie pour chaque élément. Il reste donc à définir le niveau stratégique ou la gestion globale du système.

Prenons l'exemple d'un système éolien avec une machine électrique et deux convertisseurs commandés [DELARUE 03c]. La gestion globale du système demande une extraction maximale de la puissance fournie par le vent et une maîtrise de la puissance réactive injectée sur le réseau. Cependant, la REM ne fait apparaître ni la puissance active, ni la puissance réactive. Il faut alors établir un lien entre ces puissances et les variables physiques d'échange entre les éléments. Ces relations seront alors inversées pour définir les références physiques nécessaires à la REM à partir des références des puissances. Cela constituera le bloc de stratégie.

Les blocs de stratégies correspondent à une gestion globale du système en fonction de ses objectifs et de ses contraintes. Ils seront représentés par des parallélogrammes (information) de couleur cyan (ni commande, ni estimation, mais gestion).

Nous avons remarqué que la SMC ne proposait pas d'alternative à partir d'une REM : il n'y a qu'une seule structure maximale de commande, même si on peut la réduire, si on peut utiliser différents types d'asservissement ou faire différentes synthèses. En fait, c'est logique car une bonne gestion locale de l'énergie passe par la prise en compte des réservoirs d'énergie, mis en évidence par la REM. En revanche, le niveau stratégique peut faire appel à des notions virtuelles. De ce fait plusieurs solutions sont possibles [BOUSCAYROL 04]. Par exemple, de nombreuses commandes de systèmes éoliens ont été développées : si les contrôles dynamiques des machines restent classiques, la différence essentielle réside dans la gestion de puissance (MPPT, Maximum Power Point Tracking) [SONG 00a] [VALTCHEV 00]. Il en est de même pour les convertisseurs à facteur de puissance unitaire [BOSE 93] [BLASKO 97].

Extension à l'émulation — Les systèmes étudiés étant de plus en plus complexes et pluridisciplinaires, la validation des commandes proposées passent souvent par une émulation de certaines parties du système et ce à puissance réduite. Un actionneur sera alors commandé pour se comporter comme une certaine partie du système.

Par exemple, un banc machine à courant continu machine asynchrone avec plusieurs convertisseurs statiques peut émuler le comportement d'une turbine éolienne [GERVASI 03]. L'ensemble hacheur

machine à courant continu est alors commandé pour se comporter comme la turbine connectée à la machine asynchrone.

La REM peut alors s'avérer un outil précieux pour définir le modèle à émuler. Trois niveaux sont alors à définir : la commande rapprochée de l'actionneur réel, le modèle de la partie à émuler, la commande éloignée du système étudié. L'exemple de l'émulation du système éolien illustre ces trois niveaux (Fig. II. 9).

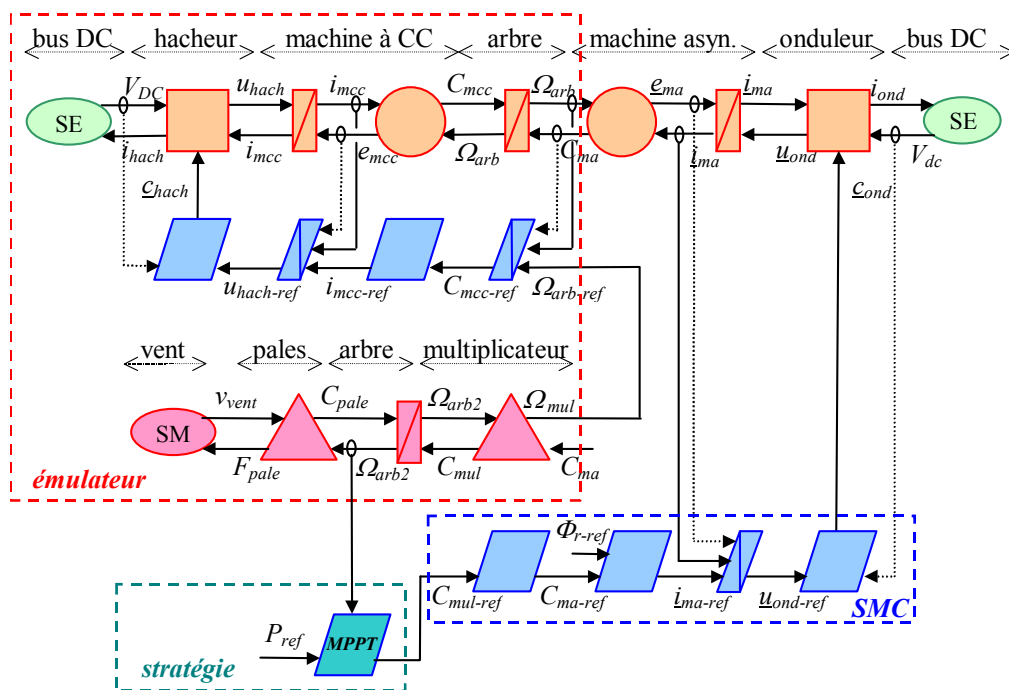


Fig. II. 9 : REM de l'émulation d'une chaîne de conversion éolienne

II. 4. Bilan critique de la REM

II. 4. 1. La REM, qu'est-ce que c'est ?

La REM est en fait un formalisme de représentation synthétique des interactions et échanges énergétiques entre composantes d'un système. Elle se veut une représentation tant fonctionnelle (liens informationnels entre les éléments) que structurelle (un élément physique est représenté par un graphique bien identifié). Ce double objectif de description n'est pas sans poser des problèmes de représentation de certaines associations (cf. les problèmes de conflit de causalité), cependant certaines règles permettent de les résoudre (cf. la règle de concaténation).

Trois principes de base sont sous-jacents à cette représentation : **le principe de cause à effet** (qui gère les relations internes des éléments), **le principe d'interaction** (qui gère les relations externes entre

éléments) et **le principe de répartition** (qui gère les distributions énergétiques via des éléments de couplage).

Cette représentation est, de plus, orientée commande. Un de ses objectifs est de mettre en évidence les divers flux d'énergie et les degrés de libertés sur lesquels on peut jouer pour faire évoluer le système. Le principe d'inversion permet alors d'en déduire, d'une manière systématique, la structure maximale de commande du système en fonction d'un cahier des charges.

En revanche, la REM n'est pas un outil de modélisation détaillée et ne peut exprimer que les fonctions globales de chaque élément. Il faut insister de plus sur le fait que son inversion propose une structuration de la commande. Si elle donne les grandes fonctions à réaliser, notamment les asservissements, elle n'en précise ni les outils à utiliser (type de correcteur) ni la synthèse (valeurs des paramètres). En effet, la REM étant une représentation macroscopique, la SMC ne peut être qu'une commande macroscopique.

Il faut rappeler que toute modélisation est associée à un domaine de validité qui dépend de certaines hypothèses de simplifications (principe de subjectivité). Pour un même système, divers modèles sont donc possibles. La SMC obtenue n'est que le reflet des choix effectués pour la construction de la REM, et donc des hypothèses de modélisation sous-jacentes.

II. 4. 2. La REM, quelles implications ?

La double fonctionnalité de la REM (description fonctionnelle et structurelle) lui donne un attrait certain par rapport à des systèmes pluridisciplinaires pour lesquels on ne possède pas de culture approfondie sur tous les éléments. Cependant, cette apparente simplicité ne doit pas cacher le fait qu'il est souvent difficile de construire la REM d'un tel système. En effet, pour un composant donné, il est difficile de lui associer les bons éléments de représentation et surtout de déterminer ses entrées et sorties sans en connaître les lois physiques qui le régissent. Un œil d'expert du champ disciplinaire concerné est donc nécessaire à cet effet. Par exemple, nous avons dû faire appel à des chercheurs en mécanique pour déterminer la REM de la partie turbine d'un système éolien [TOUNZI 02]. Mais il convient de préciser que la connaissance de l'analogie énergétique entre divers domaines de la physique est un atout essentiel pour le modélisateur.

De ce fait, la REM ne peut être qu'un outil de description macroscopique qui nécessite l'interconnexion avec d'autres outils de description plus détaillée. Le GIC peut correspondre avantageusement à ce deuxième niveau de modélisation. D'autres outils, tels les représentations par schémas blocs ou les modèles d'états, peuvent aussi correspondre à ce deuxième niveau. On peut cependant noter que la notion de causalité (description interne), propre au GIC⁴, est tout à fait

⁴ C'est aussi le cas des Bond Graph, qui cependant ne privilégient pas la causalité physique.

complémentaire avec celle d'interaction (description externe) propre à la REM : les entrées et sorties d'un élément ne peuvent être définies qu'en fonction des causalités physiques de cet élément. Un troisième niveau de description peut consister en un modèle mathématique, alors écrit sans contresens physique, ce qui n'est pas toujours le cas.

Ces divers niveaux de modélisation doivent ainsi être imbriqués pour assurer une bonne transition entre eux. Cela correspond à l'organisation spatiale proposée par la systémique. Par exemple, un GIC décrivant le contenu d'un bloc de REM, devra être décrit en positionnant les entrées et les sorties en accord avec celles de l'élément REM. Une contrainte graphique supplémentaire est imposée pour assurer cette équivalence.

La même remarque peut être faite sur la SMC. La structuration proposée ne permet pas d'établir une loi de commande en soi. La méthodologie proposée se place dans une philosophie de raisonnement descendant [SAUVAT 03] où l'on se place dans le cadre le plus large pour arriver, par simplification à des structures plus pratiques. De ce fait, avant d'initier une mise en œuvre, la possibilité de simplifications et regroupements se doit d'être examinée. Mais, cette démarche descendante a l'avantage de poser de manière très explicite les problèmes. L'œil de l'expert est alors nécessaire pour opérer les réductions utiles. Une étude et des outils complémentaires sont ensuite nécessaires pour arriver à la commande à mettre en œuvre. En effet, il faut déterminer les divers organes d'asservissement (correcteurs linéaires, flous...) et faire ensuite la synthèse des correcteurs en appliquant les techniques de l'automatique.

Dans une démarche ascendante, utilisée plus souvent en commande de systèmes électriques, la mise en œuvre fait partie intégrante du raisonnement. L'expert est nécessaire dès le départ. Comme la démarche fait apparaître les degrés de liberté de manière moins explicite, certaines solutions peuvent être ignorées. Cela explique sans doute l'utilisation quasi systématique des commandes de type maître-esclave dans l'industrie pour des SMM.

En fait, les deux démarches sont complémentaires. Si elles font apparaître souvent des solutions différentes, il est intéressant de les comparer ce qui fait souvent émerger des solutions intermédiaires. Cette remarque, fait penser à la nécessaire complémentarité entre démarches systémique et cartésienne.

Nous proposons ainsi d'organiser la démarche de commande des SMM par une double approche (Fig. II. 10). L'approche ascendante peut être utilisée pour la modélisation du système : du niveau expert au niveau macroscopique. En effet nous avons vu que la détermination de la REM est sous-jacente à la connaissance de la causalité physique de chaque élément. La démarche descendante est utilisée pour la détermination de la commande du système : du niveau macroscopique au niveau expert. Dans les deux cas, le GIC peut correspondre à un niveau intermédiaire (niveau méso en mécanique).

Il est bien sûr évident que si un sens de parcours privilégié est défini, cela n'exclut pas les nécessaires aller - retour entre les divers niveaux d'une part, et entre la modélisation et la commande d'autre part.

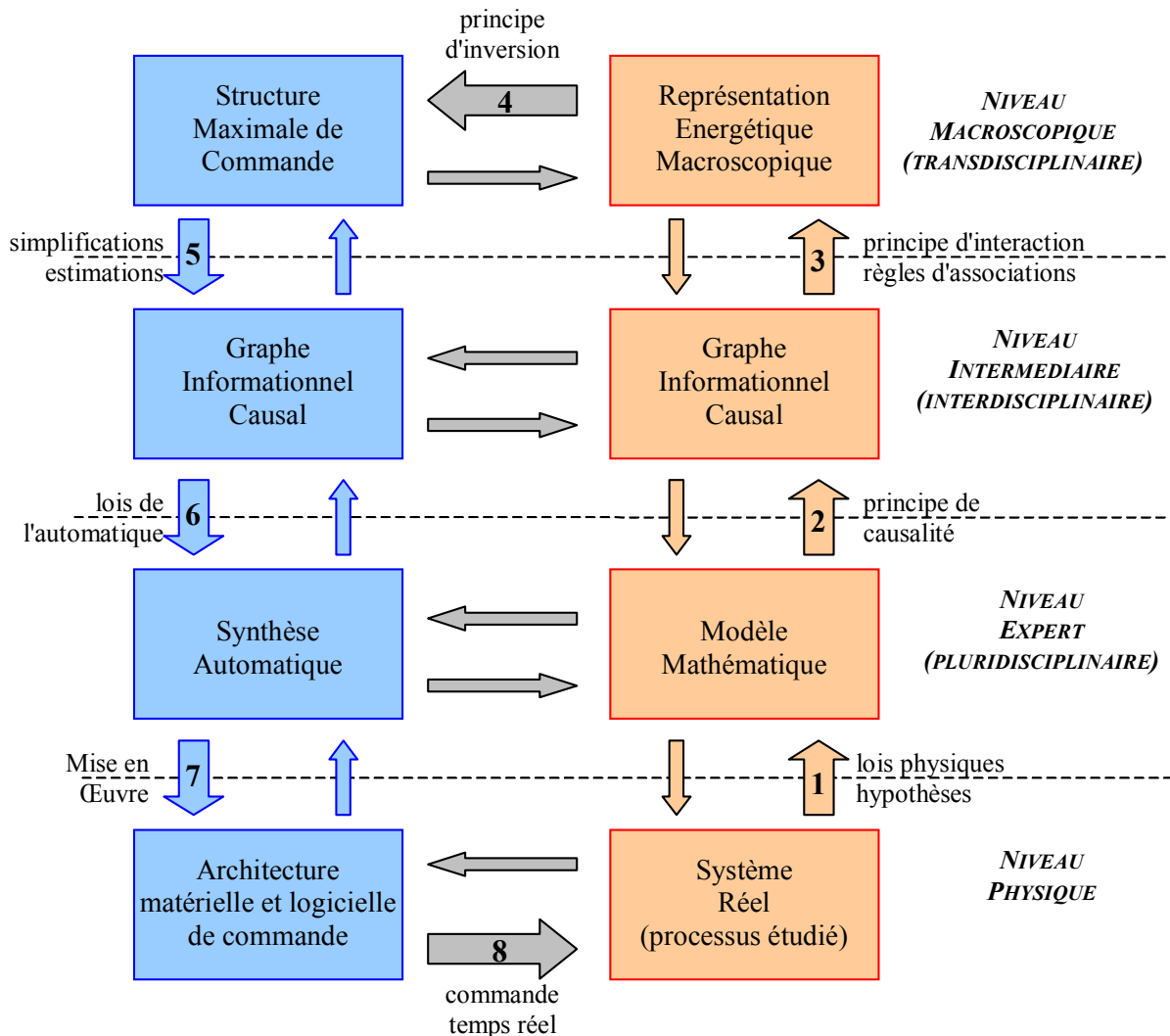


Fig. II. 10 : Double approche de la démarche de commande de SMM

II. 4. 3. La REM, quelles limites ?

La REM n'échappe pas aux limites des autres types de modélisation. La détermination de chaque élément est sous-jacente aux hypothèses réductrices que l'on utilise. En fonction des hypothèses considérées et selon la plage de validité, un même composant sera représenté par des éléments différents. Cela correspond au principe de subjectivité de la systémique. De ce fait, la problématique de l'association d'éléments se posera de manière différente en fonction des choix induits par le niveau expert de modélisation pour chacun de ces éléments. La question reste de savoir jusqu'à quel est le degré de finesse nécessaire dans la description des éléments pour bien représenter le système global.

De plus, dans le cas de systèmes ayant des phases de fonctionnement nécessitant des modèles différents par partie, le problème de représentation reste entier (représentation multi-modèle et commutation entre modèles qui doit respecter la conservation d'énergie). La REM peut cependant être utilisée avec deux sous-représentations associées par un bloc de commutation approprié.

La REM a pour objectif de représenter chaque entité par un élément afin de proposer une description à la fois structurelle et fonctionnelle. Cette caractéristique est à la base de son attractivité : un non initié pourra ainsi visualiser les divers éléments d'un simple coup d'œil à la condition qu'il ait acquis les bases de la représentation.

Cependant, certaines associations ne peuvent pas être représentées par deux éléments connectés (règle de concaténation par exemple). Les règles d'association sont essentielles pour préserver une description fonctionnelle (conflit de variables d'état), mais nuisent à la représentation structurelle.

La proposition de faire apparaître les éléments d'accumulation dans la représentation SMM n'est pas sans inconvénient. En effet, cette contrainte, si elle s'avère très intéressante pour la structuration de la commande, peut amener à des REM très lourdes. Le cas de la machine asynchrone en est un bel exemple [TOUNZI 02]. Sa REM (voir Chap. III) fait apparaître deux éléments d'accumulation du deuxième ordre. Peut-on déroger au principe de représentation explicite des éléments d'accumulation en vue d'assurer une représentation réellement synthétique ? Dans ce cas, il faudrait alors définir un niveau supérieur à la REM, qui, à l'évidence, finirait par perdre tout caractère de lisibilité. Un système complexe peut-il avoir une représentation simple compatible avec le sens physique ?

La REM étendue aux concepts SMM, permet de mettre en évidence les éléments de couplage qui assurent une répartition énergétique entre plusieurs chaînes de conversion. La SMC déduite par les règles d'inversion, introduit alors la notion de critères afin de gérer ces éléments de couplage. Cependant ces critères restent à définir, et là encore le rôle de l'expert est incontournable.

Il serait faux de penser que la REM est un outil universel qui résout tous les problèmes. On peut dire qu'elle a le mérite de donner une autre vision et de mettre l'accent sur certains problèmes... sans pour autant les résoudre. Cependant bien poser un problème est souvent un pas essentiel vers sa résolution. Son avantage le plus important est de modéliser de manière uniforme des systèmes pluridisciplinaires énergétiques. Mais comme elle se doit de contenir des niveaux de modélisation plus fins, elle aura les mêmes inconvénients que les outils de modélisation intermédiaires ou experts. Il faut cependant noter que différents outils peuvent être utilisés pour chacune des composantes (bond-graphs, fonctions de transferts, réseaux de Pétri...), ce qui permet d'avoir la modélisation la plus adaptée pour chaque partie du système. Cependant tous ces outils doivent être interconnectables et interconnectés avec la REM.

II. 4. 4. La REM, quelles applications ?

La REM est un outil de synthèse qui doit avoir un apport dans l'enseignement du Génie Electrique. Son utilisation, même pour des systèmes simples, doit ainsi permettre à l'étudiant d'appréhender les systèmes électriques et électromécaniques comme des éléments en interactions avec d'autres pour une application donnée. On insiste alors plus sur la fonctionnalité (vision externe) que sur le fonctionnement (vision interne). Cette vision globale rentre dans la nécessaire approche duale entre synthèse et analyse de l'enseignement supérieur. Les diverses expériences entreprises de la Maîtrise EEA au DEA de Génie Electrique confirment l'intérêt de cette approche « système » en association avec l'approche classique (voir Annexe « Transfert Pédagogique »).

Mais, la REM n'est pas seulement un outil à vocation pédagogique. Son intérêt dans le domaine de la recherche a été démontré par les nombreuses publications où des systèmes plus ou moins complexes ont été étudiés (voir leur énumération Chap. III). Afin d'illustrer l'intérêt scientifique de la méthodologie proposée, le chapitre III est consacré à l'étude d'un système à couplage multiple, de sa modélisation jusqu'à la mise en œuvre de sa commande, et ce, bien sur, en appliquant la démarche et les formalismes développés au cours de ce chapitre II.

**Chap - III. Exemple d'application
aux couplages multiples**

Chap - III. Exemple d'application aux couplages multiples

Résumé du chapitre

Ce chapitre illustre les outils proposés pour la modélisation et la commande des systèmes multimachines multiconvertisseurs (Chap. II) par un exemple d'application concret, de sa modélisation jusqu'à la mise en œuvre de sa commande.

Un système d'étude sera tout d'abord déduit d'applications industrielles (§ III.1). Ce système fictif, basé sur des réalités physiques, comportera ainsi tous les types de couplage, ce qui permettra d'illustrer la plupart des concepts développés. La REM du système étudié sera alors déterminée à partir des divers éléments et de leurs associations (§ III.2), puis la SMC en sera enfin déduite et mise en œuvre sur une maquette expérimentale (§ III.3). L'extension aux concepts non utilisés sera alors discutée (§ III.4).

III. 1. Description du système

III. 1. 1 Systèmes industriels avec couplages

III. 1. 2 Déduction d'un système d'étude

III. 2. REM du système étudié

III. 2. 1 REM des éléments constitutifs

III. 2. 2 REM du système global

III. 2. 3 Analyse des contraintes

III. 3. SMC du système étudié

III. 3. 1 SMC du système de traction

III. 3. 2 Emulateur de couplage mécanique

III. 3. 3 Validations expérimentales

III. 4. Bilan et extensions

III. 4. 1 Bilan de l'étude réalisée

III. 4. 2 Extension à d'autres systèmes

III. 1. Description du système étudié

Ce paragraphe a pour objet de déterminer un système d'étude pour illustrer les divers concepts développés dans le chapitre précédent. Le choix de l'exemple d'application s'avère délicat, car nous voulons avoir un système assez riche en couplages pour appliquer le plus grand nombre de principes développés, sans pour autant nous couper des réalités pratiques. De plus, le système étudié devra pouvoir être validé sur la plate-forme expérimentale SMM du L2EP, ce qui limitera le choix de ses composantes.

Dans un premier temps, des systèmes réels seront abordés afin de voir leurs couplages principaux. Dans un second temps, un système virtuel sera défini à partir de la combinaison de divers systèmes réels.

III. 1. 1 Systèmes industriels avec couplages

Nous nous limitons, dans cette partie, aux systèmes qui ont fait l'objet d'études au sein du thème SMM du L2EP. Outre l'objectif de recherche d'un cahier des charges, ces systèmes seront aussi l'occasion de donner des exemples concrets de SMM. Ils seront abordés succinctement dans le but de présenter leurs caractéristiques principales. Nous invitons le lecteur à se reporter aux références associées pour avoir plus de détails.

Systèmes d'alimentation partagée pour deux machines — Afin d'assurer une plus grande fiabilité des entraînements électriques industriels, des extensions ont été proposées pour assurer des fonctionnements en mode dégradé [WELCHKO 03]. Parmi les structures proposées pour les machines triphasées, on peut noter l'utilisation de la connexion du point neutre de la machine au point milieu du pont capacitif [VANDERBROECK 84] [ELCHEB 93] ou à un quatrième bras d'onduleur [LIU 93]. Ces deux principes ont été étendus à quelques applications multimachines. Un onduleur quatre bras pour deux machines a ainsi été proposé pour la motorisation d'un robot mobile [BOUSCAYROL 95a] : deux bras sont partagés par les deux machines asynchrones. Une autre structure quatre bras a aussi été utilisée pour la motorisation d'un véhicule électrique [LEDZEMA 01], cette fois-ci sans bras commun, mais avec une connexion commune sur le pont capacitif.

Le L2EP a développé une structure alternative utilisant 5 bras pour deux machines asynchrones [FRANÇOIS 99]. Un bras est ainsi utilisé en commun pour alimenter les deux machines. Cette structure originale peut être considérée comme une version dégradée de la structure classique (deux onduleurs 3-bras) lors de la perte d'un bras. Malgré la mise en commun d'un bras, le convertisseur 5-bras autorise un fonctionnement indépendant des deux machines mais en limitant sa vitesse maximale [DELARUE 03b]. Cette idée originale a d'ailleurs été reprise depuis par l'équipe du Pr. Matusse

(Université de Meiji, Japon) [HIZUME 03]. On peut noter de plus, qu'une extension à un convertisseur AC-AC 5-bras a été proposée en collaboration avec ABB Finlande [FRANÇOIS 00]. Le bras commun entre la partie redresseur et la partie onduleur permet cependant une absorption sinusoïdale et un contrôle dynamique de la machine asynchrone, tout en limitant la tension disponible sur la machine. Cette structure de conversion originale AC-AC a aussi été parallèlement développée par l'équipe du Pr. Jacobina (Université de Campina Grande, Brésil) [JACOBINA 03], dont le travail sur les structures dégradées est reconnu.

Par ailleurs, la structure 4 bras pour deux machines (dont deux communs) a aussi été utilisée lors de la thèse de J. Pierquin pour une application de type véhicule électrique [PIERQUIN 02a]. Une commande originale des deux machines a été développée pour prendre en compte les contraintes fortes posées par la mise en commun des deux bras. Si un fonctionnement indépendant des deux machines n'est pas possible en régime permanent, un écart de vitesse peut être géré lors d'une phase transitoire.

Ces structures de mode dégradé possèdent ainsi un couplage électrique contraignant du fait de la mise en commun d'une ou plusieurs cellules de commutation. Ce couplage de type amont nécessite ainsi une gestion particulière pour exploiter tous les degrés de liberté qui sont disponibles et les contraintes qui sont posées. Les travaux de Ph. Delarue ont mené à une commande générique multi-bras pour la gestion de convertisseurs de tension ayant un nombre quelconque de bras [DELARUE 03a]. Le convertisseur est alors considéré comme une entité à part entière (convertisseur électrique) et le couplage est reporté sur la connexion entre le convertisseur et ses charges (les machines en l'occurrence). Nous nous inspirerons de cette philosophie dans l'exemple d'application.

Systemes de traction ferroviaire — La traction du métro VAL 206 a été largement utilisée pour illustrer les concepts développés au cours du chapitre II. Cette étude fait l'objet d'une collaboration avec Siemens Transportation Systems dans le cadre de la thèse de J. N. Verhille [VERHILLE 03]. D'une part, le nombre important de couplages n'est pas sans poser des problèmes d'interaction, et d'autre part les nombreux degrés de liberté (6 convertisseurs statiques pour une rame de deux voitures) permettent différentes possibilités quant à la commande d'un tel système. Parmi les couplages les plus contraignants, on peut citer la mise en série des induits des machines à courant continu. Ce cas classique en traction ferroviaire nous a permis de valider la notion de critère de pondération sur un système composé de 4 machines à courant continu [BOUSCAYROL 03b]. Le couplage mécanique est relativement complexe de par le grand nombre de constituants des transmissions mécaniques [MERCIECA 04]. Des premières pistes de résolution de ce type de couplage ont été proposées lors de la thèse de B. Vulturescu en utilisant la commande à modèle de comportement étendue aux systèmes multimachines [VULTURESCU 02] (co-tutelle avec le Laboratoire de Convertisseurs Statiques de Bucarest). Des validations partielles ont été réalisées sur la plate forme expérimentale SMM du L2EP.

Un autre cas de traction ferroviaire a été étudié en collaboration avec le LEEI de Toulouse, dans le cadre d'un stage de doctorant du GdR SDSE¹ (Annexe « Opération SMM des GdR »). Cette traction de train à grande vitesse utilise deux machines asynchrones triphasées alimentées en parallèle par un onduleur 3-bras. Cette structure, développée au LEEI, est à la base des critères de pondération [ESCANE 99]. Le double couplage amont (électrique) et aval (mécanique) induit une "boucle" de puissance qui répercute les perturbations d'une chaîne de conversion sur l'autre. Une commande à modèle de comportement a alors été insérée pour contrer le problème de patinage, phénomène qui excitait cette boucle de puissance [PIERQUIN 00].

Les systèmes de traction ferroviaire sont ainsi des applications riches en couplages dont les effets peuvent être très néfastes voire destructeurs. Un très grand nombre de structures sont utilisées. En effet, la puissance mise en jeu nécessite un grand nombre de moteurs. De plus, les sources d'alimentation peuvent être différentes selon les réseaux de distribution, voire multiples pour les trains transfrontaliers (Thalys ou Eurostar par exemple) [STEIMEL 96] [RUFER 03]. Les combinaisons sont ainsi très variées [SABATE 98] et amènent de nombreux couplages [KETTLER 95].

Systèmes de traction automobile — La thèse de J. Pierquin a porté sur la traction d'un véhicule électrique bi-moteur [PIERQUIN 02a]. Une des principales caractéristiques de ce type de véhicule réside dans la loi de contact roue route. En effet, cette loi est non seulement non-linéaire mais aussi non stationnaire [HORI 98] [PROVOOST 98]. Le problème de couplage est alors amplifié par la loi de contact. La mise en REM a permis de bien poser le problème et de proposer une structure maximale de commande où les fonctions anti-patinage et différentiel sont bien séparées. En effet, les commandes proposées dans la littérature sont souvent globales et, de plus, utilisent des algorithmes non linéaires (logique floue, réseaux de neurones [MARTINO 93] [BRONDOLO 97] ou à modèle interne [SAKAI 00]). La SMC initiale a ainsi permis de développer différentes commandes anti-patinage sur la base de commande à modèle de comportement [PIERQUIN 01].

Diverses structures sont possibles pour la traction de véhicules électriques [MULTON 01]. Dans le cas monomoteur, le couplage amont est réalisé par le différentiel : les problèmes sont alors d'ordre mécanique. Dans le cas bi-moteur, le couplage amont est électrique, ce qui donne plus de souplesse et de degrés de liberté [ARNET 97]. Mais une synchronisation des commandes doit être réalisée.

Systèmes de propulsion navale — Les systèmes de propulsion navale demandent une puissance très importante. La segmentation de puissance est alors nécessaire pour les convertisseurs statiques et les enroulements de machines. C'est l'une des raisons pour laquelle on utilise des machines double étoile dans ce type d'application [MICHAX 97]. Les alimentations par commutateur de courant étaient privilégiées par le passé, l'utilisation d'onduleurs de tension est maintenant de plus en plus fréquente [MOUBAYED 99].

¹ Groupe de Recherche « Sécurité et Disponibilité des Systèmes Electriques », CNRS, 1998-2001.

Les travaux d'E. Semail au L2EP ont permis de développer des concepts génériques sur les machines polyphasées [SEMAIL 00]. En fait, le couplage magnétique inhérent à ce type de machine est avantageusement remplacé par un couplage électrique et un couplage mécanique, couplages plus simples [SEMAIL 03]. Des machines fictives magnétiquement indépendantes apparaissent alors : la gestion du système équivalent s'en trouve donc grandement simplifiée [SEMAIL 01d]. Ces notions ont été plus particulièrement validées sur une machine pentaphasée dans la thèse de X. Kestelyn [KESTELYN 02], mais aussi lors d'une collaboration avec le GREEN, par un stage de doctorant du GREEN au L2EP dans le cadre du GdR SDSE [MARTIN 02]. La thèse de F. Scuiller, en co-tutelle avec l'IRENAV (Institut de Recherche de l'Ecole NAVale), est en cours sur ce thème.

Les machines polyphasées offrent ainsi une solution aux applications forte puissance. Mais, une autre caractéristique importante est la possibilité de fonctionnement en mode dégradé [JAHNS 80]. De nombreux travaux sont proposés dans la littérature actuelle, mais ne proposent que des solutions spécifiques pour chaque application [FU-94], [TOLIYAT 98].

Systemes éoliens — Depuis une dizaine d'années, le domaine des énergies renouvelables est en pleine expansion afin de participer à la réduction des effets de serre et de compenser l'épuisement progressif des ressources d'origine fossile [DWA-01]. Les systèmes éoliens ont ainsi vu leur production annuelle augmenter grâce à des fonctionnements à vitesse variable [ZINGER 97] [MILLER 97]. De plus, la qualité de l'énergie produite s'est fortement améliorée grâce à l'utilisation de convertisseurs d'électronique de puissance [MULTON 02].

La simulation du système éolien J48 dans son ensemble a été la première application de la REM sur un système industriel, dans le cadre d'un contrat avec Jeumont Industrie. Ce système de 750 kW est composé d'une machine synchrone à grand nombre de pôles, ce qui évite le multiplicateur de vitesse source de problèmes sur le long terme. Le stator est connecté au réseau au travers de deux convertisseurs triphasés de tension avec bus continu intermédiaire, et d'un transformateur élévateur. Une publication commune [DELARUE 03c] a ainsi permis de poser les bases des blocs de stratégie, mais avec une génératrice équivalente à courant continu pour raison de confidentialité. En effet, dans ce type d'application, l'objectif étant la gestion de puissances active et réactive, les blocs de stratégies sont prépondérants.

Un autre système plus classique a été étudié : machine asynchrone à cage avec deux convertisseurs de tension [TOUNZI 02]. Ce système de 900 kW a fait l'objet des premières règles de simplification de la structure maximale de commande [BOUSCAYROL 02a].

Un système de 600 kW, utilisant lui aussi un double convertisseur de tension, a enfin permis de montrer que les blocs de stratégies offraient réellement des possibilités multiples contrairement aux autres blocs de commande [BOUSCAYROL 04]. On peut considérer que c'est dans ces blocs que l'on retrouve le plus de différence entre les commandes de divers systèmes éoliens [SIMOES 97], [DEBATISTA 00], [VALTCHEV 00], [SONG 01].

On peut aussi noter que la commande de la machine asynchrone double alimentation a fait l'objet d'une collaboration avec le LEEI avec le stage du doctorant P. E. Vidal dans le cadre du GdR ME²MS² (voir Annexe « Opération SMM des GdR ») [VIDAL 04]. Il faut enfin souligner qu'un système éolien de 1 kW a fait l'objet de la première émulation de système sur la plate-forme expérimentale SMM du L2EP [GERVASI 03].

Il existe un grand nombre de structures de puissance pour des systèmes éoliens [MULTON 02]. Divers types de machines sont utilisés [BAUER 00] : machine asynchrone à cage (faible puissance) [MULJADI 01], machine synchrone à aimants permanents (moyenne puissance) [CHEN 01], machine asynchrone double alimentation (fortes puissances) [SPEE 95]. De plus diverses topologies de convertisseurs sont utilisées pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau [HOFFMANN 00], [THIRINGER 01]. Ces systèmes sont ainsi bien souvent des systèmes monomachine multiconvertisseurs. La machine double alimentation, très utilisée en forte puissance, offre de plus un couplage magnétique très intéressant à étudier, et implique au moins un couplage électrique car le stator et le rotor sont (indirectement) reliés au même réseau. Il convient de noter que la tendance est de gérer des parcs éoliens de plusieurs dizaines de turbines [THIRINGER 01]. Ce sont les raisons pour lesquelles, plusieurs systèmes éoliens ont été considérés pour tester divers concepts issus de la Représentation Energétique Macroscopique.

Systèmes d'enroulement de bande — La problématique de l'enroulement et du déroulement de bande est au cœur de la qualité du produit traité pour l'industrie textile, papetière et des films plastiques [JAEGO 99]. En effet, la vitesse de défilement influe sur la régularité du traitement (teinture par exemple) mais aussi sur la qualité de la bobine finale [KOÇ 00]. La tension de bande quant à elle doit être un gage de non-détérioration (déformation plastique voire cassure) du produit, qui a des propriétés plus ou moins élastiques. De plus, on peut noter, des variations des rayons des bobines et des inerties, phénomènes non-stationnaires particulièrement perturbateurs dans les phases de démarrage ou de reprise [PISZEWSKI 01].

Un système de bobinoir de textile a été étudié lors de la thèse de S. Charlemagne [CHARLEMAGNE 03b] dans le cadre d'une co-tutelle avec le LSE (Laboratoire des Systèmes Electriques) de Tunis, qui avait déjà abordé le problème lors d'une thèse précédente [BELHADJ 01]. Le couplage entre les chaînes de motorisation enrouleur et dérouleur est réalisé par le tissu lui-même, dont l'élasticité induit un couplage mécanique très particulier car impliquant une relation non-linéaire à couplage fort [CHARLEMAGNE 01]. La REM de ce système a permis de poser une SMC menant à des découplages originaux [CHARLEMAGNE 02], mais peu robustes par rapport à la variation des rayons et des inerties. Ce problème de robustesse a été partiellement résolu [CHARLEMAGNE 03a] en utilisant une commande plate [FLIESS 92]. Le système étudié a fait l'objet d'une émulation sur la plate forme expérimentale SMM du L2EP.

² Groupe de Recherche « Maîtrise de l'Energie Electrique, du Matériau au Système », CNRS, 2002-2005.

Cette expérience a été complétée par les contacts avec l'ERT « enroutement » de Strasbourg (bandes et films plastiques) [KOÇ 00] et la CPEE (Chaire de Puissance et d'Énergie Électrique) de l'Université de Québec Trois Rivières [SICARD 02]. Ce laboratoire canadien a d'ailleurs utilisé la REM et la SMC pour simuler et développer la commande de leur maquette expérimentale en collaboration avec le L2EP [LECLERCQ 04], et l'étude d'un second système [THIFFAULT 04].

Ce type d'application fait l'objet de nombreux travaux de recherche. En effet la non-linéarité du couplage et la non-stationnarité de certains paramètres sont de réels problèmes. Le transport de bande est une application multimachine par excellence : il est en effet impossible de traiter les divers actionneurs indépendamment (i.e. sans prise en compte du couplage). Des solutions globales de type commande par retour d'état ou « H infini » [KOÇ 02] ont été appliquées avec succès sur des systèmes bi ou tri-moteurs. Leur généralisation semble cependant délicate pour un nombre plus élevé de moteurs. Une autre méthode, plus proche de notre vision « distribuée » semble prometteuse : la commande par émulation d'une ligne d'arbre [VALENZUELA 01]. Cette commande émule une ligne d'arbre, qui reproduit la ligne d'arbre commune aux divers entraînements des systèmes utilisés il y a une trentaine d'années. Une synchronisation est effectuée par cette ligne d'arbre virtuelle [PEREZ 03].

III. 1. 2 Dédution d'un système d'étude

Plate-forme expérimentale SMM — La plate-forme expérimentale SMM du L2EP (Annexe « Plate-forme expérimentale SMM ») dispose de plusieurs bancs machines, de deux convertisseurs statiques à 6 cellules de commutation chacun, d'un ensemble d'interface d'acquisition et d'une carte dSPACE1103.

Parmi les bancs machines, nous disposons de deux bancs identiques composés d'une machine asynchrone à rotor bobiné couplée à une machine à courant continu à excitation séparée, d'une puissance de 1,5 kW.

Le système d'alimentation des diverses machines (stators et éventuellement rotors) ne devra donc pas dépasser 12 cellules de commutations.

Structure de puissance d'étude — La structure étudiée se compose de deux bancs machine asynchrone - machine à courant continu, alimentés par 11 cellules de commutations (Fig. III. 1).

Les machines asynchrones auront leur rotor en court-circuit et les deux stators seront alimentés par un onduleur 5 bras : un bras sera commun aux deux machines.

Les induits des machines à courant continu seront connectés en série et alimentés par un hacheur quatre quadrants (2 cellules de commutation). Leurs excitations seront alimentées chacune par un hacheur quatre quadrants (soit 4 cellules de commutation au total), pour permettre un fonctionnement à flux variable.

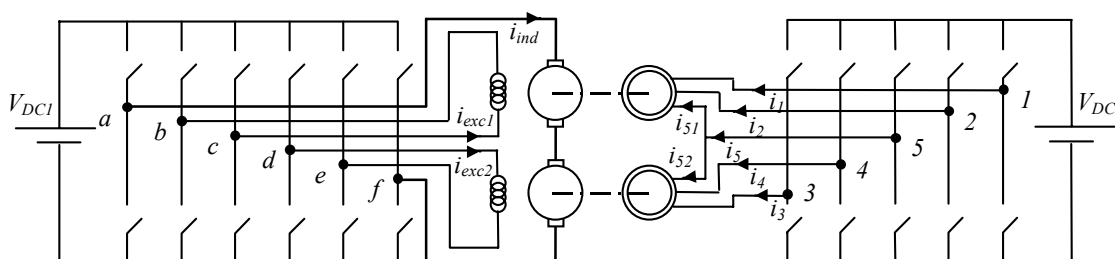


Fig. III. 1 : Structure de puissance du système d'application

Couplages étudiés — Deux couplages électriques différents sont présents dans cette structure. D'une part, un onduleur 5 bras alimente deux machines asynchrones, ce qui permettra de valider un mode de fonctionnement de type dégradé. D'autre part, les machines à courant continu sont connectées en série ce qui permettra de se rapprocher de certaines structures de traction ferroviaire.

Un couplage magnétique est présent dans le montage étudié. En effet, les machines à courant continu sont alimentées à la fois par le stator et par le rotor. Si ce couplage magnétique est le plus simple, il permettra toutefois de poser les problèmes de gestion d'un tel couplage.

Aucun couplage mécanique n'est réalisé entre les bancs machines. Ce type de couplage sera alors émulé par la commande des deux machines asynchrones afin de retrouver de manière fictive un couplage mécanique entre les deux machines à courant continu. Notre expérience dans le domaine de la traction nous a fait choisir un couplage de type véhicule automobile.

Ainsi, on peut constater que le système étudié comporte des couplages de type amont et aval. Cette disposition autorise la validation des divers concepts de commande qui leur sont associés.

III. 2. REM du système étudié

La REM du système d'étude est réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, les REM des éléments constitutifs sont définies. Dans un second temps, la REM globale est obtenue par association des REM préliminaires : les problèmes d'association sont alors posés. Le système est ensuite analysé.

III. 2. 1 REM des éléments constitutifs

REM des hacheurs — Des hacheurs quatre quadrants ont déjà été modélisés dans le chapitre II. Nous rappelons ici brièvement leur modélisation basée sur l'utilisation des concepts de fonction de connexion et de fonction de modulation [GUILLAUD 94] [HAUTIER 99].

L'état d'un interrupteur est caractérisé par sa fonction de connexion c_{ij} , qui prend une valeur 0 si l'interrupteur est ouvert et 1 s'il est fermé :

$$c_{ij} \in \{0,1\} \text{ avec } \begin{cases} i \text{ n}^\circ \text{ de cellule de commutation} \\ j \text{ n}^\circ \text{ de l'interrupteur dans la cellule de commutation} \end{cases} \quad (1)$$

Nous utilisons des convertisseurs avec des cellules de commutation composées de deux interrupteurs. En conduction continue, la fonction de connexion d'un seul interrupteur est suffisante pour caractériser la cellule de commutation, étant donné les états complémentaires des interrupteurs (mode de commandabilité totale de la cellule) :

$$c_{i1} + c_{i2} = 1 \text{ avec } i \text{ n}^\circ \text{ de la cellule de commutation} \quad (2)$$

Une fonction de modulation (ou de conversion) m_i , définit la fonctionnalité globale du hacheur :

$$m = c_{11} - c_{21} \quad m \in \{-1,0,1\} \quad (3)$$

Cette fonction de modulation permet de faire le lien entre les grandeurs d'entrée (appelées aussi sources [GUILLAUD 94]) et de sortie (appelées aussi modulées) :

$$\begin{cases} u_m = m u_s \\ i_m = m i_s \end{cases} \quad u_m \in \{-u_s, 0, u_s\} \text{ et } i_m \in \{-i_s, 0, i_s\} \quad (4)$$

Dans notre cas, la tension source est celle du bus continu, et les courants sources, ceux dans les enroulements des machines. Pour simplifier les notations, nous n'utiliserons que l'indice lié à l'élément dont une variable est issue, en rendant implicite son caractère continu (source, indice s) ou modulé (indices m).

Le GIC d'un hacheur (Fig. III. 2.a) met en évidence des relations non causales, mais aussi une relation non bijective (3) qui doit faire l'objet d'un traitement spécifique lors de la commande. La REM de ces convertisseurs (Fig. III. 2.b) doit ainsi être un carré car ils n'accumulent pas d'énergie et assurent une conversion électro-électrique. On peut remarquer la complémentarité de la description interne (GIC) et externe (REM) d'un tel élément, comme mis en exergue dans la fin du chapitre II : du niveau local, on en déduit la représentation globale.

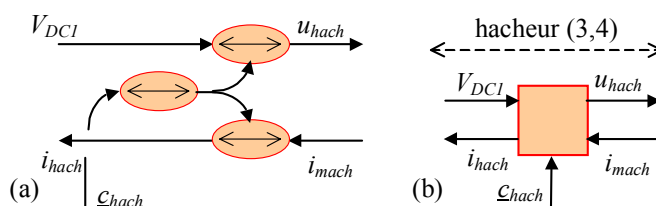


Fig. III. 2 : GIC (a) et REM (b) d'un hacheur

REM de l'onduleur 5 bras — L'onduleur 5 bras est considéré ici comme une entité à part entière. Sa modélisation n'est en fait qu'une extension de celle des hacheurs.

La connexion entre l'onduleur et sa charge électrique est constituée de 5 fils : quatre tensions indépendantes peuvent ainsi être définies. Quatre fonctions de modulations sont alors à déterminer : relations entre chaque tension modulée et la tension continue.

Une cellule de commutation doit alors être choisie comme référence afin de déterminer les fonctions de modulation à partir de celles de conversion. Le bras n° 5 étant commun aux deux machines, il apparaît a priori judicieux de le prendre comme référence. Le vecteur de modulation est ainsi défini comme suit :

$$\underline{m} = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4]^t \quad \text{avec } m_i = c_{i1} - c_{51} \quad (5)$$

Les relations entre les entrées et les sorties sont alors des relations vectorielles :

$$\begin{cases} \underline{u}_{ond} = \underline{m}_{ond} V_{DC2} \\ i_{ond} = \underline{m}_{ond}^t i_{ma} \end{cases} \quad \text{avec } \underline{u}_{ond} = [u_{15} \ u_{25} \ u_{35} \ u_{45}]^t \quad \text{et } i_{ma} = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4]^t \quad (6)$$

La REM de l'onduleur 5 bras (Fig. III. 3) est ainsi identique à celle des hacheurs mis à part certaines variables scalaires qui deviennent des vecteurs. On peut remarquer que dans notre manière d'aborder les choses, les divers convertisseurs statiques sont toujours modélisés par le même type d'élément. Comme nous le verrons dans le § II.2.2., c'est la connectique avec d'autres éléments qui sera spécifique (élément de couplage entre autres).

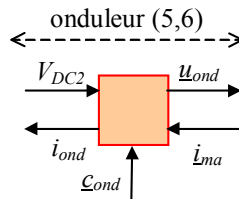


Fig. III. 3 : REM de l'onduleur 5-bras

REM de la machine à courant continu à excitation séparée — La REM d'une machine à courant continu à aimants permanents a été proposée lors du chapitre II. Dans l'application d'étude, leur excitation est cette fois séparée.

Parmi les diverses modélisations possibles, nous choisissons une représentation causale déduite de celle proposée par [DEGOBERT 97] (Fig. III. 4.a). Elle met en évidence la participation des grandeurs d'induit (indice *ind*) et des grandeurs d'inducteur (indice *exc* pour excitation) pour la création d'un flux ϕ_{mcc} même si cette répartition n'est pas homogène (réaction magnétique d'induit...). La f.e.m. d'inducteur e_{exc} est quant à elle représentative des imperfections du collecteur [CHATELAIN 83]. Un couple de perturbation C_{exc} en découle. Ces deux grandeurs sont considérées comme nulles dans la plupart des cas.

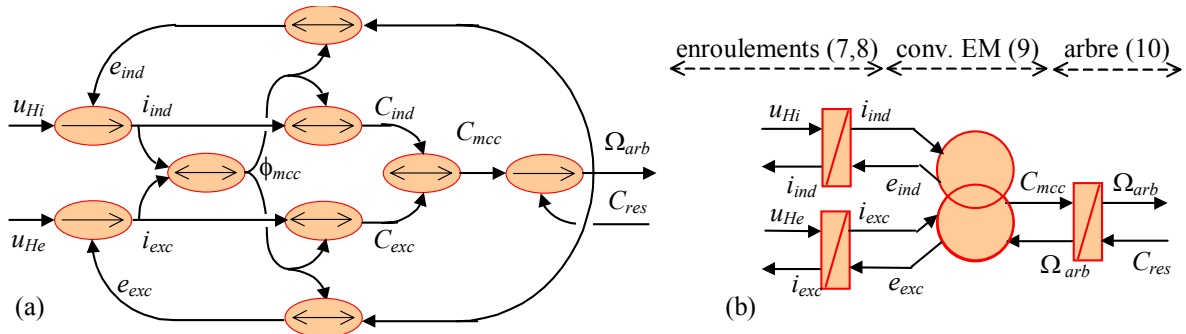


Fig. III. 4 : GIC (a) et REM (b) d'une MCC à excitation séparée

L'enroulement d'induit correspond à un élément d'accumulation, dont le courant i_{ind} est la variable d'état, suite à l'interaction entre la tension d'alimentation u_{Hi} et la f.e.m. e_{ind} :

$$L_{ind} \frac{di_{ind}}{dt} + R_{ind} i_{ind} = u_{Hi} - e_{ind} \quad (7)$$

avec R_{ind} et L_{ind} la résistance et l'inductance de l'enroulement d'induit.

L'enroulement d'excitation (inducteur) correspond à un élément d'accumulation, dont le courant i_{exc} est la variable d'état, suite à l'action de la tension d'alimentation u_{He} et de la f.e.m. d'excitation e_{exc} (qui sera nulle dans la quasi-totalité des machines, par construction) :

$$L_{exc} \frac{di_{exc}}{dt} + R_{exc} i_{exc} = u_{He} - e_{exc} \quad (8)$$

avec R_{exc} et L_{exc} la résistance et l'inductance de l'enroulement d'excitation.

Après les simplifications d'usage (pas de réaction magnétique d'induit, linéarité magnétique...), des équations de couplage relient les divers courants, la f.e.m, le couple électromagnétique C_{mcc} et la vitesse de rotation de l'arbre Ω_{arb} :

$$\begin{cases} C_{mcc} = k_{mcc} i_{exc} i_{ind} \\ e_{ind} = k_{mcc} i_{exc} \Omega_{arb} \end{cases} \quad (9)$$

avec k_{mcc} le paramètre de couplage électromécanique.

Enfin l'arbre de rotation est un élément d'accumulation dont la vitesse est la variable d'état, suite à l'interaction entre le couple électromagnétique et le couple résistant C_{res} :

$$J_{mcc} \frac{d\Omega_{arb}}{dt} + f_{mcc} \Omega_{arb} = C_{mcc} - C_{res} \quad (10)$$

avec J_{mcc} et f_{mcc} le moment d'inertie et le coefficient de frottement visqueux.

La REM de la machine (Fig. III. 4.b) est directement déduite du GIC général [BOUSCAYROL 02b]. La conversion électromécanique apparaît ainsi comme un couplage magnétique aval : production d'un mouvement en aval à partir de deux sources électriques en amont, au travers d'une carcasse magnétique commune, induisant un flux commun. Il est intéressant de noter que contrairement aux éléments de couplages déjà rencontrés, la valeur de chaque entrée d'action (les deux courants) n'est pas égale dans la production de la sortie d'action (le couple). La gestion de ce type d'élément n'en sera que plus complexe.

REM de la machine asynchrone à rotor bobiné — Les machines asynchrones utilisées possèdent un rotor bobiné. Même si, dans l'application étudiée, les enroulements du rotor seront mis en court-circuit (cas particulier de tensions rotoriques nulles), nous proposons ici une modélisation globale avec prise en compte des tensions rotoriques. Tous les enroulements sont considérés connectés en étoile.

Le modèle en régime transitoire est exprimé dans un repère de Park afin d'en simplifier ses équations selon les hypothèses classiques [CHATELAIN 83] [CARON 95]. Le repère d'étude (d,q) est tournant diphasé orthonormé, dont l'angle avec la phase statorique $1s$ est $\theta_{d/s}$ et l'angle avec la phase rotorique $1r$ est $\theta_{d/r}$ ³ (Fig. III. 5). La relation entre les phases est ainsi définie :

$$\theta_{d/s} = \theta_{d/r} + \theta_{r/s} \quad \text{avec} \quad \frac{d}{dt} \theta_{r/s} = p \Omega_{arb} \quad (11)$$

³ On peut remarquer la notation peu courante des angles qui a pour but de mieux différencier la notion de phase (transitoire) et de "pulsation" transitoire ($\omega_{d/s}$ par exemple) par rapport à la pulsation des tensions d'alimentation (ω_s par exemple) étendue en régime permanent à la pulsation des autres variables.

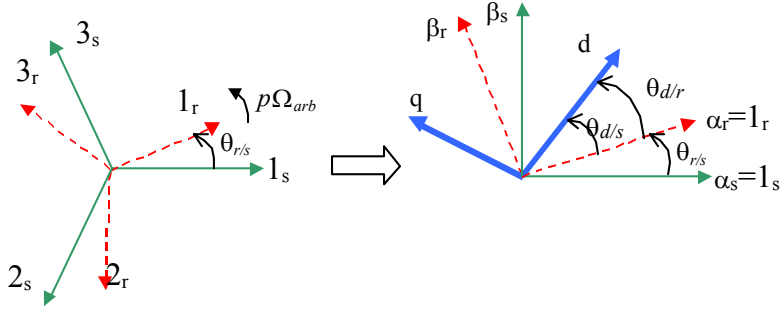


Fig. III. 5 : Repère (d,q) de Park

avec p le nombre de paire de pôles.

Les bobinages statoriques et rotoriques sont des accumulateurs d'énergie dont les courants sont les variables d'état. Pour respecter cette vision externe, nous choisissons de décrire le système avec les divers courants comme variables d'état :

$$\begin{cases} \left(R_s + \sigma \frac{L_s}{R_s} \frac{d}{dt} \right) i_{sd} = v_{sd} - \frac{M_{sr}}{L_r} v_{rd} - e_{sd} \\ \left(R_r + \sigma \frac{L_r}{R_r} \frac{d}{dt} \right) i_{rd} = v_{rd} - \frac{M_{sr}}{L_s} v_{sd} - e_{rd} \\ \left(R_s + \sigma \frac{L_s}{R_s} \frac{d}{dt} \right) i_{sq} = v_{sq} - \frac{M_{sr}}{L_r} v_{rq} - e_{sq} \\ \left(R_r + \sigma \frac{L_r}{R_r} \frac{d}{dt} \right) i_{rq} = v_{rq} - \frac{M_{sr}}{L_s} v_{sq} - e_{rq} \end{cases} \quad (12)$$

En définissant des f.e.m. associées à chaque courant, qui expriment les couplages entre les divers éléments d'accumulation :

$$\begin{cases} e_{sd} = -\frac{M_{sr}R_r}{L_r} i_{rd} - \omega_{d/s} (L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq}) + \omega_{d/r} \frac{M_{sr}}{L_r} (M_{sr} i_{sq} + L_r i_{rq}) \\ e_{rd} = -\frac{M_{sr}R_s}{L_s} i_{sd} - \omega_{d/s} (M_{sr} i_{sq} + L_r i_{rq}) + \omega_{d/r} \frac{M_{sr}}{L_r} (L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq}) \\ e_{sq} = -\frac{M_{sr}R_r}{L_r} i_{rq} + \omega_{d/r} (L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd}) - \omega_{d/s} \frac{M_{sr}}{L_r} (M_{sr} i_{sd} + L_r i_{rd}) \\ e_{rq} = -\frac{M_{sr}R_s}{L_s} i_{sq} + \omega_{d/r} (M_{sr} i_{sd} + L_r i_{rd}) - \omega_{d/s} \frac{M_{sr}}{L_r} (L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd}) \end{cases} \quad (13)$$

avec R_s et R_r résistances des enroulements statoriques et rotoriques, L_s et L_r inductances cycliques statoriques et rotoriques, M_{sr} mutuelle inductance cyclique et $\sigma = 1 - M_{sr}^2 / L_s L_r$ coefficient de dispersion.

On peut remarquer que les équations d'état sont couplées deux à deux. Par exemple, le courant i_{sd} dépend en effet de la tension v_{sd} , mais aussi de la tension v_{rd} . On peut ainsi définir deux sous-systèmes

indépendants : un sous-système d'axe d et un sous-système d'axe q. Cette propriété sera utilisée pour construire la REM de la machine.

Dans cette modélisation, les flux ne sont alors que des variables intermédiaires :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \phi_{rd} = M_{sr} i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \phi_{rq} = M_{sr} i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (14)$$

Enfin la dernière relation de couplage exprime le couple électromagnétique en fonction des courants :

$$C_{ma} = p M_{sr} (i_{rd} i_{sq} - i_{sd} i_{rq}) \quad (15)$$

La relation de l'arbre, élément d'accumulation d'énergie cinétique, est bien sûr identique à celle de l'arbre de la machine à courant continu.

Le modèle dans le repère (d,q) utilise trois tensions simples équilibrées, ce qui permet de négliger la composante homopolaire. En revanche, les modèles des divers convertisseurs utilisent des tensions entre phases. La transformation de Park (choisie à conservation de puissance) doit alors être complétée par une transformation de passage des grandeurs composées (dimension 2) aux grandeurs simples (dimension 3) :

$$\begin{cases} v_{s-dq} = [D(\theta_{d/s})] u_{ond} \\ i_{im} = [D'(\theta_{d/s})]^{-1} i_{s-dq} \end{cases} \text{ avec} \quad (16)$$

$$\underline{u}_{ond} = \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{13} \end{bmatrix} \quad \underline{i}_{ma} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad v_{s-dq} = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad \underline{i}_{s-dq} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

$$[D(\theta_{d/s})] = [P(\theta_{d/s})] \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad [D'(\theta_{d/s})] = [P(\theta_{d/s})] \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Des GIC de la machine asynchrone sont proposés dans [DEGOBERT 97] et [GUILLAUD 01]. Vu la complexité de ces représentations pour le non-initié, nous nous limitons à sa REM (Fig. III. 6) qui se

déduit des équations précédentes. Les éléments d'accumulation électriques sont d'ordre 2 et représentent les enroulements d'axe d et d'axe q (12), sous-systèmes indépendants. Après les transformations de Park (équivalentes à des conversions électro-électriques) (17), un élément de couplage est inséré afin de passer des sous-systèmes stator et rotor d'origine (le stator et le rotor étant deux éléments physiques distincts) aux sous-systèmes d'axe d et q (ces enroulements équivalents étant des sous-systèmes sans action directe l'un sur l'autre). Un élément de couplage magnétique (double cercle) (15) permet alors de fournir un couple sur l'élément d'accumulation mécanique qui correspond à l'arbre et de définir les f.e.m. de couplage (13). Cette modélisation correspond en fait à un modèle d'ordre 5 dont les variables d'état sont les deux courants d'axe d (i_{sd} et i_{rd}), les deux courants d'axe q (i_{sq} et i_{rq}) et la vitesse Ω_{arb} .

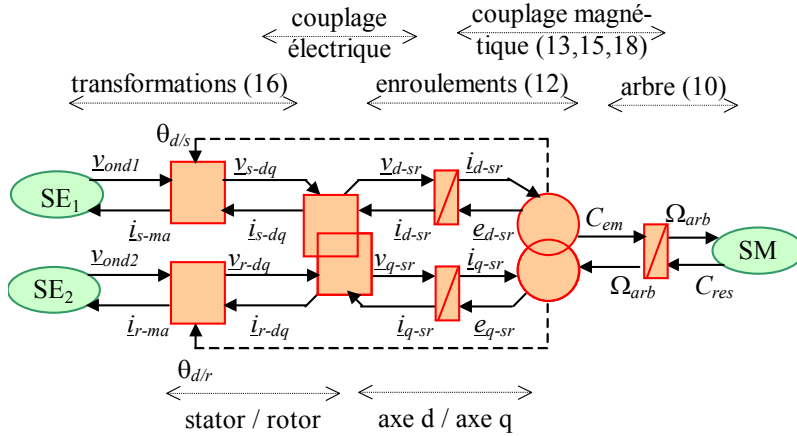


Fig. III. 6 : REM de la machine asynchrone à rotor bobiné

Les angles de transformation sont, en fait, des informations issues du modèle lui-même selon le choix du repère que l'on s'est fixé. Par exemple, si le repère est lié au flux statorique, on obtient ces angles par :

$$\begin{cases} \theta_{d/s} = \arctg\left(\frac{\phi_{sq}}{\phi_{sd}}\right) \\ \theta_{d/r} = \theta_{d/s} - \theta_{r/s} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \frac{d}{dt}\theta_{r/s} = \frac{d}{dt}\theta = p\Omega \quad (18)$$

Conformément au principe d'objectivité, il existe d'autres modélisations possibles, notamment celle où les courants statoriques et les flux rotoriques sont variables d'état, modèle très utilisé en commande de la machine à cage [PIETRZAK 88], [VULTURESCU 98b]. De plus, le choix du repère (d,q) mène à d'autres possibilités. Mais, quelle que soit la modélisation adoptée, il est clair que la machine asynchrone à rotor bobiné doit faire apparaître un couplage magnétique qui indique un couplage entre

les enroulements statoriques, les enroulements rotoriques et l'arbre de rotation. Comme indiqué lors du chapitre II, une machine complexe ne peut pas avoir de représentation simple.

Dans le cas étudié les enroulements rotoriques sont en court circuit (cas identique à la machine à cage), de la sorte que la source d'alimentation pour le rotor et la transformation associées peuvent être supprimées. Une autre modélisation (plus classique) consiste à prendre les flux rotoriques comme variables d'état au lieu des courants rotoriques. De plus, on peut envisager de permuter l'accumulateur statorique avec le bloc de transformation et celui de couplage électrique, puis intégrer ce dernier dans le couplage magnétique (ils ne possèdent tous trois que des relations rigides). La REM de la machine peut alors être simplifiée (Fig. III. 7). Si cette représentation simplifiée est issue d'une manipulation de modèle lié à une expertise de la machine, elle est suffisamment juste et synthétique pour en déduire la structure de la commande classique appelée « contrôle vectoriel à flux (rotorique) orienté » (voir § III.3).

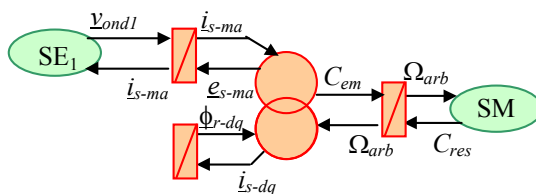


Fig. III. 7 : REM simplifiée de la machine asynchrone à cage

REM des éléments de la transmission mécanique — Divers éléments de la transmission mécanique du véhicule ont déjà été modélisés lors du chapitre II dans le cadre d'un métro. Les relations sont identiques si l'on ne considère que le mouvement longitudinal (seules les valeurs de paramètres changent).

L'ensemble réducteur et roue est un élément de conversion qui relie la vitesse du véhicule v_{vehic} à celle de l'arbre, et la force de traction à la roue F_{roue} au couple de la machine C_{mcc} , via le rapport de réduction global de la transmission k_{trans} , le rayon moyen de la roue R_{roue} et un coefficient de glissement k_{glis} :

$$\begin{cases} \Omega_{roue} = \frac{k_{glis} k_{trans}}{R_{roue}} v_{vehic} \\ F_{roue} = \frac{k_{trans}}{R_{roue}} C_{mcc} \end{cases} \quad (19)$$

Le contact entre la roue et la route n'est pas pris en compte de manière détaillée, même s'il correspond à un problème majeur de la traction automobile [ARNET 97]. Nous avons déjà intégré sa modélisation fine et une solution au patinage dans [PIERQUIN 01]. Afin d'appréhender ce problème

nous nous contenterons d'une modélisation quasi-statique linéaire [BOUSCAYROL 02c]. Ainsi le coefficient de glissement k_{glis} permet d'exprimer la perte d'énergie lors du contact :

$$F_{roue} v_{vehic} = k_{glis} C_{mcc} \Omega_{roue} \quad (20)$$

Une variation de ce paramètre en cours de fonctionnement permettra de simuler un changement d'adhérence et de tester ainsi la robustesse de la commande proposée.

Comme pour le métro, le châssis du véhicule est décomposé en deux fonctions. Un couplage exprime la sommation des forces de traction dues à chacune des motorisations :

$$\begin{cases} F_{tot} = F_{roue1} + F_{roue2} \\ v_1 = v_2 = v_{vehic} \end{cases} \quad (21)$$

On peut de plus rajouter la prise en compte des virages en différenciant les vitesses linéaires au niveau des roues, en prenant en compte le rayon de courbure R_{courb} et la largeur du véhicule (distance inter-roues motrices) l_{vehic} :

$$\begin{cases} v_1 = \frac{R_{courb} + l_{vehic} / 2}{R_{courb}} v_{vehic} \\ v_2 = \frac{R_{courb} - l_{vehic} / 2}{R_{courb}} v_{vehic} \end{cases} \quad (22)$$

La masse du véhicule est un élément d'accumulation dont la variable d'état est la vitesse v_{vehic} induite par la force globale de traction F_{tot} et celle de résistance à l'avancement F_{res} :

$$M_{vehic} \frac{dv_{vehic}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad (23)$$

III. 2. 2 REM du système global

Les divers problèmes d'associations des éléments constitutifs sont maintenant posés avant de réaliser la REM globale du système étudié.

Alimentation commune des hacheurs — Les hacheurs sont alimentés en parallèle par le même bus continu. Un couplage électrique est alors défini, avec la tension comme variable commune :

$$\begin{cases} u_1 = u_2 = u_3 = V_{DC} \\ i_{hach} = i_{He1} + i_{Hi} + i_{He2} \end{cases} \quad (24)$$

Mise en série des induits des MCC — La mise en série des induits de machines à courant continu a déjà été traitée au chapitre II. Le problème de variable d'état posé par l'association des deux enroulements a été résolu par la concaténation des deux accumulateurs :

$$L_{ind} \frac{di_{ind}}{dt} + R_{ind} i_{ind} = u_{Hi} - e_{tot} \quad (25)$$

avec $L_{ind} = L_{ind1} + L_{ind2}$ et $R_{ind} = R_{ind1} + R_{ind2}$.

La mise en série est un couplage qui fait ressortir le courant commun et une f.e.m. globale :

$$\begin{cases} i_{ind1} = i_{ind2} = i_{ind} \\ e_{tot} = e_{ind1} + e_{ind2} \end{cases} \quad (26)$$

Connexion des parties mécaniques — Les deux arbres des machines sont connectés à la vitesse du véhicule au travers d'une transmission mécanique très simple et sans prise en compte du contact roue route. Le problème de cette association réside dans l'unicité de la variable d'état commune, malgré trois éléments d'accumulation. En effet, les trois variables d'état, Ω_{arb1} , Ω_{arb2} et v_{vehic} , sont reliées entre elles par des relations rigides (19). Les règles de permutation et de concaténation sont alors appliquées pour obtenir une masse équivalente, élément d'accumulation équivalent :

$$M_{equ} \frac{dv_{vehic}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad \text{avec} \quad M_{equ} = M_{vehic} + 2 \frac{J_{arbr}}{(k_{trans} / R_{roue})^2} \quad (27)$$

Connexion des arbres de machines (émulateur) — Les deux arbres des machines sont connectés au travers d'un accouplement considéré idéal, c'est à dire sans élasticité et sans jeu. Le problème de cette association réside dans l'unicité de la variable d'état commune malgré deux éléments d'accumulation. La règle de concaténation est alors appliquée pour obtenir un arbre équivalent :

$$J_{arb} \frac{d\Omega_{arb}}{dt} + f_{arb} \Omega_{arb} = C_{mcc} - C_{ma} \quad \text{avec} \quad J_{arb} = J_{mcc} + J_{ma} \quad \text{et} \quad f_{arb} = f_{mcc} + f_{ma}. \quad (28)$$

Alimentation commune des machines asynchrones — Les deux machines asynchrones sont alimentées par l'onduleur 5 bras, avec le bras n°5 comme potentiel de connexion commun. Le choix de

travailler avec des tensions entre phase dont la référence est le potentiel du bras commun, nous permet d'exprimer le couplage de manière très simple. En effet, les composantes du vecteur de sortie de l'onduleur sont naturellement décomposées en deux sous-vecteurs, propres à chaque machine :

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{u}_{ond1} = \begin{bmatrix} u_{15} \\ u_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{u}_{ond} \\ \underline{u}_{ond2} = \begin{bmatrix} u_{35} \\ u_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \underline{u}_{ond} \\ i_{ma} = [i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4]^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^t i_{ma1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^t i_{ma2} \end{array} \right. \quad \underline{u}_{ond} = \begin{bmatrix} u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \\ u_{45} \end{bmatrix} \quad (29)$$

De plus, le courant du bras commun est implicite dans la modélisation choisie. Ce courant étant la somme des deux courants des troisièmes phases, n'apparaît pas dans la modélisation qui s'en trouve simplifiée. Si l'on veut observer le courant du bras commun, il faut alors le reconstituer :

$$i_5 = i_{51} + i_{52} = -i_1 - i_2 - i_3 - i_4 \quad (30)$$

REM globale — La REM globale du système (Fig. III. 8) se déduit ainsi des REM des éléments constitutifs et des REM de couplages déterminées par leurs associations.

III. 2. 3 Analyse des contraintes

Chaînes de réglages — Les grandeurs de réglage sont les ordres de commutation des 3 hacheurs (vecteurs de connexion) \underline{c}_{He1} , \underline{c}_{Hi} et \underline{c}_{He2} . Dans le cadre du véhicule électrique, la variable à maîtriser est la vitesse du véhicule v_{vehic} . Il y a donc 3 chaînes de réglage imbriquées (chaînes surlignées sur Fig. III. 9). Les hacheurs ayant des fonctions de modulations scalaires, il y a donc 3 degrés de liberté pour agir sur le système afin d'atteindre l'objectif (vitesse de déplacement) tout en gérant les contraintes (à savoir les patinages possibles de chacune des roues).

Cependant, la partie mécanique est émulée par un ensemble de machines asynchrones. L'objectif de ce sous-système électrique est de réagir comme réagirait le sous-système mécanique suite à la sollicitation de sa traction. En d'autres termes les machines asynchrones doivent savoir imposer les mêmes vitesses de rotation aux machines à courant continu que celles imposées par la transmission mécanique. Le sous-système émulateur sera géré par les fonctions de connexion de l'onduleur 5 bras \underline{c}_{ond} . Deux chaînes de réglage apparaissent alors pour imposer les bonnes vitesses Ω_{arb1} et Ω_{arb2} (chaîne surlignées sur Fig. III. 10).

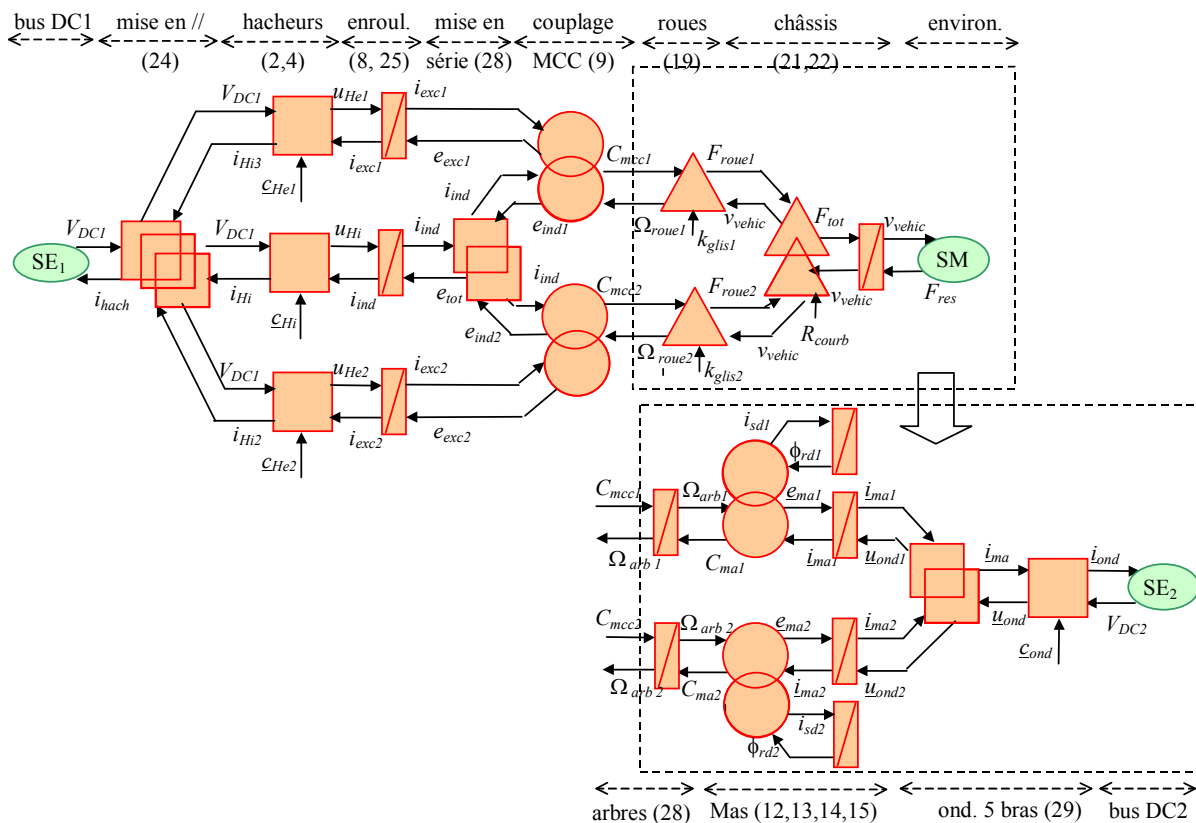


Fig. III. 8 : REM du système d'application

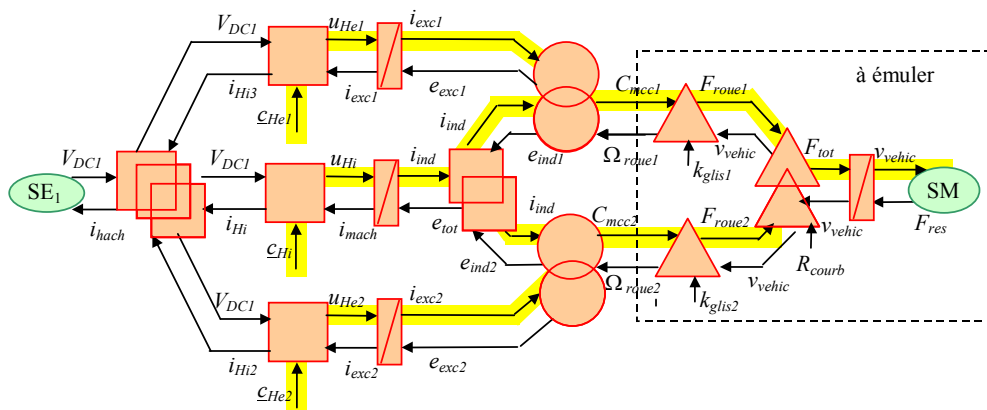


Fig. III. 9 : Chaîne de réglage du système à émuler

L'onduleur 5 bras possèdent 4 fonctions de modulation, c'est à dire qu'il permet d'imposer 4 variables indépendantes (les quatre tensions entre phases par exemple). On voit ainsi qu'il y a suffisamment de degrés de liberté pour gérer les objectifs (les deux vitesses) et les contraintes internes (les deux flux).

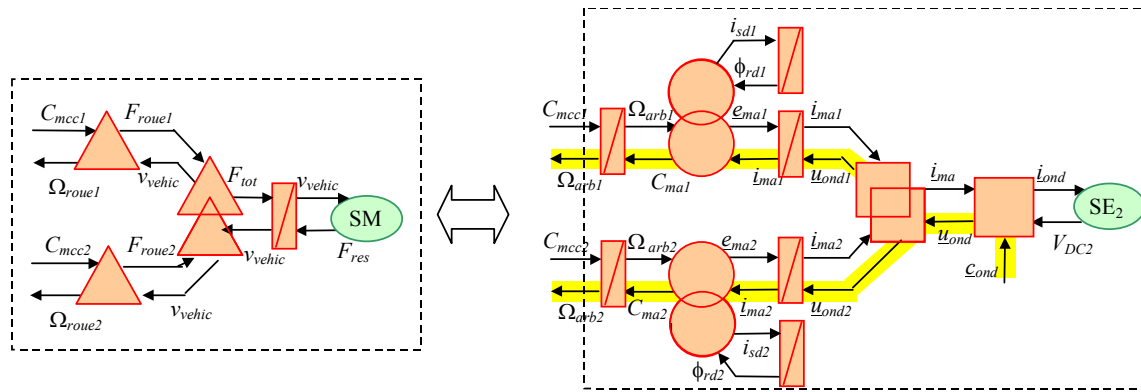


Fig. III. 10 : Chaîne de réglage de l'émulateur

Couplages à prendre en compte — Le premier couplage à prendre en compte est celui de la mise en série des inducts. Ce couplage aval est très contraignant car il impose le même courant d'induit sur les deux machines à courant continu, c'est à dire une liaison forte entre deux chaînes de conversion.

Le second couplage correspond au couplage magnétique entre le stator et le rotor des machines à courant continu. Ce couplage aval est plus classique dans le domaine du Génie Electrique : on impose indépendamment le couple et le flux, et l'expertise sur les machines nous renseigne sur le niveau de flux à imposer pour réaliser une bonne conversion.

Le couplage magnétique des machines asynchrones est en fait similaire, comme le montre la modélisation de Park dans le repère lié au flux rotorique où l'on retrouve le découplage⁴ entre le flux couple.

Le dernier couplage correspond à celui de la transmission mécanique émulée. Sa gestion est là aussi des plus classiques, même si nous verrons que d'autres alternatives sont possibles.

III. 3. SMC du système étudié

La SMC du système de traction automobile sera abordée dans un premier temps. Puis l'émulation de ce système à partir de la plate forme expérimentale sera mise en place : il faudra alors commander les machines asynchrones alimentées par l'onduleur 5 bras afin de suivre le modèle mécanique du véhicule. La dernière partie concernera la validation expérimentale, pour laquelle des simplifications de la SMC seront discutées.

⁴ On peut remarquer le terme consacré "découplage" qui n'est, bien sûr, pas un hasard.

III. 3. 1 SMC du système de traction

Conformément à la méthodologie proposée au chapitre II, une Structure Maximale de Commande globale est tout d'abord déduite de la REM du système. La réalisation de chaque « inversion » locale ne se posera que dans un second temps. Les critères de couplage seront alors définis.

SMC déduite de la REM du système étudié — On considère un cahier des charges pour lequel une consigne de vitesse est délivrée par le conducteur (mode automatique). En fait, le cas plus classique d'un réglage de couple (l'asservissement de vitesse étant fait par le conducteur qui génère cette consigne via la pédale d'accélération) pourra se déduire de la commande proposée.

En fonction des trois chaînes de réglage déterminées précédemment, l'application stricte des règles d'inversion mène à une structure maximale de commande (Fig. III. 11) sans a priori sur la possibilité de mesure des diverses variables. On note ainsi 4 asservissements et 4 critères à définir.

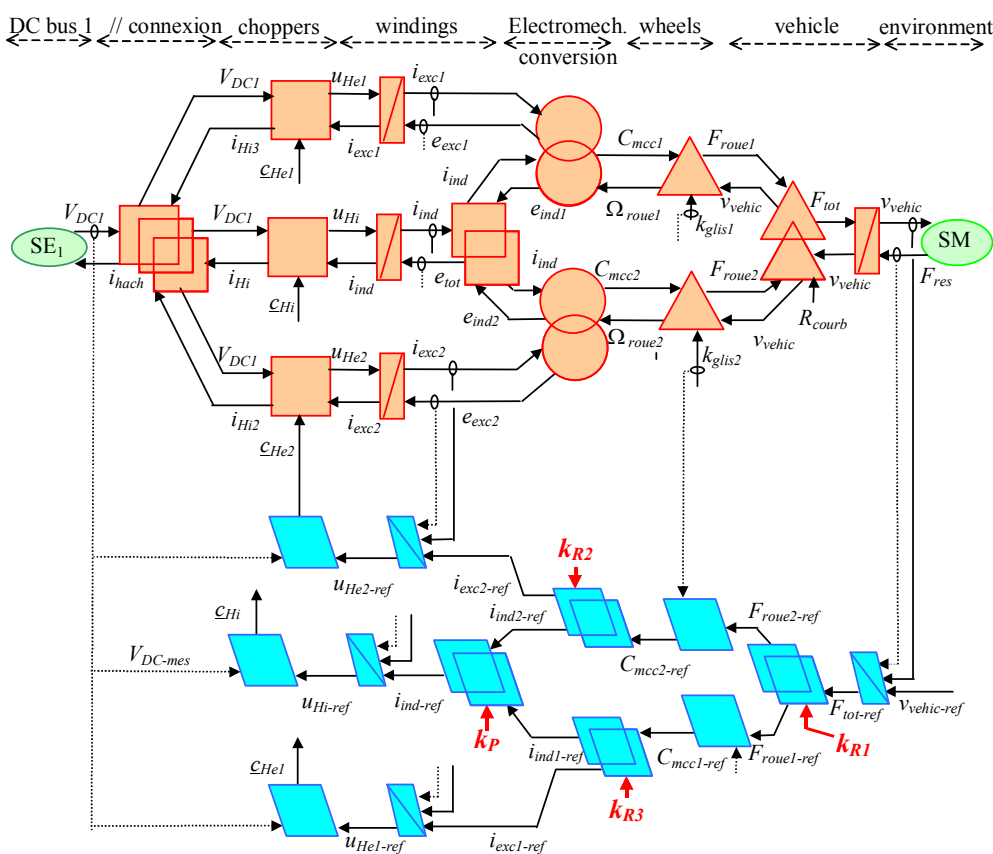


Fig. III. 11 : SMC du système d'application

Résolution du couplage mécanique — Le châssis comportant un élément de couplage aval, sa résolution nécessite un critère de répartition selon le paramètre k_{r1} :

$$\begin{cases} F_{roue1-ref} = k_{r1}F_{tot} \\ F_{roue1-ref} = (1 - k_{r1})F_{tot} \end{cases} \text{ avec } k_{r11} + k_{r12} = 1 \text{ et } k_{r1} = k_{r11} \quad (31)$$

Dans la plupart des cas, on utilise un critère d'équirépartition $k_{r1}=1/2$ qui vise à répartir uniformément les forces de traction. Si cette solution classique est évidente en ligne droite, on peut penser que d'autres choix sont possibles pour les virages. Nous nous limiterons cependant au cas classique.

Résolution du couplage magnétique — La machine à courant continu à excitation séparée constitue un couplage magnétique amont. Plusieurs solutions sont possibles pour gérer ce couplage.

La solution la plus classique consiste à fixer la valeur du flux (donc celle du courant d'excitation) selon un critère énergétique [LOUIS 99]. Si, dans certains cas, le flux est maintenu constant, dans d'autres cas, il est réduit à partir d'une vitesse limite afin d'augmenter la plage de vitesse pour une tension d'induit donnée. Dans ce cas, on a deux entrées (les courants d'induit et d'inducteur) pour gérer deux sorties (le couple et le flux) : il n'y a plus de problème de bijectivité et la nécessité d'un critère disparaît. Le courant d'inducteur à appliquer découle alors du flux de référence (nous utiliserons l'hypothèse simplificatrice de linéarité magnétique, $i_{exc} = k_{\phi} \phi_{mcc}$) et le courant d'induit du couple de référence avec prise en compte du flux (inversion de la relation 9):

$$\begin{cases} i_{exc-ref} = \frac{1}{k_{\phi}} \phi_{mcc-ref} \\ i_{ind-ref} = \frac{1}{k_{mcc} i_{exc-ref}} C_{mcc-ref} \end{cases} \quad (32)$$

Une autre solution moins conventionnelle consiste à appliquer le critère de répartition pour des entrées multiplicatives selon le paramètre k_{r2} (cf. § II.3.2) :

$$\begin{cases} i_{exc-ref} = k_{r2} \sqrt{\frac{C_{mcc-ref}}{k_{mcc}}} \\ i_{ind-ref} = \frac{1}{k_{r2}} \sqrt{\frac{C_{mcc-ref}}{k_{mcc}}} \end{cases} \text{ avec } k_{r21} k_{r22} = 1 \text{ et } k_{r2} = k_{r21} \quad (33)$$

La détermination du paramètre k_{r2} s'avère délicate. Mais on peut très bien imaginer de le déterminer à partir du même critère énergétique, c'est à dire pour suivre le même profil de flux. Donc si $i_{exc} = k_{\phi} \phi_{mcc}$:

$$k_{r2} = k_{\phi} \phi_{mcc-ref} \sqrt{\frac{k_{mcc}}{C_{mcc-ref}}} \quad (34)$$

L'utilisation d'un tel critère paraît peu judicieuse dans ce cas, mais cette démonstration permet néanmoins de montrer que l'on peut retrouver l'équivalence de la solution classique à l'aide des règles d'inversion des couplages. Bien évidemment, d'autres choix pour le critère de répartition peuvent être envisagés.

Une autre solution consiste à fixer le courant d'induit et à déterminer le courant inducteur en fonction du couple de référence :

$$\begin{cases} i_{ind-ref} \text{ fixé} \\ i_{exc-ref} = \frac{I}{k_{mcc} i_{ind-ref}} C_{mcc-ref} \end{cases} \quad (35)$$

Cette solution est la solution duale de la solution classique pour laquelle on fixe le courant inducteur (via le flux), puis on détermine le courant d'induit en fonction du couple de référence. La solution à courant d'induit fixé semble, elle aussi, peu judicieuse, mais nous en verrons son intérêt par la suite.

Des trois possibilités de résolution de ce couplage, il faut remarquer qu'une variable externe doit être fournie au bloc de commande : flux de référence, paramètre de répartition ou courant d'induit de référence. Comme nous l'avons vu dans deux des cas, l'expertise de la machine est alors nécessaire pour choisir cette entrée externe de manière appropriée. Un bloc de stratégie peut alors être défini afin de fixer cette entrée supplémentaire. Il faut de plus souligner qu'il existe bien au moins trois possibilités, même si nos habitudes ne nous font voir que la première.

Résolution du couplage électrique — La mise en série des induits des machines à courant continu correspond à un couplage électrique amont. Sa résolution demande un critère de pondération afin de définir le courant de référence pour l'asservissement à partir des deux références délivrées par les blocs de commandes précédents :

$$i_{ind-ref} = k_p i_{ind1-ref} + (1 - k_p) i_{ind2-ref} \text{ avec } k_{p11} + k_{p12} = 1 \text{ et } k_p = k_{p11} \quad (36)$$

Si la commande classique « maître-esclave » ($k_p = 1$ ou 0) permet de réduire le nombre de blocs de commande, il a été démontré qu'une commande moyenne ou avec pondération variable est plus performante pour ce couplage particulier [BOUSCAYROL 03b].

Bloc de stratégie de détermination des critères des couplages électriques — La mise en série des induits des machines nous impose le même courant d'induit. Nous avons donc trois entrées à disposition pour gérer quatre variables : les deux flux (contraintes) et les deux couples (objectifs). Il n'y a donc pas suffisamment de degré de liberté pour une gestion optimale du système. Nous proposons une stratégie gérant le compromis nécessaire, dite « stratégie à couples prioritaires ».

Le flux de la machine maître $\phi_{mcc1-ref}$ est fixé selon le critère énergétique classique, ce qui détermine $i_{exc1-ref}$ (32). Le courant induit $i_{ind1-ref}$ en est ensuite déduit à l'aide du couple de référence $C_{mcc1-ref}$ (32). Comme la machine n°1 est la machine maître, le courant d'induit de la deuxième machine est alors fixé $i_{ind2-ref} = i_{ind1-ref}$. Selon la troisième possibilité de résolution du couplage magnétique (33), le courant inducteur $i_{exc2-ref}$ est alors déterminé pour obtenir le couple de référence $C_{mcc2-ref}$.

$$\begin{aligned}
 & \cdot \tag{37} \\
 1. \quad & \phi_{mcc1-ref} = f(\Omega_{mcc1-mes}) \\
 2. \quad & i_{exc1-ref} = \frac{1}{k_{\phi 1}} \phi_{mcc1-ref} \\
 3. \quad & i_{ind1-ref} = \frac{k_{\phi 1}}{k_{mcc1} \phi_{mcc1-ref}} C_{mcc1-ref} \\
 4. \quad & i_{ind2-ref} = i_{ind1-ref} \\
 5. \quad & i_{exc2-ref} = \frac{1}{k_{mcc2} i_{ind2-ref}} C_{mcc2-ref}
 \end{aligned}$$

Evidemment, le flux de la deuxième machine n'est plus optimal, mais les deux couples de référence peuvent être obtenus malgré ce fort couplage. En fait, comme nous avons intérêt à limiter le flux à sa valeur nominale, il vaut mieux réduire le flux de la machine esclave que l'augmenter. Ceci ne se fera que si le couple de référence de cette machine est inférieur à celui de la machine maître. De ce fait, pour optimiser l'algorithme, le choix de la machine maître sera préalablement effectué par une comparaison des couples de références. Un bloc de stratégie (Fig. III. 12.a) définira alors les trois paramètres de répartition et de pondération k_{r2} , k_{r3} et k_{p1} :

$$k_p = \begin{cases} 1 & \text{pour } C_{mcc1-ref} \geq C_{mcc2-ref} \\ 0 & \text{pour } C_{mcc1-ref} < C_{mcc2-ref} \end{cases} \quad (38)$$

$$k_{r2} = \begin{cases} k_{\phi 1} \phi_{mcc1-ref} \sqrt{\frac{k_{mcc1}}{C_{mcc1-ref}}} & \text{pour } k_p = 1 \\ \frac{1}{i_{ind1-ref}} \sqrt{\frac{C_{mcc1-ref}}{k_{mcc1}}} & \text{pour } k_p = 0 \end{cases}$$

$$k_{r3} = \begin{cases} \frac{1}{i_{ind2-ref}} \sqrt{\frac{C_{mcc2-ref}}{k_{mcc2}}} & \text{pour } k_p = 1 \\ k_{\phi 2} \phi_{mcc2-ref} \sqrt{\frac{k_{mcc2}}{C_{mcc2-ref}}} & \text{pour } k_p = 0 \end{cases}$$

L'utilisation des paramètres de répartition pour le couplage magnétique permet alors de garder la même entrée de couplage pour une machine, qu'elle soit maître ou esclave (sinon, une fois on aurait un flux de référence, une autre fois un courant d'induit de référence). Le bloc de stratégie nécessite de plus les vitesses mesurées comme entrées afin de définir les flux de références selon la courbe classique d'optimisation énergétique.

D'autres solutions sont bien sûr possibles pour le bloc de stratégie, comme précisé dans le chapitre II. On peut noter qu'il correspond bien à une gestion globale du système.

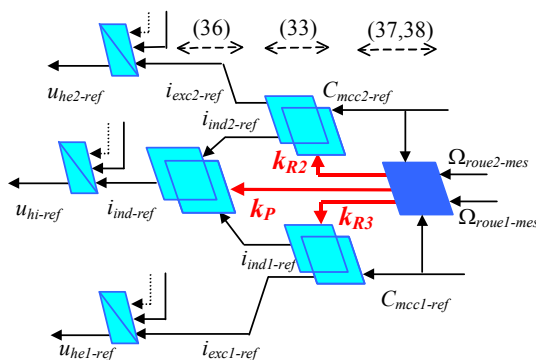


Fig. III. 12 : Bloc de stratégie définissant les critères des couplages électriques

III. 3. 2 Emulateur de couplage mécanique

Analyse du cahier des charges de l'émulateur — Comme indiqué précédemment, les machines asynchrones doivent fournir des vitesses de rotations identiques à celles que délivreraient les transmissions mécaniques. Les chaînes de réglages ont été déterminées en conséquence (cf. § III.2.3.).

Les vitesses de référence des commandes des machines asynchrones seront donc les vitesses fournies par le modèle de la partie mécanique.

Mise en œuvre de l'émulateur — La partie mécanique devient alors un modèle (mauve) dont le but est de fournir les vitesses de référence des machines asynchrones. Ses entrées restent les couples des machines à courant continu.

La SMC de l'ensemble onduleur - machines asynchrones est déduite de la REM de ce sous-système (Fig. III. 13). On notera l'asservissement de flux rotorique et ceux des courants statoriques (qui le seront dans le repère (d,q) dans la réalité). La commande de l'onduleur 5 bras est en fait une extension de celle de l'onduleur 3 bras du fait de la répartition naturelle des tensions composées issues du choix de la modélisation. Il n'y a pas de critère de résolution de couplage car il y a autant d'entrées d'action que de sorties d'action.

La SMC du système étudiée reste la même. En effet, si la commande des machines asynchrones est bien réalisée, le sous-système émulateur se comportera comme le système étudié. Il faut noter que, lors de l'implantation en temps réel, le ou les microprocesseurs auront à réaliser tous les blocs de commande (bleu) et de modèle (mauve).

III. 3. 3 Validations expérimentales

Modèle de simulation — L'ensemble a tout d'abord été validé par simulation avec le logiciel Matlab-SimulinkTM (Fig. III. 14). L'organisation de la REM et de la SMC (structures, couleurs) est conservée pour une transposition quasi-directe sous ce type de logiciel. La méthodologie proposée a l'avantage de bien structurer la simulation d'un système aussi complexe.

Le cahier des charges consiste à émuler l'évolution d'un véhicule de 150 kg (véhicule utilitaire urbain (voir paramètre Annexes « plate-forme expérimentale SMM »), lors d'une référence de vitesse trapézoïdale. A $t = 7,5$ s le véhicule effectue un virage pendant 2 s. A $t = 11$ s la roue droite patine pendant 0,5 s (passage sur une flaque). A $t = 12$ s, la roue gauche patine pendant 0,5 s. Les divers correcteurs sont des correcteurs IP dont la synthèse a été effectuée par placement de pôles sur leur fonctionnalité de poursuite (toutes les perturbations étant directement compensées).

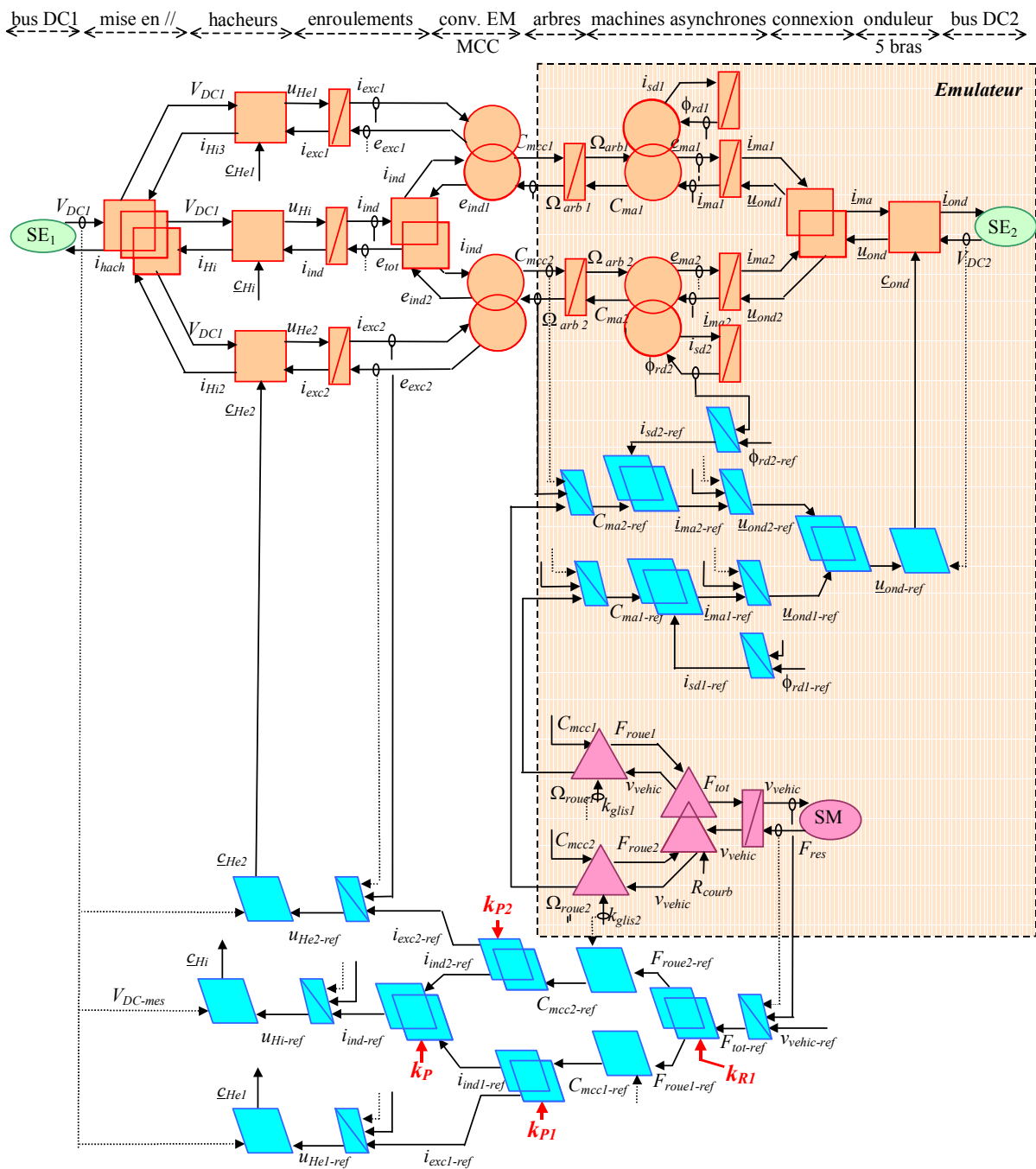


Fig. III. 13 : SMC du système d'application avec émulation de couplage mécanique

Les résultats présentés ont été obtenus par une étude aux valeurs moyennes (pas de prise en compte de la modulation des convertisseurs statiques). On peut remarquer que les fonctions de modulation des convertisseurs statiques sont inférieures à 1 (Fig. III. 15), ce qui indique une bonne utilisation des tensions de bus continu. En effet pour atteindre la consigne de 6 m/s (environ 20 km/h), les machines à courant continu sont défluxées à partir d'une vitesse de rotation de 70 rad/s. Cela permet ainsi de rester dans la limite de la tension batterie choisie. On voit ainsi que les courants d'excitation sont constants jusqu'à $t = 4,5$ s, puis sont réduits pour diminuer les flux.

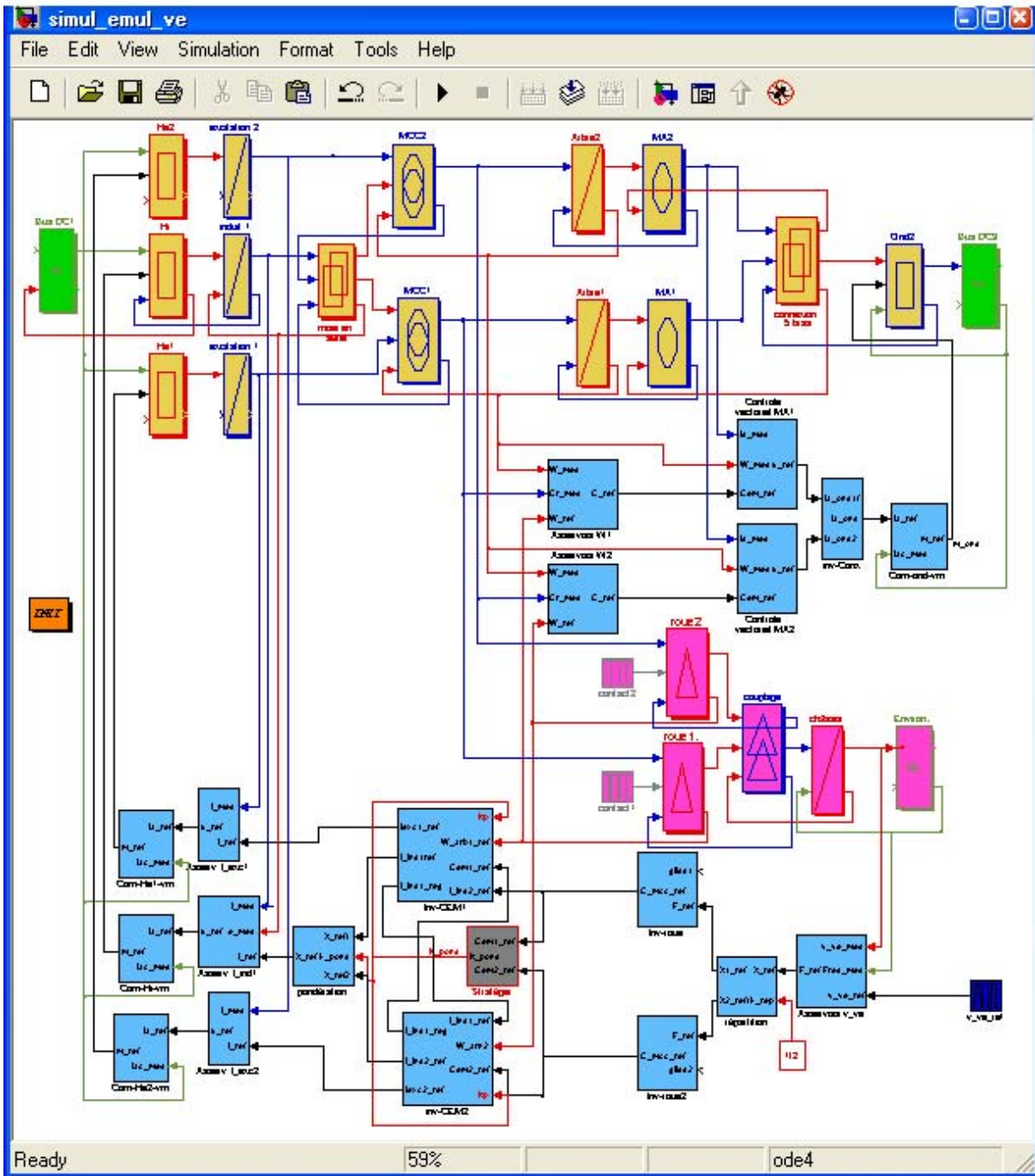


Fig. III. 14 : Modèle Matlab-Simulink™ de la simulation du système avec émulateur

Lors du virage, les vitesses de rotation des deux roues sont différentes tout en n'affectant pas la vitesse linéaire du véhicule. Il faut remarquer au passage que l'onduleur 5 bras permet bien d'obtenir des vitesses indépendantes sur les arbres des machines asynchrones.

Lors des patinages, le coefficient de pondération k_{pond} initialement fixé à $\frac{1}{2}$ (ce qui réduit les effets de commutation d'algorithmes) passe successivement à 1 (MCC1 maître) à 0 (MCC2 maître). On suppose que les patinages sont détectés et qu'ils induisent des couples de références différents [PIERQUIN 02]. La stratégie à couples prioritaires permet alors de garder la vitesse du véhicule

constante, en assurant le suivi du couple de référence et en agissant sur le flux de la machine esclave (voir les courants d'excitation).

Le principe de l'émulateur est également validé par le bon suivi des vitesses de rotation issues du modèle.

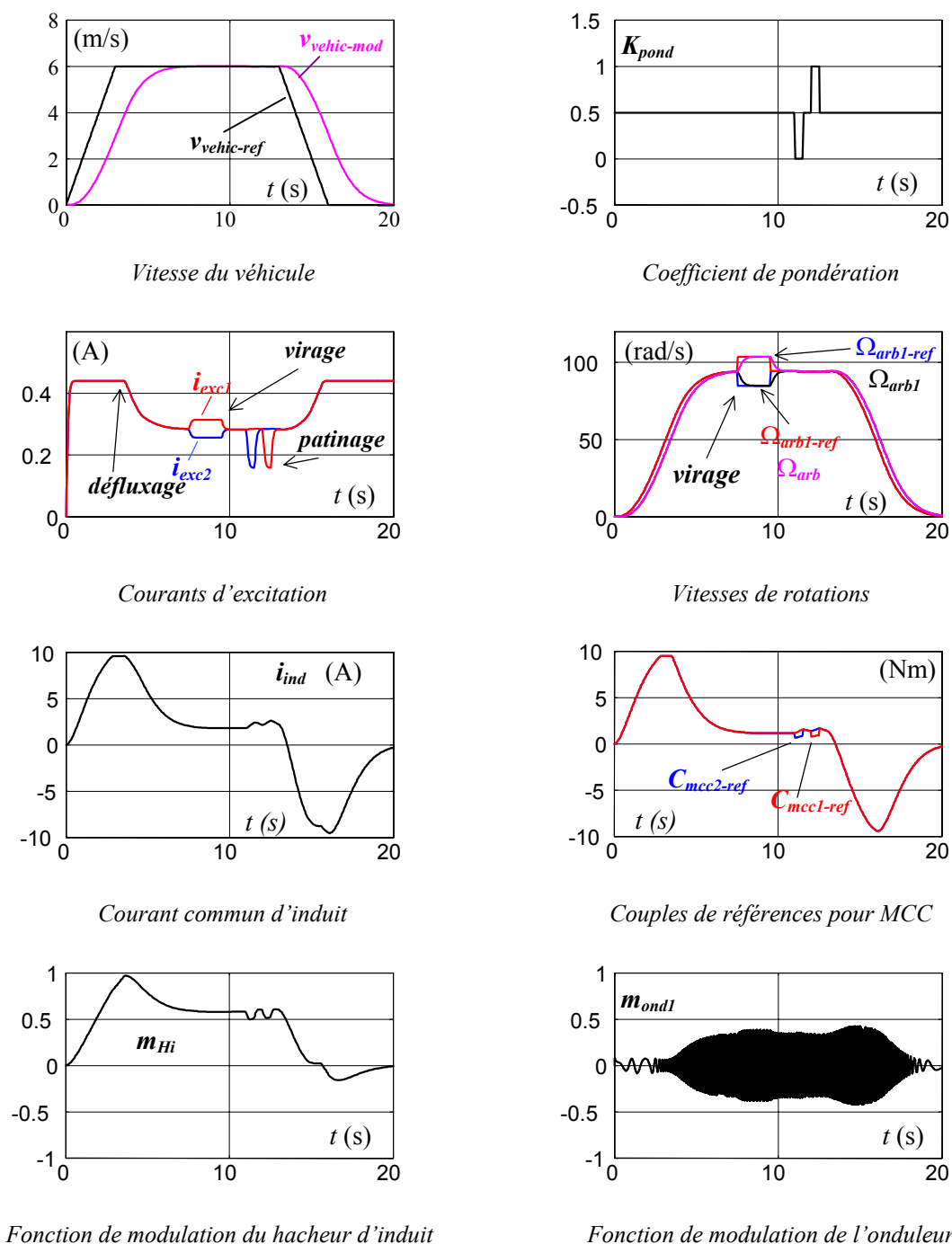


Fig. III. 15 : Résultats de simulation

Maquette expérimentale — La maquette expérimentale est donc composée de deux bancs machine asynchrone (à rotor court-circuité) et machine à courant continu à excitation séparée (Fig. III. 16).

Les tensions nominales des machines étant relativement différentes, deux bus continus sont utilisés. Un premier bus continu est associé à un ensemble de six bras pour alimenter les inducts et inducteurs des machines à courant continu. Le second bus continu est associé à l'onduleur 5 bras alimentant les machines asynchrones.

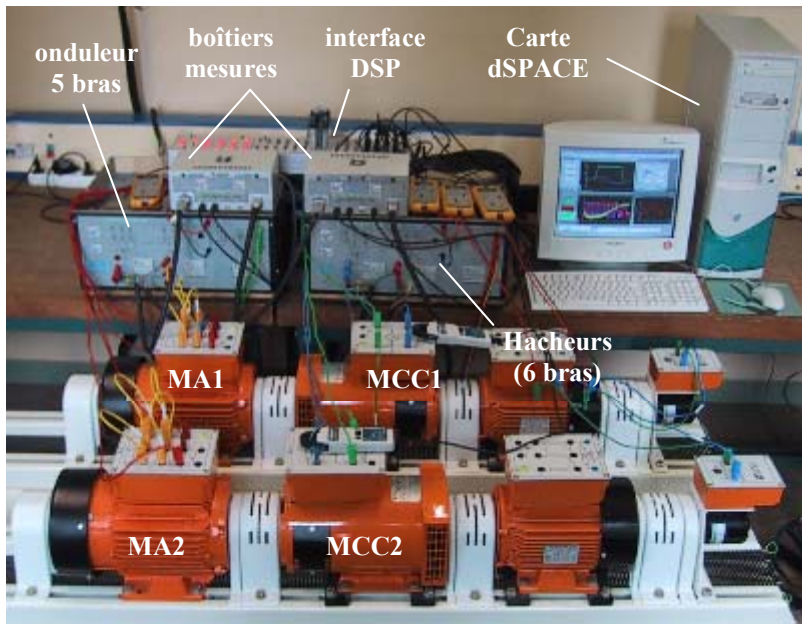


Fig. III. 16 : Plate-forme expérimentale du système d'application

La carte dSPACE 1103 ne possédant pas suffisamment d'interface MLI (PWM), la modulation des divers convertisseurs est réalisée logiquement selon le principe de la commande multi-bras [DELARUE 03a].

Les diverses mesures sont centralisées dans des boîtiers adaptés qui assurent une mise à niveaux des signaux par rapport à l'interface de dSPACE, une isolation et un filtrage analogique HF pour les problèmes de CEM.

Structure pratique de commande — La SMC est tout d'abord simplifiée en vue de son implantation temps réel. Les f.em. des machines à courant continu n'ayant pas un rôle prépondérant, leur compensation ne sera pas effectuée. En revanche la suppression des compensations des couples résistants des machines asynchrones affecte un peu la qualité de l'émulation. Etant donné que les couples des machines à courant continu sont les entrées du modèle mécanique, ils doivent être reconstitués. De ce fait nous pourrons utiliser ces estimations pour réaliser la compensation des couples résistants des machines asynchrones.

Le coefficient de glissement est, quant à lui supposé mesuré, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. En effet la prise en compte du glissement a déjà été réalisée [PIERQUIN 02] et s'avère trop complexe dans le cadre de cette étude.

Le bloc de stratégie pour le couplage électrique est fusionné avec les blocs d'inversion des couplages magnétiques (Fig. III. 17). Ce regroupement évite des opérations redondantes qui mènent aux critères de répartition. Le nouveau bloc donne directement le coefficient de pondération k_p et les références des divers courants et un test des couples de références permet de définir la machine maître pour le couple le plus important ($k_p=1$ MCC1 maître, $k_p=0$ MCC2 maître, $k_p=1/2$ sinon).

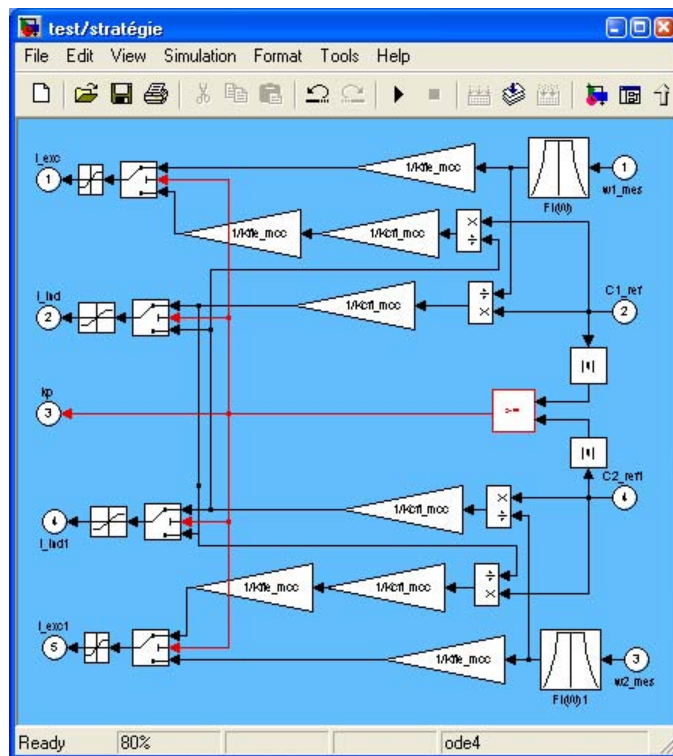


Fig. III. 17 : Modèle Matlab-Simulink™ du bloc de stratégie modifié

Le flux rotorique n'étant pas une variable mesurable, une estimation de son amplitude et de sa phase est réalisée. On utilise les relations classiques d'estimation dans le repère (d,q) lié au rotor à partir des courants mesurés puis traduits dans ce repère d'étude. Un bloc supplémentaire d'estimation doit ainsi être rajouté.

Les couples des machines à courant continu ne sont pas directement mesurables, alors qu'ils sont les entrées indispensables du modèle de la transmission mécanique. Ils sont alors estimés à partir des relations classiques de la MCC via les mesures de courant d'induit et d'inducteur :

$$C_{mcc-est} = k_{mcc} i_{exc-mes} i_{ind-mes} \quad (39)$$

Architecture logicielle de commande — Relativement au nombre de calculs et d'acquisitions de mesure, la période d'échantillonnage de base est fixée à $T_{ech} = 66,67 \mu s$. Cette période active la MLI logicielle (définition des ordres de commutation). La période de modulation est fixée à $T_{mod} = 666,7 \mu s$ ($f_{mod} = 1,5 kHz$), soit 10 périodes d'échantillonnage, ce qui permet une précision de 10% pour la définition des ordres de commutation. Il est vrai que cette précision peut paraître faible pour une étude d'électronique de puissance (qualité des ondes...), mais elle suffit pour la commande globale du système, tout en évitant des ondulations de courant trop importantes. La période d'échantillonnage des boucles rapides est, elle aussi, fixée à $T_{ech2} = 666,7 \mu s$. Elle active l'interruption de niveau 2 où sont réalisés les divers asservissements de grandeurs électriques, des grandeurs mécaniques et l'émulation. Dans la fenêtre principale (Fig. III. 18), liée à l'interruption prioritaire, on trouve les interfaces d'acquisition et de commande (en orange), les commandes de convertisseurs (bleu), la commande des machines (bleu, activé par l'interruption n° 2) et le bloc de sécurités logicielles (rouge). La fenêtre secondaire, liée à l'interruption n°2, est construite de manière identique à la REM présentée au cours de ce chapitre.

Cette architecture permet de réaliser l'implantation de la commande du système d'application en transposant directement la SMC sur Matlab-SimulinkTM sans modifier la structure en blocs hiérarchisés. Sans essayer d'optimiser le code de calcul de la commande, il est possible de fonctionner avec une période de base de $66,67 \mu s$, et ce malgré un grand nombre de calculs et de mesures (temps d'acquisition).

Les seules modifications par rapport au programme de simulation consistent à remplacer les correcteurs et fonction de transfert du premier ordre par leurs équivalents discrétisés (avec un dispositif de limitation et de remise à zéro des coefficients d'intégration). Le niveau d'interruption n° 2 est regroupé dans un sous-système permettant une activation séparée. Outre ces quelques modifications, les blocs de commande de Simulink (blocs bleus), associés aux blocs d'interface (mesures et ordres de commutation, blocs oranges), sont directement compilés en code DSP via RTI (Real Time Interface) et RTW (Real Time Workshop). Même si le code de calcul n'est pas optimisé, une grande facilité de mise en œuvre est ainsi obtenue en évitant un « recodage » parfois lourd et souvent source d'erreurs de transposition. De plus, la structuration forte des blocs Simulink, imposée par la REM, permet ainsi une réalisation fiable, évolutive et très flexible de la commande. Ces divers outils et approches sont donc complémentaires pour obtenir un ensemble performant lors d'une phase de développement de nouvelles commandes.

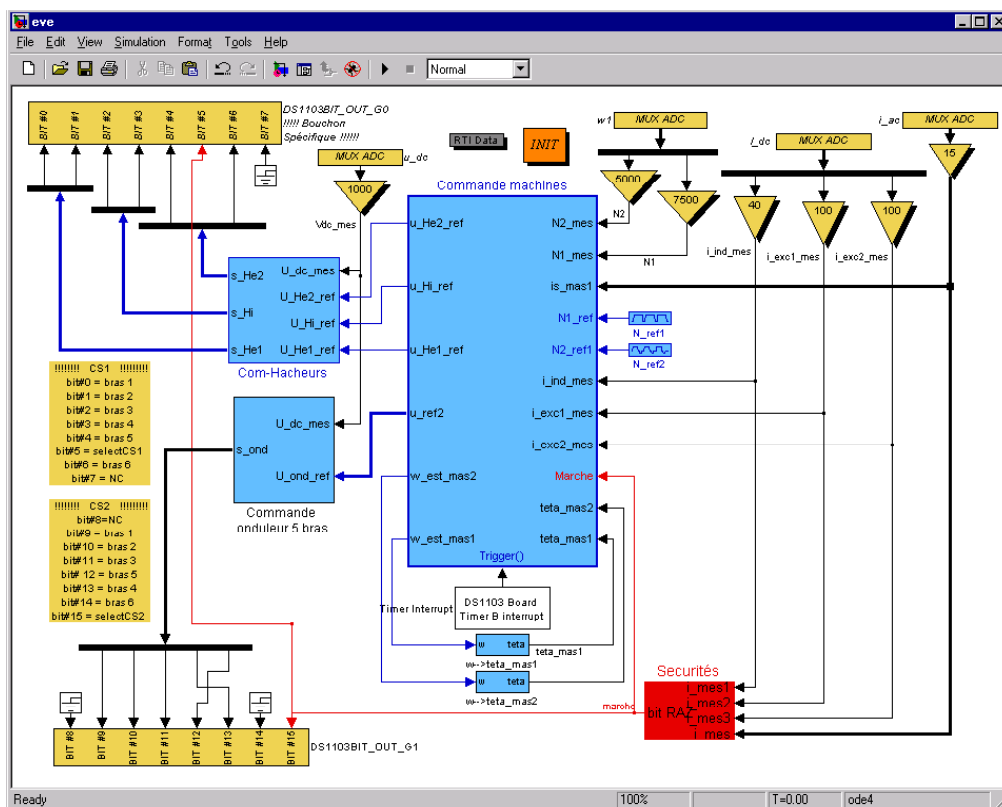


Fig. III. 18 : Fenêtre principale Matlab-Simulink™ du programme de commande

Architecture logicielle de gestion temps réel — Le logiciel ControlDesk de dSPACE assure une gestion temps réel très efficace. Les divers paramètres de commande peuvent être modifiés en temps réel. La visualisation des grandeurs internes choisies est possible sur des fenêtres différentes sachant que cet affichage est associé à la période d'activation des variables (et des niveaux d'interruption inhérents). Malgré toutes ces fonctionnalités ControlDesk ne saurait donner la même qualité que celle d'un oscilloscope performant. Il ne faut pas oublier cela lors de l'analyse de formes d'onde.

Résultats expérimentaux — Une étude préliminaire est effectuée afin de bien valider le principe de l'onduleur 5 bras et celui de la stratégie de commande à "couple prioritaire". Ainsi le système est d'abord testé sans la partie émulateur : un contrôle de vitesse est associé à chaque machine asynchrone et des couples différents sont imposés par les machines à courant continu. La zone de réduction du flux est évitée afin de bien mettre les divers phénomènes en évidence. La couleur rouge est associée aux variables du banc machine n° 1, et la couleur bleue à celles du banc n° 2.

Nous pouvons voir sur les résultats expérimentaux présentés (Fig. III. 19), que deux vitesses indépendantes sont bien obtenues pour les machines asynchrones, et ce malgré l'utilisation d'un bras commun pour leurs alimentations. En régime permanent de vitesse (entre $t = 4$ s et $t = 5$ s), les courants statoriques des deux machines ont des fréquences f_{ref} différentes. Le courant commun i_{ond5} possède bien ces deux fréquences. Le principe de l'onduleur 5 bras est ainsi validé.

Les couples de charges sont imposés par les machines à courant continu dont les induits sont en série. La stratégie de couple prioritaire est utilisée. On vérifie tout d'abord que le coefficient de pondération k_{pond} évolue correctement en fonction des couples de références. Lorsqu'il est égal à 1, le courant d'excitation de la machine n°1 est ajusté pour obtenir le couple désiré (le courant d'induit fixant le couple de la machine n°2). Lorsque k_{pond} est nul, c'est le courant d'excitation de la machine n°2 qui est ajusté. Le courant d'induit suit bien sa référence en valeur moyenne.

La validation de l'émulateur est effectuée dans un second temps. Un essai en virage est d'abord présenté (Fig. III. 20). Le rayon de courbure est changé entre $t = 7$ s et $t = 12$ s en régime permanent de vitesse linéaire. La couleur rouge est associée aux variables liées à la roue n° 1, et la couleur bleue à celles liées à la roue n° 2. Les vitesses de rotation des roues servent de références aux commandes des machines asynchrones et sont bien suivies. Les couples de références sont imposés aux commandes des machines à courant continu. Les vitesses de rotations sont décalées lors du virage, mais la vitesse linéaire suit toujours son profil. On peut remarquer que les courants d'excitation sont réduits en fonction des vitesses de rotation, car, afin de visualiser la défluxage, la vitesse limite a été fixée à 60 rad/s. Il faut souligner que les ondulations de courant sont plus faibles que les ondulations réelles car le pas de stockage des points pour le tracé des courbes a été fixé à $100 T_{mod}$.

Un essai avec le patinage successif des deux roues est ensuite présenté (Fig. III. 21). Les patinages de la roue 1 (environ entre $t = 7$ s et $t = 9$ s) et de la roue 2 (environ entre $t = 11$ s et $t = 13$ s) sont bien détectés suite à l'écart des couples de références. Le coefficient de pondération joue alors sur les courants d'excitation pour maintenir la vitesse du véhicule et celles des roues, proches de leurs profils. Une commande anti-patinage est donc réalisée.

III. 4. Bilan et extensions

III. 4. 1 Bilan de l'étude réalisée

Un système d'étude fictif a été proposé afin d'illustrer les différents concepts théoriques développés autour de la REM. Ce système d'étude a été défini en considérant des systèmes industriels pertinents afin de ne pas se couper des réalités physiques. Ainsi, ce système contient tous les types de couplages, et permet une validation sur la plate forme expérimentale SMM du L2EP.

Les différentes règles de modélisation de la REM ont d'abord permis une représentation assez aisée de ce système pourtant complexe, tant sur la partie physique (la plate forme expérimentale) que sur la partie émulée (transmission mécanique).

La SMC a ensuite été déduite logiquement de la REM. Il faut sans doute insister sur les blocs de résolution de couplage qui sont les éléments clefs de la commande des SMM. Le problème de mise en série des induits des machines à courant continu a ainsi été résolu de manière originale et performante. Le bloc de stratégie associé montre bien que ce niveau de commande correspond à une gestion globale du système qui ne peut pas découler d'une étude locale de chaque organe. C'est en effet l'une des propriétés fondatrices de la systémique (principe de totalité), philosophie dans laquelle nous nous sommes placés.

Quelques simplifications et estimations ont ensuite été réalisées pour la mise en œuvre de la commande en temps réel. Les résultats obtenus et le faible temps de calcul montrent ainsi la puissance de la méthodologie pour des systèmes non classiques.

Parmi les apports de la REM, plusieurs points peuvent ressortir de cette étude de cas. Tout d'abord cet outil est relativement intéressant pour structurer une modélisation (et une simulation) de processus, même si des outils complémentaires (niveau microscopique) sont nécessaires : la REM force à la structuration. De plus, l'analyse du système et de ses possibilités est grandement facilitée dans la phase de définition des chaînes de réglage : la REM facilite l'analyse globale. La structure maximale de commande déduite est obtenue de manière assez systématique : la REM est une modélisation en vue d'une commande structurée. Enfin, on ne peut que souligner la facilité de mise en œuvre d'émulateurs à l'aide de ce type d'outil.

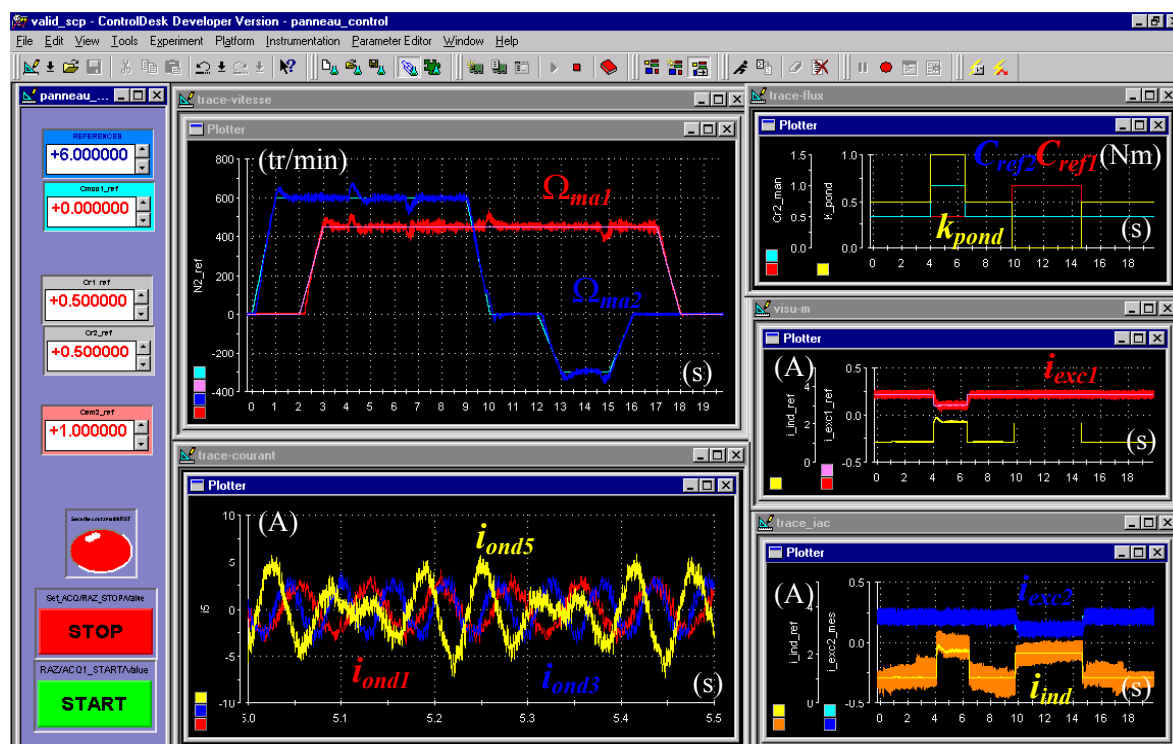


Fig. III. 19 : Validation expérimentale préliminaire (copie d'écran)

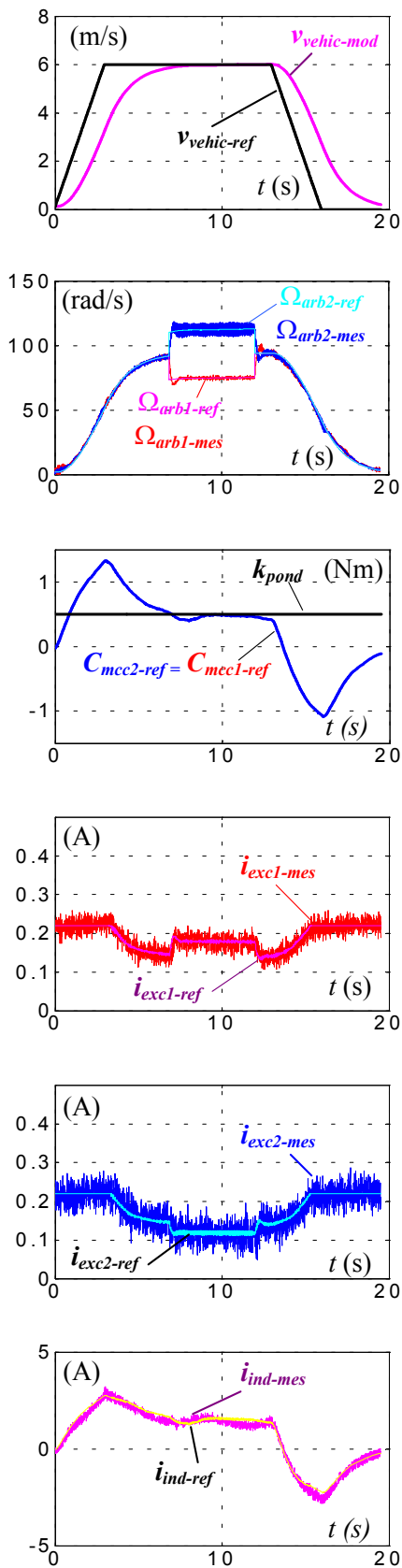


Fig. III. 20 : Validation expérimentale de l'émulateur de véhicule avec virage

vitesse du véhicule

vitesse de rotation des roues

couples de référence et k_{pond}

courant d'inducteur MCC1

courant d'inducteur MCC2

courant d'induit commun

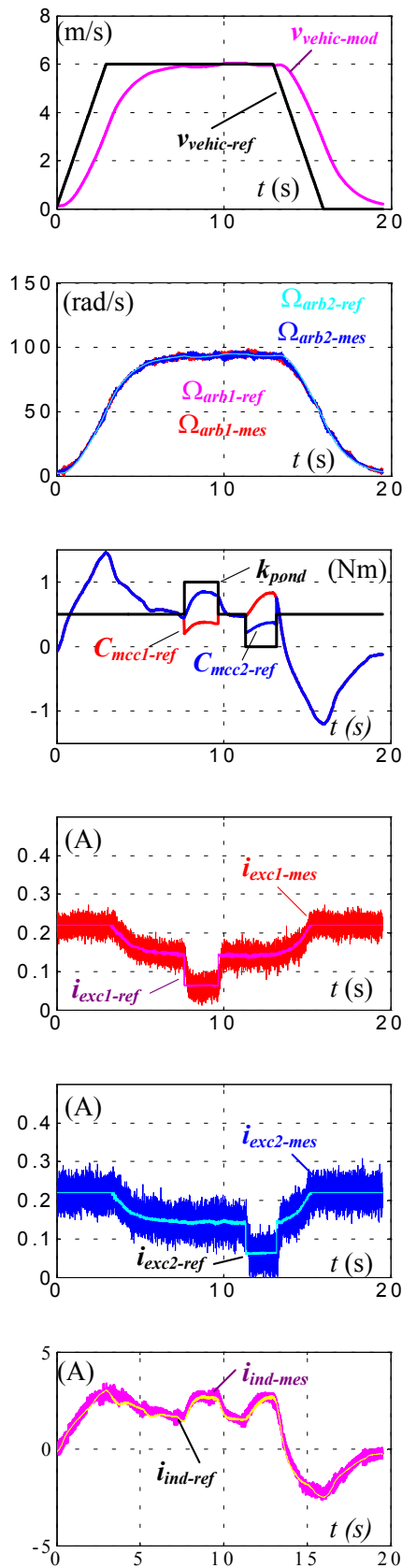


Fig. III. 21 : Validation expérimentale de l'émulateur de véhicule avec glissements

III. 4. 2 Extensions à d'autres systèmes

Les couplages magnétiques étudiés dans cet exemple, sont les couplages les plus simples que l'on puisse trouver en électrotechnique. Les cas de la machine asynchrone à double alimentation ou des machines polyphasées alternatives sont beaucoup plus complexes. Les travaux d'E. Semail, au sein du L2EP mais aussi du GdR ME²MS, ont permis d'étendre les notions développées à ce type de machines et à leur alimentation.

L'alimentation commune de deux machines à courant continu par un seul hacheur est aussi un cas simple. Si l'extension à un nombre de machines a déjà été réalisée expérimentalement (4 MCC [BOUSCAYROL 3b]), l'application de ce principe aux machines à courant alternatif semble prometteur.

Le système mécanique étudié est relativement simple avec de nombreuses hypothèses simplificatrices. La prise en compte du contact roue route a déjà fait l'objet d'études et de solutions originales d'anti-patinage [PIERQUIN 01]. Une transmission mécanique plus complexe (ordre 6) est en cours d'étude concernant le métro VAL 206 [VERHILLE 03]. Le principe de l'émulation peut alors s'avérer une phase intermédiaire judicieuse avant une vérification expérimentale sur de tels systèmes.

**Chap - IV. Extensions et perspectives
de la Représentation Energetique Macroscopique**

Chap - IV. Extensions et perspectives de la Représentation Énergétique Macroscopique

Résumé du chapitre

Ce chapitre a pour objet d'ouvrir une discussion sur les extensions possibles des outils méthodologiques proposés (Chap. II). Ces formalismes ont été développés pour pallier certains manques des approches classiques ou pour les compléter (Chap. I). Ils permettent ainsi de dégager une structure de commande pour des applications relativement complexes (Chap. III). Mais des améliorations restent à faire pour proposer d'autres commandes ou étudier d'autres types de systèmes.

Certaines extensions logiques de la REM sont d'abord présentées (§ IV.1). Elles découlent directement des travaux en cours ou en projet. L'étude de systèmes plus larges ou la conception de systèmes sont discutées dans une deuxième partie (§ IV.2). La REM se situerait alors comme un outil parmi d'autres, avec des passerelles nécessaires à développer. Les mises en œuvre de ces extensions sont enfin abordées dans la dernière partie (§ IV.3). En effet, la diffusion d'un nouveau formalisme est un pari toujours difficile.

IV. 1. Perspectives à court terme

IV. 1. 1 Vers une amélioration du formalisme

IV. 1. 2 Vers l'application aux systèmes dégradés

IV. 1. 3 Vers l'application aux systèmes multi-sources

IV. 2. Perspectives à long terme

IV. 2. 1 Vers une extension des niveaux de modélisation

IV. 2. 2 Vers l'application aux réseaux électriques

IV. 2. 3 Vers la conception de systèmes

IV. 3. Quelle politique de diffusion et de développement ?

IV. 3. 1 Quels sont les freins à la diffusion ?

IV. 3. 2 Comment assurer la diffusion de la REM ?

IV. 3. 3 Comment assurer les extensions de la REM ?

IV. 1. Perspectives à court terme

Ce paragraphe rassemble les perspectives déjà annoncées dans les chapitres précédents et des extensions qui semblent naturelles. Ces perspectives sont en fait liées à des travaux en cours ou en projet, on peut donc les considérer comme des objectifs à court terme. Les travaux en cours sur les machines polyphasées et leur décomposition en machines fictives équivalentes ne sont pas abordés dans ce chapitre, car ils ont fait l'objet d'une thèse récente [KESTELYN 03].

Dans les perspectives à court terme, on pourrait citer l'application du formalisme à des systèmes particuliers au gré des contacts établis lors de conférences internationales : machines à hautes vitesses avec enroulements pour la lévitation [KOBAYASHI 00], influence des creux de tension sur des systèmes enrouleurs pour l'industrie papetière [SICARD 02], onduleur 5 bras pour deux machines asynchrones pentaphasées en série [GATARIC 00], [LEVI 03], double machines asynchrones connectées électriquement et mécaniquement par le rotor [HOPENFENSBERGER 01], [KATO 03]... Mais l'objet de ce paragraphe vise surtout une réflexion sur l'évolution nécessaire du formalisme et son application à d'autres classes de systèmes qui devraient stigmatiser son extension.

IV. 1. 1 Vers une amélioration du formalisme

Dans l'application de la méthodologie proposée aux systèmes étudiés, certaines carences ou besoins d'évolution du formalisme ont été mis en évidence.

Analyse des systèmes — La REM met en avant les répartitions d'énergie opérées au sein d'un système. Nous avons vu, par ailleurs, que certaines boucles de puissance pouvaient être mises en évidence à la lecture d'une REM (cf. Chap. II). Cet aspect des choses n'a été qu'abordé et devrait être affiné.

D'autre part, si la REM met en avant les chemins de réglage d'un système, l'analyse des degrés de liberté en fonction des objectifs et des contraintes du système n'est pas encore très structurée. L'utilisation de vecteurs permet une vision condensée du système, mais ne sachant pas l'ordre des vecteurs à la lecture du graphe REM, le nombre de degré de liberté est un peu occulté.

Nous pouvons de plus imaginer, qu'à terme, d'autres propriétés pourraient émerger de la REM. Cela a été le cas avec le formalisme Bond-Graph [DAUPHIN 97]. Citons dans ce sens, le travail de comparaison de structures de charge de supercondensateurs qu'a effectué P. Barrade (LEI, EPF Lausanne) à l'aide la REM [BARRADE 02], lors de la session invitée SMM d'ElectrIMACS 2002 (Montréal). La description de ces structures par la REM a permis d'en souligner les similitudes et les différences.

Réduction de modèle — L'étude de systèmes de plus en plus importants et complexes, pose le problème de la dimension du modèle global. Des techniques de réduction de modèle sont utilisées pour d'autres outils, en particulier les Bond Graph [GANDANEGARA 01]. Des travaux dans l'équipe "RESE" (réseaux) du L2EP sont aussi engagés dans ce sens afin de déterminer le niveau de granularité que l'on peut utiliser pour un système éolien connecté au réseau [ROGEZ 02].

La REM et la SMC déduite, de par leur approche locale, organisent le système global selon des boucles imbriquées qui hiérarchisent les diverses dynamiques du système. On peut très bien imaginer supprimer certaines boucles internes en fonction des études. Cette suppression peut être considérée comme une concaténation d'une partie puissance et d'une partie commande. Une formalisation de ces réductions de modèle est donc à faire, et un nouveau pictogramme est à définir pour la fusion unitaire de la partie du processus et de sa commande correspondant à la boucle associée.

Manipulation des modèles — Les travaux sur les machines polyphasées ont mené à remplacer un couplage magnétique contraignant par un couplage électrique et un couplage mécanique simples. Des machines fictives équivalentes en découlent [SEMAIL 03].

Ce principe de manipulation de modèle doit être étendu à d'autres domaines, notamment pour des systèmes où un couplage est difficile à résoudre. On peut alors imaginer trouver un système équivalent (par changement de repère ou autre artifice mathématique) avec des couplages plus sympathiques. Sur la base de la règle de permutation, des règles de manipulation de modèle pourraient être développées. Il faudrait alors mettre de limites pour ne pas se couper des réalités physiques. Un premier exemple a été traité dans le cadre du projet SMM du GdR ME²MS pour une application de traction ferroviaire [SMM 02]. La SMC initiale a été ainsi modifiée par permutation des blocs de commande.

Dans ce cadre, la question de représentation multimodèles se pose. En effet certains systèmes nécessitent plusieurs modèles en fonction de la plage d'utilisation. Par exemple, en traction ferroviaire, plusieurs types de modulations sont utilisés en fonction de la vitesse de rotation des moteurs. La commutation d'un modèle à un autre doit être opérée sans occasionner de discontinuité des variables énergétiques. Par extension, on trouve les problèmes de commutation d'algorithmes de commande [MONMASSON 02]. Dans cette optique un couplage de plusieurs REM, par des Réseaux de Pétri par exemple, est envisageable, comme cela a déjà été fait pour des formalismes d'état [HAUTIER 89].

Organisation des blocs de stratégie — La gestion des systèmes multimachines passe par la définition de critères adaptés pour résoudre le problème de répartition énergétique posé par les couplages. Les blocs de stratégie (niveau global) doivent répondre à cet objectif. Il faut reconnaître que les critères utilisés jusqu'à présent ont été définis de manière plus ou moins empirique (et avec l'expertise forte du domaine considéré).

Un effort important de structuration de ces blocs de stratégie est donc à réaliser. Le travail effectué sur la répartition magnétique pour une machine à courant continu (stratégie à couple prioritaire, cf.

Chap. III) est révélateur. Afin de rapprocher la théorie à la pratique (détermination explicite du critère de répartition), non seulement une solution fonctionnelle a été obtenue, mais on en a déterminé une qui allait à contresens des habitudes classiques (et qui a aboutit à une gestion originale de deux machines dont les induits étaient en série).

Systèmes à réglages multiples — Les études réalisées jusqu'à présent ont porté sur des systèmes avec une seule chaîne de réglage : le convertisseur statique est toujours l'élément de réglage du système. Il existe cependant de nombreux systèmes possédant plusieurs éléments de réglage. Par exemple un système éolien possède quelques fois un réglage mécanique (orientation des pâles) et un ou plusieurs réglages électriques (convertisseurs statiques pour un inducteur et un induit). Une coopération des réglages est sans doute à réaliser, faut-il encore bien la formaliser.

IV. 1. 2 Vers l'application aux systèmes dégradés

Une des caractéristiques essentielles des SMM est la possibilité de fonctionner en mode dégradé, ce qui augmente la fiabilité et la disponibilité de l'ensemble. En effet, ces systèmes sont composés de plusieurs chaînes de conversion couplées. Si l'une des composantes est en défaut, la chaîne de conversion qui l'utilise ne peut plus fonctionner, mais les autres chaînes de conversion sont toujours opérationnelles. Il faut alors reconfigurer la commande en fonction des possibilités offertes par la structure dégradée. La REM peut alors s'avérer un outil précieux afin d'analyser le système réduit et d'en déduire une SMC.

Analyse des possibilités de mode dégradé — La perte d'une composante dans un SMM va forcément réduire son utilisation. La première question à poser est celle du nombre de degrés de liberté restant par rapport au cahier des charges. L'exemple des onduleurs à bras commun pour machines asynchrones montre l'intérêt de cette analyse préliminaire. Avec l'onduleur 5 bras pour deux machines [FRANÇOIS 99] il reste 4 degrés de liberté (les quatre tensions entre phases) pour gérer deux flux et deux couples. Avec l'onduleur 4 bras pour deux machines [BOUSCAYROL 96], [PIERQUIN 02a], il reste 3 degrés de liberté pour le même cahier de charges.

La REM peut être un outil précieux pour analyser la nouvelle répartition d'énergie à effectuer. Une formalisation de ce type d'étude semble être possible.

Commande de système en mode dégradé — Suite à l'analyse des degrés de liberté et des chaînes de réglage disponibles, trois situations semblent se dégager dans le cas favorable où un fonctionnement dégradé est possible.

D'abord, il peut y avoir plus de degrés de liberté que d'objectifs à réaliser ou de contraintes à prendre en compte. Il faut alors déterminer quels sont les degrés de liberté à utiliser. Dans un second

temps les degrés de liberté restant peuvent faire l'objet d'une optimisation de l'utilisation du système : un bloc de stratégie adapté devrait alors être défini.

S'il y a autant de degrés de liberté que d'objectifs et de contraintes, la seule problématique à résoudre consiste à déterminer les chaînes de réglages qui les relient et les couplages nouveaux s'ils existent.

Le dernier cas correspond à un nombre de degré de liberté insuffisant par rapport aux objectifs et aux contraintes. Le problème à résoudre correspond alors à un compromis : quels objectifs et quelles contraintes oublier et pour combien de temps ? Des premiers travaux ont été initiés dans la thèse de J. Pierquin [PIERQUIN 02a] où l'on s'autorise des couples différents pour un système 4 bras alimentant deux machines pendant un régime transitoire limité. La stratégie à couple prioritaire pour deux machines à courant continu dont les induits sont en série (cf. Chap. III), constitue un autre pas dans cette démarche de compromis.

Reprise au vol — Pour traiter le défaut en ligne, il faudra d'abord le détecter, puis commuter éventuellement une autre structure de puissance, et enfin commuter d'un algorithme de fonctionnement normal vers un algorithme de fonctionnement dégradé [PEUGET 98] [JACOBINA 03]. Chacune de ces trois étapes constitue à elle seule un pari ambitieux.

On peut penser que la REM pourrait être un outil précieux tant pour la commutation de puissance que pour la commutation d'algorithmes. En effet, plusieurs REM pourraient être définies en fonction des divers modes de fonctionnement. Des règles de "reprise au vol" devraient alors être définies afin de passer d'un modèle à un autre en évitant les problèmes de discontinuité des variables énergétiques : les asservissements doivent assurer une continuité des variables d'état même lors d'un changement d'algorithme. Ainsi, la gestion éléments d'accumulations (qui induisent des variables d'état) seraient sans doute les éléments clefs d'une "reprise au vol".

IV. 1. 3 Vers l'application aux systèmes multi-sources

Les systèmes étudiés jusqu'à présent assurent une conversion d'énergie d'une source génératrice¹ vers une source réceptrice. Pour assurer ce transfert, plusieurs chaînes de conversion sont utilisées avec certains couplages permettant de distribuer ou de rassembler l'énergie.

Mais d'autres systèmes utilisent plusieurs sources d'énergie génératrices. L'extension à ces applications est envisagée. Des contraintes nouvelles sont alors à prendre en compte.

Véhicules hybrides — Les véhicules hybrides semblent être un intermédiaire inévitable dans la course à la réduction d'émissions polluantes dans l'atmosphère. En effet, le problème d'autonomie de la

¹ Une source génératrice n'excluant pas un fonctionnement récepteur dans certaines phases temporelles.

solution tout électrique ne semble pas se résoudre dans les années à venir [MAGETTO 92] [BADIN 02]. De grands constructeurs ont ainsi investi pour développer et commercialiser de premiers véhicules hybrides : Toyota (Prius), Honda (Insight), Nissan (Tino) [TRIGUI 03]... De nombreux systèmes sont à l'étude dans les laboratoires de recherche alliant divers types de sources (piles à combustibles à hydrogène, batterie, gaz naturel, dérivés pétrolifères, énergie solaire), et de chaînes de traction (moteur thermique, moteur électrique, structures série, parallèles ou mixte, etc) [CHAPOULIE 99] [DELPRAT 01] [DINAPOLI 02]. Malgré un coût encore prohibitif, la solution hybride devrait être amenée à se développer en raison de son bon rendement et de ses faibles pollutions par rapport aux véhicules thermiques... mais aussi de la réduction progressive et inaltérable des ressources pétrolifères. On peut noter que certains de ces travaux insistent sur la structuration forte nécessaire de la modélisation globale de tels systèmes pluridisciplinaires [POWELL 98] [TRIGUI 04].

Plusieurs sources énergétiques sont alors présentes sur le véhicule. Jusqu'à présent, nous ne nous sommes intéressés qu'à des systèmes de traction dont la propulsion était assurée par une seule et même source. La gestion des sources multiples est ainsi à coordonner, avec notamment des éléments de stockage intermédiaires. Des premiers travaux ont été initiés sur la modélisation d'un véhicule hybride série [NICOLESCU 03]. Ils nous ont permis de nous sensibiliser aux problèmes de ce type de système. Outre l'ouverture nécessaire vers d'autres compétences, il faut noter les constantes de temps très différentes des diverses parties du système. L'exploitation de la REM en simulation s'avère délicate sans une manipulation ou réduction de modèle. Une décomposition par partie, en mémorisant leurs interactions, pourrait être envisagée. Une étude de la mise en REM d'un autre véhicule hybride est cours dans le cadre du DEA de W. Lhomme, en co-tutelle avec le LEI de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne [LHOMME 04].

Systemes hybrides à énergie renouvelable — Le développement des énergies renouvelables est en pleine expansion. On peut notamment citer la production d'énergie par systèmes éoliens et par systèmes photovoltaïques. Cependant, ce type d'énergie induit de grandes variations de puissance en raison des fluctuations de vent et d'ensoleillement. Afin d'en limiter l'influence sur le réseau de distribution, voire de les utiliser pour des réseaux isolés, ces systèmes sont souvent associés à des systèmes de stockage (volant d'inertie, batteries, etc.) et des systèmes de génération intermédiaires (groupe diesel) [LECLERCQ 02]. L'équipe "RESE" (réseaux) du L2EP travaille dans ce sens.

Cette multiplication de sources n'est pas sans poser des problèmes de gestion. En effet, une coordination est nécessaire pour obtenir une production plus régulière. On peut penser que la REM pourra apporter des représentations et des solutions intéressantes pour de tels systèmes. Le bloc de stratégie est alors une partie prépondérante dans la coordination des sous-systèmes producteurs. Une meilleure formalisation de ces blocs de gestion globale reste à mener dans ce sens, comme annoncé précédemment.

IV. 2. Perspectives à long terme

D'autres perspectives plus lointaines sont présentées dans ce paragraphe. Deux voies sont abordées : une extension à des systèmes avec un plus grand nombre de composantes ; et une extension à la conception de systèmes électromécaniques.

IV. 2. 1 Vers une extension des niveaux de modélisation

La REM est au cœur d'une démarche de modélisation et de commande avec des outils imbriqués associés à des niveaux différents (voir Chap. II, § II.4.2.). La première question qui se pose dans une telle démarche est celle de l'articulation avec des outils de modélisation du niveau intermédiaire. La seconde est de savoir si la REM constitue un formalisme descriptif de niveau suffisant ou s'il doit être à terme, lui aussi un outil intermédiaire.

Articulation avec le niveau expert — Dans la démarche proposée la REM a consisté en une extension du Graphe Informationnel Causal (GIC). On a d'ailleurs vu que des règles de construction graphiques du GIC devaient être rajoutées afin d'assurer une encapsulation systématique en REM [BOUSCAYROL 00]. En effet, les chaînes d'action et de réaction doivent ainsi être retrouvées en GIC.

D'autres outils du niveau intermédiaire devraient être utilisés en coopération avec la REM. Des premiers pas évidents ont été réalisés avec les fonctions de transfert, notamment en enseignement dans des cours où le GIC n'était pas au programme. Mais des passerelles avec d'autres outils pourraient être développées. On pense particulièrement aux Bond-Graph, qui sont très utilisés en mécanique ou aux réseaux de Pétri pour les systèmes séquentiels. Le GIC a déjà fait de grands pas vers l'utilisation de réseaux de Pétri [HAUTIER 99]. Une phase de systématisation des articulations entre REM et outils de niveau intermédiaire est essentielle. Il est probable que des règles de construction et d'équivalence doivent être rajoutées afin d'assurer une bonne adéquation entre les divers formalismes.

Ces articulations devraient être doublement bénéfiques. En effet, d'une part, elles permettraient de mieux connaître les domaines de compétence de chaque outil et ainsi de pouvoir les utiliser à bon escient. L'idéal serait d'obtenir la REM d'un système complexe dont les divers éléments seraient décrits de manière plus fine par des outils intermédiaires différents. D'autre part, la possibilité d'intégrer des outils différents devrait permettre à divers partenaires de s'y retrouver plus facilement en adoptant dans un premier temps l'outil intermédiaire dont il a la meilleure maîtrise.

Développement d'un niveau plus global — L'exemple traité au chapitre III, qui, s'il reste simple (4 machines et 4 convertisseurs statiques), nous montre un peu la limite de la représentation. En effet, le nombre d'éléments de description commence à être élevé. Est-elle encore viable pour un nombre

beaucoup plus important de composantes ? Ne risque-t-on pas de perdre la lisibilité du système, qui est l'une des finalités de la REM ?

Il semble alors évident de développer un formalisme de représentation encore plus synthétique ou de faire le lien des outils existants plus synthétiques. La première idée qui vient à l'esprit est de réaliser une encapsulation d'éléments de la REM. Mais il est sans doute erroné de partir seulement sur cette voie. En effet, il est clair qu'une telle approche, si elle réduit le nombre de blocs, risque de perdre la réalité physique qui découle de la nature structurelle² de la REM. Il est clair aussi, qu'une telle démarche risque de s'éloigner de l'objectif de commande. En effet, la structuration d'une SMC dépend essentiellement du découpage entre éléments d'accumulation d'énergie et éléments sans accumulation.

Ainsi les objectifs d'un niveau de description supérieur seront sans doute assez différents de ceux de la REM. De ce fait, il est sans doute judicieux d'établir un nouveau formalisme, peut-être très différent, et de définir par la suite ses articulations avec la REM. Plusieurs niveaux supérieurs de description pourraient même être développés.

Il est important de souligner qu'un tel niveau de description doit être fondé sur les principes de la systémique (voir chap. II) : principe de l'interaction (action et réaction doivent être conceptualisées dans la nouvelle description), principe de totalité (émergence et suppression de propriétés selon les associations ou regroupements), principe de subjectivité (importance des choix du modélisateur), principe d'équifinalité (plusieurs solutions possibles par rapport à un même but), nécessité de la transdisciplinarité (certains regroupements fusionnant sans doute des éléments pluridisciplinaires). Il faudra aussi trouver des moyens de limiter le risque de contresens physique. Cela ne sera pas évident dans un niveau de description si global que les entités physiques de base ne seront sans doute plus représentées. C'est la raison pour laquelle l'articulation avec des niveaux de type REM est prépondérante dans cette démarche.

IV. 2. 2 Vers l'application aux réseaux électriques

L'étude des réseaux d'énergie électrique constitue un enjeu important de notre communauté pour les années à venir. La dimension d'un tel système n'a plus rien à voir avec les systèmes électromécaniques étudiés. Le besoin de formaliser la représentation de tels systèmes se fait de plus en plus sentir. La démarche REM peut-elle être utilisée dans ce cadre ?

Les défis de l'évolution des réseaux électriques — L'ouverture du marché de l'électricité ainsi que l'insertion d'unités de production décentralisées (énergies renouvelables notamment) va modifier notablement les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Par le passé, le réseau français très maillé et avec des sources de production très importantes assurait une bonne stabilité de

² Dualité entre représentations fonctionnelle et structurelle, cf. Chap. II.

l'ensemble et une qualité indéniable de l'énergie distribuée. Les nouvelles données rendent nécessaire une étude détaillée de réseaux toujours plus complexes, l'insertion d'organes d'électronique de puissance, et de nouvelles méthodes de gestions des objectifs mais aussi la prise en compte des contraintes. Une modélisation à la fois globale et pertinente constitue une étape primordiale. De nombreux travaux ont ainsi été développés dans divers établissements industriels et structures universitaires, voire mixte (CNRT "Futurelec 1" dans lequel intervient le L2EP, par exemple).

Quel apport de la REM ? — Il est clair que la REM n'est pas un outil adapté pour l'étude des réseaux électriques. En effet, le nombre très important de composantes n'est plus compatible avec une représentation aussi détaillée des conversions d'énergie, et rendrait une telle représentation illisible contrairement à un de ses objectifs initiaux.

Un niveau descriptif plus global est donc à construire. Cependant, l'expérience de la REM et la démarche en outils de représentation, imbriqués selon les niveaux de description, pourrait être utile à la mise en place d'une description plus synthétique. Les problèmes à gérer étant fondamentalement les mêmes (transfert de puissance, limitations physiques, stockage énergétique, etc.), on peut penser que certains concepts de la REM pourraient être étendus.

Quelques problèmes à résoudre — La REM est basée jusqu'à présent sur une modélisation par tension entre phases. En effet une liaison composée de 3 fils par exemple, ne permet que de définir les tensions entre ces fils (et les courants y circulant), dont deux sont suffisantes pour caractériser le système (et trois courants aussi). Comme mis en exergue par Ph. Delarue, cette modélisation est difficilement extensible. La problématique de représentation du nœud inductif est significative. Sa résolution passe par une insertion d'un élément de couplage et d'une concaténation pour résoudre le conflit de variables d'état (les courants) qu'il occasionne. Des éléments d'accumulation fictifs apparaissent alors. Mais le nombre de nœuds inductifs dans un réseau maillé risque d'amener à introduire un grand nombre d'éléments fictifs et donc de s'écarter de toute réalité physique. L'approche nodale semble inévitable. Elle a d'ailleurs été utilisée dans la bibliothèque "PSB" de Matlab-Simulink™ [DESSAINT 99], où des éléments de réseaux sont disponibles. Cette expérience est ainsi à méditer car elle a permis d'intégrer une approche circuit dans un logiciel plutôt système. L'extension de la REM rentrerait sans doute dans ce type de problématique.

Un autre problème essentiel à résoudre est lié aux variables utilisées. La REM est centrée sur les variables d'action et de réaction (cinétiques ou potentielles) qui permettent d'en déduire la puissance instantanée échangée entre deux éléments. Les modélisations réseaux placent tout d'abord les notions de puissance au premier plan. L'articulation entre la REM et un niveau supérieur dédié "réseaux" devrait alors formaliser ce changement de variables prépondérantes.

IV. 2. 3 Vers la conception de systèmes

La REM est restée focalisée sur un objectif de commande des systèmes électromécaniques. Quelques éléments d'analyse ont cependant été proposés, hors d'une finalité de contrôle. Pourrait-on aller plus loin en lui associant une finalité de conception de système³ [GERBAUD 01] ?

Travaux sur des formalismes en vue de la conception — La REM n'est pas sans faire penser aux éléments caractérisés de conception définis par le Pr. H. Foch et H. Piquet du LEEI de Toulouse, depuis quelques années [PIQUET 03]. En effet, cet autre formalisme met en exergue des ports en I et en V qui sont à l'interface des associations de composants. Des règles de conception ont été définies à l'aide de ces éléments caractérisés et de leurs associations.

Les diverses similitudes entre nos deux méthodologies laissent à penser qu'un rapprochement est possible. De ce fait, on peut aussi penser que la REM pourrait être modifiée et que de nouvelles règles pourraient être définies afin d'aborder le domaine de la conception.

Exemple de l'alimentation de 10 machines — Des contacts avec le Pr. Lipo du WEMPEC (Université de Wisconsin Madison, USA), nous a permis d'entreprendre une réflexion sur les diverses structures de puissance possibles pour une même finalité. Comment alimenter un ensemble de 10 machines asynchrones ?

Trois structures sont classiques : un onduleur 3 bras pour alimenter les 10 machines en parallèle (Fig. IV. 1), 10 onduleurs 3 bras pour les 10 machines (Fig. IV. 3), voire 10 onduleurs monophasés (2 bras) pour chacune des phases des 10 machines (Fig. IV. 5) (extension de solutions pour une machine triphasée [KAWABATA 02]). Une quatrième structure est directement déduite des travaux entrepris sur l'onduleur 5 bras pour deux machines (cf. Chap. III) : 10 onduleurs à 2 bras pour les 10 machines et 1 bras commun à l'ensemble (Fig. IV. 2). Une dernière structure est directement issue de la manipulation de REM : 3 bras associés à chaque machine et 3 bras commun à toutes les machines (Fig. IV. 4).

Une étude comparative est en cours de réalisation. Il est évident que certaines possèdent des contraintes fortes pour être utilisées en fonctionnement normal. Cependant, ces dernières peuvent être vues comme des structures dégradées de structures classiques et ainsi augmenter la disponibilité de l'ensemble en cas de défaillance. Toutes les structures ont été simulées sur la base de REM. Chacune a fait l'objet d'une SMC qui a permis de valider le fonctionnement des structures les plus originales.

³ On pense en fait à la structuration d'un système autour de composants existants plus qu'à de la conception de nouvelles composantes.

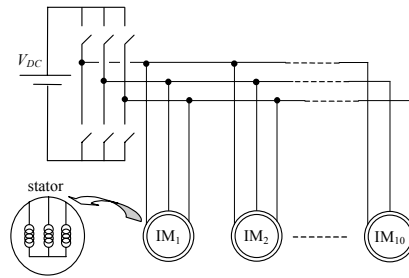


Fig. IV. 1 : Structure 3 bras pour 10 machines

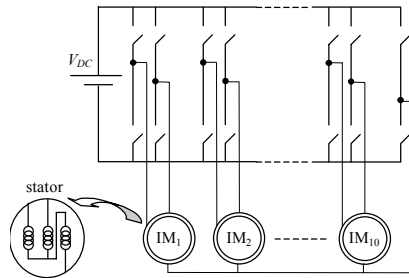


Fig. IV. 2 : Structure 21 bras pour 10 machines

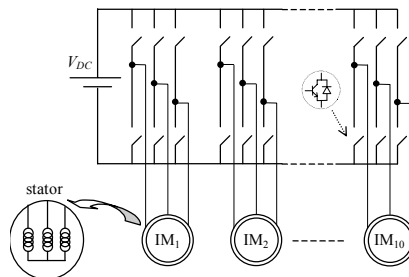


Fig. IV. 3 : Structure 30 bras pour 10 machines

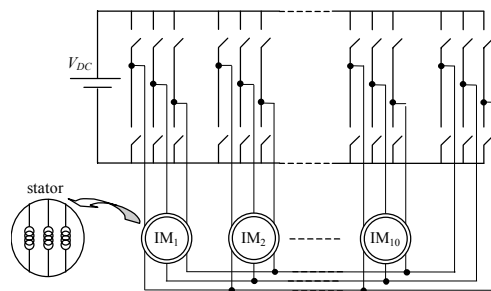


Fig. IV. 4 : Structure 33 bras pour 10 machines

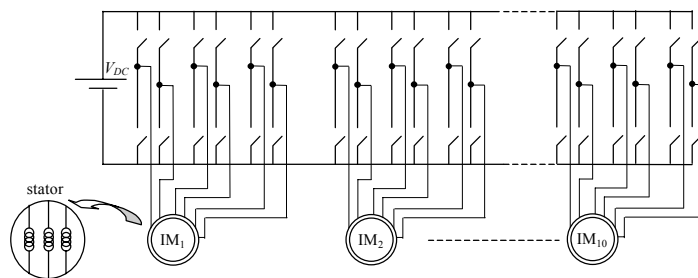


Fig. IV. 5 : Structure 60 bras pour 10 machines

IV. 3. Quelle politique de diffusion et de développement ?

Il est clair que le développement d'outils méthodologiques ne peut se limiter à quelques individus dans un laboratoire. Les divers concepts développés sont issus des interactions entre chercheurs de cultures différentes et travaillant sur des applications diverses. On peut ainsi parler de transdisciplinarité comme mis en avant par la systémique.

Ainsi, les notions de causalité et d'inversion ont été amenées par les initiateurs du GIC, J. P. Hautier en particulier. La notion d'interaction a été introduite par l'extérieur au groupe que j'étais lors de mon recrutement, avec ma culture de laboratoire différente. La notion de couplage est issue des premières rencontres du projet SMM du GdR SDSE⁴ en fonction des applications de chacun : couplage électrique (L2EP), couplage magnétique (GREEN) et couplage mécanique (LEEI). La notion d'élément d'accumulation a été introduite par Ph. Delarue (culture plus « Electronique de Puissance ») lors de son insertion dans le thème SMM du L2EP. La notion de commande avec critère a découlé des travaux du LEEI pour la pondération et du L2EP pour la répartition, notion étendue lors du projet SMM du ME²MS⁵ suite à la confrontation à d'autres applications. La notion de machines fictives (modification virtuelle des couplages) a été initiée par E. Semail (culture plus « Mathématique ») lors de son insertion dans le thème SMM de l'équipe commande du L2EP. Les règles de permutation et concaténation ont été initiées par nos travaux sur les applications concrètes du métro VAL et du système éolien J48. etc.

Ainsi, l'extension et le développement des tels outils ne pourra se faire que par une extension des utilisateurs et des applications.

IV. 3. 1 Quels sont les freins à la diffusion ?

Utiliser un nouveau formalisme est toujours un pari difficile, surtout si on n'a pas la nécessité d'un regard nouveau ou d'outils différents pour résoudre un blocage. J'ai eu la chance de changer de laboratoire, ce qui m'a mené à apprendre le GIC et à l'utiliser. Cette formation reflète, en fait, plus une volonté d'intégration que d'un intérêt scientifique : je dois reconnaître n'avoir pas été vraiment convaincu de l'intérêt de l'approche au départ. Et pourtant ! Sans cette ouverture indispensable vers des notions que j'appréhendais sans les maîtriser (causalité et inversion), quel aurait été mon apport dans la REM ?

Mais pourquoi donc, en tant que chercheur, est-on si fermé à d'autres outils, alors que l'on doit être ouvert à tout concept par définition ? Ce paragraphe essaie de donner quelques éléments de réponse afin de mieux diffuser la méthodologie REM.

⁴ Groupe de Recherche « Sécurité et Disponibilité des Systèmes Electriques », CNRS, 1998-2001.

⁵ Groupe de Recherche « Maîtrise de l'Energie Electrique, du Matériau au Système », CNRS, 2002-2005.

Un outil en cours de développement — Il est clair qu'il est plus facile de faire confiance en un outil ayant déjà fait ses preuves sur un grand nombre de cas. Ainsi, le risque de tomber sur une des ses limites est réduit.

Un outil développé par une minorité — Le chercheur a pour vocation de se doter des outils les plus adaptés à ses travaux, voire de les réaliser. Utiliser des outils déjà utilisés et reconnus dans une communauté scientifique est tout à fait naturel. Utiliser des outils développés ou en cours de développement, c'est un peu reconnaître ses propres limites.

Un manque de temps pour se permettre une vision complémentaire — La REM se veut un outil complémentaire aux outils classiques offrant une vision différente, plus globale. Malheureusement, le chercheur court de plus en plus après le temps, sans pouvoir s'offrir le luxe d'appréhender une étude de deux manières différentes.

Un apprentissage mettant difficilement en avant l'intérêt de l'outil — Chaque outil a sa propre sémantique et sa propre grammaire. Une phase d'apprentissage passe alors par des cas d'études simples... pour lequel un tel outil n'a pas d'intérêt. L'étude de cas suffisamment complexes pour justifier un nouvel outil ne peut se faire que dans un deuxième temps... et le temps court.

Un combat entre puristes et pragmatiques — Les initiateurs de l'outil deviennent souvent des puristes quant à l'utilisation de leur bébé (« les sources doivent être des ovals en vert clair avec une bordure en vert foncé »). Cette focalisation sur des détails n'est pas compatible avec l'assimilation de l'outil pour résoudre un cas concret posé par un non initié. Mais peut-on laisser dériver l'outil dans une phase de développement, qui risquerait des abus néfastes à sa diffusion ?

IV. 3. 2 Comment assurer la diffusion de la REM ?

Suite au problème posé par la diffusion d'un tel outil, quelques propositions sont dégagées pour contrer certains freins développés ci-dessus. Il y a sans doute une réflexion plus profonde à mener. Les points qui suivent devraient au moins lancer le débat.

Diffusion pédagogique — L'insertion de l'apprentissage de l'outil dans la formation scientifique des étudiants est le moyen de diffusion le plus important. Notre expérience à Lille (cours de REM en DEA, en DESS et initiation en Maîtrise, voir "Annexe Transfert Pédagogique") nous a permis de voir que les étudiants étaient plus réceptifs voire plus enthousiastes que certains de nos collègues du L2EP. Il faut espérer que les étudiants formés utiliseront ces outils dans l'industrie ou en recherche (thèse).

Les outils et notions développés sont cependant confrontés au manque de recul. Certains pensent que tout le monde les possède (et ne les présentent plus quand ils les utilisent ou publient). D'autres ne comprennent pas que l'on puisse faire autrement. Il est important d'insister sur le fait que ce n'est qu'un outil parmi tant d'autres, avec ses qualités, ses défauts et ses limites.

Il est à noter que nous intervenons aussi depuis deux ans dans le DEA de Génie Electrique de Tunis, où les formalismes de représentation sont présentés à ses étudiants.

Séminaires scientifiques — Les séminaires scientifiques sont plus destinés à nos collègues chercheurs. Mais la faible durée du séminaire est incompatible avec la phase d'apprentissage par des cas simples et l'étude de cas révélateurs de l'intérêt de la démarche. Un compromis difficile est alors nécessaire. Dans un premier temps, nous avons réalisé des séminaires très théoriques, rigoureux et très longs avec peu d'applications. Ce fut un échec. Il semble que les séminaires plus liés à une application et sa résolution soient mieux perçus. L'idée est de susciter l'intérêt des interlocuteurs (montrer la puissance de la méthodologie) sans donner toutes les clefs nécessaires à la compréhension du formalisme. Les personnes désirant aller plus loin font alors l'effort de se plonger dans les bases de l'outil. Pari difficile toutefois !

Une première expérience internationale a été cependant réalisée lors de la mise en place de la session invitée SMM d'ElectrIMACS 2002 (Montréal). Outre les articles du groupe de travail SMM du GdR ME²MS (système de traction ferroviaire [BOUSCAYROL 02b], machine asynchrone double alimentation avec deux convertisseurs [GOSHIN 02], onduleur 10 bras pour machine synchrone pentaphasée [MARTIN 02]), d'autres articles ont contribué à cette session : machine asynchrone à double rotor [SCHROEDL 02], onduleur 6 bras pour machine asynchrone double étoile [LYRA 02] et égaliseur de tension pour montages à super condensateurs [BARRADE 02]. Nous avons réalisé une introduction de 10 minutes présentant chaque article avec le formalisme SMM. Ce diaporama a été conçu lors de discussions électroniques avec les divers auteurs. Si cette présentation initiale a été un liant pour la session, elle a aussi permis un retour des divers auteurs lors de la description de leur système avec nos outils. Mais il faut reconnaître que l'on ne peut considérer cette expérience ponctuelle significative, si des retombées n'en découlent pas (utilisation du formalisme ou collaborations par exemple). Elle doit être considérée comme un premier pas.

Collaborations scientifiques — Le travail de collaboration reste le moyen le plus efficace pour sensibiliser d'autres collègues. La diffusion est cependant plus restreinte et plus longue. Cependant l'utilisation dans le cadre d'applications différentes avec des problèmes différents peut, de plus, participer au développement de l'outil. Il faut toutefois prendre garde à assurer un bon compromis entre la rigueur du puriste (ne pas noyer le collaborateur) et la simplification du pragmatique (ne pas induire le collaborateur en erreur). La tâche s'avère difficile aussi.

Pour mettre en avant la vision complémentaire de la REM, on peut proposer d'étudier un système dont une commande a déjà été développée par une autre voie. Non seulement, la SMC peut mener à une autre solution, mais des lois de commande intermédiaires peuvent découler des deux approches. Cette approche a été utilisée dans le cadre du stage de P. E. Vidal (doctorant du LEEI) au L2EP sur le thème de la machine asynchrone double alimentation [VIDAL 04] (stage effectué dans le cadre du projet SMM du GdR ME²MS).

En fait, le meilleur moyen d'assurer l'utilisation de l'outil par un partenaire est sans doute de l'impliquer dans son développement. Plus facile à dire qu'à faire !

Une première expérience est en cours avec la CPEE (Chaire de Production de l'Energie Electrique) de l'Université de Québec Trois-Rivières. La REM de leur système d'enroulement de l'industrie papetière a mené à la simulation globale du système d'étude lors du stage de A. Leclecq [LECLERCQ 04]. Cette collaboration s'est poursuivie par l'étude d'un système avec moteur linéaire [THIFFAULT 04]. Une deuxième expérience devrait se concrétiser par le DEA en co-tutelle avec le LEI (Laboratoire d'Electricité Industrielle) de l'Ecole Polytechnique de Lausanne, sur le thème des véhicules hybrides [LHOMME 04].

IV. 3. 3 Comment assurer les extensions de la REM ?

La diffusion de l'outil doit être liée à son développement et la résolution de nouveaux problèmes rencontrés. Certaines extensions ont été proposées dans ce chapitre, mais il ne fait aucun doute que d'autres problèmes surgiront. Pour continuer ce travail passionnant, il faut donc les solliciter.

Etudier d'autres démarches — L'esprit d'ouverture doit rester de mise. La recherche d'autres méthodologies développées, puis leur apprentissage devrait permettre de se positionner, de mieux voir les limites de nos outils, de les compléter... ou de les abandonner au profit d'outils plus puissants. Cette dernière idée n'est pas très réjouissante, mais elle doit être envisagée. Peut-être même trouverons-nous une méthodologie analogue déjà développée par le passé ! Il est sans doute probable que des démarches similaires ont déjà été initiées. Il faudrait alors faire le lien avec celles-ci.

Travailler avec des spécialistes d'autres domaines scientifiques — L'expérience de la mise en place de la REM nous a montré que chaque fois qu'une personne ayant une culture différente s'est impliquée dans ces travaux, de nouvelles notions ont émergé. Nous sommes restés toutefois dans le domaine du Génie Electrique. L'interdisciplinarité voire la transdisciplinarité ne pourra se faire qu'avec des chercheurs de domaines scientifiques différents. Là aussi, la tâche est assez ardue, car une phase transitoire d'apprentissage mutuel du langage, des concepts et des outils des uns et des autres est forcément à prévoir.

On peut souligner dans ce cadre le travail de J. C. Mercieca, stagiaire de DESS à Siemens Transportation Systems, qui a mené à établir un modèle de simulation complet du VAL 206 notamment en intégrant des parties mécaniques finement modélisées (collaboration avec un stagiaire de l'ENSAM), tout en respectant l'esprit de la REM [MERCIECA 04]. D'autre part le travail avec J. B; Tritsch, Maître de Conférences au Laboratoire de Mécanique de Lille, dans le cadre de la modélisation d'une turbine éolienne, a été très bénéfique pour chacun des partenaires [TOUNZI 02].

Etudier de nouveaux systèmes avec de nouvelles contraintes — Chaque nouvelle application nous a donné des signes quant à la généralisation ou le développement de nouvelles règles. Il faut poursuivre dans cette optique avec des systèmes plus larges, plus pluridisciplinaires, plus couplés. Cette démarche nécessitera alors des moyens humains plus importants, ce qui est toujours délicat à bien gérer.

Organiser l'échange d'expériences — Le développement de l'outil ne peut passer que par un nombre croissant d'utilisateurs et de développeurs à travers le monde. Il faudrait alors centraliser les retours d'expériences des uns et des autres. On peut penser à un serveur Internet dédié, voire à un forum de discussions. Des compétences autres que scientifiques seraient alors nécessaires.

IV. 4. Quel futur pour la REM ?

Des pistes d'extension et de développement ont été proposées au cours de ce chapitre, en mettant en avant quelques applications possibles. De plus, des éléments de réflexion quant à sa diffusion et à son développement ont été posés. Cette dernière partie contient certaines propositions réalistes mais aussi d'autres plus utopiques. Mais n'est-ce pas justement notre rôle de chercheur ?

Concernant l'avenir de la REM, deux solutions sont possibles. La première consiste à une stagnation de l'outil développé et donc à une utilisation par un nombre restreint de personnes. Cela ne correspond évidemment pas à notre objectif de chercheur du domaine public.

La deuxième possibilité correspond à un développement de la REM et à utilisation croissante. Peut-être même, la REM ne serait que le catalyseur d'un nouveau formalisme plus unificateur et plus puissant. Notre travail de scientifique aura alors tout son sens.

Saurons nous faire les efforts nécessaires pour aboutir à la deuxième possibilité ? Le pari est lancé. Echec ou réussite, cruel dilemme du chercheur !

Conclusion

Conclusion

Les travaux proposés s'insèrent directement dans ceux développés par le L2EP sur le Graphe Informationnel Causal (GIC), basé sur le principe de la causalité intégrale, c'est à dire la causalité physique. En effet, la Représentation Énergétique Macroscopique peut être considérée comme une encapsulation du GIC, mettant en avant les interactions des composantes d'un système. La détermination d'un vocable pour un nouvel outil est toujours délicate. Cependant la terminologie "REM" révèle les principales caractéristiques de cet outil.

Il faut insister sur le fait que la REM est une **représentation graphique**, c'est à dire une organisation structurée des informations décrivant un système. En effet, elle a pour objectif d'organiser un modèle, qui est défini par certaines hypothèses. Elle doit ainsi se placer sur le même plan que la représentation par schémas-blocs, par Bond-Graphs, voire la représentation d'état (qui n'est pas seulement graphique, mais aussi mathématique).

La REM est une **représentation macroscopique** où les diverses composantes du système sont caractérisées par leurs interactions entre elles et avec l'environnement du système. Ce formalisme a donc été développé dans une démarche systémique, dont un des principes importants est celui de l'action et de la réaction. Une démarche structuraliste a été adoptée, ce qui permet de faire le lien avec le GIC : la description interne de chacune des composantes est basée sur la causalité physique. Cette connaissance interne permet alors de définir les variables d'interaction. Il faut souligner que la REM s'attache à décomposer un système en constituants physiques. Cette double représentation fonctionnelle (relations entre entrée et sorties) et structurelle (à un objet physique correspond un élément REM), lui confère un caractère de lisibilité qui fait son attractivité.

La REM est aussi et surtout une **représentation énergétique**. D'une part, elle est basée de manière sous-jacente à la causalité intégrale qui sous-tend la notion d'énergie. D'autre part les éléments REM sont classés en deux catégories en fonction des manipulations d'énergie qu'ils assurent : accumulation d'énergie ou conversion d'énergie sans accumulation. Et enfin, les variables d'action et de réaction entre deux éléments conduisent à la puissance instantanée échangée par ces deux composants.

Des règles de construction (formes, couleurs) ont été définies afin d'assurer la meilleure **lisibilité** possible, même pour des systèmes composés de plusieurs machines et de plusieurs convertisseurs. De plus, des règles d'association ont été définies pour traduire le principe de totalité de la systémique et, de ce fait, prendre en compte les **conflits de causalités** inhérents à l'association de certaines composantes. Enfin, des éléments de couplage ont été définis pour exprimer la **répartition énergétique** des systèmes multimachines multiconvertisseurs (SMM). Outre les applications

pédagogiques évidentes de la REM, c'est surtout pour l'analyse des systèmes tels les SMM, que ce formalisme montre tout son intérêt. L'exemple non trivial traité au chapitre III est révélateur.

Le principe d'inversion mis en exergue par le GIC a été étendu à la REM, ce qui a permis de définir la Structure Maximale de Commande (SMC). Cette dernière est un développement qui mène à une commande avec un grand nombre de capteurs et d'opérations. Des règles de simplifications permettent d'obtenir une structure de commande pratique pour une implantation en temps réel.

La SMC est une **structuration de la commande**. Basée sur l'hypothèse initiale de toutes grandeurs mesurables, elle permet de localiser les variables à mesurer (ou à estimer) et les asservissements nécessaires à l'obtention de bonnes performances. Le choix des correcteurs et leur synthèse ne sont pas définis dans la méthodologie proposée, et l'on doit faire appel dans un second temps aux principes de l'Automatique. On peut noter que les perturbations font l'objet d'opérations de rejets explicites. Cela permet de soulager les correcteurs de leur fonction de régulation. De plus, la détermination d'une structure pratique de commande est réalisée par l'expression d'hypothèses de travail. Si ces dernières ne sont pas vérifiées, il est clair que les performances de la commande seront réduites.

La SMC est une **structure maximale** en nombre de capteurs et d'opérations, car elle correspond à une gestion locale de l'énergie au plus près de composants qui la manipulent. Ainsi à chaque accumulateur d'énergie correspond un asservissement afin de maîtriser au mieux ces réservoirs d'énergie. Une limitation des variables d'état peut ainsi être réalisée après chaque correcteur, ce qui minimise les risques de détérioration du système. De plus, pour les SMM, le principe d'inversion étendu montre qu'une gestion adaptée de la répartition d'énergie nécessite l'explicitation d'un critère. Il faut remarquer que ce degré de liberté est souvent négligé dans les applications industrielles au profit de commandes maîtres esclaves ou de commandes à répartition uniforme qui, si elles ont des intérêts (surtout économiques), ont aussi leurs limites.

Un niveau hiérarchique supérieur, appelé niveau de stratégie, est cependant à déterminer pour définir les critères et certaines références de la SMC. Si quelques pistes ont été étudiées, un travail d'investigation reste à faire pour formaliser ce deuxième niveau.

La méthodologie proposée permet donc une représentation des SMM en vue de leur analyse, de leur simulation et de la structuration de leur commande.

Il est clair que la REM n'en est qu'à ses premiers pas. Quelques perspectives sont dégagées au chapitre IV. L'application aux systèmes à modes dégradés et aux systèmes multisources sont des travaux déjà en cours, et devraient souligner l'intérêt de la démarche.

Si la REM a été développée par une extension de certains principes du GIC, il paraît judicieux de ne pas se cantonner à cet outil pour assurer une description interne des divers éléments. Un travail

d'articulation est à faire avec d'autres formalismes tels les fonctions de transfert, les Bond-Graphs, les réseaux de Pétri...

L'extension du formalisme à des systèmes plus complexes n'est pas sans poser de problèmes. Il paraît difficile d'assurer une bonne lisibilité, avec un tel outil, d'un système possédant un très grand nombre de composantes (réseaux électriques par exemple). Un formalisme de représentation plus synthétique est sans doute à développer. Mais l'expérience de la REM peut alors être bénéfique, en gardant l'énergie comme élément central de l'approche.

En revanche, diverses démarches de conception de systèmes ont des points communs avec celle de la REM. Il est fort à parier que des rapprochements pourraient être faits, et si la REM ne devient pas un outil de conception, des passerelles avec des outils existants pourraient être très intéressantes.

Relèverons-nous le pari ambitieux de la diffusion et du développement de la REM ? Des confrontations avec d'autres outils, son utilisation par d'autres chercheurs et son application à d'autres systèmes devraient faire émerger de nouveaux problèmes à résoudre. Le travail est ardu car il va falloir convaincre, discuter, modifier au cas par cas. Les collaborations constructives déjà engagées nous encouragent à aller dans ce sens.

Post Propos

Post Propos

Le métier d'enseignant chercheur est un métier passionnant à bien des égards. Toujours plus fort, toujours plus vite, toujours plus loin... La tourmente dans laquelle on se trouve et à laquelle on participe aussi, nous fait cependant oublier deux choses qui sont, à mon avis, des fondements de l'enseignant chercheur : le temps de la réflexion et notre rôle sociétal voire social.

La rédaction d'une habilitation à diriger les recherches est un moment de réflexion, certes, mais qui montre aussi que la "pause scientifique" n'a sans doute pas été assez privilégiée auparavant. Ces temps de réflexion devraient d'ailleurs nous permettre de nous poser la question de notre rôle dans la société.

Le chercheur du domaine public se doit de participer à une évolution positive du "progrès". Malheureusement, certaines contraintes nous amènent parfois à privilégier les intérêts privés qui ne sont pas toujours liés à l'intérêt public. Je dois bien reconnaître que ma vigilance s'est relâchée à cet égard !

On oublie aussi parfois notre rôle social dans une Université dont l'une des missions est la diffusion de la culture, du libre arbitre, des valeurs républicaines. Dans un monde où la communication prime sur tout, ce rôle devrait se renforcer par des prises de positions affirmées, sur un argumentaire ciselé propre à la rigueur scientifique. Je dois bien reconnaître que mon implication sociale s'est égrenée !

Notre discipline devrait être au cœur d'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle : « Energie électrique et Développement Durable »¹. En effet, l'énergie électrique est incontournable face au bouleversement énergétique qui s'annonce [DEROSNAY 96] [ASTIER 03]. Le développement durable correspond au « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » selon la commission Brundtland.

Nos activités devraient donc participer à améliorer l'efficacité de la production du transport, de la distribution et de l'utilisation de l'énergie électrique.

Mais notre rôle de scientifique doit aussi s'étendre aux domaines économique et politique. Pour la prise en compte d'abord du développement durable face aux aspirations libéralistes fortes au goût du jour. Si gagner en efficacité est un enjeu, consommer plus raisonnablement l'énergie doit en être un autre. Notre rôle social d'universitaire doit aussi aller dans ce sens par la sensibilisation des étudiants, mais aussi de la société.

¹ Titre du futur Master Recherche de Génie Electrique à Lille dans le cadre de la réforme LMD.

Annexes

Annexe « Petit Lexique de Systémique »

Annexe « Thème SMM du L2EP »

Annexe « Opération SMM des GdR »

Annexe « Transfert pédagogique »

Annexe « Plate-forme expérimentale SMM du L2EP »

Annexe « Différentes représentations d'un système »

Annexe « Curriculum Vitae »

Annexe « Petit Lexique de Systémique »

Annexe « Petit Lexique de Systémique »

Ce lexique a été construit à l'aide des trois références suivantes :

¹ Centre d'Etude sur les systèmes autonomes (CIES), Université de Neuchatel, mise à jour juillet 1996, <http://www.unine.ch/autogenesis/apprsyst.htm> (dernière consultation en mai 2003).

² Applications et développement de l'approche Systémique du changement dans l'entreprise, <http://www.chez.com/dbc/Pages/glos/glosmenu.html> (dernière consultation en mai 2003).

³ Le dictionnaire Larousse, Paris, édition 1992.

Adaptabilité² — Capacité d'un système à répondre aux variations de l'environnement tout en assurant sa survie ou son développement. Cette capacité dépend de sa complexité et donc de son potentiel de réponse.

Analyse de processus² — Outil systémique ayant pour but d'identifier l'ensemble des étapes de transformation d'un produit A en produit B, chaque étape étant décomposée en termes de flux entrants et flux sortants, de clients et de fournisseurs, de délais, de ressources et de contraintes.

Analyse systémique² — Etude et représentation du fonctionnement d'une organisation à travers le modèle systémique. C est un des outils privilégiés utilisés dans le cadre d'une approche systémique du changement.

Automation³ — Exécution totale ou partielle de tâches techniques par des machines fonctionnant sans intervention humaine (synonyme : *Automatisation*).

Autonomie¹ — (du grec *auto*, soi, et *nomos*, la loi.). Sens commun : possibilité de décider dont peut jouir un organisme (organisation sociale, politique ou économique, individu, etc.). En science des systèmes : propriété d'un système qui se donne lui-même sa propre loi.

Autorégulation² — Ajustement spontané et/ou automatique d'un système pour rester dans une norme.

Bionique³ — Science de l'étude de procédés biologiques en vue d'appliquer des processus analogues à des fins militaires ou industrielles.

Boîte noire² — Partie (sous-système ou élément) du système modélisé dont l'observateur ignore volontairement le fonctionnement interne pour ne l'appréhender que par ses entrées et ses sorties. Par rapport au système considéré, la boîte noire se situe au niveau choisi comme étant le plus bas, c est à dire à l'intérieur duquel il n'est pas pertinent de pénétrer en regard de l'objectif à atteindre.

Causalité circulaire² — Hypothèse selon laquelle l'événement A influence B, lequel exerce à son tour une influence sur A. Il n'existe pas véritablement de commencement ou de fin dans l'influence réciproque.
Analogie / Synonyme : spirale, allers et retours, influence réciproque, «l'œuf et la poule»,

Causalité linéaire² — Hypothèse selon laquelle un événement A est premier et qu'un événement B est déterminé par l'existence de A. Si A influence B, la réciproque n'apparaît pas.
Analogie / Synonyme : à un effet correspond une cause,

Complexe³ — (du latin *complexus*, qui contient). Qui se compose d'éléments différents, combinés d'une manière qui n'est pas immédiatement saisissable (*NDLA* : ne pas confondre avec compliqué).

Compliqué³ — (du latin *complicare*, lié ensemble). Composé d'un grand nombre d'éléments. Difficile à comprendre, à exécuter (*NDLA* : ne pas confondre avec complexe).

Convertisseur³ — (du latin *conversio*, conversion). Dispositif assurant une conversion d'énergie, l'une de ces énergies, au moins, étant de nature électrique.

Cybernétique¹ — (N. Wiener, du grec *kybernetiki*, art du pilotage) Science du contrôle et de la communication chez les êtres vivants, les machines et, plus généralement, dans tous les systèmes, naturels ou construits. La cybernétique forme, avec la théorie générale des systèmes du biologiste L. von Bertalanffy, ce qu'on appelle

souvent la première systémique qui est l'étude du fonctionnement des systèmes (et non de leur émergence, de leur transformation et de leur évolution). Une des notions les plus importantes de la cybernétique est la rétroaction.

Déterminisme¹ — Attitude épistémologique consistant à penser que l'état ultérieur d'un système est entièrement déterminé par son état présent, les mêmes causes produisant les mêmes effets. Un système peut être rigoureusement déterministe ou n'être déterminé que de façon probabiliste ; dans ce dernier cas, l'état ultérieur n'est pas déterminé de façon précise, mais selon une certaine distribution de probabilité. En dynamique des systèmes non-linéaires, loin de l'équilibre, un système peut être déterministe (donc non probabiliste) et néanmoins être très rapidement imprédictible (grande sensibilité aux conditions initiales).

Energie³ — (du grec *energeia*, force en action). En Physique, grandeur caractérisant un système et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lequel il entre en interaction (Unité SI, le Joule). Chacun des modes que peut présenter un tel système (énergie mécanique, magnétique...).

Outre l'énergie mécanique (énergie potentielle et cinétique), on distingue les énergies chimique, électrique, nucléaire, calorifique (thermique) et rayonnante (et hydraulique). L'énergie est un concept de base de la Physique car un système isolé a une énergie totale constante. Il ne peut y avoir création ou disparition d'énergie, mais seulement transformation d'une forme d'énergie en une autre ou un transfert d'énergie d'un système à un autre. Toute conversion d'énergie s'accompagne de pertes.

Entropie¹ — Grandeur utilisée en thermodynamique et caractérisant le sens de l'évolution d'un système isolé. Le 2ème principe de la thermodynamique dit en effet que l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître (Clausius, 1850). Ce principe a comme conséquence concrète que de la chaleur ne peut pas spontanément passer d'une source froide à une source chaude. Boltzmann (1870) a proposé une interprétation statistique de l'entropie, selon laquelle l'entropie correspond au degré de probabilité de l'état d'un système. L'augmentation spontanée de l'entropie d'un système isolé correspond ainsi au passage d'un état donné à un état plus probable, à un certain niveau d'observation. Le degré de probabilité d'un état macroscopique dépend du nombre de configurations microscopiques différentes qui donnent ce même état macroscopique. Comme les états macroscopiques les plus probables sont les moins différenciés et les plus symétriques (car ils sont réalisables par de nombreuses configurations microscopiques), ils apparaissent donc très uniformes : soit réguliers comme un cristal, soit amorphes comme un fluide homogène ou un ensemble d'objets en désordre. C'est pourquoi on associe souvent entropie et désordre. Pour les systèmes non-isolés la comptabilité entropique exige plus d'attention et n'a été partiellement éclaircie que depuis quelques dizaines d'années. En cas d'utilisation métaphorique du mot entropie, on exercera la plus grande vigilance afin d'éviter des abus ou des dérapages sémantiques.

Environnement² — Ensemble des éléments extérieurs au système apparent avec lequel existent des échanges d'information, de matière et d'énergie, entraînant une interdépendance.

Analogie / Synonyme : milieu, entourage, réseau.

Equifinalité² — Principe selon lequel des conditions initiales différentes peuvent produire un même résultat. Exemple : la fermeture d'un établissement peut être due à un incendie, ou à la perte d'un marché, ou à une restructuration...

Epistémologie¹ — (du grec *épistémé*, science et *logos*, étude). Science de la science. Théorie de la connaissance. Etude des présupposés d'une science.

Finalité² — Raison d'être naturelle et souvent non consciente de tout système ouvert, le conduisant à une auto-organisation et une adaptation de moyens, pour assurer son développement ou sa survie.

Analogie / Synonyme : C est le «vers quoi» l'ensemble tend par opposition au «comment ou au «pourquoi», mobilisation dans une direction.

Flux² — Quantité de matière, d'énergie ou d'information, circulant entre les différents éléments d'un système, caractérisée par son débit, sa direction, sa nature, sa structure, sa fréquence, sa durée, sa fonction.

Analogie / Synonyme : écoulement, quantité.

Holisme¹ — (du grec *holos*, entier) Attitude épistémologique qui consiste à considérer qu'un système complexe est une entité qui possède des caractéristiques émergentes liées à sa totalité, propriétés qui ne sont pas réductibles à, et déductibles de celles de ses éléments. "Le tout est plus que la somme des parties" (voir réductionnisme).

Homéostasie² — Propension d'un système à rester dans sa norme, c'est-à-dire à maintenir un équilibre tendant vers le statu quo, malgré les pressions de l'environnement.

Analogie / Synonyme : retour à l'équilibre, stabilité, maintien, statu quo.

Interaction² — Echange entre deux éléments ou sous systèmes entraînant une influence réciproque.

Analogie / Synonyme : échanges, interrelations, influences, relations circulaires.

Interdisciplinaire¹ — S'applique à des activités, des problèmes et des projets dépassant les capacités d'une seule discipline et qui impliquent donc des apports et des interactions de plusieurs disciplines. Alors que la pluridisciplinarité n'est que la juxtaposition de plusieurs disciplines établies, l'interdisciplinarité peut conduire à un dépassement des disciplines concernées et aboutir à des notions transdisciplinaires.

Invariant² — Propriété, grandeur, interaction, séquence, qui reste constante dans un système quelles que soient les situations abordées par celui-ci. Dans les relations entre les personnes, c'est la présence de séquences répétitives d'interactions.

Analogie : répétition d'interactions, séquences identiques.

Machine³ — (du latin *machina*, issu du grec). Appareil ou ensemble d'appareil capable d'effectuer un certain travail ou de remplir une certaine fonction, soit sous la conduite d'un opérateur, soit d'une manière autonome.

Macroscopique³ — (du grec *makros*, grand). Qui peut se voir à l'œil nu.

Matérialisme¹ — Doctrine ontologique (sur la nature de l'être) affirmant qu'il n'existe d'autre substance que la matière. S'oppose au spiritualisme.

Méso³ — (du grec *mesos*, du milieu).

Métamodèle² — Structure de référence dans laquelle peuvent s'inscrire les modèles spécifiques de chaque système, sous système ou élément. Le métamodèle se situe à un niveau supérieur, englobant, par rapport au modèle.

Analogie/Synonyme : cadre de référence,

Microscopique³ — (du grec *mikros*, petit). Qui ne peut se voir qu'à l'aide d'un microscope.

Modélisation³ — (de l'italien *modello*). Etablissement de modèle, i.e. de structure formalisée, utilisée pour rendre compte de certains phénomènes qui présente entre eux certaines relations. Représentation mathématique d'un phénomène physique, économique, humain... réalisée afin de pouvoir mieux étudier celui-ci.

Paradigme¹ — (du grec *paradeigma*, exemple, du verbe montrer) Terme utilisé en linguistique et en philosophie. Remis en scène par l'épistémologue Th. Kuhn autour de 1960. Définition générale : ensemble des traits caractérisant un mode d'interaction avec le monde. Peut se définir à différents niveaux: Perception : façon de percevoir, d'appréhender le monde. Science : base de connaissances communes. Epistémologie : grille de lecture. Trame théorique et hypothèses sur lesquelles repose toute science, et qui gouvernent la façon dont le scientifique pense et interprète les résultats de ses expériences. "Attracteur sémantique qui organise une partie du champ du savoir servant de contrainte et de stimulant" (Giré). Culture : attitude liée à une représentation du monde. Méthodologie: Moyens de traitement. (Ex: médecine physicaliste / médecine holistique). Outils: Moyens d'action. (Ex: prise de médicaments / prise en charge).

Pluridisciplinaire¹ — Synonyme de multidisciplinaire et s'appliquant à des activités ou des projets faisant appel à des spécialistes de plusieurs disciplines. Ne pas confondre avec interdisciplinaire ou transdisciplinaire.

Proaction² — Mécanisme consistant pour un élément ou un sous-système à influencer et faire réagir son environnement pour tendre vers ses objectifs

Réductionnisme¹ — Attitude qui consiste à réduire un système ou des phénomènes complexes à leurs composants plus simples et à considérer ces derniers comme plus fondamentaux que la totalité complexe. (voir holisme).

Régulation² — Action visant à réduire les écarts entre objectifs fixés et résultats atteints ou à modifier des objectifs en fonction de l'évolution de l'environnement.

Analogie / Synonyme : rectification, ajustements.

Relation¹ — Lien entre les états de deux objets. Il y a une relation entre deux états si ceux-ci ne sont pas aléatoires, on peut alors les décrire par une table ou une règle. Une relation entre deux objets physiques est une interaction qui se manifeste par un flux de matière ou d'énergie (messager, onde sonore, signal électrique, onde électromagnétique, etc.) et s'explique par une transformation dans un récepteur qui est fonction d'une transformation dans un émetteur (information). La catégorie "relation" et la catégorie "objet" représentent les deux catégories logiques primordiales permettant de rendre les systèmes intelligibles (le système étant un tout organisé d'objets en relation).

Représentation³ — (du latin *repraesentare*, rendre présent). Action de rendre sensible quelque chose au moyen d'une figure, d'un symbole, d'un signe. Image, figure, symbole, signe qui représente un phénomène, une idée.

Rétroaction¹ — Propriété de nature cybernétique des systèmes dont une partie du signal de sortie est renvoyée sur l'entrée. Cette injection peut se faire : 1) sans changement de signe: rétroaction positive, avec renforcement explosif du signal d'entrée 2) avec changement de signe: rétroaction négative, avec neutralisation du signal d'entrée (homéostasie).

Scientisme¹ — Opinion philosophique de la fin du 19^{ème} siècle, mais encore vivante aujourd'hui, selon laquelle la science, en particulier la science empirico-rationaliste, permet de connaître la totalité de ce qui existe.

Stratégie³ — (du grec *strategos*) Art de coordonner des actions et de manœuvrer habilement pour coordonner un but.

Système¹ — (du grec *systema*, ensemble) Dans le langage courant, mot pouvant signifier: a) un ensemble de composants matériels (ex: système solaire, système pileux, système nerveux), b) un ensemble de concepts ou d'idées (ex: système métrique, système philosophique), c) un ensemble de méthodes ou de procédés (système d'éducation, système D). Dans le contexte systémique, un système peut être défini de la façon la plus générale comme un tout organisé de composants en interaction. Cette définition générale fait ressortir les trois catégories primordiales nécessaires pour envisager un système générique: le monde des objets (composants), le monde des relations (interactions) et le monde de la totalité (entité existante). La science des systèmes s'occupe particulièrement d'une catégorie plus restreinte de systèmes, caractérisés par :

1. le fait d'exister comme des structures non-isolées, c'est-à-dire d'échanger de l'énergie, de la matière et de l'information avec leur environnement et entre leurs composants ("ouverture" matérielle, systèmes dynamiques, systèmes plus ou moins éloignés de l'équilibre thermodynamique (caractérisé par le maximum de l'entropie).
2. le fait de correspondre à une organisation circulaire, c'est-à-dire d'avoir un réseau logique possédant une ou plusieurs des six boucles fermées suivantes: auto-organisation (rétroaction positive, morphogénèse), auto-régulation (rétroaction négative, homéostasie), recyclage matériel (cycles écologiques), auto-production (autopoïèse), auto-référence et auto-construction (autogénèse);
3. le fait d'être un tout cohérent ayant des attributs holistiques émergents, c'est-à-dire liés à l'entité comme totalité et non manifestes dans les composants séparés (ex: identité, téléonomie, vie, sens, conscience).

De tels systèmes sont caractérisés par un certain degré de complexité et un certain degré d'autonomie. Ces systèmes sont donc simultanément non-isolés (matériellement ouverts) sur le plan énergétique et opérationnellement clos sur le plan relationnel.

Systémique³ — Analyse systémique : qui envisage les éléments d'une conformation complexe, non pas isolément mais globalement, en tant que partie intégrante d'un ensemble dont les différentes composantes sont dans une relation de dépendance réciproque.

Tactique³ — (du grec *taktiké*, ranger) Ensemble de moyens habiles employés pour obtenir le résultat voulu..

Totalité, non sommativité² — Propriété des systèmes ouverts à composantes humaines selon laquelle :

- toute modification d'un élément peut entraîner des modifications du système entier,
- un tout n'est pas la somme des parties et donc le comportement du tout n'est pas déductible du comportement de ses parties.

Transdisciplinaire¹ — Se dit d'un modèle ou d'une activité qui dépasse les usages d'une seule discipline et possède un champ de validité plus large, recouvrant plusieurs disciplines. Ne pas confondre avec pluridisciplinaire ou interdisciplinaire.

Annexe « Thème SMM du L2EP »

Présentation du thème SMM du L2EP

Originalité et points forts du thème SMM du L2EP

Structuration du thème SMM du L2EP

Rayonnement du thème SMM du L2EP

Production scientifique du thème SMM du L2EP

Annexe « Thème SMM du L2EP »

<http://www.univ-lille1.fr/commande/eq-com-smm.htm>

Présentation du thème SMM du L2EP

Contexte — Le thème SMM (Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs) est l'un des trois axes de recherche de l'équipe CEMASYC (Commande des Electro-Mécanismes et SYstèmes Couplés) du L2EP Lille, équipe dirigée par le Pr. B. Lemaire-Semail. Cette équipe a pour objectif d'exploiter et enrichir les outils et formalismes de commande développés au L2EP, en les appliquant notamment dans trois thèmes privilégiés :

- les systèmes multimachines, multiconvertisseurs,
- la commande et l'entraînement des machines outils à dynamique élevée,
- les actionneurs piézo-électriques et le retour d'efforts.

Objectif — Ce thème concerne la **commande de systèmes utilisant plusieurs chaînes couplées de conversion électromécanique** (actionneurs multiples). Ces systèmes distribuent et rassemblent l'énergie grâce à des composantes de puissance spécifiques dites de "couplage". Cette distribution d'énergie vise à réduire les contraintes des diverses composantes (segmentation de puissance) et/ou à augmenter la fiabilité du système (marche dégradée en cas de défaillance d'un actionneur). La mise en commun de certaines composantes de puissance pose cependant des problèmes et des contraintes qu'il faut analyser et gérer. Des algorithmes de commande adaptés doivent ainsi être proposés.

Démarche — Les travaux de l'axe SMM sont basés sur une approche méthodologique systémique. Deux niveaux de travail interagissent à cet effet : une partie "formalisme" et une partie "applications".

Dans le niveau formalisme, divers outils de modélisation et de commande sont utilisés et développés (GIC, Graphe Informationnel Causal, REM, Représentation Énergétique Macroscopique, formalisme vecteur d'espace...).

Dans le niveau application, les divers types de couplages sont étudiés. Ces applications permettent d'une part de valider les concepts théoriques développés dans la partie formalisme, d'autre part de fournir de la matière à évolution des formalismes en fonction des problèmes rencontrés et des solutions pragmatiques proposées.

Originalité et points forts du thème SMM du L2EP

L'originalité de ce thème, par rapport aux travaux tant nationaux qu'internationaux, réside dans l'approche systémique utilisée et des formalismes qui en découlent. Cette approche pluridisciplinaire et générique a permis de résoudre des problèmes dans des applications très diverses : anti-patinage pour véhicules, extraction de puissance maximale pour systèmes éoliens, commande de machines polyphasées, commande des convertisseurs statiques avec bras communs... Les publications (12) et communications internationales (19) témoignent de l'intérêt et de la dynamique de nos travaux depuis la création du thème en 1998.

Structuration du thème SMM du L2EP

Le thème SMM se décompose en 5 axes de recherche. Une plate-forme expérimentale commune a été développée pour valider les concepts issus des divers axes de recherche (voir Annexe « Plate-forme expérimentale SMM du L2EP »). Les acteurs du thème sont au 01-06-2003 :

- Alain Bouscayrol (Maître de Conférences, L2EP-USTL),
- Sébastien Charlemagne (doctorant en co-tutelle, L2EP-USTL et LSE-ENIT Tunis),
- Philippe Delarue (Maître de Conférences, L2EP-USTL-EUDIL),
- Bruno François (Maître de Conférences, L2EP-EC Lille),
- Jean-Paul Hautier (Professeur des Universités, L2EP-ENSAM, Directeur du L2EP),
- Xavier Kestelyn (doctorant L2EP-USTL),
- Walter Lhomme (DEA, L2EP-USTL, co-tutelle avec le LEI EPF Lausanne),
- E. Semail (Maître de Conférences, L2EP-ENSAM),
- Jean-Noel Verhille (Ingénieur STS, doctorat entre le L2EP et Siemens Transportation System).

Axe n°1 : Formalismes pour SMM (animateur A. Bouscayrol)

Un formalisme spécifique, intermédiaire entre le GIC (L2EP Lille) et la représentation SMM (projet SMM du GdR-SDSE) a été défini : la Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Il permet de proposer une

démarche générique pour la commande de tels systèmes : structures maximales de commande et structures pratiques de commande, utilisation de commande à modèle...

Axe n°2 : Couplages électriques (animateur Ph. Delarue)

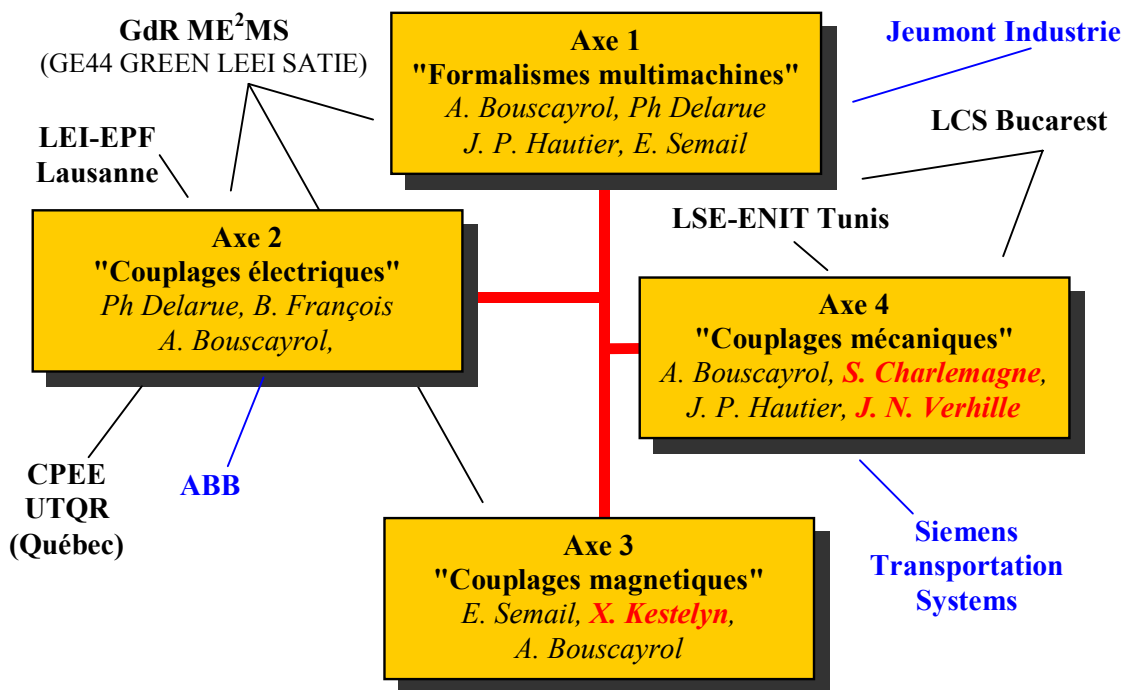
Cet axe concerne l'étude de machines électriques mécaniquement indépendantes. La mise en commun de ressources électriques au travers de l'alimentation de puissance donne des solutions originales, notamment pour des marches dégradées.

Axe n°3 : Couplages magnétiques (animateur E. Semail)

Cet axe concerne l'étude de machines électriques polyphasées qui se caractérisent par un couplage magnétique contraignant. L'utilisation de la méthode du vecteur d'espace généralisé (développée au L2EP) mène à des solutions de commande structurées et efficaces.

Axe n°4 : Couplages mécaniques (animateur A. Bouscayrol)

Cet axe concerne l'étude de machines électriques mécaniquement liées. Elles nécessitent des structures d'alimentation différentes et une commande globale prenant en compte ces liaisons mécaniques fortement contraignantes.



Rayonnement du thème SMM du L2EP

Collaborations internes au sein du L2EP — Une thèse est co-encadrée avec le thème CEMODYNE (Commande des Entraînement et Machines Outils à Dynamiques Elevées) sur la modélisation et la commande d'un système de traction ferroviaire (axe couplage mécanique, [VERHILLE 03]).

Le thème SMM participe aussi à l'équipe RESE (Réseaux) du L2EP par ses modélisations et commandes de divers systèmes éoliens (axe formalisme [BROCARD 01], [BOUSCAYROL 02a], [TOUNZI 02], [DELARUE 03]).

L'axe couplage magnétique travaille en collaboration avec l'équipe MECOSYEL (Modélisation) du L2EP au travers d'une thèse co-encadrée sur les machines pentaphasées [KESTELYN 03].

Collaborations nationales — Les acteurs du thème ont activement participé au projet SMM du **GdR SDSE** (Sûreté et Disponibilité des Systèmes Electriques, 1998-2001) du CNRS. Cette opération a d'ailleurs été reconduite dans l'actuel **GdR ME²MS** (Maîtrise de l'Energie Electrique, du Matériau au Système, 2002-2005). Cette opération regroupe le GE44 (St Nazaire), le GREEN (Nancy), le LEEI (Toulouse) et le LESiR-SATIE (Cachan), sous l'animation du L2EP (Lille). Diverses publications et communications en sont issues (voir Annexe « Opération SMM des GdR »). Une collaboration ponctuelle avec le **LEEI** (Toulouse) a concerné la commande d'un système de traction ferroviaire [PIERQUIN 00]. Une collaboration ponctuelle avec le **GREEN** (Nancy) a porté sur la commande d'une machine pentaphasée [MARTIN 02]. Une dernière collaboration a concerné la commande d'une machine double alimentation avec le **LEEI** [VIDAL 03b].

Une collaboration avec le **LML** (Laboratoire de Mécanique de Lille) au travers de J. B. Tritsch, a été réalisée pour une modélisation fine de turbine éolienne [TOUNZI 02].

Une collaboration est en cours avec l'**ERT "Enroulement" de Strasbourg**, concernant la modélisation et la commande de systèmes d'enroulement de bande.

Une collaboration est en cours avec l'**Ecole Navale de Brest** (IRENAV) concernant l'étude de machines polyphasées pour la propulsion marine.

Collaborations internationales — Une thèse en co-tutelle avec le LCS (Laboratoire des Convertisseurs statiques) de l'Université de Bucarest a été réalisée sur l'application de la commande à modèle de comportement aux systèmes multimachines [VULTURESCU 00], [VULTURESCU 01], [VULTURESCU 02].

Une collaboration ponctuelle avec l'Université polytechnique de Bucarest a concerné la modélisation d'un système de traction de tramway [POPA 02].

Une thèse de co-tutelle avec le LSE (Laboratoire des Systèmes Electriques) de l'ENI de Tunis a été réalisée sur un système d'enrouleur dérouleur pour l'industrie textile [CHARLEMAGNE 01a], [CHARLEMAGNE 01b], [CHARLEMAGNE 02], [CHARLEMAGNE 03a] et [CHARLEMAGNE 03b].

Une collaboration avec le LEI (Laboratoire d'Electricité Industrielle) de l'EPF Lausanne est en cours sur la modélisation d'un véhicule hybride (DEA de W. Lhomme).

Une collaboration avec le CPE (Chaire de recherche Hydro-Québec sur la Puissance et l'Energie Electrique) de l'Université de Trois-Rivière (Québec) est en cours sur la modélisation et la commande d'un système de traitement pour l'industrie papetière [LECLERCQ 03].

Transferts industriels — Les travaux réalisés ont été mis à profit lors de collaborations ou de contrats avec le monde industriel : ABB Finlande [FRANÇOIS 00], Jeumont Industrie [DELARUE 03c], Matra Transport International [BOUSCAYROL 02c], Scientific Software (formation continue), Siemens Transportation Systems [MERCIECA 03] et thèse en cours).

Transferts pédagogiques — Les divers concepts développés dans le thème SMM ont fait l'objet de cours, exercices d'application, bureaux d'étude et travaux pratiques en Maîtrise EEA de Lille, DESS GR2E de Lille, DEA Génie Electrique de Lille, DEA de Génie Electrique de Tunis, 2ème et 3ème IMA EUDIL, 3ème année ENSAM centre de Lille (voir Annexe "Transfert pédagogique").

Production scientifique du thème SMM du L2EP

Ce bilan fait état de la production scientifique de l'opération depuis sa création en juin 1998.

5 thèses de doctorat

- doctorat de E. Semail sur l'étude des machines polyphasées [SEMAIL 00a],
- doctorat de J. Pierquin sur la commande d'un véhicule électrique bi-moteur [PIERQUIN 02a],
- doctorat de B. Vulturescu sur la commande à modèle de comportement pour SMM [VULTURESCU 02],
- doctorat de X. Kestelyn sur la commande des machines polyphasées [KESTELYN 03],
- doctorat de S. Charlemagne sur la commande d'enroulement de bande [CHARLEMAGNE 03],

Organisation d'une session invitée

"MMS invited session" at ElectrIMACS'2002 (Montreal), organisation d'une session orale invitée, dans le cadre de l'opération SMM du GdR (6 articles invités : Autriche, Etats Unis, France (2), Liban et Suisse).

12 Revues Internationales

- Mathematics and Computers in Simulation (axe 1, co-signée GE44, GREEN et SATIE), [SMM 04],
- RIGE (axe 1, co-signée GREEN, LEEI et LESiR, octobre 2003), [SMM 03],
- EPJ Applied Physics, (axe 3, juin 2003), [SEMAIL 03],
- Renewable Energy (axe 1, co-signée Jeumont Industrie, juillet 2003), [DELARUE 03c],
- IEEE Trans. on Power Electronics (axe 2, mars 2003), [DELARUE 03a],
- RIGE (axe 1, co-signée Matra Transport, octobre 2002), [BOUSCAYROL 02b],
- IJREE (axe 1, août 2002), [BOUSCAYROL 02a],
- IEEE Power Engineering Review (axe 3, mars 2002), [SEMAIL 01b],
- EEA (axe 1, janvier 2001, co-signée Université de Bucarest), [POPA 02],
- RST (axe 1, avril 2001, co-signée LCS Bucarest), [VULTURESCU 01],
- RIGE (axe 1, juin 2000), [BOUSCAYROL 00],
- EPJ Applied Physics (axe 1, co-signée LEEI-GREEN, May 2000) [SMM 00a].

19 Communications Internationales avec comité de lecture

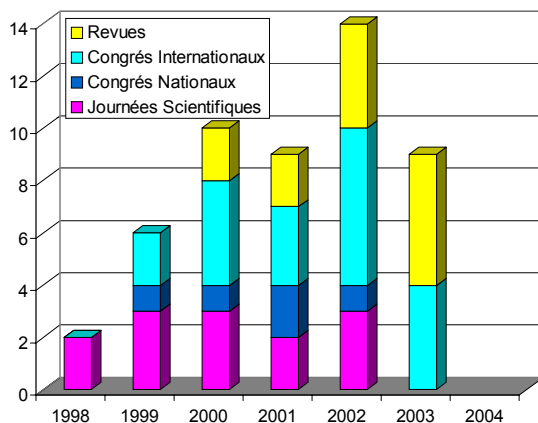
- EPE'2003, Toulouse (axe 4, co-signée LSE Tunis),
- EPE'2003, Toulouse (axe 3),
- IEMDC'2003, Madison (USA) (axe 4),
- IEMDC'2003, Madison (USA) (axe 2),
- ICEM'2002, Bruges (Belgique) (axe 1, co-signée LML),
- ICEM'2002, Bruges (Belgique) (axe 2),
- ICEM'2002, Bruges (Belgique) (axe 3),
- ICEM'2002, Bruges (Belgique) (axe 3, co-signée GE44),
- ElectrIMACS'2002, Montréal (axe 1, co-signée GE44, GREEN, LEEI, LESiR),
- ElectrIMACS'2002, Montréal (axe 1, co-signée GREEN),
- EPE'2001, Graz (Austria) (axe 2),
- EPE'2001, Graz (Austria) (axe 2),
- EPE'2001, Graz (Austria) (axe 1, co-signée GREEN, LEEI, LESiR),
- EPE-PEMC'2000, Kosice (Slovak Republic) (axe 4, co-signée LEEI),
- IEEE-IAS'2000, Roma (axe 1, co-signée LEEI-GREEN),
- IEEE-IAS'2000, Roma (axe 2, co-signée ABB Finlande),
- ICEM'2000, Espoo (Finland) (axe 1, co-signée LCS Bucarest),
- ElectrIMACS'99, Lisbon (axe 2),
- EPE'99, Lausanne (axe 2).

7 Communications Nationales avec comité de lecture

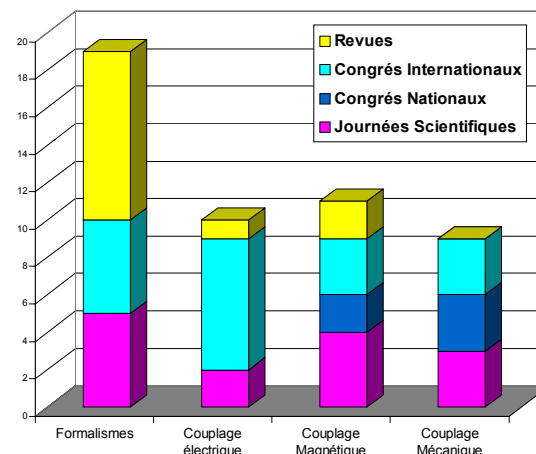
- EF'01, Cachan (axe 3 en interne, et axe 3 cosigné GREEN, LEEI, SATIE),
- JTEA'02, Sousse (Tunisie) (axe 4, co-signée LSE Tunis),
- EF'01, Nancy (axe 3),
- JCGE'01, Nancy (axe 4),
- EPF'00, Lille (axe 3),
- JDA'99, Nancy (axe 4).

14 Communications à des Journées Scientifiques avec actes

- SMM'02, St Nazaire (axes 1, 3 et 3),
- SDSE'2001, Lyon (axe 1, co-signée LEEI-GREEN-LESiR),
- SMM'01, Cachan (axes 3 et 4),
- SMM'00, Lille (axes 1 et 3),
- SDSE'2000, Lyon (axe 1, co-signée LEEI-GREEN),
- SMM'99, Toulouse (axes 1, 2 et 4),
- SMM'98, Nancy (axes 2 et 4).



Evolution temporelle



Répartition thématique

Annexe « Opération SMM des GdR »

Présentation de l'opération SMM des GdR SDSE et ME²MS

Originalité et points forts de l'opération SMM des GdR SDSE GdR ME²MS

Structuration de l'opération SMM du GdR ME²MS

Rayonnement de l'opération SMM des GdR SDSE GdR ME²MS

Annexe « opération SMM des GdR »

<http://www.univ-lille1.fr/web-smm.htm>

Présentation de l'opération SMM des GdR SDSE et ME²MS

Contexte — L'opération SMM (Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs) a débuté dans le cadre de l'Atelier commande (responsable B. de Fornel) du GdR SDSE (Sûreté et Disponibilité des Systèmes Electriques, responsable J. P. Rognon, 1998-2001). Elle constitue actuellement l'une des 5 opérations du groupe thématique "Système" (responsable L. Loron) du GdR ME2MS (Maîtrise de l'Energie Electrique du Matériau au Système, responsable F. Bouillault, 2002-2005).

Objectif — Cette opération vise la caractérisation et la commande des systèmes composés de plusieurs machines et / ou plusieurs convertisseurs. Ces systèmes sont caractérisés par des nœuds énergétiques appelés "couplages" qui ont pour rôle de répartir l'énergie selon plusieurs chaînes. Cette distribution d'énergie vise principalement à réduire les contraintes des diverses composantes (segmentation de puissance).

Démarche — De nombreux systèmes électriques sont commandés comme des systèmes autonomes que nous qualifieront de systèmes monomachines monoconvertisseurs. Cette approche a l'inconvénient de négliger les couplages inhérents au partage de ressource, qui sont cependant de plus en plus fréquents et de plus en plus forts. La prise en compte des couplages passe par une approche globale de l'ensemble des dispositifs électriques connectés à un même bus d'alimentation. Le système global est alors défini par la dénomination système multimachine multiconvertisseur (SMM). Il est composé de sous-systèmes couplés, qui vont interagir entre eux. Un système multimachine multiconvertisseur peut, par exemple, se décomposer en sous-systèmes monomachines monoconvertisseurs, mais avec des relations de couplage fortes. L'analyse de ces systèmes multimachines multiconvertisseurs doit prendre en compte les couplages inhérents à chaque structure, afin de définir une commande globale appropriée le cas échéant.

Originalité et points forts de l'opération SMM des GdR SDSE et ME2MS

Le groupe de travail a défini un vocabulaire spécifique à ces systèmes, où la notion de couplage est centrale. Un formalisme de représentation a été développé afin d'offrir une vision synthétique mettant en avant les couplages. De plus, des règles de commande ont été proposées pour la prise en compte des divers couplages. Ce travail commun a pu être réalisé lors de réunion, mais surtout de séminaires annuels de deux jours (SMM'98, SMM'99, SMM'00, SMM'01 et SMM'02). D'autre part des stages de 15 jours de doctorant ont permis de collaborations ponctuelles entre laboratoires, pour appliquer les principes développés sur des applications ciblées [PIERQUIN 00], [MARTIN 02] [VIDAL 03b]. Enfin, l'originalité des travaux s'est concrétisée par trois publications dans des revues [SMM 00], [SMM 03], [SMM-04] et trois communications à des conférences internationales [SMM 00b], [SMM 01], [SMM 02].

Structuration de l'opération SMM du GdR ME2MS

Cette opération est constituée de 5 laboratoires partenaires :

- le GREEN (Groupe de Recherche d'Electrotechnique et d'Electronique de Nancy), B. Davat (PU INP Loraine), J. P. Martin (Doctorant INP Loraine), F. Meibody-Tabar (PU INP Loraine), S. Pierfederici (MdC INP Loraine) H. Razik (MdC HDR Université Nancy), travaux sur les machines multi-enroulements (machines synchrones, et asynchrones doubles étoiles, machines multi-étoiles...) et sur les convertisseurs en parallèle.

- le L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille), A. Bouscayrol (MdC Université de Lille 1), S. Charlemagne (doctorant Université de Lille 1), Ph. Delarue (MdC Polytech' Lille), J. P. Hautier (PU ENSAM Lille), X. Kestelyn (doctorant Université de Lille 1) E. Semail (MdC ENSAM Lille), travaux sur des convertisseurs multi-bras (onduleurs 4 ou 5 bras pour deux machines), sur la traction électrique (anti-patinage...) et sur les machines polyphasées.

- LEEI (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de Toulouse), B. de Fornel (PU INP Toulouse), M. Piertzak-David, (PU INP Toulouse), P. Vidal (doctorant INP Toulouse), travaux sur la traction

ferroviaire notamment sur les problèmes de perturbation mécanique (broutement, patinage, commandes maître-esclave...), et sur la machine asynchrone double alimentation

- SATIE (Systèmes et Applications de Traitement de l'Information et de l'Energie, de Cachan), J. P. Louis (PU ENS Cachan), E. Monmasson (MdC Cergy-Pointoise), V. de Oliveira (Doctorant ENS Cachan), travaux sur les différentiels électriques avec machines asynchrones (diverses associations...) et les réseaux de bord d'avion.

- le GE44 (Pôle Atlantique de Génie Electrique), M. F. Benkhoris (MdC à Polytech' Nantes), E. Robert-Dehaut (doctorant Polytech' Nantes), travaux sur les machines synchrones double étoile et pentaphasée (propulsion navale).

Rayonnement de l'opération SMM des GdR SDSE et ME2MS

Ce bilan fait état de la production scientifique de l'opération depuis sa création en juin 1998. Les publications et communications sur le thème et propres à chaque laboratoire ne sont pas indiquées.

11 thèses de doctorat

- doctorat de N. Moubayed (GREEN) sur les machines multi-étoiles [MOUBAYED 99],
- doctorat de E. Semail (L2EP) sur l'étude des machines polyphasées [SEMAIL 00],
- doctorat de J. Belhadj (LEEI) sur l'observation pour SMM [BELHADJ 01],
- doctorat de R. Ghosn (LEEI) sur la machine asynchrone double alimentation [GHOSN 01],
- doctorat de D. Hadiouche (GREEN) sur la machine asynchrone double étoile [HADIOUCHE 01],
- doctorat de B. Vulturescu (L2EP) sur la commande à modèle de comportement pour SMM [VULTURESCU 02],
- doctorat de J. Pierquin (L2EP) sur la commande d'un véhicule électrique bi-moteur [PIERQUIN 02],
- doctorat de R. Peña-Eguiluz (LEEI) sur la commande d'un système de traction ferroviaire [PEÑA 02].
- doctorat de J. P. Martin (GREEN) sur la machine asynchrone pentaphasée [MARTIN 03].
- doctorat de X. Kestelyn (L2EP) sur la commande des machines polyphasées [KESTELYN 03],
- doctorat de S. Charlemagne (L2EP) sur la commande d'enroulement de bande [CHARLEMAGNE 03],

Organisation d'une session invitée

"MMS invited session" organisation d'une session orale invitée lors d'ElectrIMACS'2002 (Montréal), dans le cadre de l'opération SMM du GdR (6 articles invités) :

- article du GdR sur une application de traction ferroviaire (GREEN, L2EP, LEEI et LESiR-SATIE), [SMM 02]
- article sur une machine à double rotor (Université de Vienne, Autriche) [SCHROEDL 02],
- article sur l'injection d'harmonique pour machine hexaphasée (Université du Wisconsin, Etats Unis) [LYRA 02],
- article sur la commande de machine asynchrone double alimentation (Université de Beyrouth et LEEI) [GOSHN 02],
- article sur des structures de répartition de tension pour supercondensateurs (EPF Lausanne, Suisse) [BARRADE 02],
- article sur l'alimentation d'une machine pentaphasée (GREEN-L2EP) [MARTIN 02].

3 Revues Internationales communes

- Mathematics and Computers in Simulation (GE44, GREEN L2EP, LEEI et LESiR, à paraître en 2004), [SMM 04],
- RIGE (GREEN, L2EP, LEEI et LESiR, octobre 2003) [SMM 03a],
- EPJ Applied Physics (GREEN, L2EP et LEEI, May 2000) [SMM 00a].

6 Communications communes Internationales avec comité de lecture

- ICEM'2002, Bruges (Belgique) (GE44-L2EP),
- ElectrIMACS'2002, Montréal (GE44, GREEN, L2EP, LEEI, LESiR),
- ElectrIMACS'2002, Montréal (GREEN-L2EP),
- EPE'2001, Graz (Austria) (GREEN, L2EP, LEEI, LESiR),
- EPE-PEMC'2000, Kosice (Slovak Republic) (L2EP - LEEI),
- IEEE-IAS'2000, Roma (GREEN, L2EP, LEEI),

35 Communications à des Journées Scientifiques avec actes

- SDSE'2001, Lyon (GREEN, L2EP, LEEI, LESiR),
- SDSE'2000, Lyon (GREEN, L2EP, LEEI),
- 33 communications aux journées scientifiques avec actes que constituent les séminaires SMM'98, SMM'99, SMM'00, SMM'01 et SMM'02.

Annexe « Transfert pédagogique »

Application de la REM en enseignement

Formations concernées et contenus

Annexe « Transfert pédagogique »

<http://www.univ-lille1.fr/l2ep/commande/smm-tp.htm>

Cette annexe a pour objectif de montrer les implications pédagogiques issues des travaux du thème Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs. Les diverses formations effectuées visent à former les étudiants à des méthodes de modélisation et de commande des systèmes tant simples que complexes. On peut noter que cette démarche n'est autre que le prolongement de celle associée au GIC, qui est diffusée dans les formations lilloises depuis de nombreuses années par les membres de l'équipe Commande du L2EP.

Application de la REM en enseignement

Démarche générale — Elle repose sur une modélisation tant système (synthétique, principe de l'interaction), physique (entités associées à des éléments physiques, principe de la causalité), qu'énergétique (conversion, stockage et dissipation d'énergie).

Pour répondre à ces divers critères, des outils de représentation (relativement) fine (équations mathématiques, Graphe Informationnel Causal, GIC...), et de représentation globale (Représentation Energétique Macroscopique, REM) sont utilisés. Ces diverses représentations sont ainsi interconnectées, pour offrir des niveaux de modélisation différents en fonction des besoins. On obtient ainsi une modélisation multi-niveaux (macromodèles).

Le système étant bien décrit, une structure de commande (Structure Maximale de Commande, SMC) se déduit naturellement de la REM selon le principe de l'inversion de la fonctionnalité physique : " pour produire le bon effet, il faut imposer la bonne cause ".

Intérêt pédagogique de la démarche — La démarche proposée doit permettre de développer l'esprit de synthèse. Elle s'insère logiquement dans l'alternance entre un apprentissage de type analyse et de type synthèse.

La description macroscopique (REM par exemple) se focalise en effet sur la fonctionnalité globale de chacun des éléments constitutifs du système considéré (phase de synthèse). La description interne de ces éléments implique une étude des lois de la physique qui les régissent (phase d'analyse).

La démarche proposée doit alors permettre de bien :

- modéliser un système sans contresens physique, en vue de l'analyser et de le simuler,
- commander un système en accord avec les lois physiques qui le régissent.

Acteurs impliqués — Les acteurs du thème SMM sont bien sûr au cœur de ce transfert pédagogique. Bien évidemment d'autres personnes se sont impliquées dans ce sens lors des diverses formations effectuées. Les principaux initiateurs de la diffusion de cette démarche sont :

- Alain Bouscayrol (MdC L2EP-USTL, coordinateur du thème SMM)
- Philippe Delarue (MdC L2EP-Polytech'Lille, coordinateur de l'axe couplage électrique du thème SMM)
- Jean-Paul Hautier (PU L2EP-ENSAM, Directeur du L2EP, initiateur du GIC),
- Eric Semail (MdC, L2EP-ENSAM, coordinateur de l'axe couplage magnétique du thème SMM)

Formations concernées et contenus

Divers fichiers liés à la démarche REM et SMM (articles libres de droits, présentations Powerpoint, programmes de simulation, extraits de photocopiés) sont téléchargeables sur la page Internet « transfert pédagogique » du thème SMM : <http://www.univ-lille1.fr/l2ep/commande/smm-tp.htm>

— Formations régulières —

Maitrise EEA (Université de Lille 1)

- Module "Commande des modulateurs d'énergie" (option EdP, 12h cours, 12h TD, 8h TP, A. Bouscayrol, F. Giraud, Y. Le Menach) : initiation à la modélisation par REM et à la commande par inversion sur des exemples simples (métro VAL à MCC).

Le plan du cours est disponible sur la page Internet.

2ème année IMA (Polytech'Lille)

- TP "Actionneurs à vitesse variable" (tronc commun, 12h TP, A. Benabou, A. Bouscayrol, S. Clenet, Ph. Delarue) : initiation à la variation de vitesse via la REM.

L'introduction du polycopié de TP est disponible sur la page Internet.

- TP "Variation de vitesse" (option EdP, 16h TP, A. Bouscayrol) : commande d'actionneurs à vitesse variable : TP1 Modélisation, TP2 Commande par inversion TP3 Synthèse de commande TP4 Mise en œuvre.

L'introduction du polycopié et certains énoncés de TP sont disponibles sur la page Internet.

DESS GR2E (Gestion de Réseaux d'Energie Electrique) (Université de Lille 1)

- Module "Modélisation et commande des systèmes énergétiques" (16h de cours, 20h de séminaires, 24h de Bureau d'étude, A. Bouscayrol, Ph. Delarue, F. Giraud, E. Semail, J. N. Verhille).

Le cours passe notre démarche en revue, des premières notions de systémique à la structure maximale de commande, en passant par le GIC et la REM.

Les séminaires correspondent à diverses applications industrielles : métro VAL, FACTS pour la gestion des réseaux électriques, propulsion navale et système éolien.

Le bureau d'étude est consacré à la modélisation et la commande de divers systèmes par simulation sous le logiciel Matlab- Simulink™.

Le plan du cours, le plan des séminaires, la présentation du meilleur BE 2003 sont disponibles sur la page Internet.

DEA Génie Electrique (Université de Lille 1)

- Cours "Commande des systèmes complexes" (8h de cours, A. Bouscayrol)

Le cours est basé sur la REM et la SMC et termine par l'extension aux SMM.

Le plan du cours est disponible sur la page Internet.

On peut noter qu'un cours sur le GIC existe en DEA depuis de nombreuses années.

Préparation à l'Agrégation GE/PA (Université de Lille 1)

- Cours "Commandes dynamiques des machines électriques" (16h de cours 4h TD, 4h TP, A. Bouscayrol, F. Giraud)

La commande des machines est abordée selon les principes de causalité et d'inversion de modèle. Un TD de simulation sous Matlab-Simulink™ illustre le cours sur un système de traction. Un TP de commande analogique de MCC illustre la mise en œuvre de ces concepts.

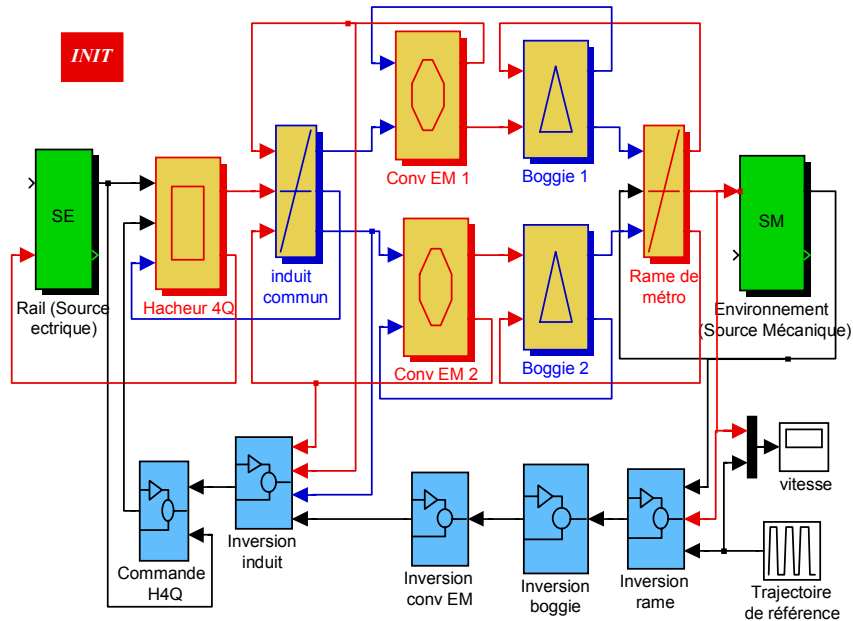


Fig. 1 : Programme Matla-Simulink™ d'un système de métro (TP de synthèse des correcteurs)

— **Formations ponctuelles** —

Diverses formations ont fait appel à nos services pour proposer des séminaires. En voici quelques uns. Nous avons aussi participé à la mise en place de la formation continue "Commande d'actionneurs électriques" de l'ENSAM, axée sur le GIC, la simulation avec Matlab-Simulink™ et la commande avec carte dSPACE™ (collaboration L2EP - Scientific Software, gérée par X. Guillaud).

Séminaire interne à Siemens Transportation Systems

- "REM du VAL 206" (3h30 de séminaire, février 2000, A. Bouscayrol, Ph. Delarue)

Suite à des premiers travaux avec J. N. Verhille, un séminaire a été réalisé en interne à STS. Il a présenté les outils GIC et REM, avant de proposer la REM et la commande déduite du métro VAL 206.

Programme Académique de Formation (Rectorat de Lille)

- "Commandes des actionneurs électriques" (4h de cours, 8h de BE, novembre 2001, A. Bouscayrol)

Consacré à la formation des enseignants du secondaire, ce PAF a porté sur le rappel des concepts de commande de machine (via les concepts de causalité et d'inversion). Le BE a concerné la simulation d'un système de traction modélisé par REM (simulation sous Matlab-Simulink™).

DEA Génie Electrique (ENI de Tunis)

- "GIC et REM" (8h de séminaire, CMCU, novembre 2001, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, puis novembre 2002, E. Semail)

Ce séminaire présente le GIC, la commande par principe d'inversion et la REM, en s'appuyant sur divers exemples industriels.

3^{ème} année ENSAM CER de Lille

- "Commande d'un système de traction électrique" (6h de séminaire, option transport, février 2002, A. Bouscayrol)

Première partie sur la REM et l'application à un système de transport. Deuxième partie sur l'analyse des divers organes de commande en simulation avec Matlab-Simulink™.

Séminaire SMM, Université de Québec Trois Rivières

- "Formalismes pour SMM et applications" (2h de séminaire, chapitre « Power Electronics » de la section St Maurice de l'IEEE, juin 2003, A. Bouscayrol),

Première partie sur la REM et la SMC. Deuxième partie sur les diverses applications : éolien, transport ferroviaire, véhicule électrique.

Annexe « Plate-forme expérimentale SMM du L2EP »

Présentation de la plate-forme SMM

Validations réalisées sur la plate-forme SMM

Paramètres du système émulé sur la plate-forme

Annexe « Plate-forme expérimentale SMM du L2EP »

Présentation de la plate-forme SMM

La plate-forme expérimentale SMM a été développée pour assurer une validation expérimentale du plus grand nombre de travaux liés à la thématique SMM du laboratoire. Ainsi diverses sources de financement ont convergé pour réaliser cet ensemble polyvalent. La mise en place de cette plate-forme a fait l'objet de nombreux développements de la part de l'équipe technique du L2EP Lille (J. J. Franchaud, M. Amberg et O. Ferla), des permanents (notamment Ph. Delarue) et doctorants de l'opération SMM, ainsi que de projets d'étudiants.

Environnement matériel (Fig. 1) — La plate-forme dispose de deux convertisseurs statiques de tension possédant chacun 6 cellules de commutation à IGBT avec diode anti-parallèle. Ils disposent tous deux d'un redresseur à diode en entête et d'un pont capacitif. Une carte de commande rapprochée réalise l'isolation entre puissance et commande. Des cartes de mise à niveau de tension et gestion des signaux de défaut ont été développées.

Deux premiers bancs machines de 1 kW sont disponibles : machines à courant continu à aimants permanents et machines asynchrones à cage avec capteurs de flux intégrés. Un banc machine synchrone pentaphasée à aimants permanents de 3 kW permet de valider les concepts sur les machines polyphasées. Deux derniers bancs de 1,5 kW comportent des machines à courant continu à excitation séparée, des machines synchrones à excitation séparée et des machines asynchrones à rotor bobiné.

Des interfaces d'acquisition ont été réalisées pour centraliser les mesures (tensions, courants et vitesses), les mettre à l'échelle et les filtrer pour leur renvoi sur le boîtier d'acquisition CLP1103. Un boîtier de sécurité gère les arrêts d'urgence logiciels et matériels (coup de poing).

Un PC de développement et de commande contient une carte dSPACE 1103. Cette dernière possède un processeur maître, un processeur esclave, 7 circuits MLI, divers convertisseurs A/D et D/A ect.

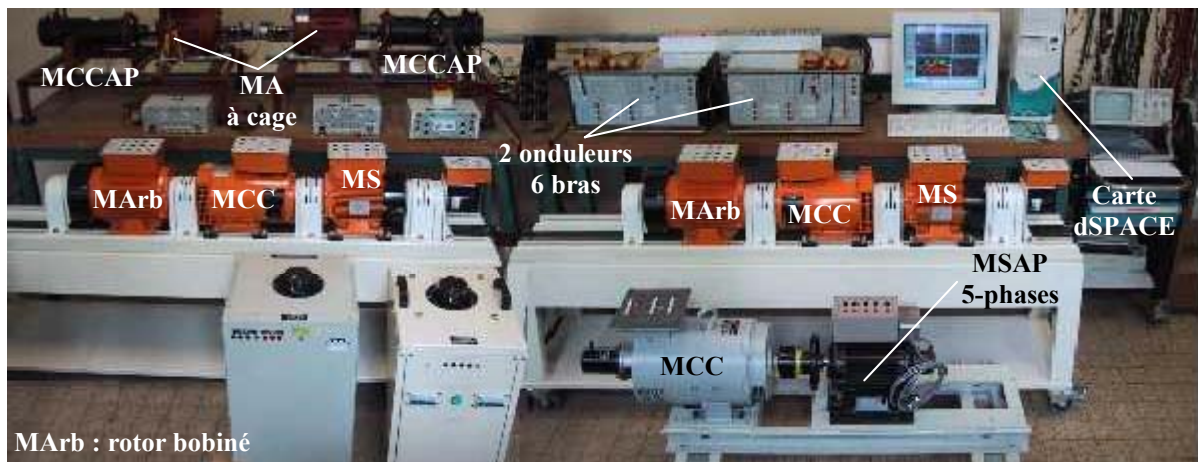


Fig. 1 : Ensemble des dispositifs disponibles de la plate-forme SMM du L2EP

Environnement logiciel — L'environnement de développement choisi est Matlab™ 6.0 avec son interface graphique Simulink. Ce choix permet de passer directement de la simulation à l'expérimentation par suppression de la partie puissance et ajout des interfaces de mesures et de commande (Fig. 2). Le code est alors compilé par Matlab (Real Time Workshop) puis par dSPACE (Real Time Interface) pour obtenir directement le code « machine ». On parle alors de prototypage rapide. La programmation du code Simulink se fait directement à l'aide de la REM tant en reprenant sa structure que ses couleurs.

La gestion temps réel se fait avec le logiciel ControDesk de dSPACE (Fig. 3) qui permet un affichage temps réel de toutes les variables et une modification en temps réel des divers paramètres.

L'ensemble (REM, Simulink, dSPACE) permet une efficacité (pas d'erreur de recodage), une rapidité (pas de recodage nécessaire) et une flexibilité (d'une manipulation à une autre) fondamentales pour le développement de commandes associées à l'opération SMM.

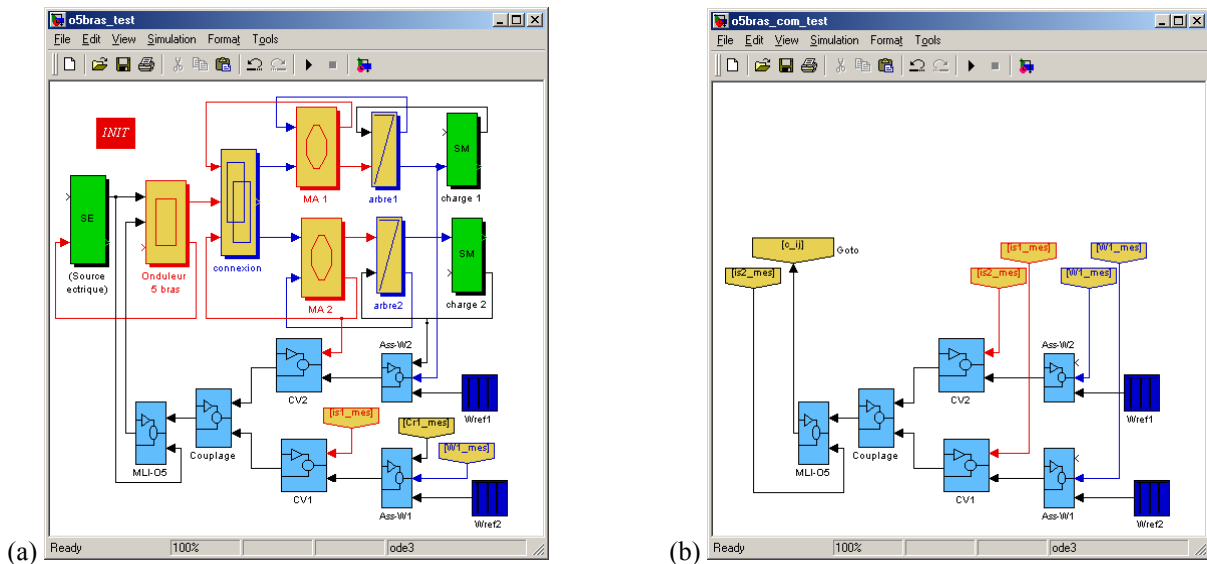


Fig. 2 : Modèle Simulink pour la simulation (a) et pour la commande temps réel (b)

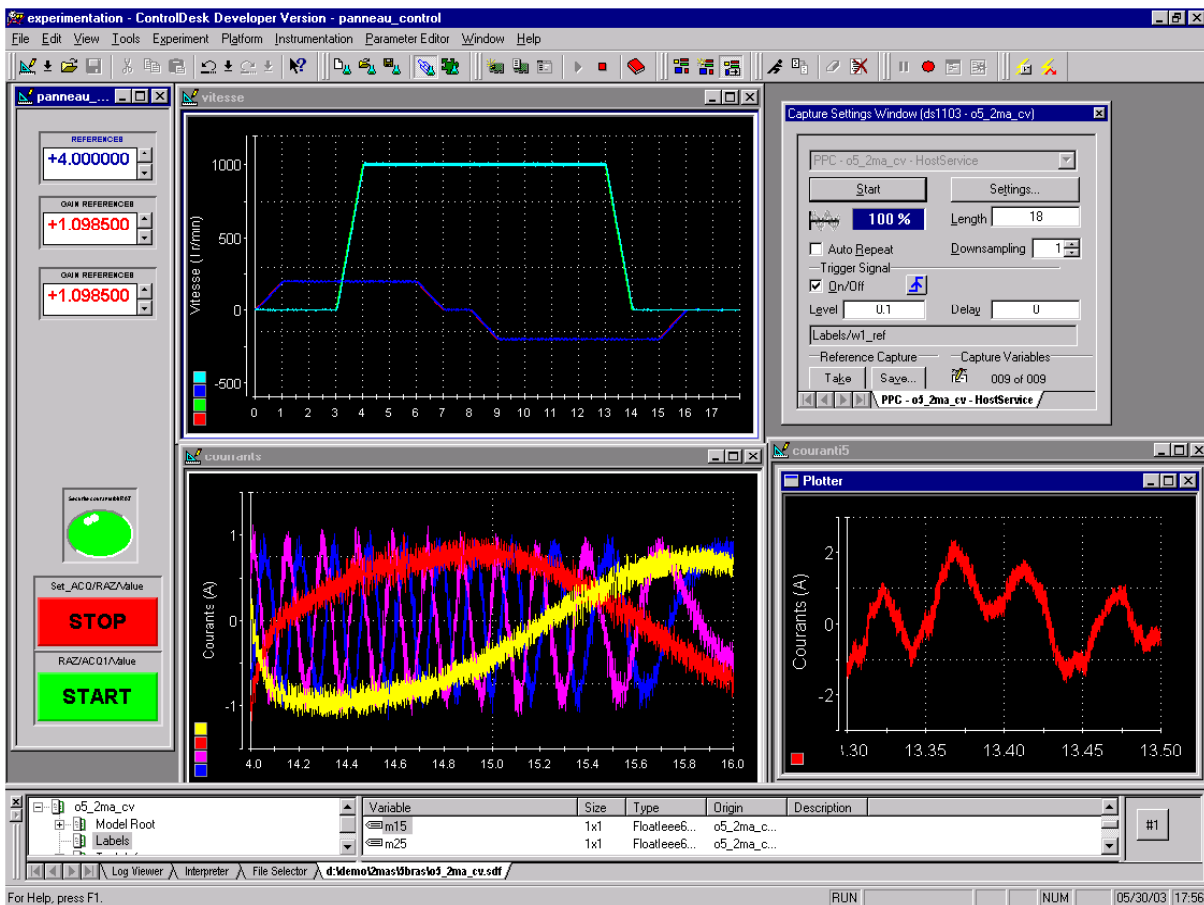


Fig. 3 : Panneaux de gestion temps réel Control Desk

Validations réalisées sur la plate-forme SMM

Nous présentons une liste non-exhaustive des travaux réalisés sur la plate-forme de puis la mise en service de la carte dSPACE et des principaux éléments de la plate-forme en septembre 2001.

Commande à modèle de comportement — L'application de la commande à modèle de comportement aux SMM a fait l'objet de la thèse de B. Vulturescu [VULTURESCU 02] en co-tutelle avec l'Université Polytechnique de Bucarest. Ces travaux ont été validés sur un ensemble bi-moteur.

Machines polyphasées — Les concepts de machines fictives et des commandes déduites ont tout d'abord été validés sur une machine asynchrone triphasée sans neutre relié, puis sur une machine synchrone pentaphasée lors de la thèse de X. Kestelyn [KESTELYN 03].

Emulateur éolien — Le premier émulateur issu de la REM a concerné un système éolien de 1 kW lors du projet de fin d'étude de Polytech Lille de J. Gervasi et C. Toulouse [GERVASI 03]. Une machine à courant continu a émulé la turbine pour entraîner une machine asynchrone en mode générateur.

Onduleurs multi-bras — Le principe de la commande générique multi-bras développée par Ph. Delarue [DELARUE 03a] a été validé sur des charges équilibrées et déséquilibrées de 2, 3, 4, et 5 phases. Ce principe a été étendu à la commande d'un onduleur 5 bras pour deux machines asynchrones [DELARUE 03b] et d'un convertisseur AC-AC à 5 bras pour une machine asynchrone avec absorption sinusoïdale [FRANÇOIS 00] (collaboration ABB Finlande).

Emulateur de système textile — L'étude d'un système d'enrouleur et dérouleur de bande textile a fait l'objet de la thèse de S. Charlemagne [CHARLEMAGNE 03b] en co-tutelle avec l'ENI de Tunis. Le couplage dû à la bande a été émulé par la commande de deux machines à courant continu, l'entraînement étant assuré par deux machines asynchrones à cage.

Machine asynchrone à double alimentation — Une commande d'une machine double alimentation a fait l'objet d'un stage P. E. Vidal, doctorant du LEEI, dans le cadre de l'opération SMM du GdR ME²MS [VIDAL 03b]

Système à couplage multiple pour démonstration — Un système à couplage multiple composé de deux machines à courant continu à excitation séparée (avec gestion du flux) et induit en série et de deux machines asynchrones alimentées par un onduleur 5 bras a été utilisé par émuler un système de traction de véhicule électrique, dans le cadre de ce mémoire d'HDR

Système de traction ferroviaire — Un système de traction ferroviaire avec 4 machines à courant continu dont les étaient en série a permis de valider le concept de commande pondérée [BOUSCAYROL 03b].

Paramètres du système émulé sur la plate-forme

Paramètres des machines à courant continu

- tension nominale d'induit :	$(U_{ind})_{nom} = 200 V$
- courant nominal d'induit :	$(I_{ind})_{nom} = 10 A$
- tension nominale d'inducteur :	$(U_{exc})_{nom} = 200 V$
- courant nominal d'inducteur :	$(I_{exc})_{nom} = 0,5 A$
- vitesse de rotation nominale :	$N_{nom} = 1500 tr/min$
- puissance mécanique nominale :	$P_{nom} = 1,5 kW$
- résistance d'induit :	$R_{ind} = 0,1 \Omega$
- inductance d'induit :	$L_{ind} = 1 mH$
- résistance d'inducteur :	$R_{exc} = 400 \Omega$
- inductance d'inducteur :	$L_{exc} = 40 H$
- constante de couplage électro-magnéto-mécanique :	$k_{mcc} = 1,58 Nm/A^2$
- constante de flux :	$k_{\phi} = 1,6 Wb/A$

Paramètres des machines asynchrones :

- tension statorique nominale (triangle) :	$(V_s)_{nom} = 220 V$
- courant statorique nominal (triangle) :	$(I_s)_{nom} = 3,8 A$
- fréquence statorique nominale :	$(f_s)_{nom} = 50 Hz$
- vitesse de rotation nominale :	$N_{nom} = 1380 tr/min$
- puissance mécanique nominale :	$P_{nom} = 1,5 kW$
- rendement nominal :	$\eta_{nom} = 0,78$
- nombre de paire de pôles :	$p = 2$
- facteur de puissance nominal :	$\cos\phi = 0,77$
- résistance statorique :	$R_s = 6,97 \Omega$
- résistance rotorique :	$R_r = 0,85 \Omega$
- inductance cyclique statorique :	$L_s = 280 mH$
- inductance cyclique rotorique :	$L_r = 51 mH$
- mutuelle inductance cyclique :	$M_{sr} = 115 mH$

Paramètres de l'arbre équivalent :

- coefficient de frottement visqueux :	$f_{arb} = 2,6 \cdot 10^{-3} Nms$
- moment d'inertie :	$J_{arb} = 19,1 \cdot 10^{-3} Kgm^2$
- couple sec :	$C_{sec-arb} = 0,4 Nm$

Paramètres du véhicule électrique

- vitesse nominale :	$(v_{ve})_{nom} = 20 km/h$
- rayon moyen des roues :	$R_{roue} = 0,27 m$
- rapport de réduction :	$k_{red} = 4,24$
- masse nominale :	$M_{nom} = 150 kg$
- largeur :	$l_{ve} = 1 m$
- surface frontale :	$S_{front} = 2 m^2$
- coefficient de pénétration dans l'air :	$C_x = 0,35$
- densité de l'air :	$\rho = 1,293 kg/m^3$

Les paramètres du véhicule électriques ont été déduits d'un véhicule utilitaire de 1,5 kW de la ville de Paris (<http://www.clubduve.org/pages/general.html>).

Type: Triporteur
 Constructeur : CARRE GALOPIN
 Modèle : TLVE
 Moteur : CC à excitation séparée
 Puissance kW : 1,5
 Tension Volts : 24
 Batteries : PLOMB GEL
 Poids kg : 140
 Charge utile kg : 100
 Nombre de places : 1
 Vitesse max km/h : 25



Annexe « Différentes représentations d'un système »

Système étudié et modèle mathématique

Représentation Energétique Macroscopique

Représentation par GIC

Représentation par Schéma-bloc

Représentation par Bond-Graph

Représentation d'état

Annexe « Différentes représentations d'un système »

Cette annexe a pour objectif de donner diverses représentations d'un même système, la traction du VAL 206 simplifié. Une modélisation commune est préalablement proposée. Les différentes représentations auront donc comme objectifs d'organiser cette modélisation mathématique initiale.

Système étudié et modèle mathématique

Le système considéré correspond à la traction simplifiée du métro VAL 206 (Fig. 4), qui a été l'exemple privilégié du chapitre II. Les différentes variables, ainsi que les principales équations de modélisation sont rappelées afin de constituer la base des diverses représentations proposées dans cette annexe.

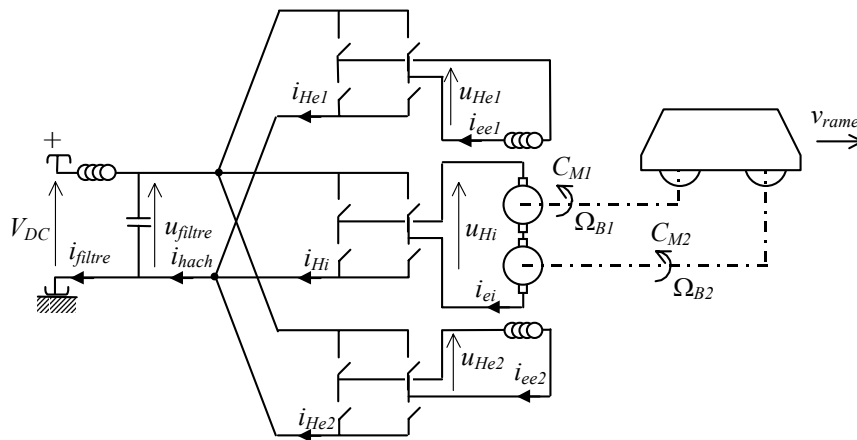


Fig. 4 : Synoptique de la partie électrique de la traction du VAL 206

Filtre d'entrée :

$$\begin{cases} C \frac{d}{dt} u_{filtre} = i_{filtre} - i_{hach} \\ L \frac{d}{dt} i_{filtre} = V_{DC} - u_{filtre} \end{cases} \quad (1)$$

Mise en parallèle du filtre :

$$\begin{cases} u_1 = u_2 = u_3 = u_{filtre} \\ i_{hach} = i_{He1} + i_{He2} + i_{Hi} \end{cases} \quad (2)$$

Hacheurs :

$$\begin{cases} u_{Hk} = m_{Hk} u_{filtre} \\ i_{Hk} = m_{Hk} i_{ek} \end{cases} \text{ avec } m_{Hk} = c_{11} - c_{21} \text{ et } \begin{cases} k \text{ n}^\circ \text{ du Hacheur} \\ i \text{ n}^\circ \text{ de la cellule de commutation} \\ j \text{ n}^\circ \text{ de l'interrupteur} \end{cases} \quad (3)$$

Enroulements des machines :

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = u_{Hk} - e_k \quad (4)$$

Mise en série des induits de machines :

$$\begin{cases} i_1 = i_2 = i_{ei} \\ e_{ei} = e_{ei1} + e_{ei2} \end{cases} \quad (5)$$

Conversion électromécanique :

$$\begin{cases} C_M = k_M i_{ee} i_{ei} \\ e_e = k_M i_{ee} \Omega_B \end{cases} \quad (6)$$

Bogie :

$$\begin{cases} \Omega_{Bk} = m_{bogk} v_{rame} \\ F_{Bk} = m_{bogk} C_{Mk} \end{cases} \quad (7)$$

Couplage de la rame :

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = v_{rame} \\ F_{tot} = F_{B1} + F_{B2} \end{cases} \quad (8)$$

Châssis :

$$M \frac{dv_{rame}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad (9)$$

Environnement :

$$F_{res} = a + bv_{rame}^2 \quad (10)$$

Représentation Énergétique Macroscopique

La construction de la REM du système est détaillée dans le chapitre III. On peut remarquer la mise en évidence des différents couplages entre chaînes de conversion d'énergie (Fig. 5).

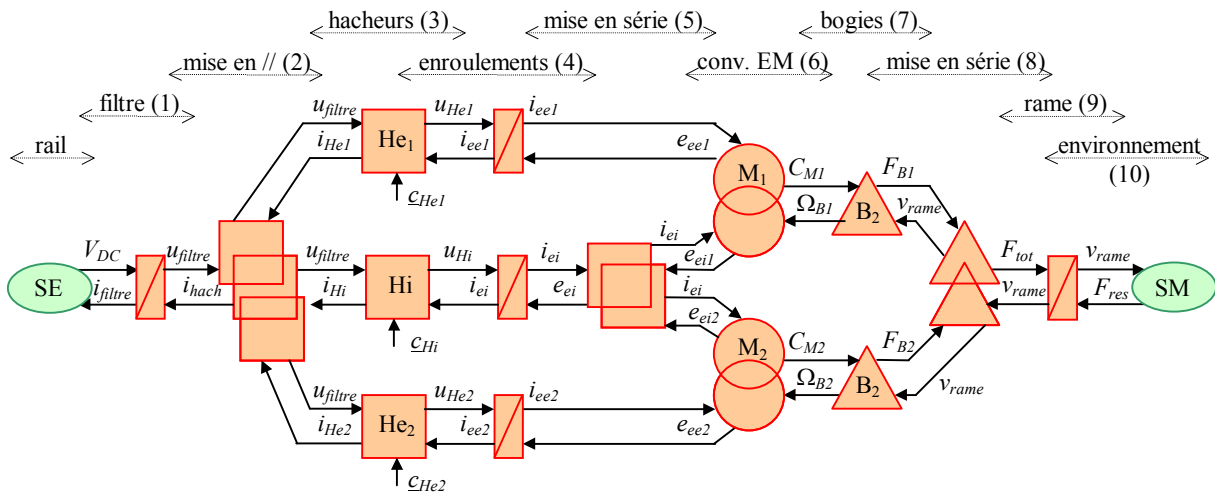


Fig. 5 : REM du métro VAL 206 simplifié (avec le numéro des équations associées)

Représentation par Graphe Informationnel Causal

La représentation par GIC (Fig. 6) a été déduite de la REM. Cette représentation a été validée par X. Guillaud, spécialiste du GIC [GUILLAUD 01]. On peut noter une description plus détaillée des relations de cause à effet, mais une représentation moins explicite des couplages.

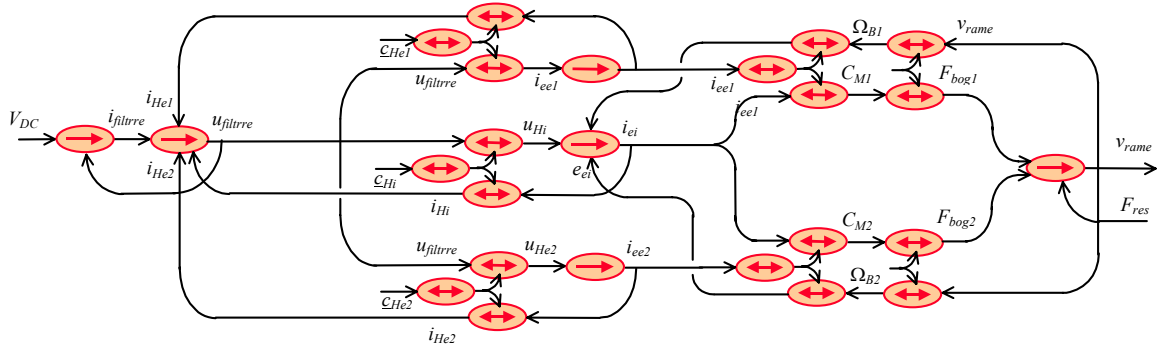


Fig. 6 : Représentation par GIC du métro VAL 206 simplifié

Représentation par schéma-blocs

La représentation par schémas blocs (Fig. 6) a été déduite des fonctions de transfert des équations. La transformation de Laplace a été utilisée, et des hypothèses supplémentaires ont été posées : modélisation des convertisseurs statiques aux valeurs moyennes, linéarité des diverses composantes. Cette description offre des informations qualitatives (gains, constantes de temps, signes des opérations...), mais le nombre de blocs et de liaisons la rend difficilement exploitable. De plus, les couplages sont noyés dans l'ensemble.

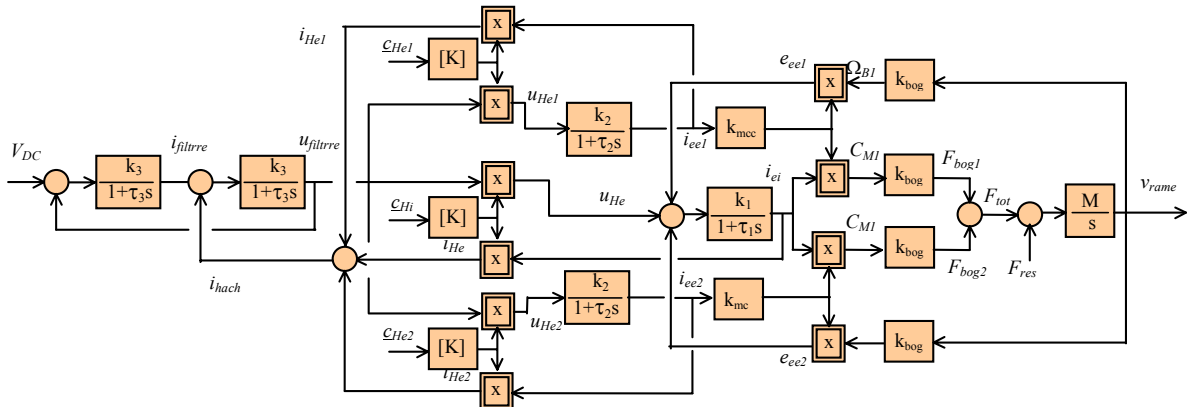


Fig. 7 : Représentation par schémas-blocs du métro VAL 206 simplifié

Représentation par Bond-Graphs

La représentation par Bond-Graph (Fig. 6) a été déduite de la REM. Cette représentation a été validée par G. Dauphin-Tanguy, spécialiste des Bond-Graph [DAUPHIN 99]. On peut noter une description plus détaillée des relations de cause à effet, avec la présence d'une causalité dérivée (L_{ind2}) pour exprimer la mise en série des inducts des machines à courant continu (la commande par inversion n'est alors plus possible). Les pertes sont bien mises en évidence au travers des éléments de type R . Si les couplages apparaissent, ils ne se différencient pas des jonctions de base (mise en série d'une résistance et d'une inductance par exemple).

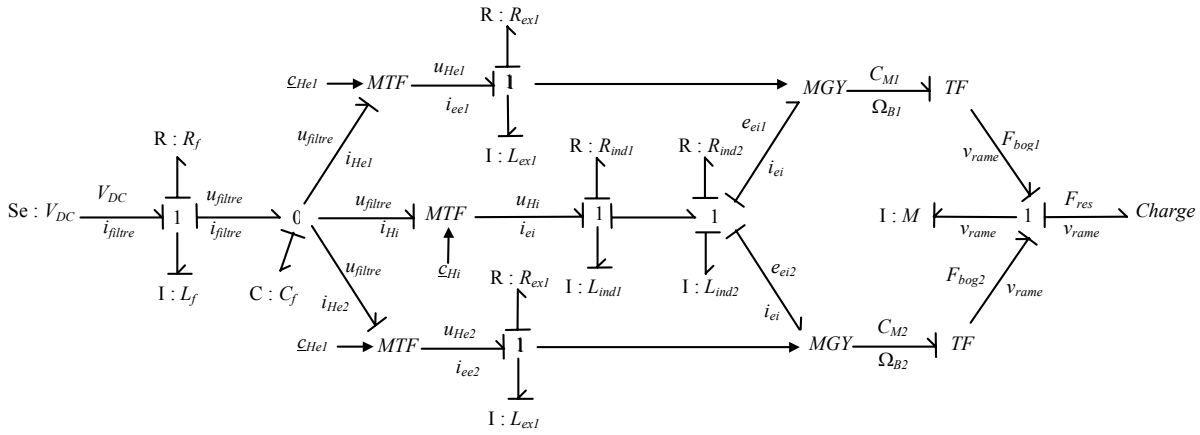


Fig. 8 : Représentation par Bond-Graph du métro VAL 206 simplifié

Représentation d'état

La représentation d'état a été déduite du modèle mathématique du système sans le filtre. Les hypothèses posées pour la représentation par fonctions de transferts sont reprises : linéarités des diverses composantes et modélisation aux valeurs moyennes des convertisseurs statiques. Les variables d'état choisies sont la vitesse de la rame, les courants d'excitation et le courant commun d'induit. La représentation est donnée sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{rame} \\ i_{ind} \\ i_{exc1} \\ i_{exc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{bog} k_{mcc} i_{ind} & k_{bog} k_{mcc} i_{ind} \\ 0 & -R_{ind} / L_{ind} & -\frac{k_{bog} k_{mcc}}{L_{ind}} v_{rame} & -\frac{k_{bog} k_{mcc}}{L_{ind}} v_{rame} \\ 0 & 0 & -R_{exc} / L_{exc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_{exc} / L_{exc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{rame} \\ i_{ind} \\ i_{exc1} \\ i_{exc2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m_{Hi} \\ m_{He1} \\ m_{He2} \end{bmatrix} V_{DC} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_{res}$$

$$v_{rame} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} v_{rame} \\ i_{ind} \\ i_{exc1} \\ i_{exc2} \end{bmatrix}$$

La représentation est très compacte et contient des informations qualitatives et quantitatives. Une analyse poussée devrait permettre de trouver les diverses caractéristiques du système. On peut remarquer que la matrice dynamique est non-linéaire. Cependant, cette représentation est purement fonctionnelle, et occulte, de fait, l'aspect structurel du système, notamment les couplages des chaînes de conversion.

Annexe « Curriculum Vitae »

Etat Civil

Activités pédagogiques

Activités scientifiques

Activités d'intérêt collectif

Production scientifique

Analyse de la production scientifique

Annexe « Curriculum Vitae »

Alain BOUSCAYROL

Etat Civil

Lieu et date de naissance : né le 11 juillet 1964 à Rodez (12 Aveyron)
Nationalité : Française
Situation Familiale : Marié, 2 enfants
Situation Militaire : Service National effectué en 89-91 au titre de la Coopération
Fonction actuelle : Maître de Conférences
Etablissement de rattachement : Université des Sciences et Technologies de Lille (Lille I)
Laboratoire de recherche : Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance
Adresse professionnelle : L2EP, Bât. P2, USTL, 59 655 Villeneuve d'Ascq cedex
Téléphone professionnel : 03-20-43-42-53
Courrier électronique : Alain.Bouscayrol@univ-lille1.fr
Serveur Internet SMM du L2EP : <http://www.univ-lille1.fr/l2ep/commande/eq-com-smm.htm>
Serveur Internet SMM du GdR : <http://www.univ-lille1.fr/l2ep/web-smm.htm>

Cursus

1996-2003 : Maître de Conférences à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (Lille I), rattaché en recherche au L2EP de Lille,
1994-1996 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'ENSEEIH - INP Toulouse, rattaché en recherche au LEEI de Toulouse,
1991-1994 : Thèse de Doctorat en Génie Electrique au LEEI de Toulouse, et Moniteur de l'Enseignement Supérieur à l'ENSEEIH - INP Toulouse (félicitations du jury),
1989-1991 : Enseignant VSN à l'ENSUT de Dakar, au département Génie Electrique (Service National au titre de la Coopération),
1988-1989 : DEA A-II-TS, option Informatique Industrielle, à l'INSA Toulouse (mention bien),
1987-1988 : DEA Electronique, option hyperfréquences, à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III),
1982-1987 : DEUG - Maîtrise EEA options Electronique et Automatique, à l'Université Paul Sabatier,
1982 : Baccalauréat, série C à Rodez (12).

Activités pédagogiques

Outre les enseignements classiques en Génie Electriques, les expériences acquises en recherche ont débouché sur du transfert pédagogique (voir Annexe « Transfert pédagogique »). Ainsi des manipulations pratiques ou bureaux d'étude ont été développés sur les applications liées au métro VAL, aux véhicules électriques ou aux systèmes éoliens. De plus, la « Représentation Energétique Macroscopique » développée au L2EP s'est intégrée dans les formations de DEA et de DESS, puis en Maîtrise EEA dans un module d'initiation.

1996-2003, Maître de Conférences à l'Université de Lille 1, UFR d'IEEA :

- Cours « Représentation Energétique Macroscopique (REM) » (DEA GE, 8 h année, depuis 2001 et DESS GR2E, 12 h année, depuis 2002),
- Séminaire en anglais sur les systèmes éoliens (DESS GR2E, 4 h année, depuis 2002),
- Cours d'initiation à la REM (Maîtrise EEA, 10 h année, depuis 2002),
- Cours de Commande de Machines (préparation à l'Agrégation de Physique et Electricité Appliquées et à celle de Génie Electrique, 12 h année, depuis 1998),
- Cours d'Electronique de Puissance (préparation au CAPET Génie Electrique, 12h année, depuis 1999),
- TD d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (Préparation CAPET Génie Electrique, Licence EEA, 1^{ère} année EUDIL, Maîtrise EEA, en moyenne 50 h année),
- TP d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance et de Commande (Maîtrise EEA, préparation au CAPES de Physique et Electricité Appliquées, 2^{ème} année EUDIL, en moyenne 60 h année),
- projets (DESS, EUDIL 2^{ème} et 3^{ème} années, Maîtrise EEA, en moyenne 3 projets par année)

Formations annexes :

- Séminaires sur le GIC et la REM, DEA de Génie Electrique de l'ENI Tunis (10 h, 2001),
- Participation à la formation continue sur la commande des actionneurs électriques, ENSAM CER de Lille (12 h année, 2000 et 2001),
- Séminaire sur la commande de systèmes de traction, filière transport, 3^{ème} année, ENSAM CER de Lille (8 h, 2002)
- Cours et BE sur la commande des systèmes électriques, plan académique de formation, Rectorat de Lille (12 h, 2000).

Responsabilités :

- animateur de l'option Electronique de Puissance la Maîtrise EEA depuis 1996,
- responsable des enseignements du DESS GR2E depuis 2002,
- responsable du module « Commande » du DESS GR2E depuis 2002.

Implications pédagogiques :

- mise en place des 4 cours dispensés, du séminaire en anglais et d'un polycopié sur la REM (2002),
- mise en place d'un BE de simulation sur la commande des systèmes en DESS GR2E avec E. Semail, et Ph. Delarue (2002),

- mise en place de TD d'initiation à l'Electronique de Puissance en Maîtrise EEA avec S. Clenet (2000),
- mise en place de TP de REM en Maîtrise EEA (2002, avec photocopié),
- mise en place de TP de vitesse variable à l'EUDIL 2^{ème} année avec S. Clenet et Ph Delarue (1999 avec photocopié),
- mise en place de TP de commande d'actionneur à l'EUDIL 2^{ème} année (2000, avec photocopié),
- rénovation des TD d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Maîtrise EEA (de 1997 à 2003, avec photocopié)
- rénovation des TP d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Maîtrise EEA avec T. Communal et S. Clenet (de 1996 à 2002, avec photocopié)

1991-1996, Moniteur puis ATER au département Electrotechnique-Automatique de l'ENSEEIHHT :

- BE (30h) et micro-projets d'Informatique Industrielle (3x30h, 2^{ème} année et DESS),
- TP d'Automatique (2x96h 1^{ère} année ingénieur, et 2x128h 2^{ème} année ingénieur),
- Micro-projet d'Electronique de Puissance (1x96h 1^{ère} année ingénieur)
- TP d'Automatique (2x96h 1^{ère} année ingénieur).

Implications pédagogiques :

- transfert "Recherche-Enseignement" d'une manipulation de commande de machine
- création d'un fascicule de projet en Informatique Industrielle 2^{ème} année,
- réorganisation des TP d'Automatique 1^{ère} année avec E. Monmasson (avec photocopié).

1989-1991, Enseignant en coopération, département Génie Electrique, ENSUT de Dakar :

- Cours de technologie des composants (2x25h 1^{ère} année DUT),
- TP d'Electronique (2x100h 1^{ère} année DUT, et 4x100h 2^{ème} année DUT),

Implications pédagogiques :

- responsable de TP de maquettes électroniques,
- réorganisation du cours de technologie pour l'électronique,
- mise en place des TP de maquettes électronique (avec photocopié),
- réorganisation des TP d'électronique de 2^{ème} année avec P. N'Diaye (avec photocopié).

Activités scientifiques

Les activités scientifiques sont organisées autour de la thématique « Systèmes Multi-machines Multi-convertisseurs » (SMM). L'expérience acquise m'a mené à coordonner la thématique SMM au sein du L2EP depuis 1998, d'animer le projet SMM au sein du GdR SDSE (1998-2001), puis du GdR ME²MS (2001-2005).

Activité au LEEI de Toulouse (1991-1996)

- thèse de doctorat sur la commande d'un système bi-moteur [O-1] sous la direction de Mme M. Pietrzak-David et du Pr. B. de Fornel : 2 revues [R-1], [R-2], 3 communications internationales [CI-1, 2 et 4], 1 communication nationale [CN-1], 1 brevet [B-1],
- travaux sur la commande de la machine asynchrone (ATER) : 1 revue [R-3], 2 communications internationales [CI-5 et 6],
- co-encadrement de deux DEA et d'un stagiaire ERAMSUS avec M. Pietrzak-David : M. Delabre [ED-1] (Observateur de flux, 1994), R. Bischoff [EP-1] (Discrétisation d'observateur de flux, 1994), E. Lefeuvre [ED-2] (Onduleur 4 bras, 1996) ; 1 communication internationale [CI-3],

Activités au L2EP de Lille (1996-2003)

- coordinateur du thème SMM de l'équipe commande du L2EP,
- thèmes personnels de recherche : formalismes REM et SMM, 3 revues [R-5, 10 et 11], 7 communications internationales [CI-8, 9, 10, 15, 17, 23 et 24], 1 communication nationale [CN-2], diverses journées scientifiques ; commande de systèmes éoliens (2 revues [R-8 et 12]),
- encadrement de 3 DEA : B. Vulturescu [ED-3] (observateur de flux, 1998, 2 communications internationales [CI-7 et 11], 1 communication nationale [CN-2]) ; C. Brocart [ED-4] (co-encadré avec A. Tounzi, modélisation d'un système éolien, 2001, 1 communication internationale [CI-22]) ; C. Toulouse [ED-5] émulateur d'un système éolien, 2003.
- co-encadrement (33%) de la thèse de cotutelles de B. Vulturescu [ET-1] avec le Pr. J. P. Hautier et le Pr. F. Ionescu : commande à modèle de comportement pour SMM ; 1 revue [R-6], 2 communications internationales [CI-12 et 18],
- co-encadrement (50%) de la thèse de J. Pierquin [ET-2] avec le Pr. J. P. Hautier : système multimachine pour véhicule électrique ; 3 communications internationales [CI-13, 18 et 21], 1 communication nationale [CN-4], diverses journées scientifiques,
- co-encadrement (33%) de la thèse de co-tutelle de S. Charlemagne [ET-3] avec le Pr. J. P. Hautier et I. Slama-Belkhodja : commande d'un enrouleur dérouleur de textile ; 1 communication internationale [CI-25], 2 communications nationales [CN-5 et 6],
- co-encadrement (33%) de la thèse industrielle de J. N. Verhille (en cours) avec le Pr. J. P. Hautier et P. J. Barre : commande SMM pour le métro VAL 206 ; 1 revue [R-9], 1 communication internationale [CI-28].

Collaborations nationales :

- collaboration avec le Laboratoire de Mécanique de Lille (LML) : modélisation d'une turbine éolienne ; 1 communication internationale [CI-22],

- animateur du projet SMM de thème « commande » du GdR-SDSE (1998-2001), regroupant le GREEN, le L2EP, le LEEI et le LESiR (voir Annexe «Opération SMM des GdR ») ; mise en place d'un vocabulaire et d'un formalisme de représentation ; 4 séminaires de travail et 2 stages de doctorant ; 2 revues communes [R-4 et 13] et 3 communications internationales communes [CI-13, 14 et 16].
- animateur de l'opération SMM du groupe thématique « Système » du GdR-ME²MS (2001-2005), regroupant le GE44, le GREEN, le L2EP, le LEEI, et SATIE (voir Annexe «Opération SMM des GdR ») ; mise en place d'un formalisme de commande ; 2 séminaires de travail et 1 stage de doctorant ; 2 revues [R-14 et 15] et 3 communications internationales communes [CI-19, 20 et 30].

Collaborations industrielles :

- collaboration avec ABB Finlande : travaux sur un convertisseur AC-AC à 5 bras ; 1 communication internationale [CI-15] (et 1 revue soumise),
- contrat avec Jeumont Industrie : logiciel de simulation du système éolien J48 ; 1 revue [R-12].
- collaboration avec Siemens Transportation Systems : modélisation par REM du VAL 206 ; séminaire interne sur le GIC et la REM ; thèse de collaboration sur la commande du VAL 206 ; 1 revue [R-9], 1 communication internationale [CI-28], 1 contrat avec co-encadrement de stagiaire de DESS [EP-5].

Collaborations internationales :

- collaboration avec le LSE de l'ENI de Tunis dans le cadre de la CMCU franco-tunisienne 2001-2003, n° 191001501911731 : 1 thèse de co-tutelle [ET-3] ; des interventions dans le DEA de Génie Electrique ; 1 communication internationale [CI-25] et 2 communications nationales [CN-5 et 6],
- collaboration avec l'Université Polytechnique de Bucarest : 1 thèse en co-tutelle [ET-1], 1 stage doctoral [EP-2] et 1 stage de fin d'étude ERASMUS [EP-3] ; 2 revues [R6 et 7], 2 communications internationales [CI-7 et 12],
- collaboration avec CPEE, Université de Québec Trois Rivières : 1 stage de DESS co-encadré [EP-4], 2 communications internationales communes [CI-26 et 28],
- collaboration avec le LEI de l'EPF Lausanne : 1 DEA en co-encadrement (2003-2004), 1 communication internationale commune [CI-27].

Rayonnement scientifique :

- examinateur au jury de mémoires CNAM : F. Crespi (commande d'un filtre actif, 2000) A. Poubelle (commande d'un système à souplesse mécanique, 2001),
- examinateur au jury de thèse de E. Delmotte (observateur de flux, 1997),
- rapporteur pour un article à EPJ Physics Applied (1999),
- rapporteur pour un article à IEEE transactions on Power Electronics (2002),
- rapporteur pour un article à IEEE transactions on Energy Conversion (2003),
- membre du comité de lecture de IEEE-IEMDC 2003 (Madison, USA, 9 articles),
- Chairman d'une session poster « Adjustable speed generation systems » à EPE 2003 (Toulouse),
- organisation de la session invitée « MMS » avec B. de Fornel, pour ElectrIMACS 2002 (Montréal),

- séminaire de recherche sur les SMM dans le cadre du chapitre « Power Electronics » de la section St Maurice de l'IEEE (2003), à l'Université de Québec Trois Rivières.

Activités d'intérêt collectif s

Responsabilités administratives :

- membre élu de la Commission de Spécialiste 63^{ème} section de l'Université de Lille 1, (depuis 1998, secrétaire au bureau depuis 2001),
- membre nommé de la Commission de Spécialiste 63^{ème} section de l'Université du Havre (depuis 2001),
- membre du Conseil de Laboratoire du L2EP (nommé de 1997 à 1999, élu depuis 2001),
- membre élu des moniteurs de l'INP au Conseil Pédagogique du CIES de Toulouse (1991-1994),
- membre élu au Collège D du Conseil Scientifique de l'INP de Toulouse (1991-1993),
- gestionnaire (webmaster) du serveur Internet du L2EP (<http://www.univ-lille1.fr/l2ep/>), 1996-1998),
- gestionnaire du serveur Internet du DESS GR2E (<http://www.uni-lille1.fr/dess-gr2e/>), depuis 2003)
- correspondant du L2EP au sein du Groupe Régional de Recherche sur les Transports (depuis 2004)

Vie collective au L2EP et au service Electrotechnique de l'USTL :

- gestion et mise en place de la salle projet-simulation du service Electrotechnique de l'USTL (1996-2000),
- coordinateur de la mise en place du serveur Internet du L2EP (1996)
- membre de la commission web du L2EP (1996-2000),
- membre de la commission communication du L2EP (2001-2002),
- coordinateur de la journée d'évaluation du L2EP (octobre 2001).

Responsabilités associatives :

- coordinateur inter-établissements du Collectif de Doctorants Toulousains (1995-1996),
- membre de l'Association des Moniteurs de l'Enseignement Supérieur de l'Académie de Toulouse (AMSEAT) : secrétaire général, responsable journal, délégué ATER (1991-1995),
- membre de l'Amicale des Etudiants de l'Université Paul Sabatier (AEUPS) : trésorier, secrétaire général, responsable du journal l' « Avis de Bêtes » (1985-1989).

Production scientifique

— **Ouvrage (O)** —

- [O-1] : A. Bouscayrol, "Structures d'alimentation et stratégies de commande pour des systèmes multimachines asynchrones - Application à la motorisation d'un robot mobile", *Thèse INP-Toulouse*, janvier 1995.

— **Revue (R)** —

- [R-1] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, H. Foch, "Influence d'une modulation avec référence à valeur moyenne variable dans un ensemble convertisseur-machine", *Journal de Physique-III*, pp 1069-1084, juin 1994.
- [R-2] : A. Bouscayrol, "Comparaison de deux types d'onduleurs MLI pour deux machines asynchrones : application à la motorisation de robot mobile", *Revue Générale de l'Electricité*, n°10-94, pp 33-37, novembre 1994 (publié suite à une sélection au congrès JCGE, Grenoble, 1994, réf. [CI-1]).
- [R-3] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Comparison of cartesian vector control and polar vector control for induction motor drives", *Mathematics and Computers in Simulation*, n° 46, pp 325-337, May 1998 (suite à une sélection au congrès ElectrIMACS, St Nazaire, 1996 réf. [CI-6]).
- [R-4] : A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, "Multimachine Multiconverter Systems: application for electromechanical drives", *European Physics Journal - Applied Physics*, Vol. 10, no. 2, May 2000, pp-131-147 (common paper GREEN Nancy, L2EP Lille and LEEI Toulouse, according to the MMS project of the GdR-SDSE).
- [R-5] : A. Bouscayrol, X. Guillaud, J. P. Hautier, Ph. Delarue, "Macromodélisation pour les conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques", *Revue Internationale de Génie Electrique*, Vol. 3, n°2, juin 2000, pp 257-282.
- [R-6] : B. Vulturescu, A. Bouscayrol, F. Ionescu, J. P. Hautier, "Limitation algorithms for the behaviour model control", *Revue Roumaine des Sciences et Technique*, série Electrotechnique et Energétique, vol. 46, no. 2. April-June 2001, pp 239-252 (common paper L2EP Lille and LCS Bucharest).
- [R-7] : I. S. Popa, M. O. Popescu, A. Bouscayrol, "Causal models for urban traction systems", *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 20, no. 1, January/February 2002, pp 37-42 (common paper Univ. Polytech. Bucharest- L2EP Lille)
- [R-8] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, "Simplifications of the Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with an induction generator", *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 4, no. 2, August 2002, pp 479-485.
- [R-9] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, E. Semail, J. P. Hautier, J. N. Verhille, "Application de la macro-modélisation à la représentation énergétique d'un système de traction multimachine", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 5, n°3-4/2002, pp 431-453, octobre 2002 (article commun L2EP Lille, Matra Transport International).
- [R-10] : Ph. Delarue, A. Bouscayrol, E. Semail, "Generic control method of multi-leg voltage-source-converters for fast practical implementation ", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 517-526, March 2003.
- [R-11] : E. Semail, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Vectorial formalism for analysis and design of polyphase synchronous machines", *European Physics Journal - Applied Physics*, vol. 22, no. 3, pp 207-221, June 2003.
- [R-12] : Ph. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud, G. Lancigu, "Modelling, control and simulation of an overall wind energy conversion system", *Renewable Energy*, vol. 28, no. 8, pp 1159-1324, July 2003 (common paper L2EP Lille and Jeumont SA).
- [R-13] : A. Bouscayrol, B. Davat, P. Escané, B. de Fornel, B. François, D. Hadiouche, J. P. Hautier, J. P. Martin, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, V. de Olivera, R. Peña-Eguiluz, J. Pierquin, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, "Structures de commande des Systèmes Multi-machines Multi-convertisseurs ", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 6, n° 3-4/2003, octobre 2003, pp. 307-324 (article commun GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse, et LESiR Cachan, dans la cadre du projet SMM du GDR-SDSE).
- [R-14] : A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, M. F. Benkhoris, "Control Structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", *Mathematics and Computers in Simulation*, to be published en 2003, (common paper of GE 44 St Nazaire, GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse

and LESiR-SATIE Cachan, according to the MMS project of the GdR-ME²MS, selected from *ElectrIMACS'2002*, ref. [CI-19]).

- [R-15] : E. Semail, F. Meibody-Tabar, M. F. Benkhoris, H. Razik, M. Pietrzak-David, E. Monmasson, A. Bouscayrol, B. Davat, Ph. Delarue, B. de Fornel, J. P. Hautier, J. P. Louis, S. Piefederici, "Représentations SMM de machines polyphasées", *Revue Internationale de Génie Electrique*, à paraître en 2004, (article commun GE44 St Nazaire, GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse, et SATIE Cachan, dans la cadre du projet SMM du GDR-SDSE, sélectionné suite à EF 2003 [CN-6])

— *Communication dans des Congrès Internationaux avec comité de lecture (CI)* —

- [CI-1] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Master-slave strategy for asynchronous robot propulsion set fed by a four-legged PWM inverter", *ICEM'94*, proceeding pp 209-214, Paris, September 1994.
- [CI-2] : A. Bouscayrol, S. Siala, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Four-legged PWM inverter feeding two induction motors for a vehicle drive application", *PEVD'94*, proceeding pp 700-705, London, October 1994.
- [CI-3] : A. Bouscayrol, M. Delabre, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, R. Bishoff, "Decoupled flux observer for an induction machine: application to a robot propulsion set", *EPE'95*, proceeding. vol. 2, pp 147-152, Sevilla, September 1995.
- [CI-4] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Comparative studies of inverter structures for a mobile robot asynchronous motorization", *IEEE-ISIE'96*, proceeding vol. 1, pp 447-452, Warsaw, June 1996.
- [CI-5] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, "Discrete-time cartesian flux observer for an induction machine", *IMACS-CESA'96*, proceeding vol. 1, pp 610-615, Lille, July 1996.
- [CI-6] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Comparison of cartesian vector control and polar vector control for induction motor drives", *ElectrIMACS'96*, proceeding vol. 2, pp 403-408, St Nazaire, September 1996 (sélectionné pour une revue, ref. [R-3]).
- [CI-7] : B. Vulturescu, A. Bouscayrol, F. Ionescu, "Model influence on simulation of induction machine vector control", *ATEE'98*, proceeding pp 137-142, Bucharest, December 1998, (common paper L2EP Lille and LCS Bucharest).
- [CI-8] : B. François, A. Bouscayrol, "Decoupled control of two induction motors fed by a five-phase voltage source inverter", *ElectrIMACS'99*, proceeding vol. 3, pp 313-318, Lisbon, September 1999.
- [CI-9] : A. Bouscayrol, S. Clenet, J.P. Hautier, F. Piriou, "Comparison of induction machine flux estimations using a finite element model", *ElectrIMACS'99*, proceeding vol.1, pp 35-40, Lisbon, September 1999.
- [CI-10] : B. François, A. Bouscayrol, "Design and modelling of a five-phase voltage source inverter for two induction motors", *EPE'99*, CD-ROM, Lausanne, September 1999.
- [CI-11] : E. Delmotte, B. Vulturescu, A. Bouscayrol, B. Lemaire-Semail, "Comparison between two analytical determinations of reduced-order observers for induction machine rotor flux", *EPE'99*, CD-ROM, Lausanne, September 1999.
- [CI-12] : B. Vulturescu, A. Bouscayrol, X. Guillaud, F. Ionescu, J. P. Hautier, "Behavior model control of a dc machine", *ICEM' 2000*, vol.1, pp 427-431, Espoo (Finland), August 2000 (common paper of L2EP Lille and LCS Bucharest).
- [CI-13] : J. Pierquin, P. Escané, A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, J. P. Hautier, B. de Fornel, "Behavior model control of a high speed railway traction system", *EPE-PEMC'2000*, Vol. 6, pp 197-202, Kosice (Slovak Republic), September 2000 (common paper of L2EP Lille and LEEI Toulouse, according to the MMS project of the GdR-SDSE).
- [CI-14] : A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, "Multimachine Multiconverter Systems for drives: analysis of coupling by a global modeling", *IEEE-IAS annual meeting 2000*, Rome, October 2000, CD-ROM (common paper of GREEN Nancy, L2EP Lille and LEEI Toulouse, according to the MMS project of the GdR-SDSE).
- [CI-15] : B. François, Ph. Delarue, A. Bouscayrol, J. Niiranen, "Five-leg ac-ac power converter: structure, modeling and control", *IEEE-IAS annual meeting 2000*, Rome, October 2000, CD-ROM (common paper of L2EP Lille and ABB Finland).
- [CI-16] : A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, "Control structure for multimachine multiconverter systems with

- downstream coupling", *EPE'2001*, Graz (Austria), September 2001, CD-ROM (common paper of GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse and LESiR Cachan, according to the MMS project of the GdR-SDSE).
- [CI-17] : Ph. Delarue, A. Bouscayrol, E. Semail, B. François,, "Control: structure for multi-leg voltage source inverter", *EPE'2001*, Graz (Austria), September 2001, CD-ROM.
- [CI-18] : J. Pierquin, B. Vulturescu, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Behaviour model control structures for an electric vehicle", *EPE'2001*, Graz (Austria), September 2001, CD-ROM.
- [CI-19] : A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, M. F. Benkhoris, "Control Structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", invited paper in the MMS session of *ElectrIMACS'2002*, Montreal (Canada), August 2002, CD-ROM (common paper of GE 44 St Nazaire, GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse and LESiR-SATIE Cachan, according to the MMS project of the GdR-SDSE).
- [CI-20] : J. P. Martin, E. Semail, S. Pierfederici, A. Bouscayrol, F. Meibody-Tabar, B. Davat, "Space vector control of 5-phase PMSM supplied by 5 H-bridge VSIs", invited paper in the MMS session of *ElectrIMACS'2002*, Montreal (Canada), August 2002, CD-ROM (common paper GREEN Nancy and L2EP Lille, according to the MMS project of the GdR-SDSE).
- [CI-21] : J. Pierquin, A. Bouscayrol, Ph. Degobert, J. P. Hautier, B. Robyns, "Torque control of an induction machine based on resonant current controllers", *ICEM'2002*, Brugge (Belgium), August 2002, CD-ROM.
- [CI-22] : A. Tounzi, A. Bouscayrol, Ph. Delarue, C. Brocart, J. B. Tritsch, "Simulation of an induction machine wind generation system based on an Energetic Macroscopic Representation", *ICEM'2002*, Brugge (Belgium), August 2002, CD-ROM (common paper of L2EP Lille and LML Lille)
- [CI-23] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, "Weighted control of drives with series connected DC machines", *IEEE-IEMDC'03*, Madison (USA), June 2003, CD-ROM, pp. 159-165.
- [CI-24] : Ph. Delarue, A. Bouscayrol, B. François, "Control implementation of a five-leg voltage-source-inverter supplying two three-phase induction machines", *IEEE-IEMDC'03*, Madison (USA), June 2003, CD-ROM, pp. 1909-1915.
- [CI-25] : S. Charlemagne, A. Bouscayrol, I. Slama-Belkhodja, J. P. Hautier, "Flatness Based Control of Non-linear Textile Multimachine Process", *EPE'03*, Toulouse, September 2003, CD-ROM (common paper of L2EP Lille, and LSE Tunis).

Communications acceptées pour 2004

- [CI-26] : A. Leclercq, P. Sicard, A. Bouscayrol, B. Lemaire-Semail, "Control of a triple drive paper system based on the Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-ISIE'04*, Ajaccio, May 2004 (common paper of L2EP Lille and CPEE Université de Québec Trois Rivières).
- [CI-27] : W. Lhomme, A. Bouscayrol, P. Barrade, "Simulation of series hybrid electric vehicles based on Energetic Macroscopic Representation ", *IEEE-ISIE'04*, Ajaccio, May 2004 (common paper of L2EP Lille, and LEI EPF Lausanne).
- [CI-28] : J. C. Mercieca, J. N. Verhille, A. Bouscayrol, "Energetic Macroscopic Representation of a subway traction system for a simulation model", *IEEE-ISIE'04*, Ajaccio, May 2004 (common paper of L2EP Lille and Siemens Transportation Systems).
- [CI-29] : C. Thiffault, P. Sicard, A. Bouscayrol, "Tension control loop using a linear actuator based on the Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-CCECE'04*, Niagara Falls (Canada), May 2004 (common paper of CPEE Université de Québec Trois Rivières and L2EP Lille).
- [CI-30] : P. E. Vidal, P. Delarue, A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, " Control of a bi-converter mono-machine system based on the energetic macroscopic representation", *ICEM'04*, Lodz (Poland), September 2004 (common paper of LEEI Toulouse and L2EP Lille, according to the MMS project of the GdR-ME²MS).

— *Communication dans des Congrès Nationaux avec comité de lecture (CN)* —

- [CN-1] : A. Bouscayrol, "Comparaison de deux types d'onduleurs MLI pour deux machines asynchrones : application à la motorisation de robot mobile", *JCGE'94*, Actes pp V.7-V.11, Grenoble, avril 1994 (sélectionné pour revue [R-2]).
- [CN-2] : A. Bouscayrol , T. Communal, "Approche globale de la commande dynamique des machines électriques", *CESTIS-EEA*, Actes pp 159-162, Paris, novembre 1997.
- [CN-3] : A. Bouscayrol , B. Vulturescu, J. P. Hautier, "Observateur d'ordre réduit de flux pour machine asynchrone : méthode pour le calcul analytique des gains", *C2I'98*, Actes pp 419-426, Cachan, novembre 1998.
- [CN-4] : J. Pierquin, A. Bouscayrol , J. P. Hautier, "Commande optimisée d'un ensemble multimoteur dans une application de traction électrique", *JDA'99*, Actes pp 245-248, Nancy, septembre 1999.
- [CN-5] : S. Charlemagne, A. Bouscayrol, K. Jelassi, J.P. Hautier, I. Slama-Belkhdja, "Commande découplée d'un entraînement multimachine pour processus textile", *JTEA'2002*, Actes vol. 3, pp 147-153, Sousse Nord (Tunisie), mars 2002 (communication commune L2EP Lille et LSE Tunis)
- [CN-6] : E. Semail, F. Meibody-Tabar, M. F. Benkhoris, H. Razik, M. Pietrzak-David, E. Monmasson, A. Bouscayrol, B. Davat, Ph. Delarue, B. de Fornel, J. P. Hautier, J. P. Louis, S. Piefederici, "Représentations SMM de machines polyphasées ", *EF'2003*, Gif-sur-Yvette, décembre 2003 (article commun GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse, et LESiR Cachan, dans la cadre du projet SMM du GDR-ME²MS).
- [CN-7] : S. Charlemagne, "Modélisation causale et commande d'un entraînement électrique de type enrouleur-dérouleur", *JCGE'2001*, Nancy, novembre 2001, pp 95-100 (co-signé par le LSE de Tunis)

— *Communication dans des Journées Scientifiques avec actes (JS)* —

- [JS-1] : A. Bouscayrol, "Machines asynchrones à commutation électronique pour la motorisation des robots mobiles", *FIRMIP-FIRTECH robotique*, Actes des journées, Toulouse, octobre 1993.
- [JS-2] : B. François, A. Bouscayrol, "Onduleur de tension à cinq bras pour alimenter deux moteurs asynchrones indépendants", *Séminaire SMM'98 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Nancy, décembre 1998.
- [JS-3] : J. Pierquin, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Onduleur quatre bras pour deux machines asynchrones liées", *Séminaire SMM'98 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Nancy, décembre 1998.
- [JS-4] : Ph. Delarue, A. Bouscayrol, B. François, "Convertisseur 5 bras : de l'onduleur pour deux machines au redresseur - onduleur", *Séminaire SMM'99 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Toulouse, novembre 1999.
- [JS-5] : J. Pierquin, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Contrôle de glissement dans une application de traction électrique", *Séminaire SMM'99 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Toulouse, novembre 1999.
- [JS-6] : A. Bouscayrol, X. Guillaud, Ph. Delarue, J. P. Hautier, "Structure de commande d'un processus monomachine", *Séminaire SMM'99 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Toulouse, novembre 1999.
- [JS-7] : A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, P. Escané, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, N. Moubayed, J. Pierquin, M. Pietrzak-David, "Formalisme pour la caractérisation des systèmes multimachines multiconvertisseurs", *Journée du GdR-SDSE*, Actes des journées pp 86-91, Lyon, janvier 2000 (communication commune du GREEN Nancy, L2EP Lille et LEEI Toulouse dans le cadre du projet SMM du GDR-SDSE, proposé par la suite à une revue [R-13]).
- [JS-8] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, E. Semail, J. P. Hautier, "Macromodélisation énergétique du VAL 206" *Séminaire SMM'00 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Lille, février 2001.
- [JS-9] : E. Semail, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Pseudo-multimachine et commande" *Séminaire SMM'00 du GDR-SDSE*, Actes des journées, Lille, février 2001.
- [JS-10] : E. Semail, X. Kestelyn, A. Bouscayrol, "Concept multimachine pour machines polyphasées" *Séminaire SMM'01 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Cachan, 25-26 octobre 2001.
- [JS-11] : S. Charlemagne, A. Bouscayrol, K. Jelassi, J. P. Hautier, I. Slama-Belkhdja, "Modélisation et commande d'un entraînement multimachine pour processus textile : application à l'enrouleur-dérouleur" *Séminaire SMM'01 du GdR-SDSE*, Actes des journées, Cachan, 25-26 octobre 2001 (communication commune L2EP –LSE Tunis).

- [JS-12] : J. P. Martin, E. Semail, S. Pierfederici, A. Bouscayrol, F. Meibody-Tabar, B. Davat, "" **Séminaire SMM'01 du GdR-SDSE**, Actes des journées, Cachan, 25-26 octobre 2001 (*communication commune GREEN – L2EP dans le cadre du projet SMM du GdR SDSE*).
- [JS-13] : A. Bouscayrol, B. Davat, P. Escané, B. de Fornel, B. François, D. Hadiouche, J. P. Hautier, J. P. Martin, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, V. de Olivera, R. Pena-Equiluz, J. Pierquin, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, "Structures de commande des systèmes multimachines multiconvertisseurs" **Journée du GdR-SDSE**, Actes des journées, Lyon, 14 décembre 2001 (*communication commune GREEN, L2EP, LEEI et LESIR dans le cadre du projet SMM du GdR SDSE*).
- [JS-14] : A. Bouscayrol Ph. Delarue, "Commande pondérée d'un système de traction à machines à courant continu en série" **Séminaire SMM'02 du GdR-ME²MS**, Actes des journées, St Nazaire, 17-18 mars 2003.

— **Brevet (B)** —

- [B-1] : "Système d'alimentation de n moteurs asynchrones", **Brevet déposé pour le CNRS** en octobre 1993 sous le n°93.12789, inventeurs : B. de Fornel, M. Pietrzak-David, A. Bouscayrol, S. Siala.

— **Rapports de contrats (RC)** —

- [RC-1] : partie "Simulation par REM du système éolien J48", **contrat avec Jeumont SA**, octobre 1993, participants, X. Guillaud, Ph. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi.
- [RC-2] : "Modélisation et commande du métro VAL 206", **contrat avec Siemens Transportation Systems**, janvier 2003, P. J. Barre, A. Bouscayrol.

— **Encadrements : thèse (ET), DEA (ED) et projets significatifs (EP)** —

1. Thèses

- [ET-1] : B. Vulturescu, "Contribution à la commande robuste des systèmes électromécaniques par la méthode du modèle de comportement. Application à la commande des systèmes multimachines", **Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1**, n° 3107, mars 2002 (co-encadrement 33%, avec J. P. Hautier et F. Ionescu)
- [ET-2] : J. Pierquin, "Contribution à la commande des systèmes multimachines multiconvertisseurs. Application à la résolution de problèmes en traction électrique", **Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1**, n° 3148, juillet 2002, (co-encadrement 50%, avec J. P. Hautier).
- [ET-3] : S. Charlemagne, "Modélisation et commande d'un système de transport de bande, application des concepts multimachines", **Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1**, décembre 2003, (co-encadrement 33%, avec J. P. Hautier et I. Slama-Belkhodja).

2. DEA

- [ED-1] : M. Delabre, "Synthèse analytique d'un observateur cartésien flux pour machine asynchrone", **DEA d'Automatique de l'INP Toulouse**, juin 1994 (co-encadrement 50%, avec M. Pietrzak-David).
- [ED-2] : E. Lefeuvre, "Structures d'alimentation pour ensemble avec deux moteurs asynchrones", **DEA de Génie Electrique de l'INP Toulouse**, juin 1996 (co-encadrement 50%, avec M. Pietrzak-David).
- [ED-3] : B. Vulturescu, "Observateur réduit de flux pour machine asynchrone : synthèse dynamique des gains d'observation", **DEA de Génie Electrique de l'Université de Lille 1**, juin 1998.
- [ED-4] : C. Brocart, "Macromodélisation d'un système éolien, commande de la machine asynchrone", **DEA de Génie Electrique de l'Université de Lille 1**, juin 2001 (co-encadrement 50%, avec A. Tounzi).
- [ED-5] : C. Toulouse, "Emulation d'un système éolien avec une machine asynchrone à cage", **DEA de Génie Electrique de l'Université de Lille 1**, février 2003.

3. Projets significatifs (ayant participé à des collaborations ou débouchés sur des articles)

- [EP-1] : R. Bischoff, "Discrétisation d'un observateur cartésien de flux pour machine asynchrone", **rapport de projet de fin d'étude, stage ERASMUS**, juin 1994 (co-encadrement 50%, avec M. Pietrzak-David).
- [EP-2] : I. Popa, "Simulation de la REM et de la SMC d'un système de transport urbain", **rapport de projet de formation doctorale**, décembre 2001.
- [EP-3] : I. Nicolescu, "Simulation d'un véhicule hybride série", **rapport de projet de fin d'étude, stage ERASMUS**, juin 2003.

- [EP-4] : J. C. Mercieca, "Modélisation par REM et simulation du métro VAL 206", *rapport de stage du DESS GR2E*, juin 2003 (co-encadrement avec J. N. Verhille de Siemens Transportation Systems dans le cadre d'un contrat).
- [EP-5] : A. Leclercq, "Modélisation et commande d'un étage d'un système de bobinage ", *rapport de stage du DESS GR2E*, juin 2003 (co-encadrement avec P. Sicard, collaboration entre la CPEE de l'Université de Québec Trois Rivières).

— *Vulgarisation* —

- [V-1] : A. Bouscayrol , T. Communal, "Approche globale de la commande dynamique des machines électriques", *Revue 3EI*, n° 17 juin 1998, pp. 73-79 (reprise de [CN-4]).

Analyse de la production scientifique

— *Analyse temporelle* —

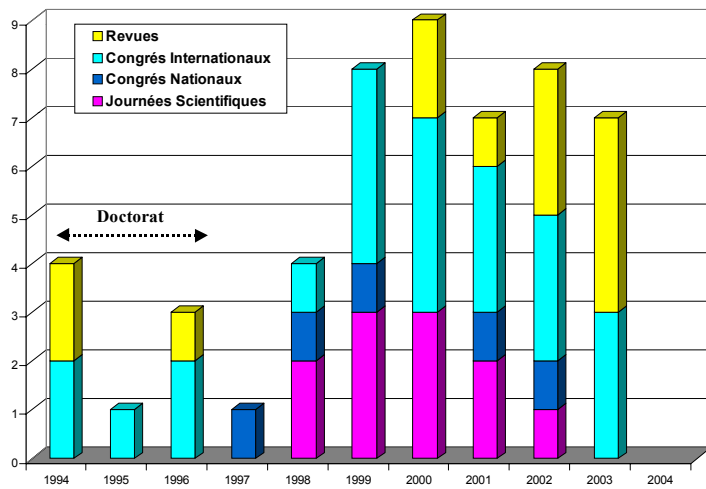


Fig.1. Répartition des articles en fonction des années

Après une transition normale suite au changement de laboratoire lors du recrutement en tant Maître de Conférences, une reprise normale de publication arrive à partir de 1999. On constate cependant un déséquilibre entre Congrès et revues. La participation aux séminaires annuels SMM explique en partie cet écart. Des efforts doivent être poursuivis pour valoriser les travaux réalisés par des publications dans des revues. On remarque que le nombre de revue a augmenté depuis la mise en place de la plate-forme expérimentale SMM en 2000.

— *Analyse thématique* —

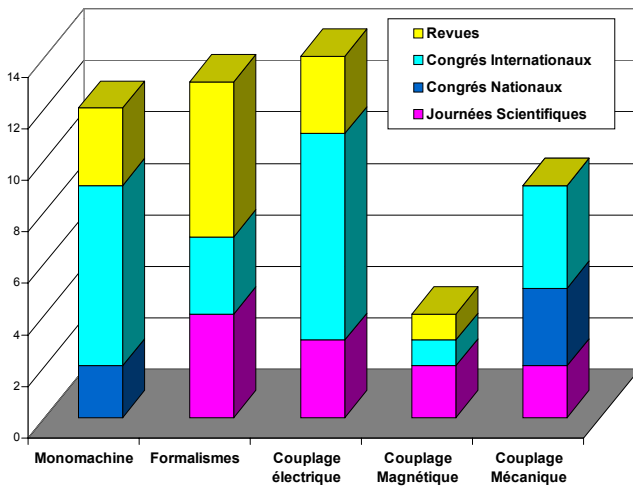


Fig. 2. Répartition des articles en fonction des thèmes

Les travaux monomachines concernent en grande partie des activités liées au doctorat et la phase transitoire de changement de laboratoire. Les autres travaux concernent les formalismes (REM et SMM) et les applications SMM. Les activités sur les formalismes et le couplage électrique sont les plus importantes. Le thème couplage électrique possède toutefois trop de congrès par rapport aux revues. Les activités liées aux couplages magnétiques sont faibles, ce qui est normal étant donné que ce thème est surtout celui d'E. Semail. Les activités sur les couplages mécaniques ne sont pas valorisées par des revues, ce qui est anormal étant donné les travaux et thèses liés à ce thème. Des efforts sont à faire dans ce sens.

— *Analyse pondérée* —

Le L2EP a mis en place un critère d'évaluation de ses membres basé sur les revues. Le nombre de revue est ainsi pondéré en $1/n$ avec n le rang de l'auteur dans la publication (par exemple si l'on est en deuxième nom, on obtient $1/2$ point). Par déontologie, les auteurs restent classés par ordre d'importance du travail fourni (doctorant en premier nom par exemple). Les permanents du laboratoire doivent alors avoir un total de 2 lors d'un quadriennal.

Sur proposition de son directeur J. P. Hautier, ce critère a été voté à l'unanimité par le conseil de laboratoire de juin 2003. Cet outil doit ainsi pouvoir inciter les membres du laboratoire à publier dans des revues.

Bilan personnel :

Moyenne annuelle pondérée depuis 1991 : 0,94

Moyenne du nombre d'auteurs : 5,07

Moyenne du rang par revue : 1,43

Moyenne annuelle pondérée du quadriennal en cours

- *toutes revues confondues* : 2,08 (soit 8,32 pour les 4 ans)

- *revues internationales de rang A* : 1,125 (soit 4,50 pour les 4 ans)

Le nombre élevé d'auteur par revue s'explique par les articles du projet SMM du GdR (une dizaine d'auteurs en moyenne) et les articles de collaboration. La moyenne du rang par revue montre un problème : les travaux personnels sont bien valorisés par des revues, mais ceux des doctorants encadrés ne le sont pas assez. Enfin la part de revues nationales ou internationales de rang B est encore trop importante.

Bibliographie

Bibliographie

- A -

- [ALI 98] : S. Ali, M. Kazmierkowski, "Current regulation of four-leg PWM-VSI", *Proc. of IECON'98*, Vol. 3/4, pp. 1853-1858, Aachen (Germany), August 1998.
- [ALLAIN 01] : J. C. Allain, "Cours de systématique", *IUFM de Dijon*, Lausanne 12 janvier 2001, (disponible sur <http://www.ac-dijon.fr/pedago/histgeo/enseigne/docu/cterrier/environnement/system.htm>)
- [ANDOULSI 01] : R. Andoulsi, "Etude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond-graph, modélisation, analyse et commande", *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille*, décembre 2001.
- [ARNET 97] : B. Arnet, M. Jufer, "Torque control on electric vehicles with separate wheel drives", *Proc. of EPE'97*, Trondheim, Vol.4, pp. 39-40, September 1997.
- [ASTIER 03] : S. Astier, "Des machines à aimants permanents aux systèmes énergétiques autonomes. Systématiques, électricité et développement durable", *Habilitation à Diriger les Recherche de l'INPT*, LEEI, Toulouse, juillet 2003.

- B -

- [BADIN 02] : F. Badin, J. P. Yonnet, "Véhicules électriques et hybrides, enjeux technologiques et perspectives", *collections de l'INRETS*, juin 2002.
- [BARRE 95] : P. J. Barre, "Stratégies de commande pour un axe numérique de machine-outil à usinage très grande vitesse", *Thèse de Doctorat de l'ENSAM*, L2EP, Lille, décembre 1995.
- [BARRE 97] : P. J. Barre, J. P. Hautier, X. Guillaud, B. Lemaire-Semail, "Modeling and axis control of machine tool for higher speed machine", *Proc. of IFAC-IMACS CIS'97*, Belfort, May 1997, vol. 3, pp. 63-68.
- [BARRADE 02] : P. Barrade, "Series connection of supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of the voltages", *Proc. of ElectrIMACS'02*, CD-ROM, Montreal, August 2002.
- [BAUER 00] : P. Bauer, S. de Haan, J. Pierik, "Evaluation of electrical systems for offshore windfarms", *Proc. of IEEE IAS annual meeting 2000*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [BELHADJ 01] : J. Belhadj, "Commande directe en couple d'une machine asynchrone, application à la commande multimachine multiconvertisseur", *Thèse de doctorat de l'ENIT*, Tunis, juin 2001.
- [BERTEREAU 01] : F. Bertereau, "Commande vectorielle multialgorithmique appliquée à la machine asynchrone avec optimisation par supervision floue", *Thèse de Doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, mai 2001.
- [BERTRAND 97] : M. Bertrand, "Chaînes de régulation types", *Techniques de l'ingénieur, traité Automatique*, ref. R 7100, pp. 1-13, Paris, 1997.
- [BETIN 03] : F. Betin, "Commande d'actionneurs électriques soumis à une charge mécanique à fortes variations paramétriques, simulation et mise en œuvre expérimentale", *Habilitation à Diriger les Recherches*, Université de Picardie Jules Verne, Amiens, février 2003.
- [BLASKO 97] : V. Blasko, V. Kaura, "A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 12, no. 1, pp. 116-123, January 1997.
- [BODSON 94] : J. M. Bodson, "Problèmes et solutions dans les entraînements multimoteurs", *Revue E*, n° 2-94, pp. 50-61, avril 1994.
- [BONAL 98] : J. Bonal, G. Segulier, "Entraînements électriques à vitesse variable", Vol. 2, *Tec & Doc Editions*, Lavoisier, Paris, 1998.
- [BORNE 90] : P. Borne, G. Dauphin-Tangy, J. P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, "Commande et optimisation des Processus" *Editions Technip*, Paris, 1990.
- [BORNE 92] : P. Borne, G. Dauphin-Tangy, J. P. Richard, F. Rotella, "Modélisation et identification des processus", *Editions Technip*, Paris, 1992.

- [BOSE 93] : B.K. Bose, "Power electronics and motion control - Technology and recent trends", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 29, pp 902-909, 1993.
- [BOUSCAYROL 94a] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Master-slave strategy for asynchronous robot propulsion set fed by four-legged PWM inverter", *Proc. of ICEM'94*, pp. 209-214, Paris, September 1994.
- [BOUSCAYROL 94b] : A. Bouscayrol, S. Siala, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Four-legged PWM inverter feeding two induction motors for a vehicle drive application", *Proc. of PEVD'94*, pp. 700-705, London, October 1994.
- [BOUSCAYROL 95a] : A. Bouscayrol, "Structures d'alimentation et stratégies de commande pour des systèmes multimachines asynchrones - Application à la motorisation d'un robot mobile", *Thèse de doctorat de l'INPT*, LEEI, Toulouse, janvier 1995.
- [BOUSCAYROL 95b] : A. Bouscayrol, M. Delabre, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, R. Bishoff, "Decoupled flux observer for an induction machine: application to a robot propulsion set", *Proc. of EPE'95*, vol. 2, pp. 147-152, Sevilla, September 1995.
- [BOUSCAYROL 96a] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Comparative studies of inverter structures for a mobile robot asynchronous motorization", *Proc. of IEEE-ISIE'96*, vol. 1, pp. 447-452, Warsaw, June 1996.
- [BOUSCAYROL 96b] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, "Discrete-time cartesian flux observer for an induction machine", *Proc. of IMACS-CESA'96*, vol. 1, pp. 610-615, Lille, July 1996.
- [BOUSCAYROL 97] : A. Bouscayrol, T. Communal, "Approche globale de la commande dynamique des machines électriques", *Actes de CESTIS-EEA*, pp. 159-162, Paris, novembre 1997.
- [BOUSCAYROL 98] : A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Comparison of cartesian vector control and polar vector control for induction motor drives", *Mathematics and Computers in Simulation*, no. 46, pp. 325-337, May 1998.
- [BOUSCAYROL 99] : A. Bouscayrol, S. Clenet, J.P. Hautier, F. Piriou, "Comparison of induction machine flux estimations using a finite element model", *Proc. of ElectrIMACS'99*, vol. 1, pp. 35-40, Lisbon, September 1999.
- [BOUSCAYROL 00] : A. Bouscayrol, X. Guillaud, J. P. Hautier, Ph. Delarue, "Macromodélisation pour les conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques", *Revue Internationale de Génie Electrique*, Vol. 3, n°2, pp. 257-282, juin 2000.
- [BOUSCAYROL 02a] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, "Simplifications of the Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with an induction generator", *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 479-485, August 2002.
- [BOUSCAYROL 02b] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, E. Semail, J. P. Hautier, J. N. Verhille, "Application de la macro-modélisation à la représentation énergétique d'un système de traction multimachine", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 5, n°3-4/2002, pp. 431-453, octobre 2002 (article commun L2EP Lille, Matra Transport International).
- [BOUSCAYROL 03a] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, E. Semail, J. P. Hautier, "Modélisation et commande des système énergétiques par représentation énergétique macroscopique", *polycopié de cours, DESS GR2E*, USTL, Lille, février 2003 (disponible à <http://www.univ-lille1.fr/l2ep/smm-tp.htm>).
- [BOUSCAYROL 03b] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, "Weighted control of drives with series connected DC machines", *Proc. of IEEE-EMDC'03*, CD-ROM, Madison (USA), June 2003.
- [BOUSCAYROL 04] : A. Bouscayrol, Ph. Delarue, X. Guillaud, "Power strategies for Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine", *internal report*, L2EP, Lille, February 2003.
- [BRONDOLO 97] : F. Brondolo, P. Ferrari, M. Marchesoni, L. Puglisi, "Optimised Fuzzy Algorithm to Control Adhesion Conditions During Starting in ac Drives for Tractions Applications", *Proc. of EPE'97*, vol. 2, pp. 426-431, Trodheim (Norway), September 1997.
- [BROCARD 01] : C. Brocard, "Macromodélisation d'un système éolien, commande de la machine asynchrone", *DEA de Génie Electrique de l'Université de Lille 1*, juin 2001.
- [BÜHLER 82] : H. Bühler, "Réglages échantillonnés", *Presses Polytechniques Universitaires Romandes*, Lausanne, 1982.
- [BÜHLER 97] : H. Bühler, "Réglages des systèmes d'électronique de puissance", *Presses Polytechniques Universitaires Romandes*, Lausanne, 1997.

- C -

- [CARON 95] : J. P. Caron, J. P. Hautier, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", *Editions Technip*, Paris, 1995.
- [CHANDRASEKARAN 00] : B. Chandrasekaran, J. Josephson, "Fuction in device representtaion", *Engineering with computer*, vol. 16, pp. 162-177, September 2000.
- [CHATELAIN 83] : J. Chatelain, "Machines électriques", Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1983.
- [CHAPUIS 96] : Y. A. Chapuis, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone par l'orientation de son flux statorique", *Thèse de doctorat de l'INPG*, LEG, Grenoble, janvier 1996.
- [CHAPOULIE 99] : P. Chapoulie, "Modélisation systémique pour la conception de véhicules électriques multi-sources, application aux véhicules équipés de générateurs photovoltaïques ou de supercondensateurs", *Thèse de doctorat, INPT*, Toulouse, janvier 1999.
- [CHARLEMAGNE 01a] : S. Charlemagne, A. Bouscayrol, K. Jelassi, J. P. Hautier, I. Slama-Belkhodja, "Modélisation et commande d'un entraînement multimachine pour processus textile : application à l'enrouleur-dérouleur" *Actes du Séminaire SMM'01 du GDR-SDSE*, Cachan, 25-26 octobre 2001 (communication commune L2EP Lille et LSE Tunis).
- [CHARLEMAGNE 01b] : S. Charlemagne, "Modélisation causale et commande d'un entraînement électrique de type enrouleur-dérouleur", *Actes de JCGE'2001*, pp. 95-100, Nancy, novembre 2001 (communication commune L2EP Lille et LSE Tunis).
- [CHARLEMAGNE 02] : S. Charlemagne, A. Bouscayrol, K. Jelassi, J.P. Hautier, Slama-Belkhodja, "Commande découplée d'un entraînement multimachine pour processus textile", *Actes de JTEA'2002*, vol. 3, pp. 147-153, Sousse Nord (Tunisie), mars 2002 (communication commune L2EP Lille et LSE Tunis)
- [CHARLEMAGNE 03a] : S. Charlemagne, A. Bouscayrol, Slama-Belkhodja, J.P. Hautier, "Flatness based control of non-linear textile multimachine process", *Proc. of EPE'03*, CD-ROM, Toulouse (France), September 2003 (common paper of L2EP Lille and LSE Tunis).
- [CHARLEMAGNE 03b] : S. Charlemagne, "Modélisation et commande d'un système de transport de bande, application des concepts multimachines", *Thèse de doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, décembre 2003 (co-tutelle avec l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis).
- [CHEN 01] : Z. Chen, E. Spooner, "Grid power quality with variable speed wind turbine", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 16, no. 2, June 2001, pp. 148-154.
- [CLENET 01] : C. Clenet, "Contribution à la modélisation numérique en électromagnétisme statique", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'USTL*, L2EP, Lille, décembre 2001.

- D -

- [DAUPHIN 99] : G. Dauphin-Tanguy, "Les bond-graphs et leur application en mécatronique", *Techniques de l'ingénieur, traité Automatique*, ref. S 7222, pp. 1-24, Paris 1999.
- [DEBATTISTA 00] : H. De Battista, R. Mantz, C. Christiansen, "Dynamical sliding mode power control of wind driven induction generators", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 15, no 4, pp. 451-457, December 2000.
- [DEFORNEL 76] : B. de Fornel, "Machines à courant alternatif alimentées à fréquence variables par convertisseurs statiques", *Thèse de docteur es-sciences de l'INPT*, LEEI, Toulouse, 1976.
- [DEGOBERT 97] : P. Degobert, "Formalisme pour la commande des machines électriques alimentées par convertisseurs statiques, application à la commande numérique d'un ensemble machine asynchrone - commutateur de courant", *Thèse de doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, juin 1997.
- [DEGOBERT 00] : P. Degobert, J.P. Hautier, "Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Machines in Concordia's Reference Frame with Resonating Currents Controllers", *Proc. of ICEM'00*, Espoo (Finland), August 2000.
- [DELPRAT 01] : S. Delprat, T. M. Guerra, J. Rimaux, "Optimal control of a parallel powertain: from global optimization to real time control strategy", *Proc. of EVS'18*, CD-ROM, Berlin, October 2001.
- [DEKELPER 02] : B. De Kelper, L. A. Dessaint, K. Al-Haddad, H. Nakra, "A comprehensive approach to fixed-step simulation of switched circuits", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 2, March 2002, pp. 216-224.

- [DELARUE 03a] : P. Delarue, A. Bouscayrol, E. Semail, "Generic control method of multi-leg voltage-source converters for fast practical implementation ", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 517-526, March 2003.
- [DELARUE 03b] : P. Delarue, A. Bouscayrol, B. François, "Control implementation of a five-leg voltage-source inverter supplying two three-phase induction machines", *Proc. of IEEE-IEMDC'03*, CD-ROM, Madison (USA), June 2003.
- [DELARUE 03c] : P. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud, G. Lancigu, "Modelling, control and simulation of an overall wind energy conversion system", *Renewable Energy*, vol. 28, no. 8, pp. 1159-1324, July 2003. (common paper L2EP Lille and Jeumont SA).
- [DEOLIVERA 01] : V. de Olivera, E. Monmasson, J. P. Louis, "Steady state analysis of two connected induction motors, application to an electrical differential", *Proc. of EPE'01*, CD-ROM, Graz, August 2001.
- [DEPENBROCK 88] : M. Depenbrock, "Direct Self-Control (DSC), of inverter-fed induction machine", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 420-429, October 1988.
- [DEROSNAY 75] : J. de Rosnay, "Le microscope", *Edition du Seuil*, Paris, 1975 (1^{ère} édition).
- [DEROSNAY 96] : J. de Rosnay, "Une approche systémique de l'énergie", *Conférence FIFEL*, Lausanne, novembre 1996 (disponible sur le serveur de la Cité des Sciences, <http://csiweb2.cite-sciences.fr/derosnay/>)
- [DESSAINT 99] : L.A. Dessaint, K. Al-Haddad, H. Le Huy, G. Sybille, P. Brunelle, "A power system simulation tool based on Simulink", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 6, pp. 1252-1254, December 1999.
- [DINAPOLI 02] : A. Di Napoli, F. Crescimbeni, L. Solero, F. Caricchi, F. Caponni, "Multiple-input DC-DC power converter for power-flow management in Hybrid Vehicles", *IEEE-IAS'02*, CD-ROM, Chicago, October 2002.
- [DU 95] : T. Du, P. Vas, F. Stronach, "Design and application of extended observers for joint state and parameter estimation in high-performance AC drives", *IEE Electronics Power Applications*, vol. 142, no. 2, pp. 71-78, March 1995.
- [DUMETZ 98] : E. Dumetz, "Modélisation et commande par modèle de référence d'un axe de machine-outil à dynamique rapide", *Thèse de doctorat de l'ENSAM*, L2EP, Lille, décembre 1998.
- [DWA 01] : Danish Wind Turbine Manufacturers Association, "The wind power web site", <http://www.windpower.dk>, consulted in 2001.

- E -

- [ELBULUK 98] : M. Elbuluk, N. Langovsky, D. Kankam, "Design and implementation of a closed-loop observer and adaptive controller for induction motor drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, no. 3, pp. 435-443, May/June 1998.
- [ELBULUK 02] : M. Elbuluk, L. Tong, I. Husain, "Neural-network-based model reference adaptive systems for high-performance motor drive and motion control", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 3, pp. 897-886, May/June 2002.
- [ESCANÉ 99] : P. Escané, C. Lochot, M. Pietrzak-David, B. De Fornel, " Electromechanical interactions in a high speed railway traction system - Comparison between two drive control structures ", *Proc. of EPE'99*, CD-ROM, Lausanne, September 1999.
- [ESCANÉ 00] : P. Escané, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Optimization of a railway traction system drive control versus slip perturbation", *Proc. of IEEE-IAS'2000*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [ELCHEB 93] : T. Elcheb, J.P. Hautier, Remedial Strategy for Inverter-Induction Machine System Faults using Two-Phase Operation, *Proceedings of EPE'93*, vol. 4, pp. 151-156, Brighton (England), September 1993.

- F -

- [FADEL 97] : M. Fadel, "Modélisation et commande des systèmes électriques", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'INPT*, LEEI, Toulouse, juillet 1997.
- [FAVRE 97] : W. Favre, "Contribution à la représentation bond graph des systèmes mécaniques multicorps", *Thèse de INSA de Lyon*, décembre 1997.

- [FILLIAU 01] : G. Filliau, A. Bondu, L. Mazodier, "Le navire tout électrique", *Techniques de l'ingénieur, traité Réseaux électriques et applications*, ref. D 5620 & D5620, Paris, février 2001.
- [FLIESS 92] : M. Fliess, J. Levine, P. Martin, P. Rouchon, "On differentially flat non-linear systems", *Non-linear Systems control design*, Pergamon, Oxford, pp. 408-412, 1992.
- [FLIESS 95] : M. Fliess, J. Levine, P. Martin, P. Rouchon, "Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples", *International Journal of Control*, vol. 61, pp. 1327-1361, 1995.
- [FRANÇOIS 99] : B. François, A. Bouscayrol, "Design and modelling of a five-phase voltage source inverter for two induction motors", *Proc. of EPE'99*, CD-ROM, Lausanne, September 1999.
- [FRANÇOIS 00] : B. François, Ph. Delarue, A. Bouscayrol, J. Niiranen, "Five-leg ac-ac power converter: structure, modeling and control", *Proc. of IEEE-IAS annual meeting 2000*, CD-ROM, Rome, October 2000, (common paper of L2EP Lille and ABB Finland).
- [FRANÇOIS 03] : B. François, "Conception des dispositifs de commande des convertisseurs de puissance par modulation directe des conversions. Perspectives pour l'insertion de production décentralisées d'énergie dans les réseaux électriques", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'Ecole Centrale de Lille*, L2EP, Lille, octobre 2003.
- [FOCH 89] : H. Foch & autres, "Electronique de Puissance - Principes fondamentaux : éléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques", *Techniques de l'ingénieur, traité Génie Electrique*, ref. D 3152, pp. 1-17, Paris 1989.
- [FONT 97] : S. Font, G. Duc, "Commande fréquentielle robuste, application aux paliers magnétiques", *Techniques de l'ingénieur, traité Automatique*, ref. R 7432, pp. 1-10, Paris 1997.
- [FORGEZ 98] : C. Forgez, "Méthodologie de modélisation et de commande par réseaux de neurones pour des dispositifs électrotechniques non linéaires", *Thèse de Doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, décembre 1998.
- [FOSSARD 97] : A. Fossard, "Systèmes multi-entrées multi_sorties", *Techniques de l'ingénieur, traité Automatique*, ref. R 7220, pp. 1-24, Paris 1997.
- [FU 94] : J. R. Fu, T. A. Lipo, "Disturbance free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 30, no. 5, pp. 1267-1274, September/October 1994.

- G -

- [GANDANEGARA 01] : G. Gandanegara, B. Sareni, X. Roboam, G. Dauphin-Tanguy, "Bond Graph Multi-time Scale Analysis of a Railway Traction System", *Proc. of EPE'2001*, CD-ROM, Graz (Austria), August 2001.
- [GATARIC 00] : S. Gataric "A polyphase cartesian vector approach to control of polyphase AC machines", *Proc. of IEEE-IAS annual meeting 2000*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [GERBAUD 00] : L. Gerbaud, "Gentiane : une plate-forme pour la conception des ensembles machine-convertisseur-commande", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'INPG*, LEG, Grenoble, juillet 2000.
- [GERVASI 03] : J. Gervasi, C. Toulouse, "Emulation d'un système éolien avec machine asynchrone à cage", *rapport interne, stage IMA3-EUDIL*, L2EP, Lille, février 2003.
- [GENTIL 03] : S. Gentil, E. Zamaï, "Principes des chaînes de régulation", *Techniques de l'ingénieur, traité Automatique*, ref. S 7090, pp. 1-22, Paris 2003.
- [GHOSN 01] : R. Ghosn, "Contrôle vectoriel de la machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation", *Thèse de doctorat de l'INPT*, LEEI, Toulouse, octobre 2001.
- [GHOSN 02] : R. Ghosn, C. Asmar, M. Pietrzak-David, B. De Fornel, "Torque control of a field oriented doubly fed induction machine", *Proc. of ElectrIMACS'02*, CD-ROM, Montreal, August 2002.
- [GIRAUD 02] : F. Giraud, "Etude et commande des actionneurs piézo électriques à onde progressive", *Thèse de doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, juillet 2002.
- [GRELLET 97] : G. Grelet, G. Clerc, "Actionneurs électriques, principes, modèles, commandes", *Editions Eyrolles*, Paris, 1997.
- [GUILLAUD 94] : X. Guillaud, J. P. Hautier, "Concepts de modélisation pour la commande des convertisseurs statiques", *Journal de Physique III*, n°4-1994, pp. 805-819, avril 1994.

- [GUILLAUD 00] : X. Guillaud, P. Degobert, J. P. Hautier, "Modeling, control and causality: the Causal Ordering Graph", *16th IMACS World Congress*, CD-ROM, Lausanne (Switzerland), August 2000.
- [GUILLAUD 01] : X. Guillaud, "Modélisation causale et algorithmes pour les systèmes électrotechniques", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'USTSL*, L2EP, Lille, mars 2001.

- H -

- [HADIOUCHE 01] : D. Hadiouche, "Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure", *Doctorat de l'Université Henri Poincaré*, GREEN, Nancy, décembre 2001.
- [HARNEFORS 98] : L. Harnefors, H.P. Nee, "Model-based current control of AC machines using the internal model control method", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 133-141, January/February 1998.
- [HAUTIER 89] : J. P. Hautier, "Contribution à la conception des commandes dans les systèmes à convertisseurs statiques", *Habilitation à diriger les Recherches de l'USTL*, Lille, décembre 1989.
- [HAUTIER 96] : J. P. Hautier, J. Faucher, "Le graphe informationnel causal", *Bulletin de l'Union des Physiciens* vol. 90, pp. 167-189, juin 1996.
- [HAUTIER 97] : J. P. Hautier, J. P. Caron, "Systèmes automatiques, tome 2 : Commande des processus", *Editions Ellipses*, Paris, 1997.
- [HAUTIER 99] : J. P. Hautier, J. P. Caron, "Convertisseurs statiques : méthodologie causale de modélisation et de commande", *Edition Technip*, Paris, 1999.
- [HERMANCE 98] : D. Hermance, S. Sasaki, "Hybrid electric vehicles take to the streets", *IEEE Spectrum*, November 1998, pp. 48-52.
- [HIZUME 03] : M. Hizume, S. Yokomizo, K. Matsuse, "Independent vector control of parallel-connected two induction motors by a five-leg inverter" *Proc. of EPE'03*, Toulouse; September 2003, CD-ROM.
- [HOFMANN 95] : H. Hofmann, S. Sanders, C. Sullivan, "Stator flux based vector control of induction machine in magnetic saturation", *Proc. of IEEE-IAS annual Meeting*, pp. 152-157, 1995.
- [HOFFMANN 00] : R. Hoffmann, P. Mutschler, "The influence of control strategies on the energy capture of wind turbine", *Proc. of IEEE-IAS annual meeting*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [HO 99] : S. Ho, J. M. Kim, K. C. Jung, S. K. Sul, J. Choi, "Decoupling control of bridel rolls for steel mill drive system", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, pp. 119-125, January/February 1999.
- [HOLTZ 92] : J. Holtz, "Pulse width modulation - A survey", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 39 no. 5, pp. 410-419, December 1992.
- [HOPENFENSBERGER 01] : B. Hopfenfensperger, D. Atkinson, "Doubly-fed AC machines: classification and comparison", *Proc. of EPE'01*, CD-ROM, Graz (Austria), August 2001.
- [HORI 98] : Y. Hori, Y. Toyoda, Y. Tsuruoka, "Traction Control of Electric vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV UOT Electric March", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1131-1138, September/October 1998.
- [HUA 99] : C. Huang, L. Shong, "Control of tension and line speed in fabric finishing", *Textile Research Journal*, vol. 69, no. 10, pp. 714-719, 1999.

- I -

- [IWASAKI 94] : I. Iwasaki, H. A. Simon, "Causality and model abstraction", *Artificial Intelligence*, Elsevier, vol. 67, pp. 143-194, 1994.

- J -

- [JAEGO 99] : A. Jaego, Z. Nowacki, "The technological requirements in paper industry refer multimotor drives", *Proc. of EPE'99*, CD-ROM, Lausanne, September 1999.
- [JACOBINA 03] : C. Jacobina, R. Ribeiro, A. Lima, E da Silva, "Fault-tolerant reversible AC motor drive system", *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 39, no. 4, pp 1077-1084, July-August 2003.

- [JAHNS 80] : T. Jahns, "Improved reliability in solid-state AC drive by means of multiple independent phase-drive units", *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 16, no. 3, pp 321-331, May/June 1980.
- [JEON 99] : S. Jeon, J. Kim, K. Jung, S. Sul, J. Choi, "Decoupling control of bridge rolls for steel mill drive system", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, pp. 119-125, January-February 1999.

- K -

- [KATO 03] : S. Kato, N. Kishi, K. Ogishi, "Power converter topologies for adjustable-speed cascaded induction generators systems", *Proc. of EPE'2003*, CD-ROM, Toulouse, September 2003.
- [KAWAKAMI 94] : N. Kawakami, M. Hombu, T. Ikimi, A. Ueda, J. Takahashi, K. Kamiyama, "Quick response and low-distortion current control for multiple inverter-fed induction motor drives", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 240-245, March 1994.
- [KAWABATA 02] : Y. Kawabata, M. Nasu, T. Nomoto, E. Ejiogu, T. Kawabata, "High-efficiency and low acoustic noise drive system using open-winding AC motor and two space-vector-modulated inverters", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 4, August 2002, pp. 783-789.
- [KESTELYN 02] : X. Kestelyn, E. Semail, "Multi-machine modeling for a five-phase machine", *Proc. of ICEM'2002*, CD-ROM, Brugge (Belgium), August 2002.
- [KESTELYN 03] : X. Kestelyn, "Modélisation vectorielle Multimachine pour la commande des ensembles convertisseurs-machines polyphasés", *Doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, décembre 2003.
- [KETTNER 95] : K. H. Kettner, "Multisystem propulsion concept on the basis of the double star circuit", *Proc. of EPE'95*, vol. 2, pp. 159-166, Sevilla, September 1995.
- [KLUMPNER 03] : C. Klumpner, F. Blaabjerg, "Measuring with only one Current Sensor all the Load Currents in a Multiple Drive System based on a Two-Stage Direct Power Electronic Conversion Topology", *Proc. of EPE'03*, Toulouse, September 2003, CD-ROM.
- [KOÇ 00] : H. Koç "Modélisation et commande robuste d'un système d'entraînement de bande flexible", *Doctorat de l'université Louis Pasteur de Strasbourg*, septembre 2000.
- [KOÇ 02] : H. Koç, D. Knittel, M. de Mathelin, G. Abba, "Modeling and robust control of winding systems for elastic webs", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 197-208, march 2002.
- [KOBAYASHI 00] : K. Kobayashi, M. Yamashita, A. Chiba, "Principles of self-excitation at radial force winding terminals in bearingless induction motors with a squirrel cage rotor", *Proc. of IEEE-IAS'2000*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [KURTZ 99] : H. Kurtz, "Rolling across Europe's vanishing frontiers", *IEEE Spectrum*, vol. 36, no. 2, pp. 44-49, February 1999.

- L -

- [LANDAU 79] : I. D. Landau, "Adaptive Control: The Model Reference Approach", *Marcel Dekker*, New York, 1979.
- [LECLERCQ 02] : L. Leclercq, B. Robyns, J. M. Grave, "Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators", *Proc. of ElectrIMACS'02*, CD-ROM, Montreal, August 2002.
- [LECLERCQ 04] : A. Leclercq, P. Sicard, A. Bouscayrol, B. Lemaire-Semail, "Control of a triple drive paper system based on the Energetic Macroscopic Representation", *Proc. of IEEE-ISIE'04*, Ajaccio, May 2004 (common paper of L2EP Lille and CPEE Université de Québec Trois Rivières).
- [LEDZEMA 01] : E. Ledzema, B. McGrath, A. Munoz, T. A. Lipo, "Dual AC-drive system with a reduced switch count", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 37 no. 5, pp. 1325-1333, September/October 2001.
- [LEE 03] : H. Lee, M. Tomizuka, "Adaptive vehicle traction force control for intelligent vehicle highway systems", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 37-47, February 2003.
- [LEMOIGNE 77] : J. L. Le Moigne, "La théorie du système général - Théorie de la modélisation", *Editions PUF*, Paris, 1977 (1^{ère} édition).
- [LEMOIGNE 90] : J. L. Le Moigne, "La modélisation des systèmes complexes", *Editions Dunod*, Paris, 1990.

- [LEMAIRE 97] : B. Lemaire-Semail, "Contribution à la modélisation et à la commande des machines asynchrones", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'USTL*, L2EP, Lille, décembre 1997.
- [LEONHARD 91] : W. Leonhard., "30 years space vectors, 20 years field orientation, 10 years digital signal processing with controlled AC drives", *EPE Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 13-20, July 1991
- [LEVI 02] : E. Levi, M. Wang, "A speed estimator for high performance sensorless control of induction motors in the field weakening region", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17 no. 3, pp. 365-378, May 2002.
- [LEVI 03] : E. Levi, M. Jones, S. N. Vukasovic, H. Toliyat, "A five-phase two-machine vector controlled induction motor drive supplied from a single inverter", *Proc. of EPE'03*, Toulouse, September 2003, CD-ROM.
- [LEIRENS 03] : S. Leirens, J. Pierquin, "Modelling and control of an aluminium strip unwinder-rewinder", *Proc. of ECC'03 European Control Conference*, CD-ROM, Cambridge, September 2003.
- [LHOMME 04] : W. Lhomme, A. Bouscayrol, P. Barrade, "Simulation of series hybrid electric vehicles based on Energetic Macroscopic Representation ", *Proc. of IEEE-ISIE'04*, Ajaccio, May 2004 (common paper of L2EP Lille, and LEI EPF Lausanne).
- [LIU 93] : T. Liu, J. Fu, T. Lipo, "A strategy for improving reliability of FOC induction motor", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 29, no. 5, pp. 910-918, September/October 1993.
- [LOCHOT 99] : C. Lochot, "Modélisation et caractérisation des phénomènes couplés dans une chaîne de traction ferroviaire asynchrone ", *Doctorat de l'INPT*, LEEI, Toulouse, mai 1999.
- [LORENZ 94] : R. Lorenz, T. Lipo, D. Novotny, "Motion control with induction motors", *Proceeding of the IEEE*, vol. 82, no. 2, pp. 1215-1240, 1994.
- [LOT 97] : C. Lott, O. Lapierre, S. R. Jones, J. Courault, C. Nicolas, "Filtrage actif du réseau et lissage actif du couple à bord des navires à propulsion électrique", *REE*, n° 3, pp. 54-65, mars 1997.
- [LOUIS 99] : J. P. Louis, B. Multon, Y. Bonnasieux, M. Lavabre, "Commande des machines à courant continu à vitesse variable", *Techniques de l'ingénieur, traité Génie Electrique*, ref. D 3617, pp. 6-14, Paris 1999.
- [LYRA 02] : R. Lyra, T. A. Lipo, "Six-phase induction machine with third harmonic current injection", *Proc. of ElectrIMACS'02*, CD-ROM, Montreal, August 2002.

- M -

- [MA 01] : J. D. Ma, B. Wu, N. Zargari, S. Rizzo, "A space vector modulated CSI-based AC drive for multimotor applications", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 16, no. 4, pp. 535-544, July 2001.
- [MAGGETO 92] : G. Maggeto, "Advanced drive systems and infrastructure for electric or hybrid busses, van and passenger car", *EPE Journal*, vol. 2, no. 2, June 1992, pp. 71-76.
- [MARINO 93] : P. Marino, S. Meo, M. Scarano, "A Stochastic Controller for Anti-skidding Microprocessor system", *Proc. of EPE '93*, vol. 3, pp. 162-166, Brighton, September 1993.
- [MARTIN 02] : J. P. Martin, E. Semail, S. Pierfederici, A. Bouscayrol, F. Meibody-Tabar, B. Davat, "Space vector control of 5-phase PMSM supplied by 5 H-bridge VSIs", *invited paper in the MMS session of ElectrIMACS'2002*, CD-ROM, Montreal (Canada), August 2002, (common paper GREEN Nancy and L2EP Lille, according to the SMM project of the GDR-SDSE).
- [MATSUMOTO 01] : Y. Matsumoto, S. Ozaki, A. Kawamura, "A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motor drive for Shinkansen traction system", *Proc. of APEC'01*, Anaheim (USA), March 2001.
- [MATSUSE 02] : K. Matsuse, Y. Kouno, H. Kawai, S. Yokomizo, "A speed-sensorless vector control method of parallel-connected dual induction motor fed by a single inverter", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1566-1571 November/December 2002.
- [MENDES 00] : E. Mendès, "Contribution à la modélisation et la commande des actionneurs électriques, vers une commande globale de l'actionneur à induction", *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Paris Sud*, LGEP, Paris, décembre 2000.
- [MEIBODY-TABAR 00] : F. Meibody-Tabar, "Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension : modélisation, commande et segmentation de puissance", *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de l'INP de Lorraine*, GREEN, Nancy, janvier 2000.

- [MERCIECA 04] : J. C. Mercieca, J. N. Verhille, A. Bouscayrol, "Energetic Macroscopic Representation of a subway traction system for a simulation model", *Proc. of IEEE-ISIE'04*, Ajaccio, May 2004 (common paper of L2EP Lille and Siemens Transportation Systems).
- [MILLER 97] : A. Miller, E. Muljadi, D. Zinger, "A variable speed wind turbine power control", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 12, no. 2, pp. 181-186, June 1997.
- [MICHAUX 97] : R. Michaux, P. Letellier, "Les machines discoïdes à champ axial dans les systèmes de propulsion électrique", *REE*, n° 3, pp. 37-42, mars 1997.
- [MONMASSON 01] : E. Monmasson, A. Naassani, J. P. Louis, "Extension of the DTC concept", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 3, pp. 715-717, June 2001.
- [MONMASSON 02] : E. Monmasson "Synthèse, reconfiguration et architecture de commande pour systèmes électriques, du contrôle direct de la machine asynchrone au contrôle des systèmes multimachines multiconvertisseurs", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Cergy-Pontoise*, LESiR-SATIE, Cergy Pontoise, décembre 2002.
- [MORARI 89] : M. Morari, E. Zafiriou, "Robust Process Control", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- [MOUBAYED 99] : N. Moubayed, "Alimentation par onduleurs de tension de machines multi-étoile", *thèse de doctorat de l'INPL*, GREEN, Nancy, juillet 1999.
- [MULJADI 01] : E. Muljadi, C. P. Butterfield, "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 240-246, January/February 2001.
- [MULTON-01] : B. Multon, "Motorisation des Véhicules Electriques", *Techniques de l'Ingénieur*, réf. E3996, Volume E5, Paris, février 2001.
- [MULTON 02] : B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Hamed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nichita "Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques" *Rapport « Electronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Editions Ecrin, pp. 97-154, Paris, mai 2002.

- N -

- [NICOLESCU 03] : D. Nicolescu, "Simulation d'un véhicule électrique série", *stage ERASMUS de fin d'étude*, rapport interne L2EP, Lille, juin 2003.
- [NOWACKI 97] : Z. Nowacki, "A torque ripple in inverter-fed multimotor drive", *Proc. of EPE'97*, vol. 2, pp. 06-508, Trondheim, September 1997.

- O -

- [ORLOWSKA 89] : T. Orłowska-Kowalska, "Application of extended Luenberger observer for flux and rotor time-constant estimation in induction motor drives", *IEE Proceeding D*, vol. 136, no. 6, pp. 324-330, November 1989.

- P -

- [PAYNTER 61] : H. Paynter, "Analysis and design of engineering systems", *MIT Press*, 1961.
- [PEUGET 98] : R. Peugeot, S. Courtine, J. P. Rogon, "Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1318-1326, November/December 1998.
- [PEÑA 02] : R. Peña-Eguiluz, "Commande algorithmique d'un système mono-onduleur bimachine asynchrone destiné à la traction ferroviaire", *Thèse de doctorat de l'INP*, LEEI, Toulouse, novembre 2002.
- [PEREZ 03] : F. Perez-Pinal, G. Claderon, I. Araujo-Vargas, "Relative coupling strategy", *Proc. of IEEE-IEMDC'03*, Madison (USA), June 2003.
- [PIERQUIN 00] : J. Pierquin, P. Escané, A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, J. P. Hautier, B. de Fornel, "Behavior model control of a high speed railway traction system", *Proc. of EPE-PEMC'2000*, vol. 6, pp. 197-202, Kosice (Slovak Republic), September 2000 (common paper of L2EP Lille and LEEI Toulouse, according to the SMM project of the GDR-SDSE).

- [PIERQUIN 01] : J. Pierquin, B. Vulturescu, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Behaviour model control structures for an electric vehicle", *Proc. of EPE'2001*, CD-ROM.Graz (Austria), September 2001.
- [PIERQUIN 02a] : J. Pierquin, "Contribution à la commande des systèmes multimachines multiconvertisseurs. Application à la résolution de problèmes en traction électrique", *Thèse de doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, juillet 2002.
- [PIERQUIN 02b] : J. Pierquin, A. Bouscayrol, Ph. Degobert, J. P. Hautier, B. Robyns, "Torque control of an induction machine based on resonant current controllers", *Proc. of ICEM'2002*, CD-ROM, Brugge (Belgium), August 2002.
- [PIETRZAK 88] : M. Pietrzak-David, "Algorithmes de commande d'un variateur électrique asynchrone : contrôle dynamique du flux, commande optimale en position", *Thèse de Docteur es-sciences de l'INPT*, LEEI, Toulouse, 1988.
- [PIETRZAK 00] : M. Pietrzak-David, B. de Fornel, X. Roboam, "Estimations et observations déterministes et stochastiques des états électromagnétiques", *Commande des moteurs asynchrones*, vol. 2, chap. 4, Hermès Sciences, Paris, 2000.
- [PIQUET 03] : H. Piquet, H. Foch, F. Bernot, "Conception de systèmes de conversion de l'énergie électrique à l'aide d'éléments caractérisés", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 4, n°3-4, pp. 217-235, 2001.
- [PISZEWSKI 01] : C. Piszewski, D. Knittel, H. Koç, E. Aubry, "Optimization of speed changes in web unwinding-winding systems", *SEM 2001*.
- [POPA 02] : I. S. Popa, M. O. Popescu, A. Bouscayrol, "Causal models for urban traction systems", *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 20, no. 1, pp 37-42, January/February 2002, (common paper Univ. Polytech. Bucarest and L2EP Lille).
- [POWELL 98] : B. K. Powell, K. E. Bailley, S. R. Cikanek, "Dynamic modelling and control of hybrid electric vehicle powertrain systems", *IEEE Control Systems Magazine*, October 1998, pp. 17-33.
- [PROVOOST 98] : M. Provoost, C. Courtois, "Traction électrique : dynamique ferroviaire et sous stations", *Techniques de l'ingénieur*, traité de Génie Electrique, ref. D 5501, pp. 1-12, Paris 1998.

- R -

- [REBIS 03] : Association REBIS, "Quelques généralités sur l'approche systémique et sur les techniques Qualité", *site Internet de l'association*, <http://jfa04.chez.tiscali.fr/gensyst.html>, consulté en mars 2003.
- [ROBYNS 00] : B. Robyns, "Synthèse de commandes robustes pour machines asynchrones basée sur une théorie caractérisant la sensibilité paramétrique", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'USTL*, L2EP, Lille, 2000.
- [ROBOAM 00] : X. Roboam, "De la modélisation à la commande et à la caractérisation des systèmes électromécaniques à propulsion asynchrone", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'INPT*, LEEI, Toulouse, mars 2000.
- [ROBOAM 00b] : X. Roboam, B. de Fornel, M. Pietrzak-David, "Lois de commande directe de couple du moteur asynchrone", *Commande des moteurs asynchrones*, vol. 1, chap. 6, Hermès Sciences, Paris, 2000.
- [ROBERT 02] : E. Robert-Dehault, M. F. Benkhoris, E. Semail, "Study of a 5-phase synchronous machine fed by PWM inverters under fault conditions", *Proc. of ICEM'2002*, CD-ROM, Brugge (Belgium), August 2002 (common paper of GE44 St Nazaire and L2EP Lille, according to the MMS project of GDR-SDSE).
- [ROGEZ 03] : V. Rogez, E. Mogos, E. Vandenbrande, X. Guillaud, "Simplified Model for Power Electronic Devices in Electrical Grid: Applications for Renewable Energy Systems", *Proc. of CESA*, CD-ROM, Lille, juillet 2003.
- [RUBIN 97] : Z. Rubin, S. Munns, J. Moskowa, "The development of vehicular powertrain system modeling methodologies: philosophy and implementation", *System Automotive Engineering*, paper 971089, 1997.
- [RUFER 03] : A. Rufer, N. Schibli, C. Chabert, C. Zimmermann, "Configurable front-end converter for multicurrent locomotives operated on 16 2/3 Hz and 3 kV DC systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 5, September 2003, pp. 1186-1193.

- S -

- [SABATE 98] : V. Sabaté, "Traction électrique ferroviaire, convertisseurs et moteurs", *Techniques de l'ingénieur*, traité de Génie Electrique, ref. D5502, pp. 1-38, Paris, 1998.
- [SAKAI 00] : S. Sakai, H. Hori, "Advantage of electric motor for anti-skid control of electric vehicle", *Proc. of EPE-PEMC'2000*, CD-ROM, Kosice (Slovak Republic), September 2000.
- [SAUVAT 03] : D. Sauvat, "Principes généraux de modélisation systémique", *cours de l'Institut National d'Agronomie de Paris-Grignon*, Paris, 2003, disponible sur <http://www.inapg.inra.fr/dsa/cours/systemique/systemique.pdf>
- [SCHAUDER 92] : C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1054-1061, September/October 1992.
- [SCHROEDL 02] : M. Schrödl, E. Schmidt, S. Ojak, "The duomotor - A novel double rotor machine construction and control", *Proc. of ElectrIMACS'02*, CD-ROM, Montreal, August 2002.
- [SEMAIL 00] : E. Semail, "Outils et méthodologie d'étude des systèmes électriques polyphasés. Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace", *Thèse de doctorat de l'USTL*, L2EP, Lille, juin 2000.
- [SEMAIL 01a] : E. Semail, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Pseudo-multimachine et commande", *Actes du Séminaire SMM'00 du GDR-SDSE*, Lille, février 2001.
- [SEMAIL 01b] : E. Semail, C. Rombaut, "New tools for studying voltage-source inverters", *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 3, pp. 47-48, March 2002.
- [SEMAIL 01d] : E. Semail, X. Kestelyn, A. Bouscayrol, "Concept multimachine pour machines polyphasées" *Actes du Séminaire SMM'01 du GDR-SDSE*, Cachan, 25-26 octobre 2001.
- [SEMAIL 03] : E. Semail, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Vectorial formalism for analysis and design of polyphase synchronous machines", *European Physics Journal - Applied Physics*, vol. 22 no. 3, pp. 207-221, June 2003.
- [SIALA 03] : S. Siala, E. Guette, J. L. Pouliquen, "Multi-inverter PWM control: a new generation drives for cruise ship electric propulsion", *Proc. of EPE'03*, Toulouse, September 2003, CD-ROM.
- [SICARD 02] : P. Sicard, N. Elouariachi, S. Lahaie, "Characterisation of sensitivity to voltage sags of mechanically coupled induction motors", *ElectrIMACS'2002*, CD-ROM, Montreal (Canada), August 2002.
- [SIMOES 02] : M. G. Simoes, P. Viera, "A high-torque low speed multiphase brushless machine, a perspective application for electric vehicles", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 5, pp. 1154-1164, October 2002.
- [SLAMA 85] : I. Slama-Belkhodja, "Identification des paramètres d'une machine asynchrone pour le dimensionnement de convertisseur statique associé", *Thèse de docteur Ingénieur de l'INPT*, Toulouse, 1985.
- [SMM 00a] : (*MMS project of GdR SDSE*) A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, "Multimachine Multiconverter System: application for electromechanical drives", *European Physics Journal - Applied Physics*, vol. 10, no. 2, May 2000, pp. 131-147 (common paper of GREEN Nancy, L2EP Lille and LEEI Toulouse).
- [SMM 00b] : (*MMS project of GdR SDSE*) A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, "Multimachine Multiconverter Systems for drives: analysis of coupling by a global modeling", *Proc. of IEEE-IAS anual meeting 2000*, CD-ROM, Rome, October 2000, (common paper of GREEN Nancy, L2EP Lille and LEEI Toulouse).
- [SMM 01] : (*MMS project of GdR SDSE*) A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, "Control structure for multimachine multiconverter systems with downstream coupling", *Proc. of EPE'2001*, CD-ROM, Graz (Austria), September 2001 (common paper of GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse and LESiR Cachan).
- [SMM 02] : (*MMS project of GdR ME²MS*) A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, M. F. Benkhoris, "Control Structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", *invited paper in the MMS session of ElectrIMACS'2002*, CD-ROM, Montreal (Canada), August 2002 (common paper of GE 44 St Nazaire, GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse and LESiR Cachan).

- [SMM 03] : (*projet SMM du GdR SDSE*) A. Bouscayrol, B. Davat, P. Escané, B. de Fornel, B. François, D. Hadiouche, J. P. Hautier, J. P. Martin, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, V. de Olivera, R. Peña-Eguiluz, J. Pierquin, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, "Structures de commande des Systèmes Multi-machines Multi-convertisseurs", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 6, n°3-4/2003, pp. 325-350, octobre 2003, (article commun GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse, et LESiR Cachan).
- [SMM 04] : (*MMS project of GdR ME²MS*) A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, M. F. Benkhoris, "Control Structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 63, no3-5, November 2003, pp. 261-270, (common paper of GE 44 St Nazaire, GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse and LESiR Cachan, selected from ElectrIMACS'2002).
- [SONG 00a] : T. Song, B. Dhinakaran, X. Bao, "Variable speed control of wind turbines using non-linear and adaptive algorithms", *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 85, pp. 293-308, 2000.
- [SONG 00b] : S. Song, S. Sul, "A new tension controller for continuous strip processing line", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 633-639, March/April 2000.
- [SPÉE 95] : R. Spée, S. Bhowmik, J. Enslin, "Novel control strategies for variable-speed doubly fed wind power generations systems", *Renewable Energy*, vol. 6, no. 8, pp. 907-915, 1995.
- [SRIHAN 93] : S. Srihan, L. Tan, H. Ting, "Reduced transient model of a group of induction motors", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 8, no. 4, pp. 769-777, December 1993.
- [STEFANOVIC 92] : V. stefanovic, "Industrial AC drives status of technology", *EPE Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 7-24, March 1992.
- [STEIMEL 96] : A. Steimel, "Electric railway traction in Europe", *IEEE Industry Application Magazine*, pp. 8-17, November 1996.

- T -

- [TAKAHASHI 86] : I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 22, no. 5, pp. 375-378, 1986.
- [THIFFAULT 04] : C. Thiffault, P. Sicard, A. Bouscayrol, "Tension control loop using a linear actuator based on the Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-CCECE'04*, Niagara Falls (Canada), May 2004 (common paper of CPEE Université de Québec Trois Rivières and L2EP Lille).
- [THIRINGER 01] : T. Thiringer, T. Petru, C. Liljegren, "Power quality impact of a sea located hybrid wind park", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 16, no. 2, pp. 123-127, June 2001.
- [TOLIYAT 98] : H. A. Toliyat, "Analysis and simulation of five-phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connections", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 13 no. 4, pp. 748-756, July 1998.
- [TOLIYAT 00] : H. A. Toliyat, S. Ruhe, X. Huansheng, "A DSP-based vector control of five-phase synchronous reluctance motor", *Proc. of IEEE-IAS annual meeting 2000*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [TOUNZI 02] : A. Tounzi, A. Bouscayrol, Ph. Delarue, C. Brocart, J. B. Tritsch, "Simulation of an induction machine wind generation system based on an Energetic Macroscopic Representation", *Proc. of ICEM'2002*, CD-ROM, Brugge (Belgium), August 2002 (common paper of L2EP Lille and LML Lille).
- [TRIGUI 03] : R. Trigui, F. Badin, B. Jeanneret, F. Harel, G. Coquery, R. Lallemand, J. P. Ousten, M. Castagné, M. Debest, E. Gittard, F. Vangraefshepe, V. Morel, L. Baghli, A. Rezzoug, J. Labbé, S. Biscaglia, "Hybrid light duty vehicles evaluation program", *International Journal of Automotive Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 65-75, June 2003.
- [TRIGUI 04] : R. Trigui, B. Jeanneret, F. Badin, "Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques, construction de la bibliothèque de modèle VEHLIB", *revue RTS*, Elsevier, à paraître en 2004.

- V -

- [VALTCHEV 00] : V. Valtchev, A. Van den Bosche, J. Gijssels, J. Melkebeek, "Autonomous renewable energy conversion system", *Renewable Energy*, vol. 19, no. 1-2, pp. 259-275, January, 2000.

- [VALENZUELA 01] : M. Valenzuela, R. Lorenz, "Electronic line-shafting control for paper machine drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 158-164, January/February 2001.
- [VANDERBROECK 84] : H. Van der Broeck, J. Van Wyk, "A comparative investigation of a three-phase induction machine drive with a component minimized voltage fed-inverter under different control option", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 20, pp. 309-320, March/April 1984.
- [VAS 90] : P. Vas., "Vector control of AC machines", *Clarendon Press*, Oxford, 1988.
- [VASSEUR 98] : C. Vasseur, "Réalisation numérique des correcteurs", *Technique de l'Ingénieur, Traité Automatique*, ref. R 7117, pp. 1-12, Paris 1998.
- [VERGHESE 88] : G. Verghese, S. Sanders, Observers for flux estimation in induction machines, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 85-94, February 1988.
- [VERHILLE 03] : J. N. Verhille, "Contribution à la commande de systèmes multimachines, application au métro VAL 206", *rapport interne, L2EP-STES*, Lille, octobre 2003.
- [VIDAL 03] : P. E. Vidal, M. Pietrzak-David, B. de Fornel, "Stator flux oriented control of a doubly fed induction machine", *Proc. of EPE'2003 CD-ROM*, Toulouse, September 2003.
- [VIDAL 04] : P. E. Vidal, P. Delarue, A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, "Control of a bi-converter mono-machine system based on the energetic macroscopic representation", *Proc. of ICEM'04*, Lodz (Poland), September 2004 (common paper of LEEI Toulouse and L2EP Lille, according to the MMS project of the GdR-ME2MS)..
- [VULTURESCU 98b] : B. Vulturescu, A. Bouscayrol, F. Ionescu, "Model influence on simulation of induction machine vector control", *Proc. of ATEE'98*, pp 137-142, Bucharest, December 1998, (common paper L2EP Lille and LCS Bucharest).
- [VULTURESCU 00] : B. Vulturescu, A. Bouscayrol, X. Guillaud, F. Ionescu, J. P. Hautier, "Behavior model control of a dc machine", *Proc. of ICEM' 2000*, vol. 1, pp 427-431, Espoo (Finland), August 2000 (common paper of L2EP Lille and LCS Bucharest).
- [VULTURESCU 01] : B. Vulturescu, A. Bouscayrol, F. Ionescu, J. P. Hautier, "Limitation algorithms for the behaviour model control", *Revue Roumaine des Sciences et Technique*, série Electrotechnique et Energétique, vol. 46, no. 2, pp 239-252 April-June 2001 (common paper L2EP Lille and LCS Bucharest).
- [VULTURESCU 02] : B. Vulturescu, "Contribution à la commande robuste des systèmes électromécaniques par la méthode du modèle de comportement. Application à la commande des systèmes multimachines", *Thèse de doctoral de l'USTL*, L2EP, Lille, mars 2002 (co-tutelle avec l'Université Polytechnique de Bucarest).

- W -

- [WELCHKO 03] : B. Welchko, T. Lipo, T. Jahns, S. Schulz, "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost and limitations", *Proc. of IEEE-IEMDC'03*, CD-ROM, Madison (WI, USA), June 2003.
- [WU 88] : B. Wu, S. B. Dewan, P. Sen, "A modified current-source inverter for a multiple induction motor drive system", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 10-16, January 1988.
- [WULVERYCK 00] : M. Wulveryck, "Contrôle de courants alternatifs par correcteur résonnant multifréquentiel, application à la commande de systèmes électrotechniques non linéaires", *Thèse de doctoral de l'USTL*, L2EP, Lille, juin 2000.
- [WURTZ 03] : F. Wurtz, "Statut et nature des modèles que nous utilisons en électrotechnique", *Actes de EF 2003*, CD-ROM, Supélec, décembre 2003.

- X -

- [Xu 02] : H. Xu, H. A. Toliyat, L. Petersen, "Five-phase induction motor drives with DSP-based control system", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 4, pp. 524-533, July 2002.

- Y -

- [YE 00] : Z. Ye, D. Boroyevich, F. C. Lee, "Paralleling non-isolated multi-phase PWM converter", *Proc. of IEEE-IAS annual meeting 2000*, CD-ROM, Rome, October 2000.
- [YANG 01] : Z. Yang, M. Henke, H. Gtrotstollen, "Pitch analysis and control design for the linear motor of a railway carriage", *Proc. of IEEE-IAS annual meeting 2001*, CD-ROM, Chicago, October 2001.

- Z -

- [ZHEN 98] : L. Zhen, L. Xu, "Sensorless field orientation control of induction machines based on a mutual MRAS scheme", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 824-830, October 1998.
- [ZINGER 97] : D. Zinger, E. Muljadi, "Annualized wind energy improvement using variable speed", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, no. 6, pp. 1444-1447, November/December 1997.