

N° D'ORDRE : 41064

RAPPORT DE SYNTHÈSE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ LILLE 1

EN VUE D'OBTENIR

**L'HABILITATION À DIRIGER DES
RECHERCHES**

PAR

CHRISTOPHE SAUDEMONT

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

**MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT
DE STRATÉGIES DE SUPERVISION
ÉNERGÉTIQUE EN TEMPS REEL DANS LES
SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DE PUISSANCE**

SOUTENANCE LE 31 JANVIER 2013, DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

M. LE PROFESSEUR	E. MONMASSON	RAPPORTEUR
M. LE PROFESSEUR	S. PIERFEDERICI	RAPPORTEUR
M. LE DIRECTEUR DE RECHERCHE	X. ROBOAM	RAPPORTEUR
M. LE PROFESSEUR	F. LABRIQUE	EXAMINATEUR
M. LE PROFESSEUR	M.M. RADULESCU	EXAMINATEUR
M. LE PROFESSEUR	N. IDIR	EXAMINATEUR
M. LE PROFESSEUR	B. FRANCOIS	EXAMINATEUR
M. LE PROFESSEUR	B. ROBYNS	EXAMINATEUR

SOMMAIRE

CURRICULUM VITAE	I
ACTIVITES D’ENSEIGNEMENT, DE RECHERCHE, ET RESPONSABILITES	III
A. ACTIVITE D’ENSEIGNEMENT	V
B. ACTIVITE DE RECHERCHE	VI
1. <i>Encadrement de thèses de doctorat</i>	vii
2. <i>Collaboration avec de jeunes docteurs et ingénieurs de recherche</i>	xii
C. RESPONSABILITES DE PROGRAMMES ET PROJETS SCIENTIFIQUES	XIII
D. AUTRES INFORMATIONS.....	XV
PUBLICATIONS	XVII
MEMOIRE SCIENTIFIQUE	1
A. INTRODUCTION	1
1. <i>Contextes économique et environnemental</i>	2
2. <i>Objectifs et défis de mes travaux de recherche</i>	6
B. CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE METHODOLOGIQUE.....	10
1. <i>Méthodologie de développement de stratégies de supervisions énergétiques basées sur des règles</i>	11
2. <i>Méthodologie d’optimisation des superviseurs à base de règles floues</i>	16
3. <i>Méthodologies expérimentales</i>	20
4. <i>Conclusion</i>	26
C. EXEMPLES D’APPLICATIONS	26
1. <i>Réseau terrestre : Eolienne à vitesse variable associée à un système inertiel de stockage d’énergie</i>	27
2. <i>Réseau embarqué : Réseau local DC à échanges d’énergie en aéronautique</i>	45
3. <i>Conclusion</i>	81
D. AUTRES TRAVAUX	81
1. <i>Contribution des convertisseurs multiniveaux NPC au raccordement de la production d’origine éolienne sur un réseau électrique</i>	82
2. <i>Etude du système de conversion électromécanique d’une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable</i>	87
3. <i>Contribution d’une éolienne à vitesse variable au réglage primaire de fréquence, basé sur un superviseur à règles floues</i>	89
SYNTHESE	97
A. BILAN.....	99
B. PERSPECTIVES	103
ANNEXES	105
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	121

CURRICULUM VITAE

SAUDEMONT Christophe

Né le 13/11/1971

Marié, 2 enfants

Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur HEI

13, rue de Toul - 59046 LILLE Cedex

Tél. : 03 28 38 48 58 / Mél. : christophe.saudemont@hei.fr

Qualifié aux fonctions de **Maître de Conférences**, en **63^{ème} section**.

Expérience professionnelle

A l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur – HEI Lille

Enseignant-Chercheur au département Energies, Electricité et Automatique - EEA (ex. Génie Electrique) à partir de septembre 2001.

Chercheur intégré au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) à partir de juin 2002.

Responsable du pôle de recherche Réseaux Electriques – Transports Intelligents à partir de 2007.

Responsable du département EEA en 2008-2009.

A l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electrotechnique et Electronique - ESIEE Amiens

Enseignant-Chercheur au département Systèmes et Energie, à partir de septembre 2000, pour une durée d'un an.

A l'IUT de Génie Electrique et Informatique Industrielle - Béthune

Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche, à partir de septembre 1998, pour une durée de 2 ans.

Au sein de l'Armée de l'Air, dans le cadre du Service National

A l'Ecole des Officiers de Réserve de l'Armée de l'Air, à Evreux, en tant qu'élève officier,

A l'Ecole de formation des Sous-officiers de l'armée de l'air, à Rochefort, en tant qu'officier chargé de la formation des élèves sous-officiers.

Formation

Docteur en Génie Electrique à l'Université des Sciences et Technologies de Lille en novembre 1999.

Sujet de la thèse de doctorat : "*Contribution à une synthèse structurelle et développement d'un modèle de variation des convertisseurs à sortie haute tension*", sous la direction du Professeur C. ROMBAUT.

Service National, en 1998

DEA de Génie Electrique à l'Université des Sciences et Technologies de Lille en juin 1994.

Sujet du mémoire de DEA : "Modélisation et compensation des temps morts dans les structures entièrement commandées".

**ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT,
DE RECHERCHE, ET
RESPONSABILITES**

A. Activité d'enseignement

Mon activité d'enseignement se déroule aujourd'hui au sein de l'école HEI (Hautes Etudes d'Ingénieur) de Lille, où ma charge se répartit en cours magistraux, travaux dirigés et travaux pratiques dispensés aux étudiants du cycle Ingénieur (HEI3, HEI4 et HEI5), pour l'essentiel en domaine d'enseignement *Energies et Systèmes Electriques Automatisés (ESEA)*. Mais c'est en 1995 qu'elle a débuté, alors que j'entamais ma thèse de Doctorat, par des vacances à l'Ecole Centrale de Lille, pour se poursuivre par deux années d'ATER à l'IUT de Béthune, de 1998 à 2000, et une année à l'ESIEE d'Amiens.

Activité menée à l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur

J'occupe depuis septembre 2001 la fonction d'Enseignant-Chercheur au sein du département Energies, Electricité et Automatique (ex. Génie Electrique) de l'école HEI de Lille. J'y dispense des cours magistraux, des travaux dirigés, ainsi que des travaux pratiques, aux élèves Ingénieurs de 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} années, en Tronc Commun et en Domaine *Energies et Systèmes Electriques Automatisés*.

Les disciplines dispensées sont classiques aux enseignements de Génie Electrique (Electronique de puissance, Distribution de l'Energie Electrique, Mesures Electriques, Instrumentation numérique, Instrumentation dans les systèmes).

Le volume annuel moyen d'enseignement représente environ 197h équivalent TD.

Je suis responsable des modules de cours que je dispense (à l'exception du module de Distribution de l'Energie Electrique), et gère les enseignants extérieurs à HEI, pouvant intervenir dans ces modules, l'évolution des contenus pédagogiques et des moyens pédagogiques associés.

Les suivis de projets (la pédagogie par projet a été intégrée à la formation des élèves à partir de 2006), de stages (en cycle Ingénieur) font bien entendu partie de cette activité pédagogique.

Activité menée à l'ESIEE d'Amiens

J'ai occupé, le temps d'une année scolaire, la fonction d'enseignant-chercheur à l'ESIEE Amiens, en intégrant, en septembre 2000, le département Systèmes et Energie.

J'ai développé et enseigné des cours, travaux dirigés et travaux pratiques d'électronique de puissance, destinés aux élèves ingénieurs de tronc commun (3^{ème} année) et de la Majeure Génie des Systèmes Electriques (4^{ème} et 5^{ème} années), pour un volume d'environ 150h équivalent TD. J'étais bien sûr responsable de ces modules, dont j'assurais le développement.

Activité menée à l'IUT de Béthune

J'ai occupé pendant deux années, à partir de la rentrée 1998, la fonction d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'IUT de Génie Electrique et d'Informatique Industrielle de Béthune (charge d'enseignement complète chaque année). J'y ai dispensé uniquement des séances de travaux pratiques, en Electronique, Electrotechnique, Equipement et Mesures Electriques, aux élèves de 1^{ère} et 2^{ème} années.

Activité menée à l'Ecole Centrale de Lille

La première expérience d'enseignement devant des groupes d'élèves, débuta donc à l'Ecole Centrale de Lille, alors que j'y menais ma thèse de doctorat, en 1995. Il s'agissait de travaux pratiques d'électronique, d'électrotechnique et de capteurs aux étudiants de 2^{ème} et 3^{ème} années (env. 180h) et de travaux dirigés d'analyse numérique et probabilités aux étudiants de 1^{ère} année (env. 60h).

B. Activité de recherche

L'équipe RESEAUX (initialement *Réseaux Electriques et Systèmes Energétiques*) est née en mars 2002, dans un contexte régional qui avait connu, deux années plus tôt, la création du Centre National de Recherche Technologique (CNRT) *FUTURELEC (Réseaux et Machines Electriques du Futur)*. Comme pour les chercheurs qui furent à l'origine de sa création, intégrer cette équipe en juin 2002 exigea de moi une évolution thématique, même si je n'abandonnais pas l'idée de mettre mes compétences en électronique de puissance au service des *réseaux électriques du futur*.

L'équipe a donc grandi en même temps que ses chercheurs évoluaient au cœur de leurs projets respectifs. Aujourd'hui, le CNRT n'est plus, et le pôle MEDEE (*Maîtrise Energétique des Entraînements Electriques*) lui a succédé, il y a environ trois ans.

En ce qui me concerne, au sein de l'équipe, j'ai très rapidement pris en main le développement de moyens expérimentaux, au travers d'une plateforme d'essai située sur le site de HEI, dénommée *Plateforme Energies Electriques*. Nous verrons au cours de ce mémoire que cet outil est un formidable moyen de validation expérimentale. Il est aussi un levier indispensable à la valorisation de nos travaux et au développement de nouveaux projets. Qu'il me soit permis de remercier les partenaires institutionnels qui, au travers de différents projets, contribuent à son financement : l'Europe, l'Etat et la Région Nord-Pas de calais, via les fonds mis à disposition au travers des projets développés dans le cadre du pôle MEDEE, ainsi que l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Je n'oublie pas qu'au tout début de l'aventure, via des projets de fin d'étude à HEI (*Travaux d'Etude Recherche - TER*), le soutien d'industriels régionaux fut également précieux, notamment celui de Forclum Ingénierie, à Verquin (ex. Norelec et aujourd'hui Eiffage Energie), et de son Directeur, Jean-Michel GRAVE.

Depuis 2006, grâce à certains de ces financements institutionnels, des ingénieurs de recherche ou post-docs, recrutés pour des durées déterminées, ont successivement contribué au développement et à l'exploitation de cette plateforme. Consciente de l'importance d'un tel équipement pour la croissance de l'activité de recherche, et témoignant de la volonté de consolider les efforts jusqu'alors réalisés, HEI a procédé en 2011, au recrutement, de façon permanente, d'un ingénieur de recherche.

Parallèlement au développement de ces moyens d'essais, je portais mes efforts de recherche sur la problématique de l'intégration des sources d'énergie renouvelable, à caractère fortement variable et aléatoire (type éolien, photovoltaïque) dans les réseaux électriques, ainsi que sur la problématique des gains en efficacité énergétique des systèmes électriques.

La thèse de Gabriel CIMUCA, réalisée en co-tutelle entre l'Université Technique de Cluj-Napoca (Roumanie) et l'Ecole Nationale des Arts et Métiers (Lille), fut la première que j'encadrerai, et de surcroît sur le thème de l'intégration des énergies renouvelables dites « subies » dans les réseaux. Cette thèse a été soutenue en décembre 2005.

Cinq autres thèses ont suivi cette première expérience d'encadrement de jeune chercheur, parmi lesquelles trois ont à ce jour été soutenues.

Dans le même temps, j'ai pris en charge la responsabilité de projets scientifiques, développés, selon les cas, en partenariat avec des équipes de recherche et des acteurs industriels nationaux.

Ces différents aspects de mon activité de recherche vont être développés dans la présente partie, ainsi que d'autres contributions liées à cette activité.

1. Encadrement de thèses de doctorat

A ce jour, j'ai co-encadré quatre thèses ayant déjà été soutenues, et je co-encadre deux thèses, débutées respectivement en 2010 et 2011.

a. Thèse de Gabriel CIMUCA

« *Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens* », soutenue le 2 décembre 2005 à Cluj-Napoca (Roumanie).

Cette thèse a été menée dans le cadre d'une co-tutelle entre l'Université Technique de Cluj-Napoca (Roumanie) et l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (Lille), sous la direction commune de MM. B. ROBYNS et M.M. RADULESCU. Ma contribution à l'encadrement de ces travaux était d'environ 35%.

Ce travail aborde la problématique de l'intégration des sources d'énergie renouvelable, à caractère fortement variable et aléatoire (type éolien, photovoltaïque) dans les réseaux électriques. Il fait suite aux travaux de thèse de Ludovic LECLERCQ, qui traitent de l'association, au sein d'un réseau ilien, d'une éolienne à vitesse fixe, d'un alternateur couplé à un moteur diesel et d'un Système Inertiel de Stockage d'Energie (SISE), via le réseau alternatif (Figure 1), et qui visent au développement d'une supervision contribuant au lissage de la puissance délivrée par le groupe alternateur-diesel.

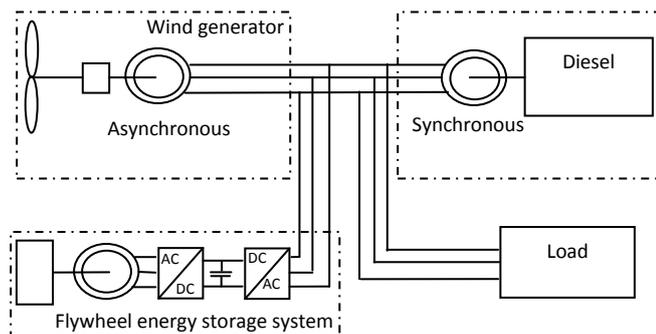


Figure 1 – Schéma global d'un générateur éolien à vitesse fixe associé à un SISE et à un groupe alternateur-diesel via le réseau AC

La solution technologique investiguée dans la thèse de G. CIMUCA, est celle d'une éolienne à vitesse variable (Génératrice Synchrones à Aimants Permanents) connectée au réseau électrique via un convertisseur AC/DC/AC « dos à dos » à base d'IGBT, associée à un SISE connecté au bus continu (Figure 2).

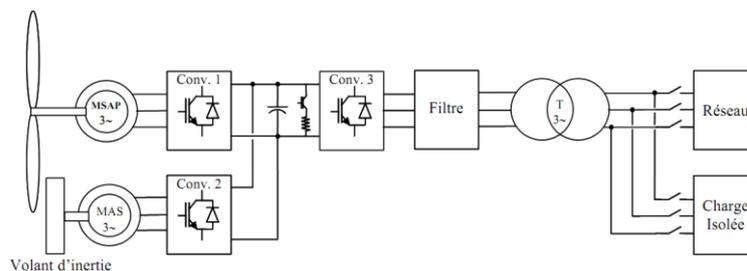


Figure 2 – Eolienne à vitesse variable associée à un dispositif de stockage inertiel

Après une étude approfondie sur les SISE (dimensionnement, choix de la machine d'entraînement, rendements, ...etc.), ces travaux ont porté sur la supervision énergétique de la Source Hybride d'Energie (SHE) ainsi réalisée, avec comme objectif de lisser la puissance injectée au réseau, d'assurer le maintien de la tension du bus continu, tout en veillant à maintenir le stockage disponible, soit pour fournir, soit pour récupérer de l'énergie.

Les développements théoriques réalisés au cours de cette thèse ont fait l'objet de nombreuses validations expérimentales sur la *Plateforme Energies Electriques*.

Je reviendrai sur ces travaux dans la partie de ce mémoire traitant de ma contribution scientifique, en tant que cas d'application pour les réseaux terrestres.

Toutefois, il m'est déjà possible de dire que, d'un point de vue développements théoriques, cette thèse a été pour moi la première brique de la **construction méthodologique de superviseurs énergétiques en temps réel**, à base de logique floue, dans les systèmes électriques de puissance.

Elle m'a également permis d'amorcer une réflexion au niveau des développements d'**architectures** de systèmes dits « hybrides », interconnectant des sources, des charges et des dispositifs de stockage, au sein de réseaux électriques, **en courant continu**.

D'un point de vue développements expérimentaux, elle fut la première à exploiter la plateforme en y intégrant ces superviseurs. La nécessité d'une **méthodologie expérimentale** visant à permettre l'implantation en temps réel des superviseurs à base de logique floue, est née de ce travail.

Enfin, elle fût pour moi la première expérience de collaboration avec une équipe de recherche internationale. Grâce à Gabriel, et au professeur RADULESCU, cette expérience fût très enrichissante, scientifiquement et humainement. Je les en remercie.

Publications associées¹ : [5], [10], [14], [18], [20], [21], [37], [39-42], [45], [51].

b. Thèse d'Omar BOUHALI

« **Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique** », soutenue le 19 Avril 2007 à Alger (Algérie).

Cette thèse a été menée dans le cadre d'une co-tutelle entre l'Ecole Centrale de Lille et l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction commune de MM. B. FRANCOIS et E.M. BERKOUK. Ma contribution à l'encadrement de ces travaux était d'environ 25%.

Elle traite du raccordement au réseau électrique d'éoliennes à vitesse variable associées à du stockage inertielle d'énergie, par l'intermédiaire de convertisseurs de tension multiniveaux, de type NPC (*Neutral Point Clamped*). Le recours à ce type de convertisseurs, dans une topologie 3 niveaux, est aujourd'hui envisagé par les industriels du monde de l'éolien [1] (Figure 3).

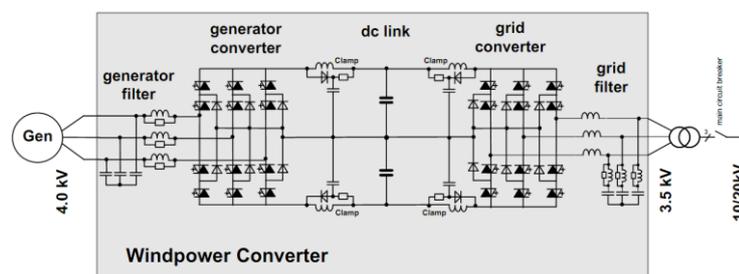


Figure 3 - Raccordement d'une génératrice éolienne via un convertisseur Back-to-back NPC (Source ABB)

L'idée originelle du travail réalisé dans la thèse d'O. BOUHALI, est d'exploiter la multiplicité de points de raccordement présents au niveau du bus continu, afin d'y connecter des systèmes de production ou/et de stockage. La Figure 4 regroupe deux exemples de raccordement qui ont fait l'objet de développements dans cette thèse.

¹ Cf. page xvii et suivantes.

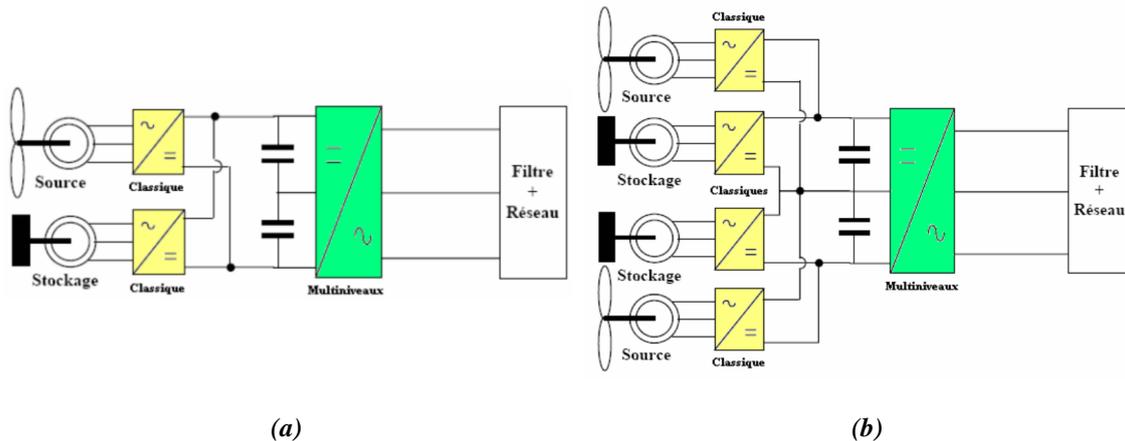


Figure 4 – Exemples de raccordement de génératrices éoliennes et de systèmes de stockage, au réseau électrique, via un convertisseur NPC.

La solution de la Figure 4 (a) utilise le convertisseur NPC uniquement pour la connexion au réseau. Le gain est donc visible en termes de contenu harmonique de la tension au point de raccordement, côté réseau. Les montées en tension et en puissance ne sont pas envisageables, car l'éolienne et le stockage sont raccordés à la totalité du bus continu, à l'aide de convertisseurs classiques, non clampés par le neutre.

La solution de la Figure 4 (b) raccorde deux ensembles « Eolienne + Stockage + Convertisseur classique » (ESC) au réseau, via un seul point de raccordement de type NPC. Chacun de ces ensembles est connecté en parallèle sur un condensateur du bus DC. Le degré de liberté lié à la mise en série des condensateurs est exploité.

Une première partie des travaux d'Omar a porté sur le développement de commandes destinées au convertisseur NPC, visant à exploiter les possibilités de redondances au niveau des vecteurs de commande, afin de contribuer au maintien de la tension du bus continu. Une étude généralisée à des convertisseurs NPC à N niveaux a été réalisée.

Ensuite, ces convertisseurs NPC, associés à ces commandes, ont servi d'interface avec le réseau afin d'étudier les architectures des Figure 4 (a) et Figure 4 (b). Comme pour les travaux de G. CIMUCA, une supervision a été mise en place, visant les mêmes objectifs (lissage de la puissance injectée au réseau, maintien de la tension du bus continu et absence de saturations haute et basse du stockage). Cette partie du travail a permis de montrer comment la commande spécifique du convertisseur NPC allait permettre, indirectement, via le contrôle des tensions aux bornes de chaque condensateur, de répartir les énergies stockées dans les différents SISE.

En termes de développements expérimentaux, ces travaux ont sollicité la *Plateforme Energies Electriques*, ainsi que les moyens situés sur le site de l'Ecole Centrale de Lille.

Des résultats seront présentés un peu plus en détail, dans la partie *Autres travaux*.

Publications associées : [9], [11], [13], [15-17], [36], [43], [44].

c. Thèse de He ZHANG

« *Gestion décentralisée de réseaux continus à forte disponibilité en aéronautique* », soutenue le 24 juin 2010, à l'Université Lille1.

Cette thèse s'est déroulée sous la direction du professeur B. ROBYNS. Ma contribution à l'encadrement de ces travaux était d'environ 50%.

Pour plusieurs raisons, elle fut une « première » dans ma carrière de chercheur.

Tout d'abord, elle fut, en ce qui me concerne, mais aussi pour l'équipe, la première à concerner le champ applicatif des **réseaux électriques embarqués**. Et plus particulièrement en aéronautique, puisqu'elle fit l'objet d'un **partenariat industriel** avec Hispano-Suiza, représentée par M. Régis MEURET.

Puis, elle fut la **première** à s'inscrire dans le cadre du **programme Futurelec7** « Gestion énergétique de réseaux électriques embarqués » (qui allait devenir, en 2010, MEDEE7), dont j'ai pris la **responsabilité scientifique**. Elle put bénéficier d'un contexte financier favorable : co-financement de la thèse de He ZHANG, de matériel coûteux pour le développement de la plateforme, et d'un poste, à durée déterminée, d'ingénieur de recherche.

Le contexte industriel de ces travaux est celui de l'avion plus électrique (*More Electrical Aircraft – MEA*) et du développement de réseaux électriques locaux (pour le cas présent), de type continu (DC), à échanges d'énergie, au sein des futurs aéronefs : des sources locales de production d'électricité, des charges bidirectionnelles en puissance, ainsi que des systèmes de stockage d'énergie et de dissipation, peuvent alors être interconnectés par un bus continu de tension, associés à des protections électriques adaptées.

Une part importante du travail de He ZHANG a porté sur le **développement de stratégies de supervision énergétique** de ces réseaux locaux. En fonction des objectifs, des contraintes et des moyens d'action identifiés, différents outils ont été mis en œuvre. Il a notamment été mis en évidence l'importance de considérer des stratégies multi-objectifs, portant par exemple sur le maintien de la tension du bus DC, sur la disponibilité du stockage, sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, ...etc.

Cette thèse a également comporté une réflexion sur le développement de **stratégies de protections électriques** de ces réseaux locaux DC, où les flux de puissances peuvent être inversés, sans que cela témoigne d'un quelconque défaut, et où le stockage est susceptible d'alimenter le défaut, si la supervision énergétique n'est pas adaptée. Cette phase de la thèse a en partie été abordée avec des **chercheurs de SUPELEC**, partenaire académique du programme Futurelec 7.

Enfin, la question de la contribution du stockage, associé à une dissipation, sur la **stabilité du réseau DC local**, a été abordée, via une étude de type petit signal. Celle-ci a permis de montrer l'apport d'une telle solution pour certains points de fonctionnement, sans pouvoir toutefois généraliser, en raison de la méthode employée.

La problématique abordée lors de cette dernière phase du travail nous a permis de nous rapprocher de **l'équipe de recherche du GREEN** (Groupe de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nancy), reconnue pour ses travaux portant sur le *comportement dynamique des systèmes électriques*.

Les développements méthodologiques de supervision, développés par He ZHANG, feront l'objet d'une présentation détaillée, en tant que cas d'application des réseaux embarqués, dans la section *Exemples d'applications*. Des résultats expérimentaux y seront également présentés.

Publications associées : [3-4], [12], [19], [28-33]

d. Thèse de Pascal MONJEAN

« **Architecture et gestion de réseaux de production d'énergie électrique offshore** » – Soutenue le 26 septembre 2012, à HEI Lille.

Cette thèse a été menée dans le cadre du programme MEDEE6-4. Il s'agit d'une **thèse CIFRE**, réalisée avec GENERAL ELECTRIC (ex. CONVERTEAM), sous la direction du professeur B. ROBYNS. Ma contribution à l'encadrement de ces travaux était d'environ 50%.

Les objectifs étaient de développer une architecture de ferme éolienne offshore, construite sur la base d'un réseau DC, ainsi que son contrôle, afin :

- D'assurer une bonne efficacité énergétique du transport de l'énergie produite,
- D'assurer la fiabilité de ce réseau, c'est à dire sa stabilité et une minimisation de l'impact de la défaillance d'une source sur la production globale,
- De fournir des services système au réseau terrestre.

Plusieurs topologies électrotechniques de fermes éoliennes offshore ont été comparées, afin de définir la plus intéressante d'un point de vue faisabilité, efficacité et fiabilité. Une solution de connexion a été retenue pour la suite des développements de la thèse, entièrement en DC, car elle présente des pertes diminuées et des convertisseurs DC-DC avec transformateurs à haute fréquence, apportant un gain d'encombrement comparé à une topologie classique en AC.

Un contrôle de ce convertisseur, par entrelacement des commandes, a été développé, afin de réduire la taille du filtre en sortie.

Deux phases d'expérimentation ont été menées, respectivement sur la *Plateforme Energies Electriques*, permettant de valider le modèle développé, les pertes et les contrôles implantés sur le convertisseur, puis sur la *Plateforme Energies Réparties* (site de Arts&Métiers-ParisTech Lille), où l'ensemble de la ferme éolienne a été simulé, en faisant cohabiter des émulateurs et de la simulation en temps réel.

Ce projet a été le premier à porter sur le **développement d'architectures HVDC**. Une proposition de méthodologie a été faite, en vue de sélectionner une architecture parmi plusieurs solutions possibles, reposant sur un critère de coût de matière des câbles, un critère de pertes d'énergie (dans les câbles, les convertisseurs et les transformateurs) reposant sur la méthode de Monte Carlo, et un critère de disponibilité de l'architecture, reposant aussi sur cette méthode.

Des **développements expérimentaux** ont permis également de mettre en évidence la complémentarité des moyens d'essais disponibles au sein du laboratoire, et plus particulièrement au sein de l'équipe RESEAUX. Daniel MARIN, Post-Doc recruté pour une durée déterminée sur ce projet, a contribué à ces essais expérimentaux.

Publications associées : [23], [26-27], [49]

e. Thèses en cours

Deux thèses sont en cours de réalisation. Il s'agit de la thèse de Jean-Charles SWIERCZEK, intitulée « **Gestion énergétique et protections de réseaux électriques continus embarqués en aéronautique** », débutée à l'automne 2010, puis de la thèse de Petronela PANKOVITS, intitulée « **Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixes de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides)** », débutée à l'automne 2011.

La thèse de Jean-Charles SWIERCZEK constitue l'opération 2 du programme MEDEE7. Il s'agit d'une **thèse CIFRE**, réalisée avec Hispano-Suiza. La direction de thèse est assurée par B. ROBYNS. Ma contribution à l'encadrement de ces travaux est d'environ 50%.

Cette thèse comporte deux objectifs. Tout d'abord, **poursuivre le développement et l'optimisation de stratégies de supervision énergétique** de réseaux locaux continus afin de satisfaire les objectifs visés en termes d'efficacité énergétique, de stabilité, de disponibilité, de réduction des contraintes architecturales du réseau (masse, volume,...), de qualité des grandeurs électriques du réseau, d'aide à la reconfiguration du réseau en cas de défaillance,...etc. Des échanges avec l'équipe du GREEN sont envisagés afin d'étudier la compatibilité des supervisions énergétiques développées dans notre travail, avec les

méthodes de stabilisation actives développés par l'équipe *Comportement dynamique des systèmes électriques* du laboratoire nancéen. Puis, mener **l'étude de la protection électrique** d'un réseau continu local bidirectionnel en puissance, et plus particulièrement le développement de plans de protection, des stratégies de reconfiguration de réseau en cas de défaillance du réseau, ...

Cette opération 2 de MEDEE7 a débutée simultanément à une opération 3, concrétisée par la thèse de Clément MARLIER, dirigée par Nadir IDIR et encadrée par Arnaud VIDET, de l'équipe *ELECTRONIQUE DE PUISSANCE* du L2EP. Les travaux y portent sur la modélisation haute fréquence des éléments constituant ces réseaux locaux (convertisseurs, câbles d'énergie, machines électriques). A terme, une étude portant sur les composants électroniques destinés à la protection électrique de ce type de réseau, doit être menée. Cette action complètera le travail réalisé par Jean-Charles SWIERCZEK.

Dans ce travail, la validation expérimentale des concepts développés (gestion énergétique, protection électrique) est envisagée.

Publication associée : [22]

La thèse de Petronela PANKOVITS s'intègre au projet CONIFER (Conception et Outils iNnovants pour un réseau électrique Intelligent appliqué au FERroviaire), dans le cadre du programme *Stock-E* de l'ANR, édition 2010. Les partenaires de ce projet sont la SNCF, le L2EP (équipes RESEAUX et OPTIMISATION), le G2ELAB (équipes SYREL et MAGE) et SERMA TECHNOLOGIES. Il s'agit d'une **thèse CIFRE**, dont la direction de thèse est assurée par Benoît ROBYNS et Stéphane BRISSET, de l'équipe OPTIMISATION du L2EP. Ma contribution à l'encadrement de ces travaux est d'environ 25%.

Au travers de ce projet, la SNCF souhaite développer des solutions permettant de limiter la facture énergétique liée à l'activité ferroviaire. L'une d'elles repose sur une gestion intelligente du réseau d'électrification afin d'optimiser les performances du système ferroviaire. Ceci est notamment possible à travers l'intégration de dispositifs innovants de stockage d'énergie, de nouveaux moyens de production renouvelables et délocalisés, ainsi qu'une optimisation énergétique de l'architecture des réseaux.

Les travaux scientifiques de la thèse sont décomposés en quatre grandes étapes :

- Dimensionner des nouveaux éléments physiques (stockages et sources de production) de l'IFTEH (Installation Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à Production et Stockage Intégré) à partir de modèles simplifiés et de cycles de fonctionnement idéalisés,
- Développer des stratégies de supervisions énergétiques temps réels,
- Intégrer la stratégie de supervision à la phase de dimensionnement et ainsi aboutir au développement d'un outil de dimensionnement systémique,
- Mener une phase de validations expérimentales, sur les plateformes situées sur les sites de HEI et d'Arts&Métiers ParisTech – Lille.

2. Collaboration avec de jeunes docteurs et ingénieurs de recherche

Comme cela a été précédemment évoqué, lors de mon arrivée à HEI fin 2001, j'ai pris en main le développement de la plateforme expérimentale *Energies Electriques*, composée de machines électriques de natures différentes, de convertisseurs statiques, de systèmes de stockage (supercondensateurs, volants d'inertie), l'ensemble étant piloté par des cartes dSpace™. Beaucoup de nos travaux au sein de l'équipe utilisent cet équipement pour valider les concepts développés.

A partir de 2006, des recrutements de chercheurs en post-doc et d'ingénieurs de recherche ont été successivement réalisés, dans le cadre de différents projets. J'ai donc été amené à travailler en étroite collaboration avec ces jeunes ingénieurs et chercheurs, au travers de différents projets.

Mostafa EL MOKADEM fut le premier d'entre eux, dans le cadre du projet MEDEE6-1, en accompagnement de la thèse de Vincent COURTECUISSÉ, « *Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique* », soutenue le 20 novembre 2008. Quelques résultats, portant sur la *Contribution d'une éolienne à vitesse variable au réglage primaire de fréquence, basé sur un superviseur à règles floues*, seront présentés dans la section *Autres travaux*.

Les travaux de validation expérimentale, dans le domaine applicatif des réseaux embarqués (Projets MEDEE7-1 et MEDEE7-2), ont débuté avec Mostafa, puis se sont poursuivis avec Hicham HIHI, Hicham FAKHAM, et Fabien MOLLET.

Dans le cadre du projet RECUPENER (*Développement et mise au point d'un réseau local d'alimentation et de RECUPération d'ENERgie à bord*), Stefan BREBAN fut recruté pour un contrat post-doctoral d'une durée de douze mois, à partir de mars 2010. Son travail a tout d'abord porté sur des développements théoriques liés à la méthodologie d'optimisation des superviseurs flous, que je présenterai dans la section *Contribution scientifique méthodologique* de ce mémoire. Ensuite, Stefan a contribué à la validation expérimentale de ces travaux, sur la plateforme *Energies Electriques*.

Dans le cadre du projet OCESE (*Optimisation du Couplage Energie Solaire et réseau d'Eclairage LED au sein de bâtiments tertiaires*), Riad KADRI a été recruté, dès septembre 2011, pour un contrat post-doctoral d'une durée de vingt-quatre mois. Son travail porte sur des aspects théoriques (définition de l'architecture de réseau optimale pour le couplage des éléments, développement d'une supervision énergétique de l'ensemble, ...), ainsi que sur des développements expérimentaux, au cours desquels l'intégration de panneaux photovoltaïques à la plateforme *Energies Electriques* est envisagée.

Les projets RECUPENER et OCESE, dont je suis responsable scientifique, seront détaillés dans la partie *Responsabilités de programmes et projets scientifiques* de ce mémoire.

Publications associées : [1], [6-7], [24-25], [34-35]

C. Responsabilités de programmes et projets scientifiques

Programme MEDEE7

Au sein du pôle MEDEE², j'ai, depuis novembre 2006, les responsabilités scientifique et administrative du programme MEDEE7. Le contexte industriel de ce programme est celui de l'avion plus électrique (*More Electrical Aircraft - MEA*) et du développement de réseaux électriques locaux, de type continu, à échanges d'énergie, au sein des futurs aéronefs.

Les partenaires sont :

- Industriel (HISPANO-SUIZA),
- Académiques [le L2EP (Equipes RESEAUX et ELECTRONIQUE DE PUISSANCE) et SUPELEC],
- Institutionnels [l'EUROPE, via le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional), l'Etat et la Région Nord-Pas de Calais].

² <http://www.pole-medee.com/>

Des échanges scientifiques avec l'équipe *Comportement dynamique des systèmes électriques* du laboratoire GREEN (*Groupe de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nancy*) ont pris naissance au cours de ce programme.

Ce programme compte à ce jour un projet achevé, MEDEE7-1 (thèse de H. ZHANG + deux ans de contrat d'Ingénieur recherche) et deux projets en cours, MEDEE7-2 et MEDEE7-3 (deux thèses + deux ans de contrat d'Ingénieur de recherche).

Projet RECUPENER

L'expérience développée au cours du programme MEDEE7, dans le domaine des réseaux embarqués de type DC, nous a permis d'intégrer le projet RECUPENER (Développement et mise au point d'un réseau local d'alimentation et de RECUPération d'ENERgie à bord). Celui-ci répond au 7ème appel à projets du FUI (Fonds Unique Interministériel). Il est labellisé par le pôle de compétitivité Astech (PARIS Région). Le consortium du projet a été structuré autour de 2 PME (*Sherpa, ERTE*), de 4 laboratoires (*Supélec, HEI-L2EP, Univ. Paul Sabatier - CIRIMAT, et Nancy Université - GREEN*) et de 6 groupes industriels (*Messier-Bugatti, SAGEM, Hispano-Suiza, Batscap, Clemessy, Nexter Electronics*). Son budget initial est d'environ 4,5M€.

Son idée centrale consiste, au sein de l'aéronef, à subdiviser le réseau électrique en plusieurs sous-réseaux électriques spécialisés, au niveau du train d'atterrissage et des commandes de vols de la voilure. Ces réseaux s'appuieraient sur des super-capacités pour répondre aux besoins de puissance variables de l'avions plus électrique.

Au sein de ce projet, je suis responsable de l'intervention du L2EP et de HEI. Je suis impliqué dans le programme depuis son montage et son lancement, en novembre 2009. Notre action s'est déroulée de mars 2010 à février 2011, au travers la mission post-doctorale de Stefan BREBAN, d'une durée de 12 mois. Les résultats de ces travaux ont fait l'objet de réalisations de livrables, confidentiels, et de publications.

Projet OCESE

En réponse à l'appel à projets de recherche (2009-2010) de l'ADEME et de la Région Nord-Pas de calais, intitulé « *Réseaux énergétiques et maîtrise de la demande d'énergie dans un contexte d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques* », nous avons proposé le projet OCESE (*Optimisation du Couplage Energie Solaire et réseau d'Eclairage LED au sein de bâtiments tertiaires*), en partenariat avec Eiffage Energie Verquin. Le L2EP est impliqué via les membres de l'équipe RESEAUX d'Arts&Métiers-ParisTech Lille et HEI.

Ce projet a débuté en février 2011 et durera trente mois. En septembre 2011, Riad KADRI a été recruté pour une mission post-doctorale d'une durée de 24 mois.

OCESE s'inscrit dans le cadre des politiques européennes et nationales visant à améliorer l'efficacité énergétique et à favoriser l'utilisation des énergies renouvelables.

Actuellement, les éclairages de type LED sont alimentés à partir du réseau alternatif 230V. Dans ce présent projet, on se propose d'analyser les faisabilités technique, économique et environnementale de l'alimentation de réseaux d'éclairage de type LED de bâtiments tertiaires (accueillant des bureaux par exemple), via un réseau continu basse tension alimenté au moyen de panneaux photovoltaïques, associés éventuellement à du stockage d'énergie et en maintenant une liaison avec le réseau alternatif de distribution.

On y recherche l'accroissement du rendement global en améliorant les chaînes de distribution et de conversion d'énergie, en utilisant l'énergie produite localement par des installations photovoltaïques, pour alimenter en direct et sans étage de conversion (ou en tout cas un étage de conversion réduit au minimum), des appareils d'éclairage de technologie LED.

D. Autres informations

Parallèlement à ces activités d'enseignement, de recherche, et à ces responsabilités scientifiques de programmes et de projets de recherche, je mène d'autres activités, j'occupe d'autres fonctions, liées à la vie d'un chercheur au sein de son établissement, de son laboratoire, de la communauté scientifique et industrielle, et plus largement de la société.

Au sein de HEI, j'anime un pôle de recherche depuis 2007, et j'ai occupé, lors de l'année 2008-2009, la responsabilité du département *Energie, Electricité et Automatique*.

Au sein du L2EP, je suis membre élu du conseil de laboratoire, dans le collège des enseignant-chercheurs permanents, depuis 2006. J'ai également participé, en tant qu'examinateur, à huit jurys de thèse (Annexe 1), dont quatre que j'ai co-encadrées.

Au niveau de la communauté scientifique et industrielle, j'ai participé à l'organisation de la conférence *ELECTROMOTION 2009* à Lille (et l'organisation pour EPE 2013 est lancée...), de journées SRBE-SEE organisées à HEI en 2005 (« *Eolien et réseaux : Enjeux* »), 2007 (« *4 novembre 2006 : retour d'expérience d'un blackout évité* ») et 2010 (« *Gestion de la Demande d'Electricité dans un environnement libéralisé avec intégration croissante d'énergies renouvelables* »). Je suis co-animateur de l'axe « *Réseaux embarqués et stabilité* » du Groupe de Recherche POCA (« *structure de coopération [...] (entre SAFRAN et le CNRS), ayant pour objectif d'orienter, de soutenir et d'assurer la cohérence et la consolidation de la recherche sur les technologies des systèmes électriques embarqués ...* »). Je participe à des processus de reviewing dans des revues et conférences internationales, et préside des sessions lors de conférences internationales.

Enfin, je contribue à des missions de communication vers le public : j'ai ainsi participé à *La nuit des chercheurs en 2008* : j'ai pu au travers d'un article de presse régionale, puis lors d'une conférence au théâtre Sébastopol de Lille, faire découvrir les différentes facettes du métier de chercheur.

PUBLICATIONS

Depuis mon intégration à l'équipe RESEAUX, les résultats de mes travaux de recherche ont, à ce jour, fait l'objet de :

- 11 articles de revues internationales avec impact factor,
- 7 articles de revues internationales autres,
- 3 articles de revues nationales,
- 24 articles de conférences internationales,
- 1 Conférence « invité »
- 2 Conférences nationales
- 3 autres publications.

Revue internationale avec Impact Factor

- [1] ***"Experimental design and genetic algorithm optimization of a fuzzy logic supervisor for embedded electrical power systems"***,
Mathematics and Computers in Simulation, Elsevier, 12-2012
Stefan BREBAN, **Christophe SAUDEMONT**, Sébastien VIEILLARD, Benoît ROBYNS
- [2] ***"Methodologies for supervision of hybrid energy sources based on storage systems – A survey"***
Mathematics and Computers in Simulation, Elsevier, 12-2012
Benoît ROBYNS, Arnaud DAVIGNY, **Christophe SAUDEMONT**
- [3] ***"Experimental validation of energy storage system management strategies for a local DC distribution system of More Electric Aircraft"***
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, N°. 12, pages. 3905-3916, 12-2010
He ZHANG, F MOLLET, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [4] ***"Comparison of different DC voltage supervision strategies in a local Power Distribution System of More Electric Aircraft"***
Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 81, pages. 263-276, 10-2010
He ZHANG, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, R MEURET
- [5] ***"Design and control strategies of an induction machine-based flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator"***
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, N°. 2, pages. 526-534, 6-2010
G CIMUCA, Stefan BREBAN, M RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [6] ***"Experimental study of variable speed wind generator contribution to primary frequency control"***
Renewable Energy, Elsevier, Vol. 34, N°. 3, pages. 833-844, 3-2009
Mostafa EL MOKADEM, Vincent COURTECUISE, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Jacques DEUSE
- [7] ***"Fuzzy Logic Supervisor Based Primary Frequency Control Experiments of a Variable Speed Wind Generator"***
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, N°. 1, pages. 407-417, 1-2009
Mostafa EL MOKADEM, Vincent COURTECUISE, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Jacques DEUSE
- [8] ***"Variable speed small hydro power plant connected to AC grid or isolated loads"***
EPE Journal, Vol. 17, N°. 4, 1-2008
S. BREBAN, Mehdi NASSER, Aymeric ANSEL, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, M.RADULESCU

- [9] ***"DC Link Capacitor Voltage Balancing in a Three-Phase Diode Clamped Inverter Controlled by a Direct Space Vector of Line-to-Line Voltages"***
IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, N°. 5, pages. 1636-1648, 9-2007
Omar BOUHALI, Bruno FRANCOIS, El madjid BERKOUK, **Christophe SAUDEMONT**
- [10] ***"Control and performance evaluation of a flywheel energy storage system associated to a variable speed wind generator"***
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N°. 4, pages. 1074-1085, 8-2006
Gabriel CIMUCA, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Mircea RADULESCU
- [11] ***"A general modelling and control algorithm of a three-phase multilevel diode clamped inverter by means of a direct space vector control"***
European Physical Journal Applied Physics, Vol. 31, pages. 53-62, ISBN. 1286-0042, 4-2005.
Omar BOUHALI, Bruno FRANCOIS, El madjid BERKOUK, **Christophe SAUDEMONT**

Autres Revues internationales (avec comité de lecture)

- [12] ***"Electrical features comparison between more electric aircraft and hybrid electric vehicles"***
Electromotion, Vol. 16, N°. 3, pages. 111-119, 9-2009
He ZHANG, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Marc PETIT
- [13] ***"Power sizing and control of a three-level NPC converter for grid connection of wind generators"***
Electromotion, Vol. 16, N°. 1, pages. 38-49, 3-2009
Omar BOUHALI, Bruno FRANCOIS, E.M. BERKOUK, **Christophe SAUDEMONT**
- [14] ***"Performance Analysis of an Induction Machine-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator"***
[Journal of Electrical Engineering, Vol. 6, N°. 4, ISBN. ISSN 1582-4594, 11-2006, URL](#)
Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [15] ***"A New Modeling and Control of a Five Level Three-Phase Diode Clamped Inverter with Self-Stabilization of the DC Link Voltage"***
International Review of Electrical Engineering (IREE), ISBN. 1827- 6600, 6-2006
Omar BOUHALI, El madjid BERKOUK, Bruno FRANCOIS, **Christophe SAUDEMONT**
- [16] ***"New Direct Space Vector Modelling and Control of a Five Level Three-Phase Inverters"***
Archive of Electrical Engineering, Vol. LIV, N°. 2, pages. 159-182, 7-2005
Omar BOUHALI, El madjid BERKOUK, Bruno FRANCOIS, **Christophe SAUDEMONT**
- [17] ***"Solving Harmonics Elimination Problem in Voltage-Controlled Three Phase Inverter using Artificial Neural Networks"***
[Journal of Electrical System, Vol. 1, N°. 1, pages. 47-61, ISBN. 1112-5209, 1-2005, URL](#)
Omar BOUHALI, El madjid BERKOUK, Bruno FRANCOIS, **Christophe SAUDEMONT**, Salim LABIOD
- [18] ***"Flywheel Energy Storage System to improve the integration of wind generators into a network"***
Electromotion, vol. 10, pp. 101-106, 2003.
L. Leclercq, **C. Saudemont**, B. Robyns, G. Cimuca, and M. M. Radulescu,

Revue nationale (avec comité de lecture)

- [19] **"Gestion énergétique d'un réseau local DC à récupération d'énergie au sein d'un avion plus électrique"**
European Journal of Electrical Engineering, Hermès-Lavoisier, Vol. 12, N°. 5-6, pages. 763-784, 12-2009
He ZHANG, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [20] **"Apport du stockage de l'énergie à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques. Contribution aux services systèmes"**
Revue de l'Electricité et de l'Electronique, REE, N°. 5, pages. 77-85, 5-2005
Benoît ROBYNS, Aymeric ANSEL, **Christophe SAUDEMONT**, Arnaud DAVIGNY, Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, Jean-Michel GRAVE
- [21] **"Développement d'un émulateur temps réel d'un système de génération éolienne associé à un stockage d'énergie"**
Revue de l'Electricité et de l'Electronique, REE, N°. 11, pages. 49-59, 12-2004
Christophe SAUDEMONT, Ludovic LECLERCQ, Benoît ROBYNS, Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU

Conférences internationales (avec actes)

- [22] **"Power management of a regenerative local HVDC aircraft network using supercapacitors"**
15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, 4-6 septembre 2012, 9-2012
J-C SWIERCZEK, F MOLLET, **Christophe SAUDEMONT**, R MEURET, Benoît ROBYNS
- [23] **"Control strategies of dc-based offshore wind farm "**
14th Conference EPE 2011, Birmingham, 30 juillet-1 septembre 2011, 9-2011
Pascal MONJEAN, J DELANOE, D MARIN, J AUGUSTE, **Christophe SAUDEMONT**, B. ROBYNS
- [24] **"Design and Supervision Strategies for Embedded Electrical Power Systems Equipped with Energy Storage Devices"**
14th Conference EPE 2011, Birmingham, 30 juillet-1 septembre 2011, 9-2011
F MOLLET, Stefan BREBAN, **Christophe SAUDEMONT**, R MEURET, Benoît ROBYNS
- [25] **"Optimization of Fuzzy Logic Supervisor Using Experimental Design and Genetic Algorithm for Embedded Electrical Power Systems"**
10th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS 2011, Paris, 6-8 juin 2011, 6-2011
Stefan BREBAN, **Christophe SAUDEMONT**, S VIEILLARD, Benoît ROBYNS
- [26] **"Comparison methodology of offshore wind farm architectures"**
10th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS 2011, Paris, 6-8 juin 2011, 6-2011
Pascal MONJEAN, J DELANOE, Jonathan SPROOTEN, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [27] **"Topologies comparison of multi-cell medium frequency transformer for offshore farms"**
9th International Conference on AC and DC Power Transmission, ACDC 2010, Londres, 20-21 octobre 2010, 10-2010
Pascal MONJEAN, J DELANOE, J AUGUSTE, **Christophe SAUDEMONT**, Jonathan SPROOTEN, A.MIRZAIAN, B.ROBYNS

- [28] ***"Power flow management strategies for a local DC distribution system of More Electric Aircraft"***
IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2010), Lille, 1-3 septembre 2010, 9-2010
He ZHANG, F MOLLET, Stefan BREBAN, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [29] ***"Hybrid storage and dissipation systems based power management strategies in a local DC Power Distribution System of More Electric Aircraft"***
27th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2010, Nice, 19-24 septembre 2010, 9-2010
He ZHANG, F MOLLET, Stefan BREBAN, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, R.MEURET
- [30] ***"Power management strategies in a local DC Power Distribution System of More Electric Aircraft with the help of hybrid storage and dissipation systems."***
Proceedings of Electromotion'09, Lille, 1-3 juillet 2009, ISBN. 978-2-915913-25-5, 7-2009
He ZHANG, H FACKAM, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [31] ***"Stability Analysis on the DC Power Distributing System of More Electric Aircraft"***
13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008, Poznan, 1-3 septembre 2008, 9-2008
He ZHANG, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Nicolas HUTTIN, Régis MEURET
- [32] ***"Comparison of Technical Features between a More Electric Aircraft and a Hybrid Electric Vehicle"***
IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China, 9-2008
He ZHANG, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Marc PETIT
- [33] ***"Comparison of different DC voltage supervision strategies in a local Power Distribution System of More Electric Aircraft"***
9th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS 2008, 9-11 juin 2008, Québec, 6-2008
He ZHANG, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Nicolas HUTTIN, Régis MEURET
- [34] ***"Experiment of a wind generator participation to frequency control"***
First EPE-Wind Energy Chapter, Delft, 27-28 mars 2008, 3-2008
Vincent COURTECUISSÉ, M EL MOKADEM, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, J DEUSE
- [35] ***"Experimental Study of Wind Generator Participation to Primary Frequency Control"***
Electromotion'07, Bodrum, Turquie, 10-12 septembre 2007, 9-2007
Mostafa EL MOKADEM, Vincent COURTECUISSÉ, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Jacques DEUSE
- [36] ***"Practical power control design of a FESS and a WECS with a NPC multilevel inverter for grid connection"***
32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'2006, Paris, 11-2006
Omar BOUHALI, Bruno FRANCOIS, **Christophe SAUDEMONT**, Olivier BARRE, EL Madjid BERKOUK
- [37] ***"Energy-optimized direct torque control of an induction machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator"***
Proceedings of Electromotion'05, Lausanne, septembre 2005, 9-2005
Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS, Stephan BREBAN

- [38] ***"Feedback loop control strategies with a resonant controller for ac voltage control of a grid-connected decentralized generator"***
EPE'05, September 11 -14, 2005, Dresden, ISBN. 90-75815-07-7., 9-2005
Bruno FRANCOIS, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [39] ***"Grid Connected or Stand-Alone Real-Time Variable Speed Wind Generator Emulator Associated to a Flywheel Energy Storage System"***
EPE 2005, Vol. CD-ROM, 9-2005
Christophe SAUDEMONT, G CIMUCA, Benoît ROBYNS, M.M RADULESCU
- [40] ***"DTC versus FOC of an IM-based flywheel energy storage system associated to a variable speed wind generator"***
Proceedings of the 8th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems: ELECTRIMACS 2005, 17-20 Avril 2005, Hammamet, Tunisie, 4-2005
Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [41] ***"Comparative study of flywheel energy storage systems associated to wind generators"***
Proceedings of the 7th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2004, Baile Herculane, Romania, 14-15 Octobre 2004, pages. 133-136, ISBN. 973-8043-554-4, 10-2004
Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [42] ***"Losses and Efficiency of a Flywheel Energy Storage System with Permanent-Magnet Synchronous Machine Associated to a Variable-Speed Wind Generator "***
Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2004, Cracovie, 6-8 septembre 2004 (CD Rom), 9-2004
Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS
- [43] ***"Direct generalized modulation of electrical conversions including self stabilization of the DC-link for a single phase multilevel inverter based AC grid interface "***
Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, Vol. 2, pages. 1385-1391, ISBN. 0275-9306, 6-2004
Omar BOUHALI, El madjid BERKOUK, Bruno FRANCOIS, **Christophe SAUDEMONT**
- [44] ***"A five-level diode clamped inverter with self-stabilization of the DC-link voltage for grid connection of distributed generators"***
IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'2004, Vol. 2, pages. 947-952, ISBN. 0780383044, 5-2004
Omar BOUHALI, El madjid BERKOUK, **Christophe SAUDEMONT**, Bruno FRANCOIS
- [45] ***"Performance Analysis of an Induction Machine-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator"***
Proceedings of the 9th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipment, OPTIM'04, Brasov, Roumanie, 20-23 mai 2004, 5-2004
Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS

Conférences nationales (avec actes)

- [46] ***"Etude de dimensionnement des moyens de productions énergétiques renouvelables pour l'alimentation des auxiliaires des Installations Fixe de Traction Ferroviaire Electrique"***
Électrotechnique du Futur, Belfort, 14-15 décembre 2011, 12-2011
J POUGET, G VRIGNIAUD, F MOLLET, **Christophe SAUDEMONT**, Benoît ROBYNS

- [47] ***"Développement d'un émulateur temps réel d'un système de génération éolienne associé à un stockage inertiel d'énergie"***
in Electrotechnique du Futur, Gif sur Yvette-FRANCE, 2003.
C. Saudemont, L. Leclercq, B. Robyns, G. Cimuca, and M. M. Radulescu.

Conférence « invité »

- [48] ***"Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie"***
Actes des Journées Electrotechnique du Club EEA « Ouverture des marchés de l'Electricité », Gif-sur-Yvette, 15-16 mars 2006, 3-2006
Benoît ROBYNS, Arnaud DAVIGNY, **Christophe SAUDEMONT**, Aymeric ANSEL, Vincent COURTECUISSÉ, B. FRANCOIS, S. PLUMEL, J. DEUSE

Autres publications

- [49] ***"Innovative DC connections for offshore wind and tidal current farms"***
Third EPE-Wind Energy Chapter, Staffordshire, 15-16 avril 2010, 4-2010
Pascal MONJEAN, **Christophe SAUDEMONT**, Jonathan SPROOTEN, Benoît ROBYNS, L LECLERE, A.Mirzaian
- [50] ***"Comportement de l'éolien et perspectives"***
Journée SRBE-SEE « 4 novembre 2006 : retour d'expérience d'un blackout évité », Lille, 31 mai 2007., 5-2007
Benoît ROBYNS, Vincent COURTECUISSÉ, Arnaud DAVIGNY, Mostafa EL MOKADEM, **Christophe SAUDEMONT**
- [51] ***"Contribution du stockage de l'énergie électrique à la participation aux services système des éoliennes"***
Journée SRBE-SEE « Eolien et Réseaux : Enjeux », Lille, 22 mars 2005, 3-2005
Benoît ROBYNS, Aymeric ANSEL, Arnaud DAVIGNY, **Christophe SAUDEMONT**, Gabriel CIMUCA, M. RADULESCU, J-M. GRAVE, B. FANCOIS

MEMOIRE SCIENTIFIQUE

L'introduction qui débute ce mémoire scientifique me permettra de définir le contexte dans lequel s'inscrivent mes travaux de recherche. Les objectifs que cherchent à atteindre ces travaux, ainsi que les défis qu'ils tentent de relever, seront explicités.

Puis, je présenterai mes contributions scientifiques dans le développement de méthodologies visant à : (i) développer des stratégies de supervision énergétique temps réel, (ii) optimiser les superviseurs ainsi réalisés, (iii) mettre en œuvre expérimentalement, en temps réel, ces superviseurs.

Ensuite, j'illustrerai ces travaux à l'aide de deux cas d'application : (i) pour le domaine des réseaux terrestres, l'association d'une éolienne à vitesse variable et d'un système inertiel de stockage d'énergie, (ii) pour le domaine des réseaux embarqués, en aéronautique, un réseau local DC à échanges d'énergie.

Enfin, je terminerai ce mémoire scientifique en évoquant quelques autres travaux auxquels j'ai contribué.

A. Introduction

Les travaux de recherche que je mène au sein de l'équipe RESEAUX du L2EP, s'inscrivent dans des contextes économique et environnemental qui se caractérisent par :

- Des besoins énergétiques mondiaux en augmentation,
- Des coûts de ressources énergétiques d'origine fossile d'une grande volatilité, et dont la croissance, observée depuis une quarantaine d'année, s'amplifie depuis le début des années 2000,
- Un réchauffement climatique à la surface du globe terrestre lié à l'accroissement des Gaz à Effets de Serre (GES), notamment d'origine anthropique,
- Le marché européen de l'électricité qui s'ouvre au secteur concurrentiel, en vue de la création d'un « marché intérieur de l'énergie ».

Dans ces contextes, les principaux objectifs de mes travaux sont de:

- Permettre un accroissement de la contribution des sources d'énergie renouvelable à la fourniture globale d'énergie, malgré leur fonctionnement irrégulier dans le temps,
- Rendre les systèmes électriques plus vertueux en termes d'efficacité énergétique, tout en maintenant ou en accroissant leur fiabilité,

Les défis scientifiques que nous tentons de relever au travers de nos travaux de recherche, sont :

- **L'intégration** et la **valorisation du stockage** d'électricité dans les réseaux électriques de tout type,
- Le développement de **nouvelles architectures HVDC**,
- Le développement de **techniques de supervision énergétique temps réel**, adaptées et **optimisées** pour des **systèmes complexes multi sources, multi charges**, dont certaines grandeurs peuvent présenter un **caractère fortement variable et aléatoire**, et pouvant intégrer des dispositifs de **stockage**. Ces stratégies devront permettre de **viser plusieurs objectifs simultanément**.

1. Contextes économique et environnemental

a. Des besoins énergétiques mondiaux en augmentation

La population mondiale, composée en 2012 d'environ 7 milliards d'habitants, devrait, selon la majorité des hypothèses de projection, croître de façon importante dans les prochaines décennies. Des hypothèses basées sur les tendances démographiques actuelles estiment la population mondiale à environ 10 milliards d'habitants à la fin du 21^e siècle (Figure 5) [2]. Les régions fortement concernées par l'accroissement démographique étant des pays n'appartenant pas à l'OCDE³, principalement en Asie et en Afrique (Figure 6) [3].

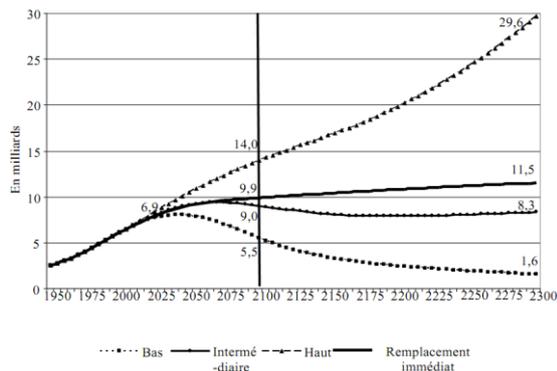
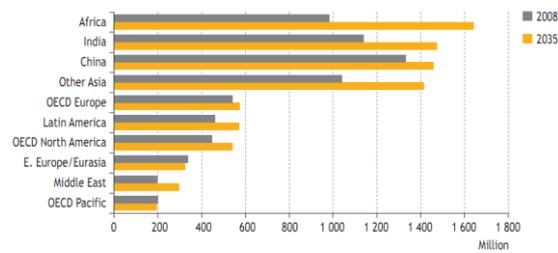


Figure 5 – Evolution de la population mondiale (Source Nations Unies)



Sources: UNPD and World Bank databases; IEA analysis.

Figure 6 - Population selon les principales régions du monde (Source AIE)

Cet accroissement démographique, ainsi que le développement économique mondial, sont à l'origine de l'augmentation de la demande mondiale en énergie primaire. Différents scénarios de projection, proposés par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), permettent d'estimer cette augmentation entre 0,7% et 1,4% par an, entre 2008 et 2035. En sachant qu'en 2008, cette demande en énergie primaire s'élevait à environ 12 Gtep (Milliards de tonnes équivalent pétrole), cette augmentation correspond respectivement à 21% et 50% de besoins supplémentaires (Figure 7)[3].

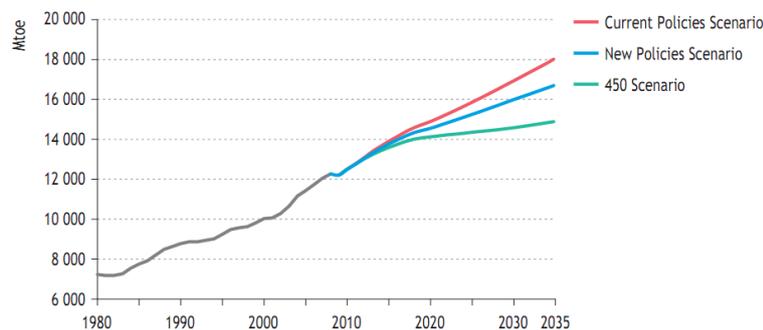


Figure 7 - Tendances de l'évolution de la demande mondiale en énergie primaire (Source AIE) (Mtoe : Million tonnes of oil equivalent)

³ OCDE : L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques compte 34 pays membres à travers le monde, de l'Amérique du Nord et du Sud à l'Europe, en passant par la région Asie-Pacifique. <http://www.oecd.org/fr/>

Comme le montrent les Figure 8 et Figure 9, les énergies fossiles demeurent dominantes, d'ici 2035, dans l'estimation de la demande mondiale énergétique, quelque soit les hypothèses retenues.

			New Policies Scenario		Current Policies Scenario		450 Scenario	
	1980	2008	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Coal	1 792	3 315	3 966	3 934	4 307	5 281	3 743	2 496
Oil	3 107	4 059	4 346	4 662	4 443	5 026	4 175	3 816
Gas	1 234	2 596	3 132	3 748	3 166	4 039	2 960	2 985
Nuclear	186	712	968	1 273	915	1 081	1 003	1 676
Hydro	148	276	376	476	364	439	383	519
Biomass and waste*	749	1 225	1 501	1 957	1 461	1 715	1 539	2 316
Other renewables	12	89	268	699	239	468	325	1 112
Total	7 229	12 271	14 556	16 748	14 896	18 048	14 127	14 920

* Includes traditional and modern uses.

Figure 8 – Demande mondiale d'énergie primaire, selon les types d'énergie et les hypothèses, en Mtoe (Source AIE)

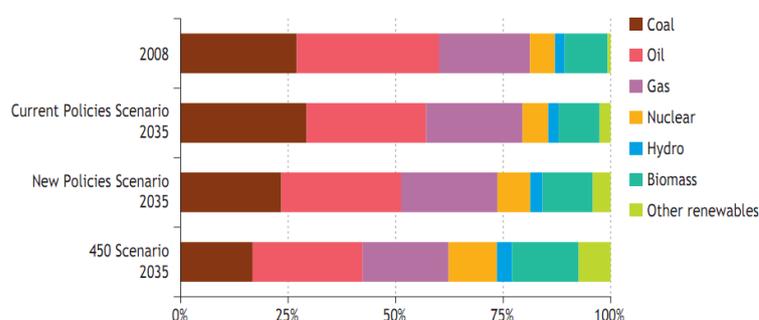


Figure 9 – Répartition des différentes sources d'énergie, selon les hypothèses, dans la demande mondiale (Source AIE)

b. Des coûts estimés de ressources énergétiques d'origine fossile en hausse et volatils

L'AIE propose, dans son *Annual Energy Outlook* de 2012, une estimation de l'évolution du prix moyen du baril de pétrole brut léger (Figure 10) et du gaz naturel (Figure 11).

Il s'agit, là aussi, de tendances. Les prix de ces ressources primaires sont néanmoins très volatils, et rendent très incertaines les projections. Toutefois, en conservant les tendances de consommation et de production actuelles, les estimations d'évolution des prix montrent une tendance nettement haussière.

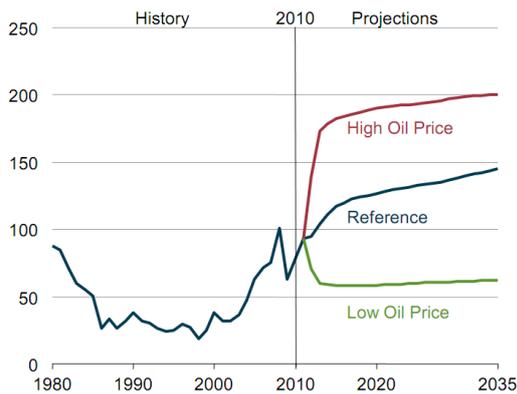


Figure 10 - Estimations du prix moyen annuel du baril de pétrole (en \$_{US} de 2010)

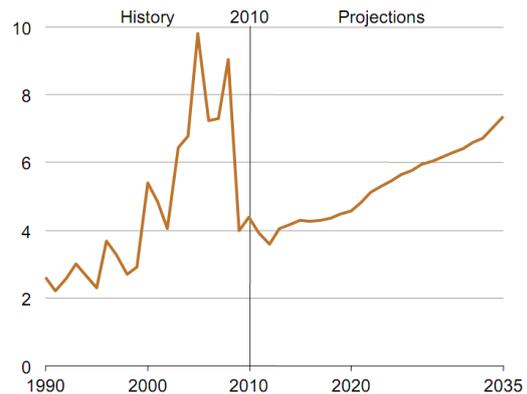


Figure 11 - Evolution du prix du gaz naturel (en \$_{US} de 2010, par Btu - British Thermal Unit)

c. Le réchauffement climatique et l'accroissement des Gaz à Effet de Serre corrélés

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), liés aux activités humaines (anthropiques) ont augmenté de 70% entre 1970 et 2004 (Figure 12-a), le CO₂ y contribuant environ à hauteur de 80%. Les énergies fossiles étaient, en 2004, responsables d'environ 60% des gaz GES anthropiques (Figure 12-b). Plus de la moitié de cette production de GES étant liée aux secteurs de la production d'énergie, de l'industrie et du transport (Figure 12-c).

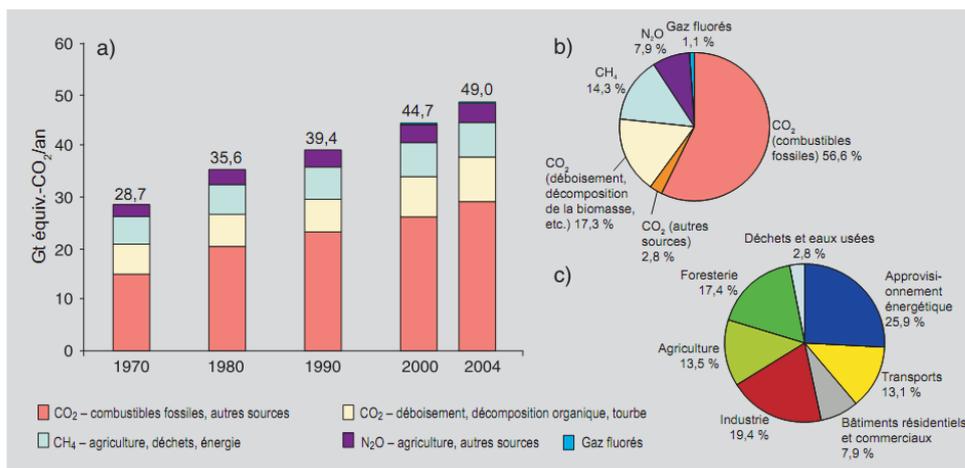


Figure 12 – (a) Emissions annuelles mondiales de GES liées à l'activité humaine (de 1970 à 2004), (b) Répartition, en 2004, des différents GES liés à l'activité humaine, en équivalent CO₂, (c) Secteurs d'activité à l'origine de ces GES, en équivalent-CO₂ (Source GIEC)

La corrélation entre la concentration en GES, et plus particulièrement en CO₂, de l'atmosphère terrestre et l'évolution de la température à la surface du globe est aujourd'hui établie (Figure 13) [4].

L'accroissement du taux de GES anthropiques dans l'atmosphère terrestre va donc contribuer à la modification du bilan énergétique du système climatique. Selon les travaux du GIEC⁴ publiés dans son rapport de 2007[5], la température moyenne globale terrestre, qui a augmenté d'environ 1°C sur un siècle, a crû fortement au cours des trente dernières

⁴ Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). <http://www.ipcc.ch/>

années (Figure 14). Des hypothèses raisonnables de croissance démographique et de développement économique, d'équilibre entre énergies fossiles et renouvelables, conduisent à une croissance estimée à +2,8°C en moyenne d'ici la fin du 21^e siècle.

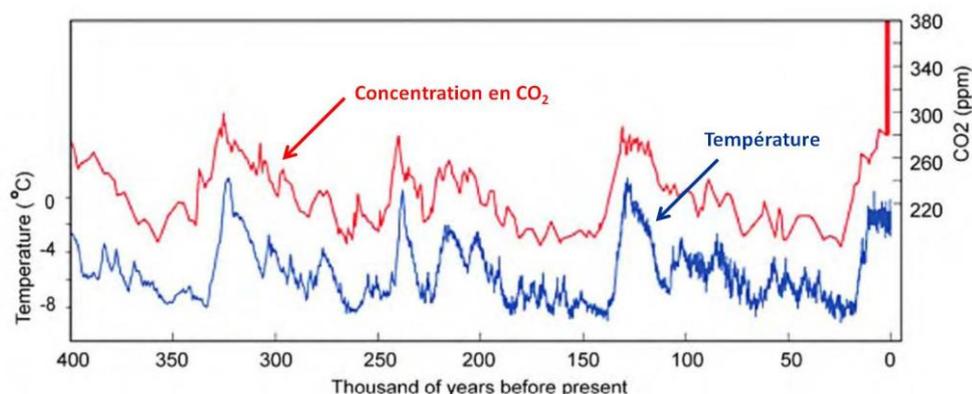


Figure 13 – Variations de la concentration en CO₂ et de la température atmosphériques sur une période de 400000 années (mesure réalisées sur un échantillon de glace en région antarctique).

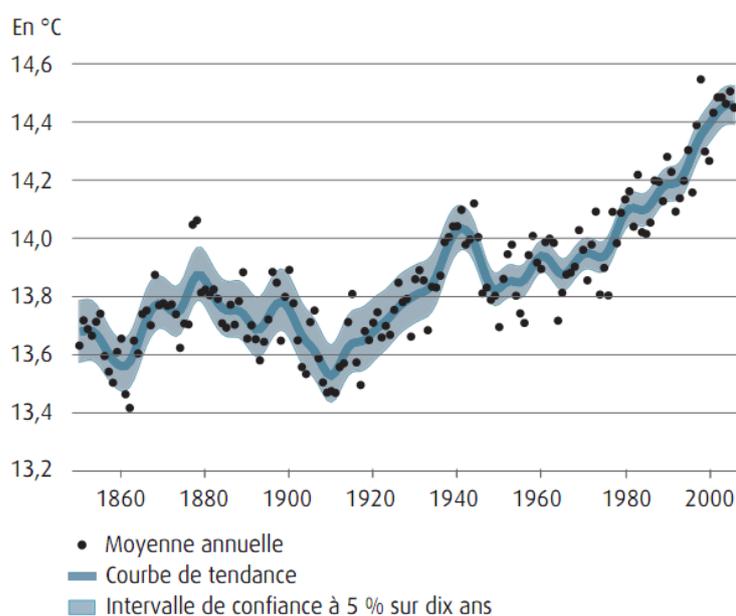


Figure 14 – Evolution de la température moyenne globale estimée depuis 1850 (Source GIEC)

d. Le marché européen de l'électricité s'ouvre au secteur concurrentiel

L'ouverture à la concurrence des marchés européens de l'énergie a été engagée dès 1996, avec l'adoption d'une première directive européenne concernant l'électricité, suivie en 1998 d'une directive sur le gaz. Les dernières directives, aujourd'hui en vigueur, s'appliquent dans toute l'Union Européenne (UE). Elles ont pour objectif la construction d'un "marché intérieur de l'énergie" à l'échelle de l'Union Européenne. Pour y parvenir, les directives organisent l'ouverture à la concurrence du marché de l'énergie en prévoyant :

- pour les consommateurs, le libre choix du fournisseur,
- pour les producteurs, la liberté d'établissement,

- concernant les réseaux de transport et de distribution d'énergie, le droit d'accès dans des conditions objectives, transparentes et non discriminatoires pour tous les utilisateurs des réseaux.

Les objectifs affichés par la Commission Européenne pour ce marché intérieur de l'énergie sont un marché plus sûr, en termes d'approvisionnement, et plus compétitif, tout en veillant à la protection de l'environnement. A ce jour, l'UE couvre 50 % de ses besoins énergétiques à partir des produits importés. Ce taux de dépendance pourrait grimper à 70% avant 2030, selon la tendance actuelle. La diversification des sources d'énergie (et des zones d'approvisionnement) est un moyen pour assurer la sécurité d'approvisionnement.

e. Conclusion

Un accroissement de la demande d'énergie à l'échelle de la planète, une forte incertitude sur l'évolution des prix des matières premières énergétiques, une évolution climatique très préoccupante, ont conduit les instances gouvernementales, notamment européennes, à mener des politiques énergétiques ambitieuses, visant particulièrement à accroître l'efficacité des systèmes électriques, à réduire la consommation d'énergie, à favoriser le développement des énergies renouvelables, ... etc. (Protocole de Kyoto, objectifs européens 20-20-20, Traité de Lisbonne, ...).

C'est dans ce contexte que se développent les travaux que je mène au sein de l'équipe RESEAUX du L2EP, dont les objectifs sont décrits dans la suite de ce mémoire.

2. Objectifs et défis de mes travaux de recherche

a. Objectifs

Dans le contexte précédemment détaillé, les travaux que je mène se fixent principalement, comme objectifs, de :

- Permettre un accroissement de la contribution des sources d'énergie renouvelable à la fourniture globale d'énergie,
- Rendre les systèmes électriques plus vertueux en termes d'efficacité énergétique, tout en maintenant ou en accroissant leur fiabilité.

i. Accroître le développement des énergies renouvelables

La contribution de l'électricité dans l'alimentation mondiale en énergie est passée de 4,4 Mtep en 1973 à plus de 1,5 Gtep en 2010 (Figure 15).

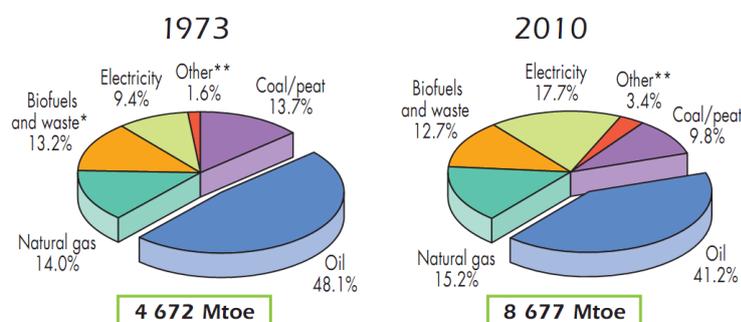


Figure 15 – Contribution des types d'énergies dans la consommation énergétique mondiale, de 1973 à 2010 (Source AIE)

Dans le même temps, la contribution des énergies renouvelables, autres que l'hydraulique de grande taille (c'est à dire solaire, éolien, géothermique, co-génération, petite hydraulique, ...etc.) à ces besoins, a progressé de 36,7 TWh en 1973 à 793 TWh en 2010 ; La part du renouvelable tel que défini ci-dessus, a donc vu sa part croître de 0,6% à 3,7% de la production totale d'électricité à l'échelle du globe (Figure 16) [6].

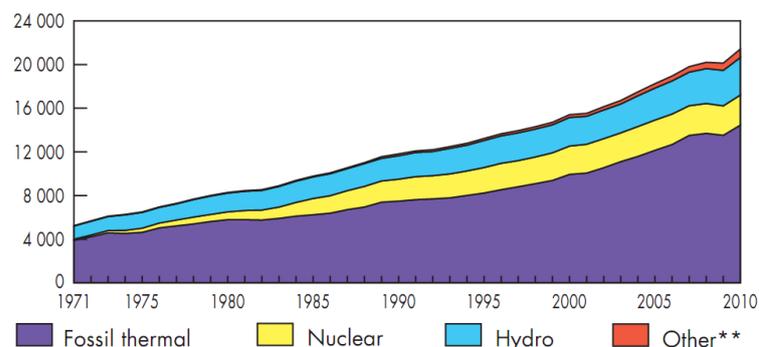


Figure 16 - Production mondiale d'électricité de 1971 à 2010, répartie selon l'énergie primaire (TWh)
(Source AIE)

La marge de croissance des énergies renouvelables est donc importante, et certaines perspectives, en termes de puissances installées de l'éolien on- et off-shore et du photovoltaïque, sont avancées jusqu'en 2050 (Tableau 1)[7, 8].

	2020	2030	2040	2050
Capacité « Eolien » (dont offshore) en GW	671 (109)	1024 (194)	1572 (366)	2016 (652)
Capacité « Photovoltaïque » en GW	200	900	2000	3000

Tableau 1 – Perspectives d'évolution des productions éolienne et photovoltaïque jusqu'en 2050
(Tableau réalisé à partir de données issues des feuilles de route de l'Agence Internationale de l'Energie)

Selon certains scénarios⁵, les productions éolienne et photovoltaïque pourraient représenter, en 2050, respectivement 12% et 11% de la production globale mondiale d'énergie électrique, soit 6,5 Gt de CO₂ non émis.

L'accroissement, dans le mix global énergétique, de la contribution des énergies renouvelables telles que l'éolien et le photovoltaïque, est rendu compliqué par les caractéristiques aléatoires et peu prévisibles des sources primaires, que sont le vent et, dans une moindre mesure, le soleil.

De nombreux axes de recherche peuvent être envisagés afin d'accroître l'intégration des énergies renouvelables au comportement fluctuant, dans les réseaux électriques : Tout d'abord, l'intégration économique de la production de l'électricité d'origine renouvelable dans le marché de l'électricité [9-12] est un sujet de recherche essentiel. Ensuite, une approche de la problématique consiste également à rechercher une meilleure prévision à court terme du comportement des sources primaires éolienne et solaire, à l'aide de modèles physiques, de méthodes statistiques ou à l'aide d'outils d'intelligence artificielle [13-21]. Enfin, il peut être envisagé d'agir au niveau même du système de production, via de nouvelles architectures de réseaux, de nouvelles interfaces avec le réseau électrique (à base d'électronique de puissance), en envisageant l'association locale ou répartie dans le réseau,

⁵ ETP 2008 BLUE Map scenario : Ce scénario repose sur l'objectif, issu des travaux du GIEC, de limiter l'augmentation de la température à la surface du globe à 2,4°C. Pour cela, il propose une diminution de 50% des émissions de GES d'ici 2050, en explorant des solutions économiquement « viables ». Cf. Annexe2

du générateur initial avec un système de stockage ou de réglage (Facts), en agissant sur le contrôle du générateur, en développant des stratégies de supervision énergétique de ces systèmes complexes ainsi réalisés, ...etc. [22-30]

Les travaux que je mène, et que je vais détailler dans ce mémoire, s'inscrivent dans cette dernière voie.

ii. Accroître l'efficacité énergétique

La crise pétrolière des années 1970 a suscité le développement de politiques visant à améliorer l'efficacité énergétique et réduire la consommation énergétique. On estime que celle-ci ont permis, sur une trentaine d'années, des économies d'énergie de 63% au sein de l'OCDE-11⁶ (Figure 17).

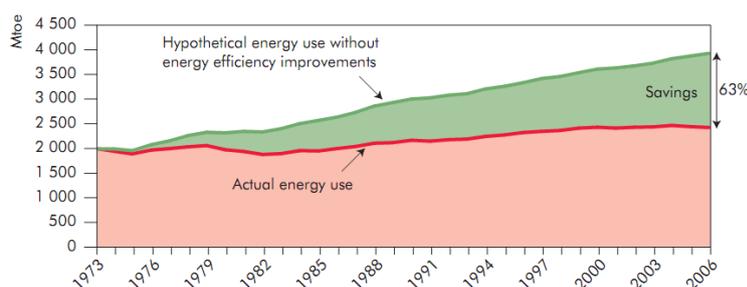


Figure 17 – Estimation des économies d'énergies dues aux accroissements de l'efficacité énergétique, dans l'OCDE-11 (Source AIE)

L'amélioration de l'efficacité énergétique, au niveau d'un usage final, devrait contribuer à hauteur de 38%, à la réduction des émissions de GES d'ici 2050, dont 14% reposent sur gains réalisés au sein des systèmes électriques (Figure 18).

Notons que les améliorations attendues au niveau du secteur de la production d'énergie, ne représentent que 5%, alors que les attentes liées à l'intégration des énergies renouvelables représentent 17%. Le développement d'une production d'énergie décentralisée, située à proximité des lieux de consommation (au sein de microgrids, de bâtiments, ...), réduisant donc les pertes⁷ d'énergie au travers des installations de transport et de distribution, semble donc tout à fait cohérent [30-33].

Enfin, des attentes en termes d'accroissement de l'efficacité énergétique reposent sur l'électrification de certains systèmes. De très bons rendements des machines électriques, une souplesse introduite par la présence accrue de l'électronique de puissance, la réversibilité des flux de puissance électrique, et donc la récupération et le stockage de celle-ci, sont, entre autres, à l'origine de ces attentes. Outre le secteur industriel, au travers de ses nombreux processus, les transports sont un domaine fortement concerné par cette évolution énergétique, qu'ils soient terrestres, maritimes ou aériens [34-40].

⁶ L'OCDE-11 inclut l'Australie, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, l'Italie, le Japon, la Norvège, la Suède, le Royaume-Uni et les USA. Ces pays contribuent à hauteur de 75% de la consommation énergétique finale des pays de l'OCDE.

⁷ Les pertes représentent principalement l'énergie dissipée par effet joule lors du transport sur le réseau haute et très haute tension. Elles dépendent essentiellement de la consommation, du plan de production, et des échanges transfrontaliers. En France, les taux de pertes sont compris entre 2 et 3,5% de la consommation, suivant les saisons et les heures de la journée. En moyenne, le taux s'établit à 2,5%, ce qui représente environ 11,5 TWh (TeraWatt-heure) par an.

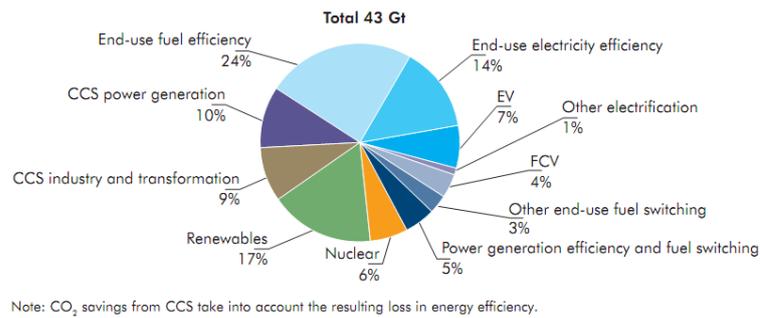


Figure 18 – Sources potentielles de réduction des émissions de GES à échéance 2050 (Blue Map Scenario)

iii. Conclusion

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques, ainsi que les gains en efficacité énergétique des systèmes électriques, doivent contribuer à atteindre les objectifs en termes de lutte contre le réchauffement climatique et d'indépendance énergétique. Des difficultés scientifiques et technologiques freinent le développement de ces solutions. Leur analyse permet d'identifier des défis à relever au travers de nos travaux de recherche.

b. Les défis scientifiques

Les défis scientifiques que je contribue à relever au travers des travaux de recherche que je mène, et des projets que je porte, sont :

- **l'intégration et la valorisation du stockage** d'électricité dans les réseaux électriques de tout type :
 - **Adossé aux systèmes de production très fluctuants** (éolien, photovoltaïque), il contribue à leur meilleure intégration dans les réseaux en permettant un lissage de la puissance injectée et en accroissant la capacité du système de production décentralisé, de participer aux services système.
 - Thèses de Gabriel CIMUCA [41] et Omar BOUHALI [42].
 - **Implanté dans un réseau embarqué, à échanges d'énergie**, où des charges sont capables de renvoyer de la puissance lors de certaines phases de fonctionnement, il contribue à accroître directement l'efficacité énergétique du système, en emmagasinant une puissance jusqu'alors dissipée. Il y contribue également de façon indirecte, lorsqu'il est sollicité pour fournir des pointes de puissance, et qu'il autorise alors un dimensionnement au plus juste de la source principale et du circuit d'alimentation.
 - Programme MEDEE7 (Thèses de He ZHANG [43] et Jean-Charles SWIERCZEK [44]), Projet RECUPENER [45].
 - **Intégré dans des réseaux internes à des bâtiments** (surtout tertiaires et commerciaux), il contribue, lorsque des sources de production d'énergie de type photovoltaïque sont envisagées afin d'alimenter directement des charges spécifiques (éclairage LED, par exemple), à réduire la puissance globale appelée par le bâtiment au réseau de distribution, tout en garantissant la qualité de la fourniture électrique.
 - Projet OCESE.

- **Implanté dans des Installations Fixes de Traction Electrique Ferroviaire**, il permet de valoriser l'énergie cinétique des trains et de lisser la charge vue par le réseau électrique de distribution.
 - Projet CONIFER (Thèse de Petronela PANKOVITS)
- le développement de **nouvelles architectures HVDC** :
 - comme **interface de raccordement** de sources de production éolienne, éventuellement associées à du stockage, au réseau électrique.
 - Thèse d'Omar BOUHALI
 - Comme solution au développement de **centrales à énergie renouvelable offshore et onshore**.
 - Thèse de Pascal MONJEAN [46]
- le développement de **techniques de supervision énergétique temps réel**, adaptées et **optimisées** pour des **systèmes complexes multi sources, multi charges**, dont certaines grandeurs peuvent présenter un **caractère fortement variable et aléatoire**, et pouvant intégrer des dispositifs de **stockage**. Ces stratégies devront permettre de **viser plusieurs objectifs simultanément**.
 - Thèse de Gabriel CIMUCA, Programme MEDEE7, Projets RECUPENER, OCESE et CONIFER.

Ce dernier défi constitue le thème principal de mes travaux. Il fait donc l'objet d'un développement spécifique dans la prochaine partie B, traitant de ma contribution scientifique méthodologique. J'y aborde successivement les développements de stratégies de supervision énergétique temps réel, de méthodologies d'optimisation et expérimentales.

Dans la partie C, deux cas d'application servent d'illustration au propos : l'un portant sur l'association d'une éolienne à vitesse variable associée à un système inertiel de stockage d'énergie, l'autre portant sur un réseau local DC à échanges d'énergie en aéronautique.

Enfin, la partie D présente d'autres travaux. Il s'agit des travaux de thèse d'Omar BOUHALI, qui ont porté sur le développement et la commande d'interfaces de connexion pour la production éolienne, à base de convertisseurs de type NPC, puis des travaux de thèse de Stefan BREBAN et de Vincent COURTECUISSE, pour lesquels ma contribution a porté principalement sur les développements expérimentaux.

B. Contribution scientifique méthodologique

Les Sources Hybrides d'Énergie (SHE), utilisant des dispositifs de stockage, sont envisagées de façon croissante afin d'améliorer l'intégration des générateurs d'énergie d'origine renouvelable et aléatoire dans les réseaux électriques, ou pour améliorer l'efficacité énergétique, notamment dans les réseaux embarqués [27, 47, 48].

Différents niveaux de supervision peuvent être distingués, notamment en fonction de l'échelle de temps considérée :

- La supervision à long terme, qui peut correspondre à l'échelle de temps d'une journée,
- La supervision à moyen terme, qui peut correspondre à l'échelle de temps de la demi-heure ou de l'heure,

- Et la supervision temps réel, qui peut correspondre à l'échelle de temps de quelques secondes ou minutes.

Les stratégies de supervision que nous développons concernent la supervision temps réel.

Trois méthodologies de supervision, en temps réel, de Sources Hybrides d'Énergie sont habituellement envisagées. En associer certaines peut parfois permettre d'atteindre une solution optimale.

Tout d'abord, les méthodologies causales, qui utilisent les inversions des flux de puissance, afin de déterminer les variables de réglage, et les références de puissance [49-52]. Elles permettent la bonne connaissance des flux de puissance au cœur du système, et donc une identification précise des variables de réglage. Elles nécessitent la détermination d'un modèle détaillé du système complet.

Ensuite, les méthodologies utilisant les méthodes d'optimisation, c'est-à-dire reposant sur la mise en forme mathématique du problème, à l'aide de fonctions objectif [53-55]. Appropriées à une optimisation au préalable (dite « off-line »), elles sont difficiles à mettre en œuvre en temps réel.

Enfin, les méthodologies utilisant des outils d'intelligence artificielle (systèmes multi-agents [56, 57], logique floue [58-61], ...). La logique floue, par exemple, est appropriée à la supervision des SHE complexes, car elle ne nécessite pas de modèle mathématique détaillé de ces systèmes. Nous verrons plus loin que cet outil est également adapté au caractère aléatoire de certaines grandeurs physiques au cœur de ces unités. Sa mise en œuvre, lors d'une implantation en temps réel, peut nécessiter la réduction et la simplification du superviseur développé.

En ce qui concerne la gestion des systèmes de stockage, plusieurs approches peuvent être envisagées. Les solutions fréquentielles, qui, à l'aide de filtres, visent à répartir les références de puissance entre différents éléments de stockage [62-65], les méthodes ayant recours à des correcteurs [66], ou à des outils d'intelligence artificielle [57-61]. L'association de ces méthodes peut également être envisagée [67, 68].

Les travaux qui vont être présentés dans les prochaines sections, visent à développer des superviseurs temps réel, à base de logique floue.

La section 1 présente la méthodologie développée afin de construire le superviseur d'une SHE, constituée de sources, de charges et de stockage. Cette méthodologie est structurée en plusieurs étapes, depuis les spécifications du système étudié, jusqu'à l'élaboration des règles du superviseur. Nous verrons que cette phase initiale recourt à une approche empirique afin de déterminer certains paramètres de ce superviseur.

Afin de limiter ce caractère empirique, nous proposerons, dans la section 2, une méthodologie d'optimisation pour le réglage des paramètres du superviseur, construite autour de l'utilisation des plans d'expérience et des algorithmes génétiques.

Enfin, la section 3 sera consacrée au développement de méthodologies expérimentales, visant à permettre l'implantation, en temps réel, des superviseurs développés, à des fins de validation des développements réalisés.

1. Méthodologie de développement de stratégies de supervisions énergétiques basées sur des règles

La méthodologie présentée dans cette partie, a pour objectif le développement de stratégies de supervision de Sources Hybrides d'Énergie, à base de logique floue. Elle est

née, et continue de se développer, au travers de plusieurs travaux menés au sein de l'équipe. Pour une grande partie d'entre eux, j'ai participé ou je participe à leur encadrement (Thèses soutenues de G. CIMUCA [41, 67, 69] et H. ZHANG [43, 66, 70, 71], en cours de J-C. SWIERCZEK [44] et P. PANKOVITS, projets RECUPENER [72] et OCESE). D'autres travaux [60, 68, 73, 74] y ont également contribué.

Nous allons dans cette partie décrire et développer le déroulement méthodologique de la création d'un superviseur énergétique, dont les différentes étapes sont, dans un premier temps :

- La définition du cahier des charges,
- La détermination de la structure du superviseur,
- Le choix des outils de développement.

A ce point de développement, nous montrerons que l'outil « Logique floue » présente des atouts pour la création de stratégies de supervisions énergétiques appliquées aux systèmes énergétiques qui nous intéressent. Nous pourrions alors poursuivre le déroulement de la méthodologie, avec les étapes suivantes :

- L'identification des différents états de fonctionnement du superviseur,
- L'élaboration des fonctions d'appartenance,
- La détermination de la base de règles floues constituant le superviseur.

a. Définition du cahier des charges

L'écriture de ce cahier des charges nécessite d'apporter les réponses aux questions suivantes :

- Quels sont les objectifs que doit atteindre le système auquel s'appliquera le superviseur ?
- Quelles contraintes ce système subit-il ?
- Quels sont les moyens d'action pour atteindre les objectifs ?

i. Les objectifs

On cherche à identifier la ou les missions confiées au système énergétique. Selon le nombre d'objectifs à atteindre, les stratégies développées seront appelées mono- ou multi-objectifs.

Dans le cas de plusieurs objectifs définis, il faut prendre soin, si nécessaire, d'identifier les priorités, afin de ne pas annihiler les performances de la supervision.

Enfin, le développement d'indicateurs doit permettre de juger la performance des stratégies de supervision développées, en regard de ces objectifs.

ii. Les contraintes

Les contraintes peuvent être internes au système, et dépendre de caractéristiques d'éléments qui le composent, ou externes, et dépendre alors de son environnement.

Elles peuvent être de nature technologique, réglementaire, normative, environnementale, économique, ...

iii. Les moyens d'action

Les moyens d'actions sont les références envoyées à certaines unités constituant le système énergétique. Ce sont, par exemple, des références de puissance envoyées vers les dispositifs de stockage, de raccordement au réseau, ou de production, ... mais il peut s'agir

également de grandeurs de réglage telles qu'un angle de référence pour l'orientation de pâles éoliennes, ...etc.

b. Détermination de la structure du superviseur

Cette étape consiste à identifier les grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur (Figure 19).

i. Les grandeurs d'entrée

Les grandeurs d'entrée sont choisies en fonction des objectifs à atteindre.

Il s'agit de données ou de mesures internes ou externes au système que l'on cherche à gérer.

Il peut s'agir également d'informations provenant de niveaux supérieurs de supervision (supervision à moyen ou long terme, par exemple).

ii. Les grandeurs de sortie

Les grandeurs de sortie sont les moyens d'action.



Figure 19 : Structure de superviseur

c. Choix des outils de développement

La nature, ainsi que le nombre, des objectifs à atteindre, peuvent conditionner le choix des outils à exploiter pour le développement des stratégies de supervision.

Toutefois, dans les développements présents, plusieurs critères nous incitent à orienter, pour une part au moins du superviseur, notre choix vers la logique floue.

i. Des modélisations mathématiques difficiles

Les systèmes énergétiques qui font l'objet de nos études de recherche présentent un caractère complexe, et il peut être difficile, voire impossible, d'en déterminer un modèle mathématique précis, pertinent et suffisamment simple à exploiter.

Une supervision construite sur une base de règles floues, repose d'avantage sur une connaissance experte du fonctionnement, du pilotage du système, que sur l'existence d'un modèle précis.

ii. Un grand nombre de variables à traiter

En raison de leur caractère multi objectif, les stratégies de supervision que nous développons requièrent, en entrée, un grand nombre de données. Il est donc important de pouvoir disposer d'un outil adapté au caractère multi-variable, capable de les traiter simultanément. La logique floue, qui repose sur une méthode d'agrégation permettant d'intégrer un grand nombre de données, répond à cette attente.

iii. Des conditions de fonctionnement fortement variables et difficilement prévisibles

Qu'il s'agisse de la source primaire (vent, ensoleillement), de l'état du réseau, du profil des charges (consommateurs sur un réseau, profil de vol, ...), du comportement des sources

en amont, ...etc., de nombreux paramètres des systèmes énergétiques étudiés, sont soumis à des variations fortement variables et peu prévisibles. La logique floue permet de prendre en compte de fortes amplitudes de variation des variables, et de segmenter ces plages de variations afin de graduer la réponse du système.

d. Identification des différents états de fonctionnement

La construction d'un superviseur à l'aide de la logique floue repose sur la connaissance experte, humaine, du système. Il est donc nécessaire de déterminer les différents états que le système énergétique peut occuper, ainsi que les conditions qui permettent les transitions entre ces états. Il est essentiel, à ce niveau, de n'oublier aucun cas.

Dans [60], une méthode graphique est proposée, utilisant l'analogie avec les méthodes employées dans l'élaboration de systèmes industriels automatisés complexes, telles que décrites dans le *Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts* (GEMMA)[75], développé par l'Agence pour le Développement de la Productique Appliquée à l'industrie (ADEPA).

L'aboutissement premier de cet outil est l'élaboration d'un graphe fonctionnel du système énergétique, où apparaissent les différents modes possibles en son cœur, ainsi que les conditions pour y accéder (Figure 20).

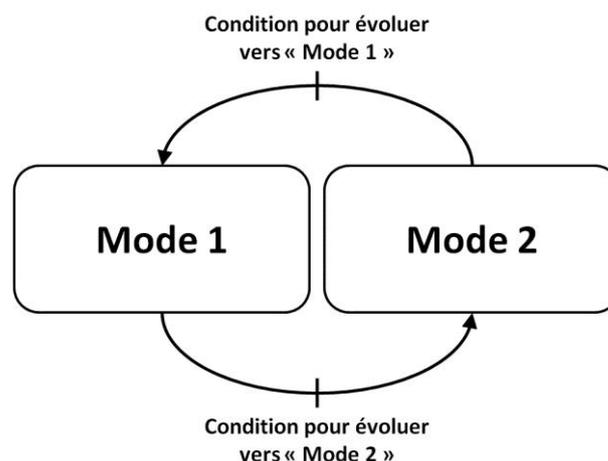


Figure 20- Principe du graphe fonctionnel

Selon la complexité du système étudié, plusieurs niveaux de graphes sont envisagés, selon un principe d'imbrication, afin d'en rendre plus aisée la lecture, et donc l'analyse et la conception.

e. Détermination des fonctions d'appartenance

La traduction des variables d'entrée et de sortie du système, en variables floues, est indispensable au développement du superviseur. Cette étape, appelée **fuzzification**, peut être précédée d'une phase de **normalisation** des variables.

Le lecteur trouvera, en Annexe 3, ainsi que dans les références [76-79], des notions de logique floue utiles à la bonne compréhension de ce qui suit.

i. La normalisation

Les données d'entrées et de sortie peuvent subir, sans que cela soit une obligation, une normalisation, permettant d'obtenir un **univers de discours** limité au maximum à

l'intervalle $[-1,1]$, ainsi que des valeurs comprises dans l'intervalle $[0,1]$. Par cette opération, les grandeurs perdent leur unité physique, et sont exprimées en *per unit* (*p.u.*).

ii. La fuzzyfication

Il s'agit, au cours de cette étape, de traduire les variables physiques réelles en ensembles flous, caractérisant les *valeurs linguistiques* prises par ces variables.

La *fuzzyfication* se fait à l'aide de fonctions d'appartenance dont le choix de forme est très souvent trapézoïdal ou triangulaire, notamment pour simplifier l'acquisition de l'expertise, mais aussi l'implantation matérielle. Les Figure 21 et Figure 22 illustrent cette notion, respectivement pour une grandeur d'entrée, x , et une variable de sortie, y .

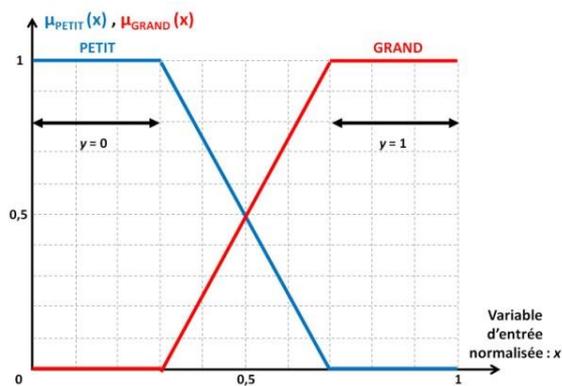


Figure 21 – Fonctions d'appartenance d'ensembles flous pour une grandeur d'entrée x

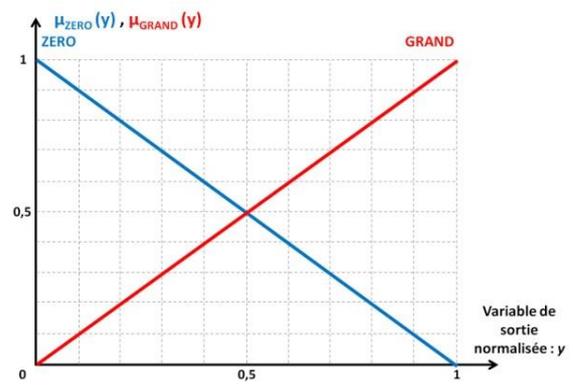


Figure 22 - Fonctions d'appartenance d'ensembles flous pour une grandeur de sortie y

Dans cette étape de détermination des fonctions d'appartenance, les paramètres de ces fonctions d'appartenance (*noyau*, *support*, *pentés*, ...) sont fixés de façon empirique, selon l'expertise que possède le développeur au sujet du système.

f. Détermination des règles du superviseur

La dernière étape de cette méthodologie est la détermination des règles floues. En poursuivant l'analogie avec les méthodes employées dans l'élaboration de systèmes industriels automatisés complexes, cette étape consiste à établir le graphe opérationnel du système énergétique (Figure 23), traduction des graphes fonctionnels à l'aide des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie, définies à l'étape précédente. Dans la mesure où les variables ont fait l'objet d'une fuzzification, les états présentés au niveau de ces graphes sont flous, et les transitions se font de manière graduée.

Les règles floues de l'algorithme de supervision peuvent alors être déduites. Pour l'exemple d'illustration de la Figure 23, deux règles en découlent :

R_1 : **Si** x est PETIT **Alors** y est ZERO

R_2 : **Si** x est GRAND **Alors** y est GRAND

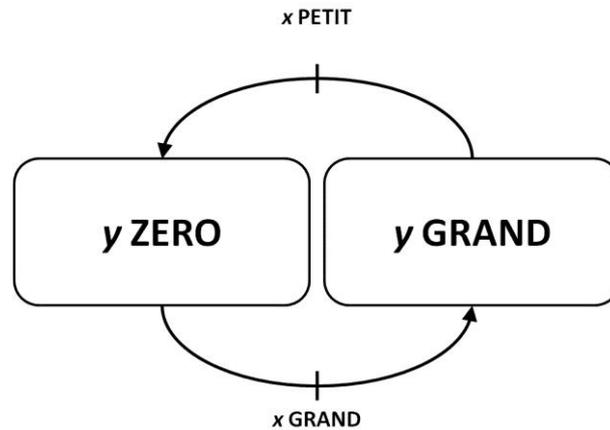


Figure 23 – Principe du graphe opérationnel

g. Conclusions

Nous venons de présenter une méthodologie permettant de développer un superviseur à base de règles floues pour une Source Hybride d’Energie, depuis la définition du cahier des charges du système, jusqu’à l’élaboration des règles floues. Ce développement repose sur une connaissance experte du système, et l’élaboration des fonctions d’appartenance se fait via une approche empirique.

L’étape que nous proposons de décrire dans la suite, envisage de mener une optimisation sur les paramètres du superviseur, issus de la démarche que nous venons de traiter. Il s’agit d’une approche méthodologique, structurée autour d’étapes et d’outils préalablement définis.

2. Méthodologie d’optimisation des superviseurs à base de règles floues

Le développement de superviseurs repose, pour l’instant, sur la connaissance experte du système énergétique, et ses paramètres sont déterminés de façon empirique.

L’optimisation que nous proposons repose sur quatre étapes :

- Le choix des objectifs et des indicateurs,
- Le choix des paramètres à optimiser,
- La détermination des paramètres influents, à l’aide des plans d’expérience,
- L’optimisation de ces paramètres, à l’aide des algorithmes génétiques.

Cette méthodologie a connu ses premiers développements au cours du déroulement du projet RECUPENER, au travers de l’étude visant au développement d’un superviseur flou appliqué à un réseau local DC, à échanges d’énergie, en aéronautique [72].

a. Le choix des objectifs et des indicateurs

Les objectifs faisant l’objet de l’optimisation, sont choisis parmi ceux fixés au superviseur développé précédemment. Dans les systèmes que nous étudions, il peut s’agir du maintien d’une tension, du réglage d’une fréquence, de l’amélioration d’efficacité énergétique, ...etc.

Des indicateurs sont ensuite développés, qui servent à mesurer les performances du système vis-à-vis des objectifs fixés, mais aussi à construire les fonctions sur lesquelles reposera l’étape finale d’optimisation.

b. Le choix des paramètres à optimiser

Le choix des fonctions d'appartenance des ensembles flous permettant de traduire les variables d'entrée et de sortie du superviseur flou en variables linguistiques, est pour l'instant réalisé de façon empirique, en fonction de l'expertise que possède le développeur, vis-à-vis du système énergétique.

La présente phase d'optimisation vise à déterminer les paramètres des superviseurs flous (fonctions d'appartenance, gains) permettant d'atteindre les meilleurs résultats vis-à-vis des objectifs (Figure 24).

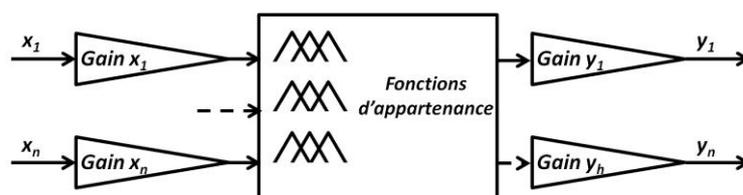


Figure 24 - Les paramètres à optimiser

L'optimisation des fonctions d'appartenance porte sur le noyau de chaque ensemble flou, en envisageant une amplitude de variation maximale, tout en cherchant à agir par symétrie, afin de limiter le nombre de paramètres à optimiser, et en conservant une partition floue, qui se traduit par la relation (1).

$$\forall x \in X, \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(x) = 1 \quad (1)$$

La Figure 25 illustre ce principe, à l'aide des fonctions d'appartenance des sous-ensembles des variables linguistiques « GRAND » et « PETIT », qui évoluent d'une fonction booléenne à une fonction totalement floue. Dans un tel cas, c'est le paramètre a qui fera l'objet de l'optimisation.

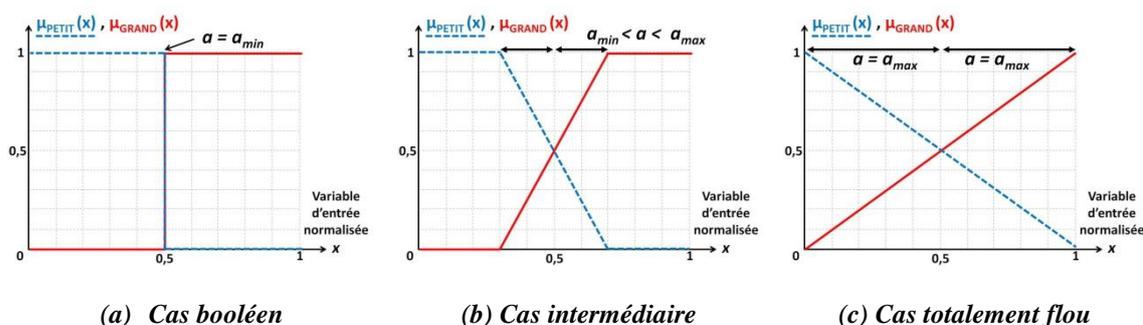


Figure 25 – Fonction d'appartenance des variables « GRAND » et « PETIT »

Les paramètres pouvant faire l'objet de l'optimisation sont donc les noyaux, les supports des fonctions d'appartenance, ainsi que les gains. Toutefois, avant de mener une phase d'optimisation, coûteuse en temps, sur tous les paramètres, il est utile de déterminer l'influence de chacun de ces paramètres, sur les objectifs recherchés, afin d'éliminer du processus tout paramètre sans effet.

Cette étude d'influence est réalisée à l'aide des plans d'expérience.

c. Détermination des paramètres influents à l'aide des plans d'expérience

La démarche présentée précédemment conduit à identifier un paramètre à optimiser par fonction d'appartenance. A cela, doivent s'ajouter les éventuels gains. Dans cette étape, on cherche à exclure du processus d'optimisation, tout paramètre n'ayant aucune influence, ou une influence réduite, sur les objectifs visés. Les plans d'expérience sont utilisés, comme cela a pu être proposé dans [80].

La méthode utilisée repose sur les plans factoriels complets, à deux niveaux par facteur. Ces plans sont les plus utilisés, et les plus simples à mettre en œuvre. Dans notre étude, les facteurs sont les paramètres du superviseur que l'on cherche à optimiser. Si nous sommes en présence de k facteurs, le plan factoriel sera noté 2^k . Contrairement à la méthodologie courante, qui consiste à ne faire varier progressivement qu'un paramètre à la fois, tandis que tous les autres restent constants, et à observer les effets de ce changement (ce qui conduit à un très grand nombre d'essais), les plans factoriels auxquels nous avons recours, vont mener à la réalisation de 2^k essais, choisis aux limites du domaine expérimental.

En recourant à la notation de Yates, on note respectivement +1 et -1 les niveaux haut et bas de chaque facteur (ce qui consiste à utiliser des variables réduites et centrées, via un changement d'origine).

Ensuite, la matrice d'expérience est construite, qui regroupe les résultats des essais réalisés. Celle-ci permet, finalement, de déterminer les effets de chaque facteur sur les différents objectifs (Figure 26).

Illustrons cette méthode, en considérant un cas simple où l'on étudie l'influence de deux variables, $x_1 \in [x_{1_inf}, x_{1_sup}]$ et $x_2 \in [x_{2_inf}, x_{2_sup}]$ sur un objectif, y .

Quatre essais doivent donc être menés, aux limites du domaine expérimental, soit pour les paires suivantes de (x_1, x_2) : (x_{1_inf}, x_{2_inf}) , (x_{1_inf}, x_{2_sup}) , (x_{1_sup}, x_{2_inf}) , (x_{1_sup}, x_{2_sup}) . Les résultats correspondants sont respectivement notés : y_1, y_2, y_3 et y_4 .

Les effets E_1 et E_2 , respectivement de x_1 et x_2 sur l'objectif y , ainsi que la moyenne M des résultats, sont déterminés selon les relations (2) à (4). Les effets sont obtenus en moyennant les résultats y_j pondérés par les notations de Yates de x_1 et x_2 correspondantes.

$$E_1 : \text{Effet de } x_1 \text{ sur } y \qquad E_1 = \frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4}{4} \qquad (2)$$

$$E_2 : \text{Effet de } x_2 \text{ sur } y \qquad E_2 = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{4} \qquad (3)$$

$$M : \text{Moyenne des résultats} \qquad M = \frac{+y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \qquad (4)$$

N° de l'essai	X ₁		X ₂		Résultat
	Valeur réelle	Notation de Yates	Valeur réelle	Notation de Yates	
1	X _{1_inf}	-1	X _{2_inf}	-1	y ₁
2	X _{1_inf}	-1	X _{2_sup}	+1	y ₂
3	X _{1_sup}	+1	X _{2_inf}	-1	y ₃
4	X _{1_sup}	+1	X _{2_sup}	+1	y ₄
Effets		E ₁		E ₂	M

Figure 26 - Matrice d'expérience et effets

Les effets obtenus nous informent des influences respectives de x_1 et x_2 sur l'objectif y . Seuls les paramètres influents sont intégrés au processus d'optimisation, que nous allons décrire dans ce qui suit.

d. Optimisation des paramètres à l'aide des algorithmes génétiques

Le processus d'optimisation nécessite la création de *fonctions objectif*, que l'on cherche à minimiser. Celles-ci, dans notre méthodologie, sont obtenues par la somme pondérée des différents indicateurs mis en place lors de la première étape. Les poids retenus permettent, par exemple, de placer les objectifs à des niveaux de priorité différents, ou encore de favoriser certains points de fonctionnement du système.

Les *fonctions objectif* ainsi élaborées sont ensuite intégrées à un outil logiciel d'optimisation. Pour le choix de celui-ci, il faut veiller à ce que les solutions obtenues à l'issue du processus reposent sur l'obtention d'un minimum global de la fonction objectif, et non d'un minimum local.

Notre choix se porte sur le logiciel *Matlab*[®], associé à la boîte à outils *Global Optimization Toolbox*, qui utilise les algorithmes génétiques.

e. Conclusions

Nous venons de présenter une méthodologie d'optimisation du réglage des paramètres d'un superviseur flou.

Une première étape consiste à définir les objectifs visés par l'optimisation, ainsi que les indicateurs utilisés afin d'en vérifier la qualité.

Ensuite, les paramètres à optimiser sont identifiés. Dans notre cas, il s'agit des paramètres des fonctions d'appartenance, ainsi que des gains.

La phase d'optimisation, à proprement parler, étant très gourmande en temps de calcul, il est utile d'étudier l'influence des paramètres identifiés, sur les objectifs recherchés. Pour cela, les plans d'expérience sont utilisés, et permettent d'isoler les paramètres influents, qui seuls sont conservés pour la dernière étape d'optimisation.

Le processus se termine par le développement de fonctions objectif, construites autour des indicateurs développés précédemment, en vue d'une optimisation finale à l'aide des algorithmes génétiques.

Afin de valider les développements méthodologiques réalisés jusqu'à ce point, des essais expérimentaux sont envisagés. Dans ce cadre, des méthodologies expérimentales d'implantation en temps réel des superviseurs à base de règles, ont été développées.

3. Méthodologies expérimentales

a. La nécessité d'un processus de validation expérimentale

L'élaboration de modèles (d'étude, de simulation) de systèmes complexes fait nécessairement appel, à des degrés divers, à des hypothèses simplificatrices. L'exploitation des résultats est alors rendue plus délicate, dans la mesure où il est parfois difficile d'estimer les limites des hypothèses réalisées. De plus, les outils de simulations laissent parfois entrevoir des différences au niveau des résultats délivrés, en raison de leurs modes de fonctionnement. Aussi, la nécessité de développer des processus de validation expérimentale apparaît-elle rapidement.

Dès lors, cette entreprise peut s'inscrire dans une démarche plus structurée, méthodologique, de développement et de validation de concepts théoriques, à l'image de ce que l'on retrouve dans le concept de *TRL (Technology Readiness Levels)*, initié par la NASA au cours des années 70, puis formalisé au cours des années 80, pour être intégré dans le *NMI (Nasa Management Instruction)* [81], utilisé dans les secteurs de l'aérospatial et de l'aéronautique [81]. Il s'agit d'un système d'évaluation du degré d'avancement du développement d'une nouvelle technologie, allant du concept initial (*TRL1*), jusqu'au système éprouvé en conditions réelles (*TRL 9*). Le Tableau 2 montre que différentes phases de validations ponctuent le développement d'une nouvelle technologie : par simulation numérique, puis de façon expérimentale, depuis la maquette en laboratoire (*TRL 4*), jusqu'au prototype en environnement réel (*TRL 7*), en passant par du prototypage en environnement approprié (*TRL 6*).

Technology Readiness Levels Summary	
<i>TRL 1</i>	Basic principles observed and reported
<i>TRL 2</i>	Technology concept and/or application formulated
<i>TRL 3</i>	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of concept
<i>TRL 4</i>	Component and/or breadboard validation in laboratory environment
<i>TRL 5</i>	Component and/or breadboard validation in relevant environment
<i>TRL 6</i>	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)
<i>TRL 7</i>	System prototype demonstration in a space environment
<i>TRL 8</i>	Actual system completed and "flight qualified" through test and demonstration (ground or space)
<i>TRL 9</i>	Actual system "flight proven" through successful mission operations

Tableau 2 - Les 9 niveaux du concept de mesure *TRL* [81]

C'est en nous inspirant de ce principe, que nous développons progressivement, au travers de nos travaux de recherche, une démarche méthodologique de développement d'un nouveau concept.

Celle-ci doit intégrer successivement des phases de simulation numérique, puis de validation expérimentale en laboratoire, avec bouclage sur le concept théorique initial, afin de l'affiner.

a. Validation par simulation numérique

Une première phase de validation repose sur des simulations numériques du système énergétique et du superviseur. Pour nos travaux de recherche, nous utilisons principalement *Matlab® Simulink®*, associé, pour le développement du superviseur, à la boîte à outils *Fuzzy Logic*.

Lorsque le système énergétique a besoin d'être modélisé avec grande précision, et que le recours à un logiciel plus orienté « composant » que « système » est nécessaire, il est alors intéressant de rechercher un logiciel permettant la co-simulation avec *Simulink®*.

La partie opérative peut alors être modélisée dans le logiciel « composant », tandis que le superviseur est développé sous *Simulink®*, puis « encapsulé » dans le premier logiciel.

Nous procédons ainsi avec le logiciel *Saber®*, notamment dans les applications aéronautiques.

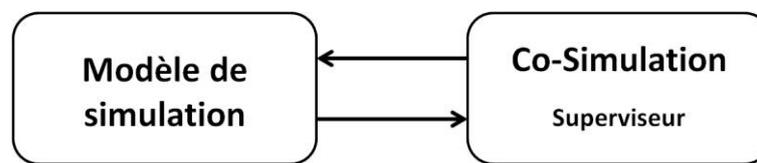


Figure 27 – La co-simulation permet d'utiliser des outils logiciels adaptés à l'intégration de superviseurs à base de règles floues

De façon chronologique, la validation par simulation numérique intervient, dans un premier temps, avant la phase d'optimisation décrite précédemment. Elle permet alors de s'assurer de la cohérence du superviseur développé (les règles obtenues répondent-elles aux objectifs fixés, en fonction des contraintes existantes). Ceci est important, car cette phase d'optimisation est gourmande en ressources de calcul. Dans un second temps, la simulation numérique intervient pour une première étape de validation du superviseur optimisé.

Lorsque cette phase de validation numérique est achevée, la validation expérimentale peut être envisagée.

b. Validation expérimentale

Les essais expérimentaux sont réalisés sur la plateforme *Energies Electriques* du L2EP, située sur le site de HEI Lille. Cette plateforme, dont le développement a débuté en 2001, permet aujourd'hui d'émuler des Sources Hybrides d'Energie, dans les champs d'application tels que réseaux terrestres, embarqués, ...etc.

Elle constitue un outil de validation de nos développements théoriques, portant sur les superviseurs temps réel des SHE. Composée de systèmes réels de puissance (machines électriques, convertisseurs électroniques de puissance, réseau de laboratoire, ...), pilotés par des cartes *dSpace™*, temps réel, elle constitue un outil dédié aux simulations dites *Power Hardware In the Loop* [82]. Une description en est donnée dans l'Annexe 4.

La nécessité d'implanter les superviseurs à base de règles, en temps réel, est à l'origine de travaux visant à simplifier les résultats obtenus, afin de réduire le temps de calcul, et faciliter la mise en œuvre expérimentale.

c. Discussion sur la réduction de la complexité du superviseur

i. Problématique

La logique floue est adaptée au développement de superviseurs de systèmes énergétiques complexes, car d'une part, elle ne nécessite pas de modèle mathématique

précis du système, et d'autre part, elle permet de traiter un grand nombre de variables d'entrée.

Ces superviseurs reposent sur un ensemble de règles floues, dont le nombre peut devenir rapidement très grand : Soit n le nombre de variables d'entrées exploitées dans la partie *prémisse* des règles, et m le nombre de valeurs linguistiques que peut prendre chacune des entrées, alors la prise en compte de toutes les situations possibles conduit à m^n règles floues (hypothèse faite d'un nombre identique de variables linguistiques par variable d'entrée traitée) associées à chaque variable de sortie.



Figure 28 – Le nombre de règles floues augmente très rapidement avec le nombre des entrées

Ce très grand nombre de règles floues risque d'être à l'origine de difficultés lors de l'implantation matérielle, notamment en temps réel, de ces solutions : espace mémoire, temps de calcul, ... sont alors des limites.

Des solutions de réduction du nombre de règles floues doivent être trouvées.

La littérature scientifique propose de nombreuses références à des travaux de recherche, traitant de cette nécessité de réduire la complexité des systèmes flous, par exemple en réduisant le nombre de labels linguistiques à l'aide de transformations matricielles, ou en exploitant des similarités entre paires d'ensembles flous de chaque variable [83-87], ...etc. Mais parce qu'elles ont très souvent recours à des outils mathématiques relativement « lourds », ces méthodes deviennent elles-mêmes sources de complexité dans le développement des superviseurs à base de règles floues.

Il peut donc être intéressant, de notre point de vue d'utilisateur de la logique floue, de rechercher des méthodes de simplification les plus simples possible à mettre en œuvre.

ii. Contribution de la méthode graphique à la réduction d'un superviseur à base de règles floues

La proposition suivante relève du bon sens : « Si dans un superviseur, des règles floues ne sont jamais activées, alors il est possible de les supprimer ».

La difficulté réside dans la parfaite sélectivité dont il faut faire preuve au moment de la conception du superviseur, afin d'éviter l'élimination de toute règle active, ce qui pourrait avoir des conséquences néfastes au bon fonctionnement du système piloté. La méthode graphique, grâce à l'analyse rigoureuse qu'elle permet du système, atteint cet objectif.

Dans [73], le cas envisagé est le système multi-sources présenté à la Figure 29. Il est constitué d'un générateur éolien, de systèmes de stockage long et court terme ainsi que d'une source de production décentralisée prévisible (type micro-turbine à gaz).

L'objectif de la supervision de cette centrale est de déterminer les puissances de référence en temps réel afin de :

- Fournir la puissance de référence déterminée par la supervision à moyen terme,
- Participer au réglage primaire de la fréquence (garantir une réserve primaire de puissance),

- Maximiser l'énergie éolienne,
- Minimiser le recours à la source prévisible, en particulier si elle est basée sur des combustibles fossiles.

Les contraintes du système sont les limites des capacités des différents groupes de production, les niveaux de stockage ainsi que les éventuelles variations de fréquence dues à un dysfonctionnement du réseau.

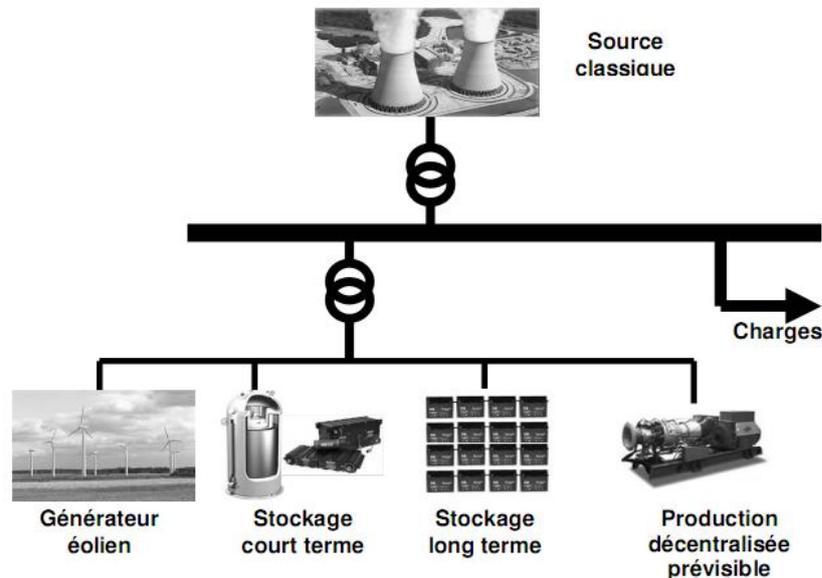


Figure 29 – Système multi-sources connecté au réseau électrique

Le superviseur développé comporte six entrées et quatre sorties. Quatre des entrées sont soumises à *fuzzyfication* (car deux entrées sont des valeurs de consigne), ainsi que les quatre sorties.

Parmi les entrées, trois font l'objet d'une *fuzzyfication* sur une base de trois ensembles flous, la quatrième sur une base de cinq ensembles flous.

Le nombre de lois floues, par sortie, correspond donc à 135 (soit $3^3 \times 5$). Au total, pour les quatre sorties, 540 lois floues (soit 135×4) doivent, au maximum, être initialement considérées.

Or, on montre qu'il est possible de réduire ce nombre de lois à 44. En effet, l'analyse précise du système conduit à identifier des règles qui ne sont jamais activées, et qui ne présentent donc aucun intérêt pour la supervision.

Il n'est bien sûr pas exclu de parvenir au même résultat sans avoir recours à la méthodologie proposée, mais celle-ci, par la structuration qu'elle offre pour la conception du superviseur, rend plus sûre cette réduction du nombre de lois.

Enfin, nous voyons que l'ampleur de cette simplification est directement liée à la nature du système énergétique à superviser, aux objectifs fixés, et qu'il n'est pas possible, *a priori*, de connaître la réduction du nombre de lois floues.

Cette réduction du nombre de règles floues est une première étape. Selon les résultats obtenus, il peut être intéressant, voire nécessaire, de poursuivre cette simplification, en agissant au niveau de l'implantation en temps réel du superviseur obtenu.

iii. Méthodologies d'implantation temps réel de supervisions énergétiques, à base de règles

Le caractère multi-variable de la logique floue, rend cet outil pertinent pour le développement de stratégies de supervision énergétique multi-objectifs (maintien de tension, réglage de fréquence, accroissement de l'efficacité énergétique, ...etc.). En revanche, ce nombre important de variables peut être à l'origine de difficultés d'implantation, au cœur de systèmes temps réel, des superviseurs ainsi développés. La concrétisation de ces difficultés est un accroissement du temps nécessaire pour l'accomplissement des séquences de calcul (acquisition des mesures, calcul des algorithmes, conversion pour restitution des ordres vers le système). Des séquences de l'ordre de la milliseconde peuvent se produire, avec comme conséquence envisageable, une impossibilité de compilation des programmes, mais aussi, lorsque la phase de compilation réussit, une altération de la commande des systèmes électriques.

Nous proposons, dans ce qui suit, des pistes de simplification des superviseurs à base de règles floues : (i) La méthode de simplification par linéarisation des surfaces issues du superviseur flou, puis (ii) la méthode de simplification par création de tables de données.

Seuls les principes sont ici exposés. Les cas d'application permettront d'illustrer ces solutions.

1) Méthode de simplifications par linéarisation des surfaces

L'évolution d'une grandeur de sortie du superviseur en fonction de deux entrées peut être représentée par une surface en trois dimensions (3-D), présentant des non linéarités.

La proposition est ici de remplacer cette surface par une surface linéaire la plus proche possible. Ainsi, la solution implantée matériellement est l'équation d'un plan passant par trois sommets de la surface non-linéaire.

Cette solution a été mise en place dans [69], [41], et sera illustrée dans la partie traitant de l'association *Eolienne à vitesse variable – Système inertielle de stockage d'énergie*, à partir de la page 27.

On peut identifier quelques limitations à cette solution. La première est qu'elle consiste en la simplification d'une surface à trois dimensions. Par conséquent, si le nombre de grandeurs, en entrée est supérieur à deux, il faut créer autant de surfaces simplifiées qu'il y a de paires de variables d'entrée différentes, et ce pour chaque sortie. Une autre difficulté est l'accroissement de l'erreur entre la surface simplifiée et la surface floue lorsque la non-linéarité de cette dernière augmente.

Cette difficulté peut être atténuée en essayant de déterminer des surfaces simplifiées plus complexes, de degré supérieur à celle d'un plan. Nous n'avons pas développé cette piste, privilégiant une autre approche, que nous allons décrire maintenant : la méthode de simplification par création de tables de données.

2) Méthode de simplification par création de tables de données

a) Principe de la création de table de données

Un tableau montre une relation biunivoque entre la variable d'entrée et la variable de sortie. Un tableau en 2 dimensions (2-D) est suffisant pour exprimer un espace de 3-D, (X, Y, Z). Si les axes X et Y sont les variables d'entrée et l'axe Z est la variable de sortie, on peut

mettre les valeurs de X et Y à la rubrique colonne et ligne, et remplir le tableau par la valeur de Z qui correspond au couples d'entrée (X, Y).

	X_1	X_2	...	X_n
Y_1	Z_{11}	Z_{12}	...	Z_{1n}
Y_2	Z_{21}	Z_{22}	...	Z_{2n}
...
Y_m	Z_{m1}	Z_{m2}	...	Z_{mn}

Tableau 3 – Tableau 2D

Pour un espace de 4-D (3 entrées et une sortie), un tableau en 2-D n'est plus suffisant. Dans ce cas, il faut utiliser un tableau en 3-D. Un espace 4-D peut-être représenté en plusieurs espaces 3-D. Selon le même principe, un tableau 3-D peut être considéré comme plusieurs tableaux 2-D.

b) L'influence du pas de discrétisation

Afin de procéder au transfert des surfaces obtenues par logique floue vers des tableaux 2-D et 3-D, nous avons recours à un outil logiciel disponible dans l'environnement *Matlab® Simulink®* : les « *look-up tables* ».

La fonction « *look-up table* » permet d'enregistrer des coordonnées de points échantillonnés, issues d'une discrétisation, dans un tableau. Lorsque les entrées de « *look-up table* » reçoivent des valeurs entre deux points échantillonnés, le bloc « *look-up table* » utilise l'insertion linéaire pour obtenir la sortie.

La difficulté de mise en œuvre réside dans le choix du pas de discrétisation. Il importe, en effet, de ne pas perdre trop d'information dans cette opération de discrétisation (ce qui impliquerait un pas le plus petit possible), tout en veillant à maintenir le volume (en termes d'occupation de mémoire) des tableaux générés compatible avec une implantation en temps réel.

Ainsi, pour un tableau 2-D, le nombre de points enregistrés augmente selon le carré du nombre de points échantillonnés. Pour un tableau 3-D, cette évolution se fait selon le cube du nombre de points échantillonnés. Une division par deux du pas de discrétisation entraîne quatre fois plus de points à mémoriser pour un tableau 2-D, 8 fois plus pour un tableau 3-D.

Il est donc nécessaire d'aboutir à un compromis entre la précision de transfert et la taille de tableau.

c) Estimation de l'erreur commise

Dans notre démarche méthodologique de simplification des surfaces obtenues à l'aide de la logique floue, il paraît nécessaire de tenter d'estimer l'écart de précision inhérent à cette simplification.

Cette estimation est réalisée de la façon suivante : Pour la base de règles floues à simplifier, toutes les combinaisons d'entrées envisageables sont traitées, d'une part par les lois d'inférence du superviseur, d'autre part au travers des tableaux issus du processus de discrétisation (*look-up table*).

Si, de façon générique, on note S_{LF} chaque sortie obtenue dans le premier cas, et S_{LT} chaque sortie obtenue dans le second cas, alors l'estimation de l'écart peut être obtenue à l'aide de la relation suivante (5).

$$\text{Ecart (\%)} = \frac{\sum |S_{LF} - S_{LT}|}{\sum |S_{LF}|} \times 100\% \quad (5)$$

3) Conclusion

La validation expérimentale est une étape indispensable dans le processus d'élaboration d'un concept original, en complément de vérifications par moyens numériques de simulation. L'implantation en temps réel des superviseurs que nous développons, construit sur la base de règles floues, et donc gourmande en temps de calcul, conduit au développement de méthodes de simplification. Tout d'abord, la réduction de la base de règles doit être étudiée, sans assurance de résultats pertinents. Ensuite, une solution repose sur la simplification des surfaces obtenues suite au développement du superviseur. Enfin, l'utilisation de tables de données peut également être envisagée. Une proposition d'estimation de l'erreur due à la simplification est proposée.

4. Conclusion

La partie que nous venons de traiter nous a permis d'expliquer les méthodologies que nous mettons en place afin de développer des superviseurs de systèmes énergétiques.

Tout d'abord, une méthodologie générale visant à créer, à partir du cahier des charges qu'il faut définir, les règles floues du superviseur. Celles-ci sont, à ce niveau, construites sur la base d'une connaissance experte du système à superviser.

Ensuite, une phase d'optimisation du superviseur est menée, en utilisant des outils tels que les plans d'expérience et les algorithmes génétiques. Les paramètres à optimiser concernent alors les fonctions d'appartenance des ensembles flous appliqués aux différentes données d'entrée et de sortie du superviseur.

Enfin, afin de valider le superviseur, une phase de validation est envisagée, par simulation et expérimentation. Les règles floues pouvant être à l'origine de difficultés d'implantation matérielle (temps de calcul, espace mémoire), des méthodes de simplification sont proposées.

Nous allons maintenant appliquer ces méthodologies à deux exemples, concernant respectivement les domaines applicatifs des réseaux terrestres et embarqués.

C. Exemples d'applications

Deux exemples d'application sont abordés au cours de cette partie, afin d'illustrer les développements méthodologiques précédents :

- Le premier concerne les réseaux terrestres, et porte sur l'association d'une éolienne à vitesse variable à un système inertiel de stockage d'énergie (pages 27 et suivantes).
- Le second concerne les réseaux embarqués, et porte sur un réseau local DC à échanges et récupération d'énergie, en présence d'un système de stockage par supercondensateurs, en aéronautique (pages 45 et suivantes).

1. Réseau terrestre : Eolienne à vitesse variable associée à un système inertiel de stockage d'énergie

L'accroissement de la présence de la production décentralisée dans les réseaux électriques est tributaire, en grande partie, de l'évolution technologique de ces sources. Les nouvelles générations devront être capables de participer aux services système : réglage de la tension, de la fréquence, de la puissance réactive, participation à la répartition de charge, capacité de démarrage en autonome et fonctionnement en mode îloté.

En raison du caractère très fluctuant et peu prévisible du vent, une éolienne seule ne peut que partiellement participer aux services système, dans la mesure où une supervision adaptée est mise en place [88, 89]. Son couplage avec une réserve d'énergie, ainsi que le développement d'une supervision adaptée, doivent être envisagés [90]. Le stockage inertiel présente des caractéristiques adaptées à cette application, en termes de dynamique, durée de vie, rendement, ...etc.

Les travaux de thèse de G. CIMUCA [41] ont porté sur l'étude de l'association d'un système inertiel de stockage d'énergie à un générateur éolien à vitesse variable, afin de constituer un ensemble capable de fournir des services système ou de fonctionner en mode îloté.

a. Le système énergétique étudié

La Figure 30 représente le schéma d'une éolienne à vitesse variable construite sur la base d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Le Système Inertiel de Stockage d'Énergie (SISE), composé d'un volant d'inertie entraîné par une machine asynchrone à cage, est couplé sur le bus continu [74], [91]. L'interconnexion des différents éléments (génératrice éolienne, machine électrique associée au volant d'inertie, raccordement au réseau électrique) se fait par l'intermédiaire de convertisseurs électroniques de puissance AC-DC, entièrement commandables, raccordés à un même bus continu.

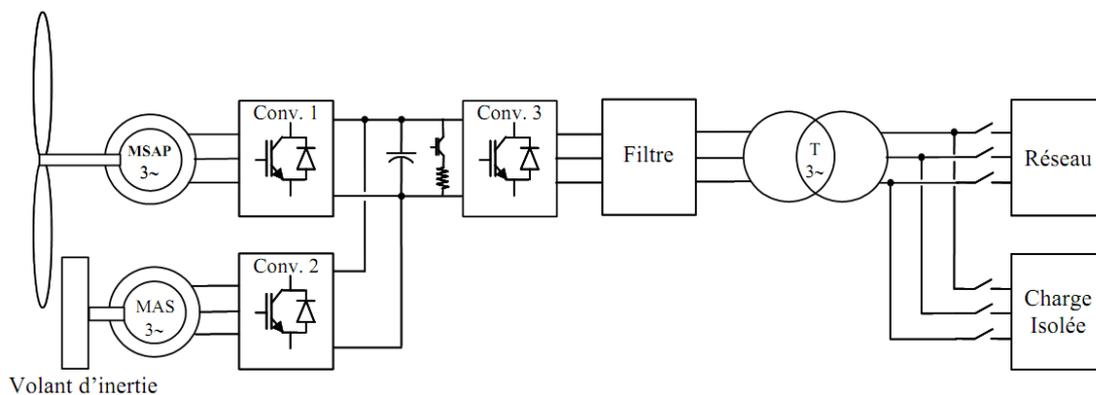


Figure 30 - Eolienne à vitesse variable associée à un dispositif de stockage inertiel

b. Le cahier des charges

Nous devons identifier, pour le système énergétique présenté à la Figure 30, les objectifs, les contraintes, ainsi que les moyens d'actions.

i. Les objectifs

Deux cas peuvent se présenter : soit un fonctionnement raccordé au réseau, soit un fonctionnement sur charge isolée.

Dans le premier cas, l'objectif est de renvoyer une puissance lissée vers le réseau, dont on fait l'hypothèse qu'il peut recevoir la puissance envoyée par l'éolienne.

Dans le second cas, l'objectif est de délivrer une puissance constante par intervalles, correspondant à la consommation de la charge, aux pertes près.

Seul le premier cas est abordé en détail dans ce mémoire. Pour le second, seuls les résultats issus de l'expérimentation sont montrés en p.43 et suivantes, et de plus amples détails sont consultables dans [69] et [41].

Ensuite, un second objectif est de s'assurer de la disponibilité du stockage, c'est-à-dire de faire en sorte qu'il n'atteigne pas ses limites haute et basse (pour ce dernier cas, en supposant néanmoins une vitesse de vent minimale).

Enfin, se pose la question du maintien de la tension du bus continu.

Dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, celui-ci, via le convertisseur de raccordement (Conv3), peut contribuer à ce maintien. Toutefois, si l'on souhaite que cette éolienne puisse participer aux services système, il faut libérer ce convertisseur de cette tâche. De plus, dans le cas d'une alimentation de charge isolée, cette possibilité n'existe plus. Aussi, il est envisagé de confier le maintien du bus continu au SISE.

ii. Les contraintes

Nous avons fait l'hypothèse que le réseau électrique est capable de recevoir la puissance injectée. Il n'y a donc aucune contrainte à envisager à ce niveau. En revanche, le lissage de puissance est dépendant de la capacité du stockage.

Ensuite, pour assurer le bon fonctionnement du système, et plus particulièrement des convertisseurs électroniques de puissance, la tension du bus continu doit être maintenue à une valeur fixe en fonctionnement permanent.

Enfin, le système de stockage inertiel présente des limites, en termes d'énergie, haute et basse. L'énergie cinétique E_c , stockée dans un volant entraîné à la vitesse de rotation Ω , dont l'inertie est J , s'écrit :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2 \quad (6)$$

La limite haute est imposée par la machine d'entraînement, choisie de sorte que cette vitesse limite soit inférieure à la vitesse mécanique maximale acceptable pour le volant.

La limite basse est choisie afin de maintenir la machine asynchrone dans sa zone de fonctionnement à puissance constante, permettant ainsi de maintenir un bon rendement.

iii. Les moyens d'action

Dans notre cas d'étude, la génératrice synchrone à aimants permanents est commandée de façon à extraire le maximum de puissance. Nous ne cherchons donc pas à dégrader la puissance en provenance de la turbine éolienne. Aussi, aucune action sur l'angle de calage des pôles n'est envisagé en mode de fonctionnement normal.

Deux moyens d'actions sont alors identifiés : la référence de puissance à injecter au réseau, que nous noterons P_{reg} et la puissance de référence destinée au système de stockage, P_{SISE_ref} .

c. La structure du superviseur

Nous déterminons, dans cette partie, les grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur.

i. Les grandeurs d'entrée

Les entrées du superviseur dépendent des objectifs fixés.

Le premier est de lisser la puissance en provenance de la turbine éolienne, afin de l'injecter au réseau électrique. Une première entrée est donc la puissance éolienne P_{eol} .

Le second objectif est de maintenir la disponibilité du stockage entre ses limites haute et basse. Le superviseur doit être informé de l'énergie contenue dans le volant d'inertie. Selon l'équation (6), la mesure de la vitesse de rotation, Ω , est nécessaire.

Enfin, la tension du bus continu devant être maintenue, la mesure de cette tension, notée V_{dc} , est également une entrée du superviseur.

ii. Les grandeurs de sortie

Les sorties sont les références envoyées vers les moyens d'action, soit P_{reg} et P_{SISE_ref} .

La structure du superviseur global est représentée à la Figure 31.

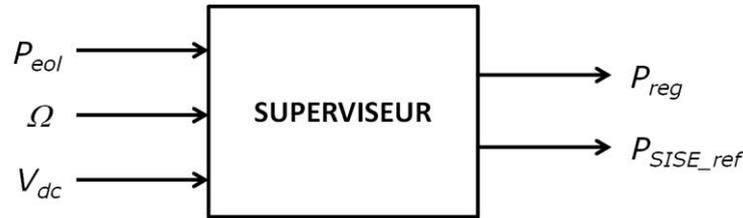


Figure 31 – Superviseur d'une éolienne à vitesse variable associée à un dispositif de stockage inertiel

Le développement du superviseur nécessite à présent la détermination des outils appropriés.

d. Les outils de développement du superviseur

Le lissage de la puissance à renvoyer au réseau électrique appelle la présence d'un filtre, et donc un traitement fréquentiel, comme proposé dans [65]. Le principe est alors d'envoyer au réseau la puissance P_{reg} correspondant à la composante basse fréquence issue de la puissance éolienne, P_{eol_BF} (7).

$$P_{reg} = P_{eol_BF} \quad (7)$$

La composante haute fréquence de la puissance éolienne, P_{eol_HF} , est alors destinée au stockage.

Enfin, la tension V_{dc} devant être asservie à une valeur de consigne fixe, un simple correcteur de type PI est utilisé. Dans la mesure où ce maintien de tension est confié au système de stockage, la puissance ΔP nécessaire à ce maintien constitue un élément de la référence de puissance du système de stockage.

Ainsi, cette référence de puissance peut s'écrire selon (8).

$$P_{SISE_ref} = P_{eol_HF} + \Delta P \quad (8)$$

A ce niveau de développement, le superviseur est celui présenté à la Figure 32. Il peut assurer les objectifs de lissage de la puissance renvoyée au réseau et de maintien de la tension du bus continu. En revanche, en cet état, il ne permet pas d'assurer la disponibilité du stockage.

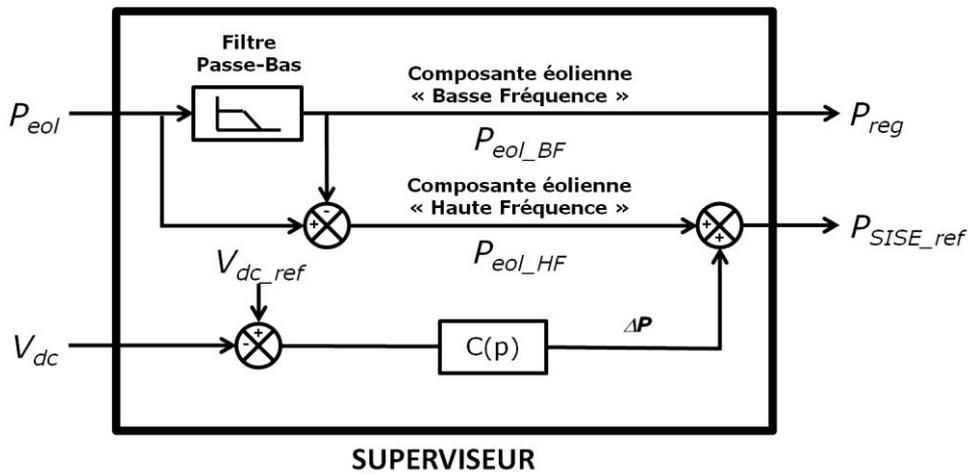


Figure 32 – Superviseur répondant aux 2 objectifs de lissage de puissance, maintien de tension

Pour atteindre ce dernier objectif, la mesure de la vitesse de rotation du volant d'inertie, Ω , doit être prise en compte par le superviseur, et contribuer à la détermination de la puissance à envoyer vers le réseau. La logique floue est ici retenue, en raison de l'aspect fortement variable de Ω et P_{eol_BF} , qui sont alors les deux entrées de la partie floue du superviseur (Figure 33), que nous appellerons dans la suite « Superviseur Flou ».

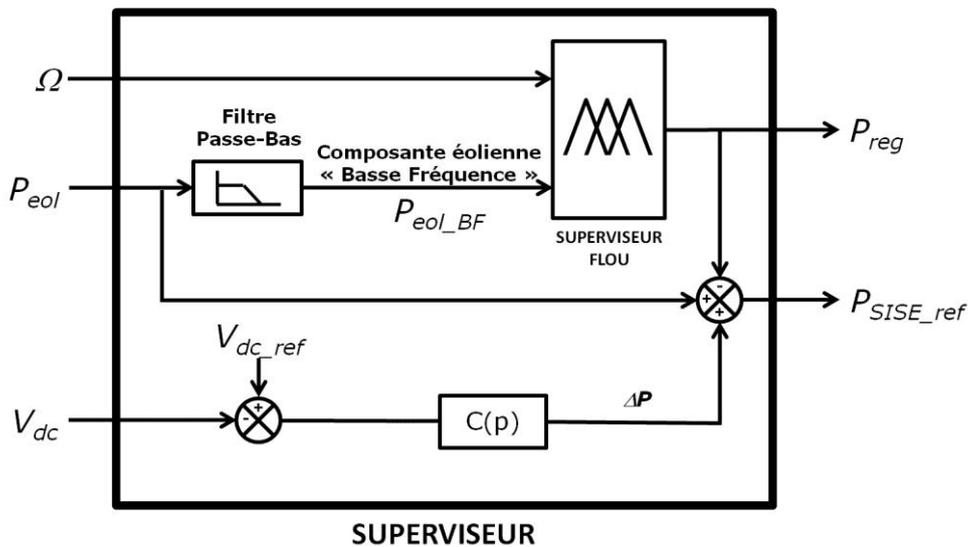


Figure 33 – Superviseur répondant aux 3 objectifs de lissage de puissance, maintien de tension et disponibilité du stockage

La puissance de référence destinée au stockage, P_{SISE_ref} , s'exprime donc selon la relation (9), tandis que la référence de puissance à envoyer vers le réseau, , est déterminé par le superviseur flou.

$$P_{SISE-ref} = P_{eol} + \Delta P - P_{reg} \quad (9)$$

A ce point de l'étude, nous pouvons établir une synthèse reprise dans le Tableau 4.

Objectifs	Mesures	Contraintes	Moyens d'action	Outils
Lissage de la puissance envoyée au réseau	P_{eol}	Pas de contrainte au niveau du réseau La capacité limitée du stockage	Référence de la puissance injectée au réseau : P_{reg}	Filtre Passe-Bas
Disponibilité du stockage	Ω	Limites basse et haute du stockage		Logique Floue
Maintien de la tension du bus DC	V_{dc}	Valeur de consigne	Référence de la puissance du stockage : P_{SISE_ref}	Correcteur PI

Tableau 4 – Tableau de synthèse pour le développement du superviseur

Les éléments du superviseur présenté à la Figure 33 devant être précisés sont : Les paramètres du correcteur PI, la fréquence du filtre passe-bas et le superviseur flou.

Les paramètres du correcteur PI sont déterminés selon les méthodes classiques d'automatique.

La constante de temps, τ , du filtre est déterminée, de façon générale, en fonction de la capacité de stockage [41, 65]. Dans le cas présent, on utilise la relation (10), où J est l'inertie du volant, P_n la puissance nominale pouvant être envoyée vers le stockage, Ω_{max} et Ω_{min} les vitesses maximale et minimale, respectivement, du volant d'inertie.

$$\tau = \frac{J \cdot (\Omega_{max}^2 - \Omega_{min}^2)}{2 \cdot P_n} \quad (10)$$

Les parties suivantes sont consacrées au développement du superviseur flou, en abordant tout d'abord l'identification des différents états de fonctionnement du système, en vue d'établir le graphe fonctionnel.

e. Identification des différents états de fonctionnement : Le graphe fonctionnel

Le superviseur flou possède deux entrées (la vitesse de rotation du volant, image de l'état de charge du stockage, et la composante basse fréquence de la puissance éolienne) et une sortie, qu'est la référence de puissance à envoyer vers le réseau (Figure 34).

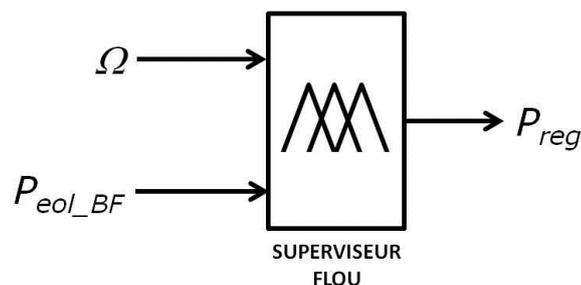


Figure 34 – Entrées et sortie du superviseur flou

Au cours de cette partie, nous devons déterminer la tendance que doit observer la puissance renvoyée au réseau (sortie du système de production), en fonction de l'état de charge du stockage et de la puissance éolienne fournie.

i. Graphe de niveau N_1

Le premier niveau du superviseur, N_1 , a pour but d'envoyer la puissance éolienne vers le réseau. Les états de fonctionnement sont indiqués sur le graphe de la Figure 35.

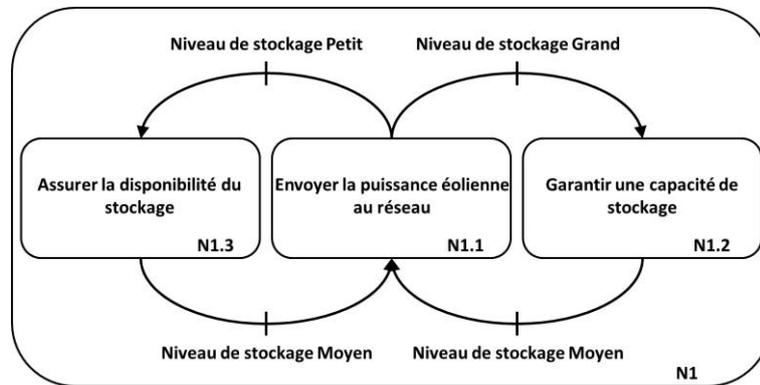


Figure 35 – Graphe fonctionnel de niveau 1

Si le niveau de stockage est PETIT, il faut chercher à le reconstituer, car il a la mission de maintenir la tension V_{dc} .

Si le niveau de stockage est GRAND, il faut chercher à préserver une marge, si l'on souhaite poursuivre le lissage de puissance.

Si le niveau de stockage est MOYEN, aucune action particulière n'est envisagée vis-à-vis de celui-ci.

ii. Graphe de niveau $N1.1$

Le niveau $N1.1$ (Figure 36) correspond à un fonctionnement du système alors que le stockage est chargé à un niveau MOYEN.

Aucune action particulière, en termes de charge ou de décharge, n'est favorisée au niveau du stockage.

La tendance est donc d'envoyer vers le réseau une puissance équivalente à la puissance éolienne fournie par la génératrice.

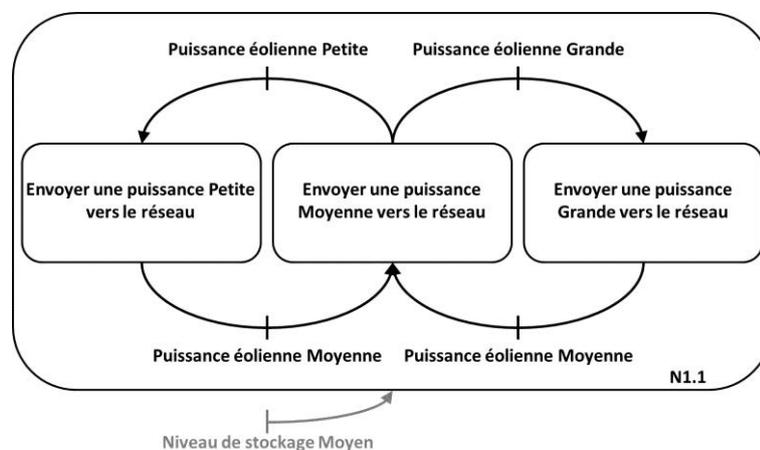


Figure 36 – Graphe fonctionnel de niveau 1.1

iii. Graphe de niveau N1.2

Le niveau N1.2 (Figure 37) correspond à un fonctionnement du système alors que le niveau de stockage est GRAND.

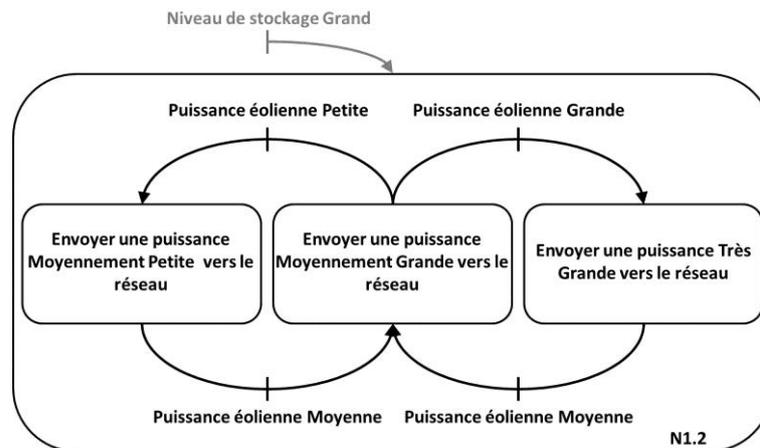


Figure 37 – Graphe fonctionnel de niveau 1.2

La tendance est donc d'envoyer vers le réseau une puissance supérieure à la puissance éolienne, afin de puiser dans le stockage, et donc de contribuer à garantir sa disponibilité.

- Si la puissance éolienne est PETITE, il est demandé au système d'envoyer une puissance un peu plus élevée (MOYENNEMENT PETITE).
- Si la puissance éolienne est GRANDE, il est demandé au système d'envoyer une puissance TRES GRANDE au réseau, afin d'éviter la saturation « haute » du stockage.
- Si la puissance éolienne est MOYENNE, il est demandé au système d'envoyer une puissance un peu plus élevée (MOYENNEMENT GRANDE) au réseau.

i. Graphe de niveau N1.3

Le niveau N1.3 (Figure 38) correspond à un fonctionnement du système alors que le niveau de stockage est PETIT.

La tendance est donc d'envoyer vers le réseau une puissance inférieure à la puissance éolienne, afin de reconstituer en partie le stockage.

- Si la puissance éolienne est PETITE, la puissance envoyée au réseau est TRES PETITE.
- Si la puissance éolienne est GRANDE, la puissance envoyée au réseau est MOYENNEMENT GRANDE.
- Si la puissance éolienne est MOYENNE, la puissance envoyée au réseau est MOYENNEMENT PETITE.

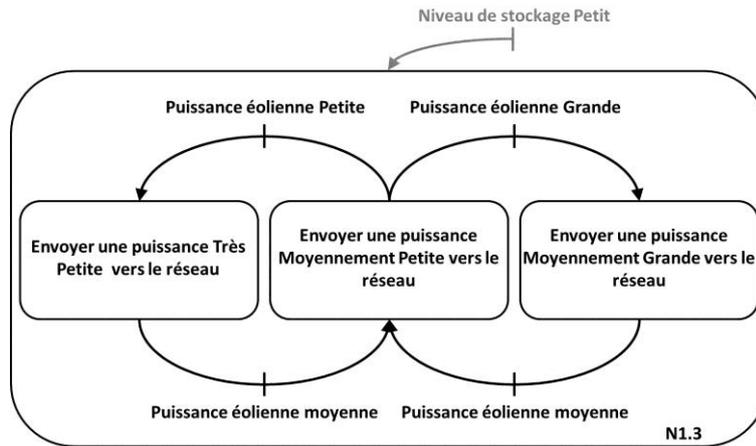


Figure 38 - Graphe fonctionnel de niveau 1.3

Le comportement du système de production en fonction de l'état de charge du stockage et de la puissance éolienne étant déterminé, nous allons maintenant procéder à la détermination des fonctions d'appartenance liées aux variables d'entrée et de sortie du superviseur flou.

f. Les fonctions d'appartenance

Au regard de la Figure 34, les variables à traiter dans cette partie sont les deux variables d'entrée, P_{eol_BF} et Ω , ainsi que la variable de sortie P_{reg} .

Dans la suite, nous noterons P_{eol_f} la composante basse fréquence de la puissance éolienne, seule à nous intéresser dorénavant.

Les grandeurs sont normalisées (11), et apparaissent sur les graphes en *per unit* (pu) :

$$\begin{aligned} \Omega[p. u.] &= \frac{\Omega}{\Omega_{max}} \\ P_{eol_f}[p. u.] &= \frac{P_{eol_f}}{P_{eol_f_{max}}} \end{aligned} \quad (11)$$

Les variables sont définies comme suit :

- Pour les variables d'entrée :
 - $\left\{ \Omega, \left[\frac{8}{30}, 1 \right], \text{"PETIT"}, \text{"MOYEN"}, \text{"GRAND"} \right\}$, (Figure 39).
 - $\left\{ P_{eol_f}, [0,1], \text{"PETIT"}, \text{"MOYEN"}, \text{"GRAND"} \right\}$, (Figure 40).
- Pour la variable de sortie du superviseur flou :
 - $\left\{ P_{reg}, [0,1], \text{"TRES PETIT"}, \text{"PETIT"}, \text{"MOYEN PETIT"}, \text{"MOYEN"}, \text{"MOYEN GRAND"}, \text{"GRAND"}, \text{"TRES GRAND"} \right\}$, (Figure 41)

Par souci de clarté des figures, les labels linguistiques y sont reportés à l'aide de leurs initiales, selon les correspondances du Tableau 5.

Labels linguistiques	TRES PETIT	PETIT	MOYEN PETIT	MOYEN	MOYEN GRAND	GRAND	TRES GRAND
Labels linguistiques simplifiés	TP	P	MP	M	MG	G	TG

Tableau 5 - Labels linguistiques et simplifications

Pour chaque variable d'entrée, le nombre d'ensembles flous est choisi égal à 3. Comme cela est rappelé dans l'annexe 3, il n'y a pas de règle imposée pour choisir ce nombre. On

trouve en général 3, 5 ou 7 ensembles flous. Il s'agit de trouver un compromis entre la finesse de description de la variable (qui conduit à un nombre grand d'ensembles flous) et la contrepartie qu'est l'augmentation de la quantité de règles floues.

La vitesse minimale d'entraînement du volant d'inertie est de 800 tr/min, tandis que la vitesse maximale est de 3000 tr/min; L'univers de discours, en p.u., de la variable Ω est donc compris entre 8/30 et 1 (Figure 39). Les trois fonctions d'appartenance sont choisies, empiriquement, trapézoïdales et symétriques par rapport au centre de l'univers de discours.

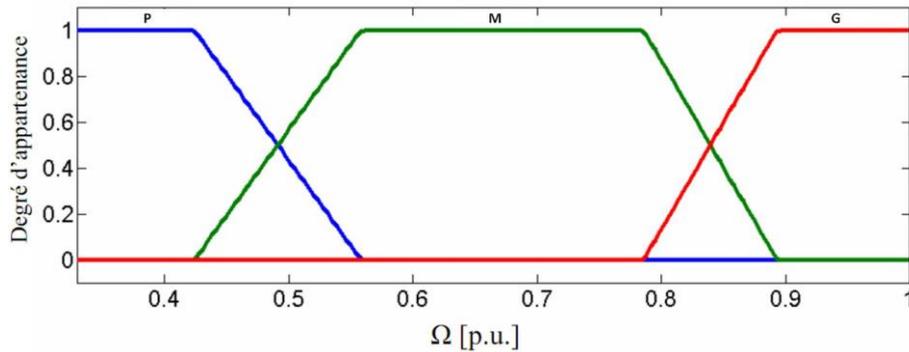


Figure 39 – Vitesse du volant d'inertie Ω - Fonctions d'appartenance des ensembles flous

La puissance éolienne filtrée pouvant varier d'une puissance nulle à une puissance nominale, l'univers de discours de la variable P_{eolf} varie de 0 à 1. Les allures des fonctions d'appartenance sont choisies de façon empirique.

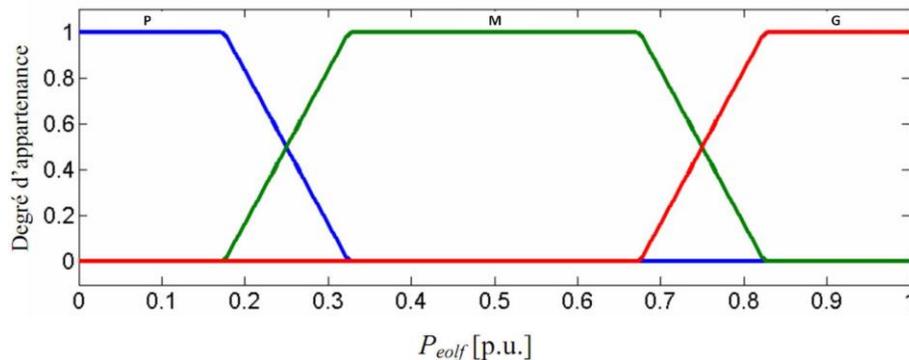


Figure 40 – Puissance éolienne filtrée - Fonctions d'appartenance des ensembles flous

La fuzzyfication des deux variables Ω et P_{eolf} , repose sur l'utilisation de trois fonctions d'appartenance, compromis entre précision et limitation du nombre de règles floues.

La même opération, sur la variable de sortie, P_{reg} , utilise sept fonctions d'appartenance, afin d'adoucir les changements d'état de cette variable. Ce nombre important de fonctions d'appartenance n'augmentera pas le nombre maximum de règles floues. Dans la mesure où les variables d'entrée sont fuzzyfiées à l'aide de trois fonctions chacune, un maximum de neuf (3^2) labels aurait pu être envisagé pour P_{reg} .

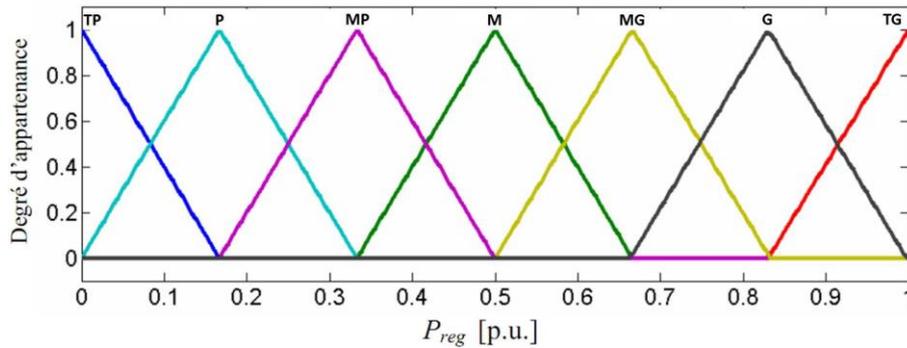


Figure 41 – Puissance envoyée vers le réseau - Fonctions d'appartenances des ensembles flous

Le graphe fonctionnel et les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie du superviseur flou définis, le graphe opérationnel peut être élaboré.

g. Le graphe opérationnel

Le graphe opérationnel principal, ainsi que les sous-graphes opérationnels, sont présentés de la Figure 42 à la Figure 45.

Leur écriture fait intervenir, pour les états ainsi que pour les transitions, les noms de variables, ainsi que les labels linguistiques simplifiés.

Ainsi, par exemple, « Puissance éolienne Petite » devient « P_{eolf} est P », « Envoyer une puissance Moyennement Grande vers le réseau » devient « P_{reg} est MG », ...etc.

Au niveau du fonctionnement de l'algorithme, contrairement à ce que l'on observe dans un outil tel que le Grafcet, le passage d'une action à une autre va s'effectuer progressivement.

i. Graphe de niveau N1

Sur le graphe présenté à la Figure 42, nous retrouvons les trois niveaux N1.2 à N1.3, « activés », avec des transitoires progressifs, en fonction de l'état de charge du stockage.

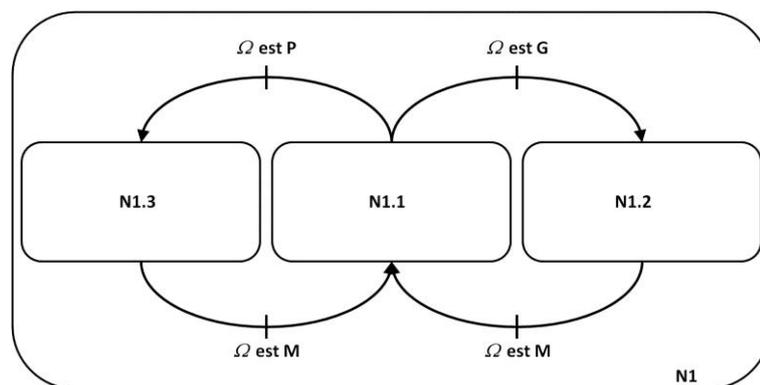


Figure 42 - Graphe opérationnel de niveau 1

ii. Graphe de niveau N1.1

Ce niveau (Figure 43) est activé lorsque l'état de charge du stockage est MOYEN (« Ω est M »). On y retrouve la correspondance entre les fonctionnements envisagés dans les graphes d'état (Figure 36) et les valeurs linguistiques attribuées aux variables :

- « Envoyer une puissance MOYENNE vers le réseau » vs « P_{reg} est M »,
- « Envoyer une puissance GRANDE vers le réseau » vs « P_{reg} est G »,

- « Envoyer une puissance PETITE vers le réseau » vs « P_{reg} est P »,

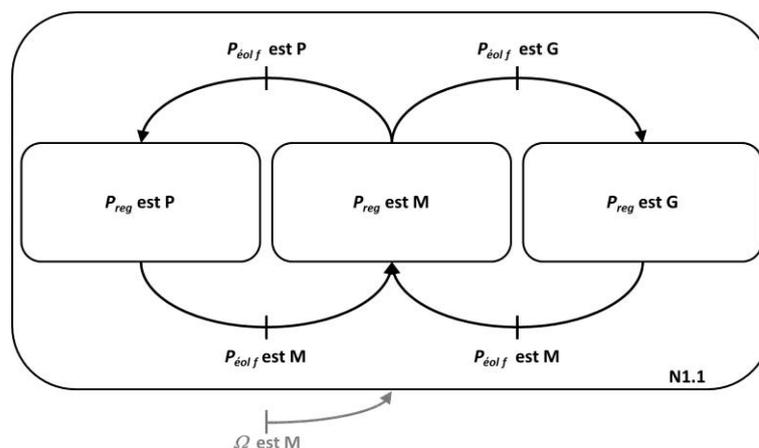


Figure 43 - Graphe opérationnel de niveau 1.1

iii. Graphe de niveau N1.2

Ce niveau (Figure 44) est activé lorsque l'état de charge du stockage est GRAND (« Ω est G »). On y retrouve la correspondance entre les fonctionnements envisagés dans les graphes d'état (Figure 37) et les valeurs linguistiques attribuées aux variables :

- « Envoyer une puissance MOYENNEMENT GRANDE vers le réseau » vs « P_{reg} est MG »,
- « Envoyer une puissance TRES GRANDE vers le réseau » vs « P_{reg} est TG »,
- « Envoyer une puissance MOYENNEMENT PETITE vers le réseau » vs « P_{reg} est MP »,

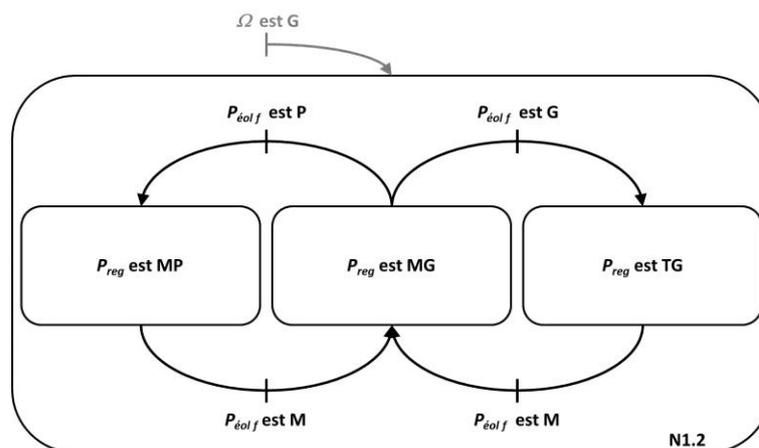


Figure 44 - Graphe opérationnel de niveau 1.2

iv. Graphe de niveau N1.3

Ce niveau (Figure 45) est activé lorsque l'état de charge du stockage est PETIT (« Ω est P »). On y retrouve la correspondance entre les fonctionnements envisagés dans les graphes d'état (Figure 38) et les valeurs linguistiques attribuées aux variables :

- « Envoyer une puissance MOYENNEMENT PETITE vers le réseau » vs « P_{reg} est MP »,

- « Envoyer une puissance MOYENNEMENT GRANDE vers le réseau » vs « P_{reg} est MG »,
- « Envoyer une puissance TRES PETITE vers le réseau » vs « P_{reg} est TP »,

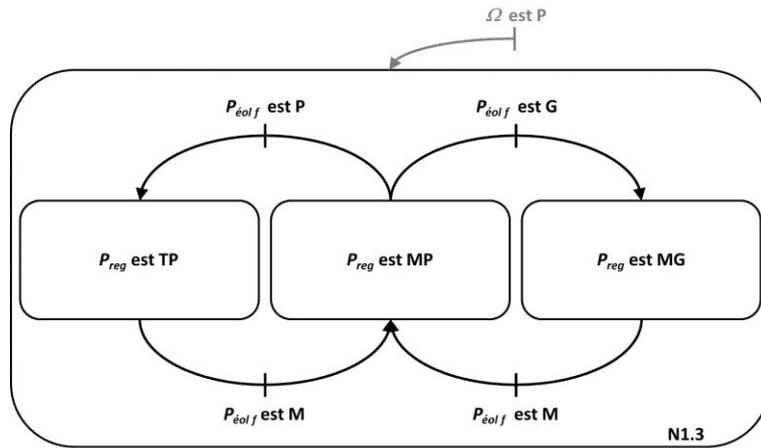


Figure 45 - Graphe opérationnel de niveau 1.3

h. Les règles floues

Les règles floues du superviseur découlent de ces graphes opérationnels.

Deux entrées, Ω et $P_{éolf}$, sont soumises à *fuzzyfication*, chacune à l'aide de trois variables linguistiques. Le nombre de règles sera donc de 3^2 , soit 9 règles floues.

Le Tableau 6 répertorie ces règles, classées selon les sous-niveaux présentés plus haut.

N1	N1.1	SI	Ω est M	ET SI	$P_{éolf}$ est M	ALORS	P_{reg} est M
		SI	Ω est M	ET SI	$P_{éolf}$ est G	ALORS	P_{reg} est G
		SI	Ω est M	ET SI	$P_{éolf}$ est P	ALORS	P_{reg} est P
	N1.2	SI	Ω est G	ET SI	$P_{éolf}$ est M	ALORS	P_{reg} est GM
		SI	Ω est G	ET SI	$P_{éolf}$ est G	ALORS	P_{reg} est TG
		SI	Ω est G	ET SI	$P_{éolf}$ est P	ALORS	P_{reg} est PM
	N1.3	SI	Ω est P	ET SI	$P_{éolf}$ est M	ALORS	P_{reg} est PM
		SI	Ω est P	ET SI	$P_{éolf}$ est G	ALORS	P_{reg} est GM
		SI	Ω est P	ET SI	$P_{éolf}$ est P	ALORS	P_{reg} est TP

Tableau 6 – Les 9 règles floues du superviseur

Nous pouvons noter qu'aucune réduction de la base de règles n'est envisageable. Ceci s'explique par la relative simplicité du cas étudié, puisque le superviseur flou ne compte que deux entrées. Notons toutefois que cette apparente simplicité est liée à la simplification réalisée en amont, au moment de l'élaboration du superviseur. En effet, la logique floue n'a volontairement pas été systématiquement utilisée, et des outils de type filtre passe-bas, correcteur PI, ont été employés, limitant ainsi le nombre d'entrées du superviseur flou.

i. Validation expérimentale

i. L'implantation du superviseur

Le superviseur développé ci-dessus a fait l'objet d'une implantation sous *Matlab*[®]-*Simulink*[®], associé à la boîte à outils *Fuzzy Logic*, afin d'être validé [69].

La Figure 46 représente la surface non linéaire issue du superviseur flou. Elle montre l'évolution de la puissance P_{reg} devant être injectée au réseau électrique, en fonction de la vitesse de rotation du volant d'inertie, Ω , et de la puissance provenant de la génératrice éolienne filtrée, P_{eolf} . Nous y retrouvons une évolution de P_{reg} conforme aux règles présentées dans le Tableau 6.

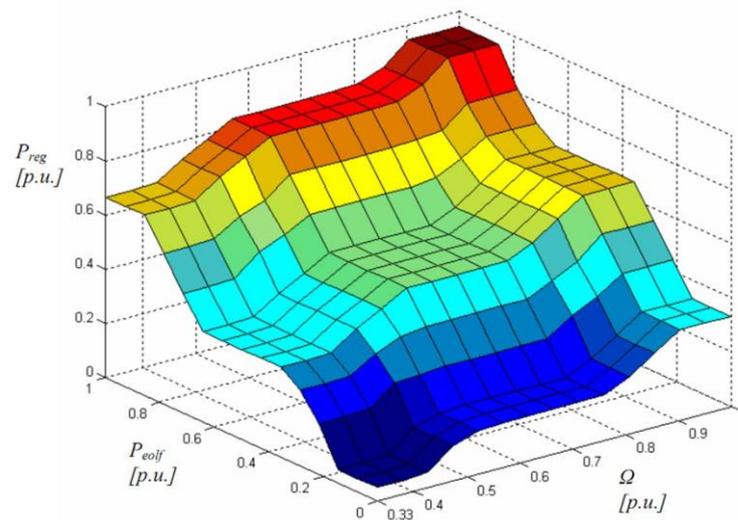


Figure 46 – Evolution de la puissance devant être injectée au réseau (P_{reg}) en fonction de la vitesse du volant d'inertie (Ω) et de la puissance éolienne filtrée (P_{eolf})

Avec le matériel à notre disposition, l'implantation en temps réel de cette solution n'est pas envisageable directement, car le temps de calcul, ajouté au temps d'acquisition des mesures et à celui nécessaire à la restitution des ordres, avoisine la milliseconde dans le cas d'un contrôle vectoriel de la machine asynchrone qui entraîne le volant d'inertie. Il est impossible, dans ces conditions, d'assurer un contrôle correct du système.

La solution retenue, dans le cas présent, est une simplification par linéarisation de la surface floue initiale (Figure 46) à l'aide d'un plan moyen, déterminé de façon empirique, en cherchant à conserver les coordonnées respectives de trois sommets, communs aux deux surfaces. L'équation, en $p.u.$, du plan retenu est donnée par (12) et la surface correspondante est représentée à la Figure 47.

$$P_{reg} = 0.63 \cdot P_{eolf} + 0.52 \cdot \Omega - 0.17 \quad (12)$$

L'implantation pratique du superviseur simplifié permet de faire chuter les périodes d'échantillonnage (T_e) de 1ms à 250 μ s, dans le cas du contrôle vectoriel de la machine asynchrone.

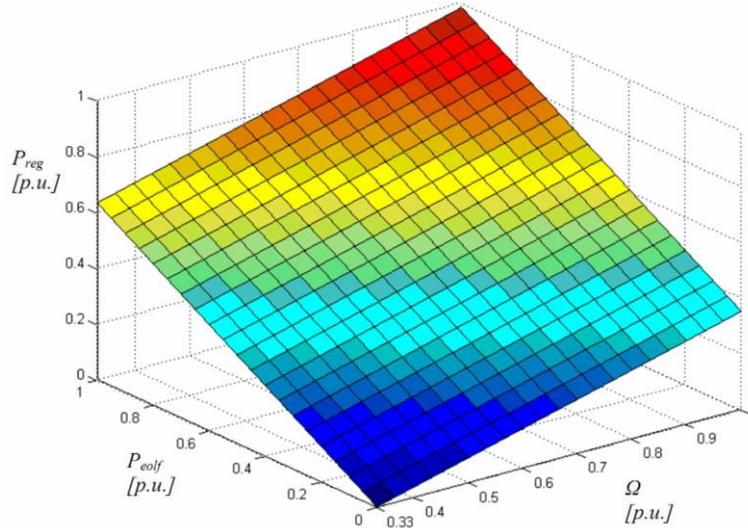


Figure 47 – Simplification du superviseur afin de permettre l'implantation temps réel

ii. La configuration expérimentale

La plateforme *Energies Electriques*, dans sa configuration « Eolienne à vitesse variable associée à un dispositif de stockage inertiel » (Figure 48), se structure selon le schéma de la Figure 49. Un descriptif complet des différentes parties est disponible en Annexe 4, et dans [69, 92].

Il s'agit d'une plateforme dont la puissance globale est d'environ 3kW. Dans cette configuration, le stockage est réalisé à l'aide d'une machine asynchrone à cage, couplée à un volant d'inertie en acier, d'inertie $J=0,2 \text{ kg.m}^2$, entraîné à une vitesse maximale de 3000 T.mn^{-1} . Le bus continu auquel sont interconnectés les convertisseurs à MLI, est réalisé à l'aide de condensateurs dont la capacité équivalente est de $2200\mu\text{F}$, la tension du bus DC étant de 400V.

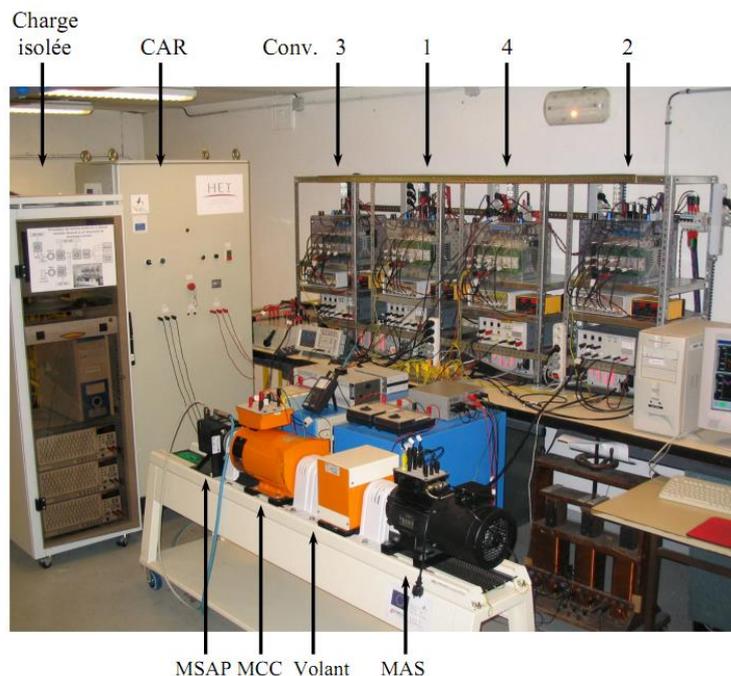


Figure 48 – Photo de la plateforme expérimentale

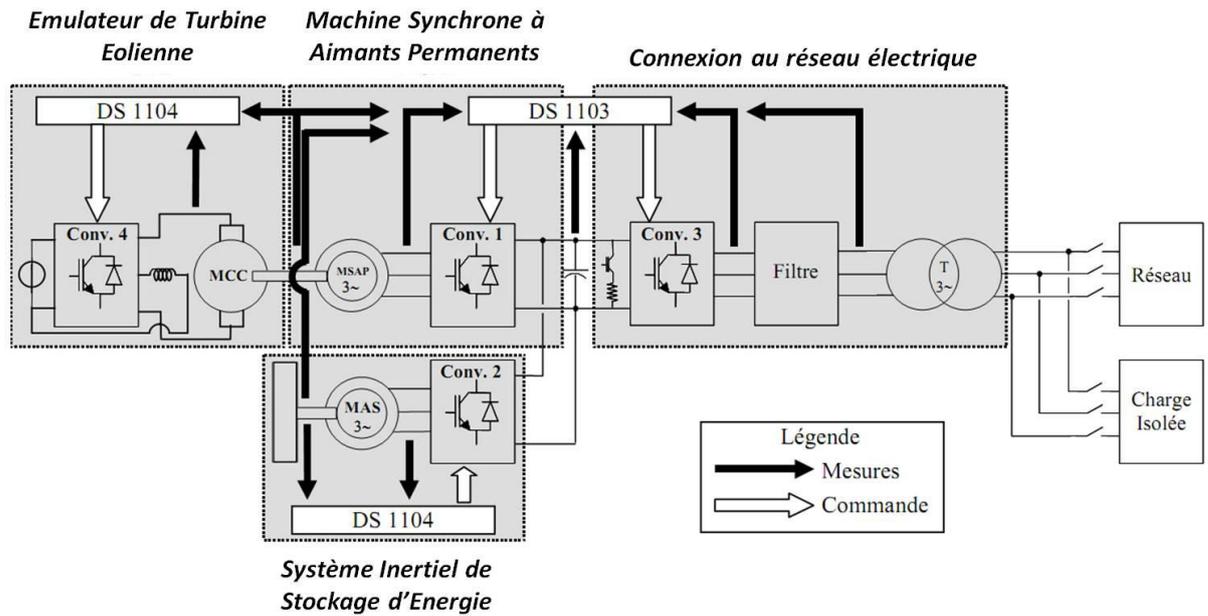


Figure 49 – Schéma synoptique de la plateforme expérimentale

iii. Résultats et analyses

1) Superviseur à puissance lissée

Pour ces essais, nous disposons de mesures de vents enregistrées sur le site de Dunkerque. A partir de celles-ci, nous créons un fichier de points permettant d'obtenir la courbe présentée à la Figure 50.

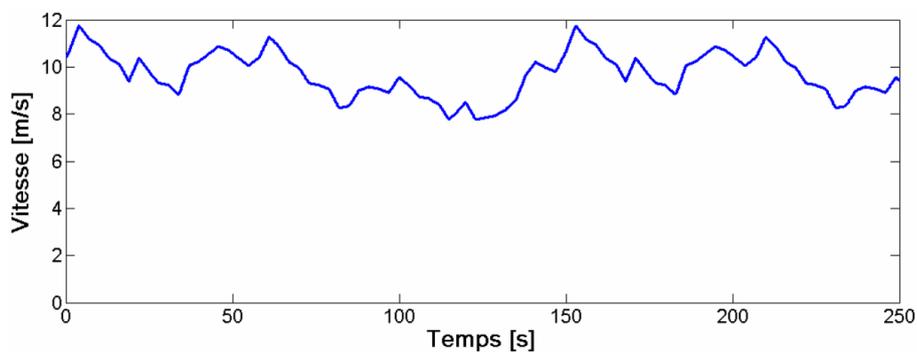


Figure 50 – Vitesse du vent

La vitesse d'entraînement de la génératrice éolienne est présentée à la Figure 51.

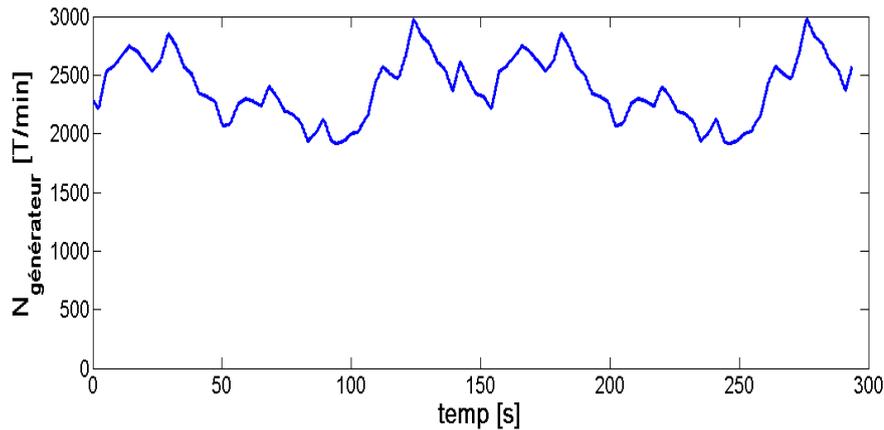


Figure 51 - Vitesse de la génératrice éolienne

En l'absence de système de stockage, la génératrice éolienne seule injecte au réseau la puissance active très fluctuante que l'on peut observer à la Figure 52.

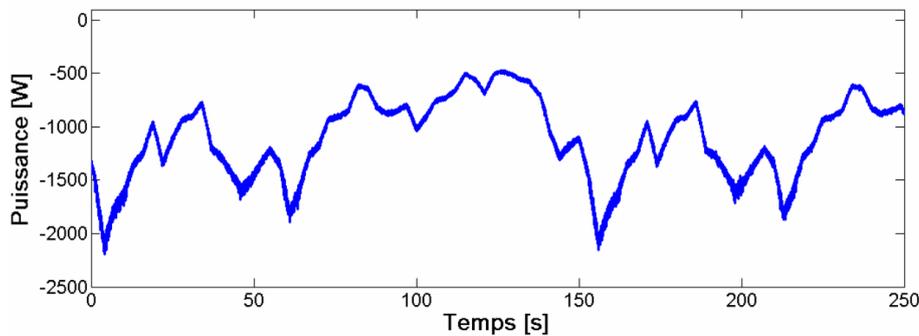


Figure 52 – Puissance active fournie au réseau an l'absence de stockage

Lorsque le SISE est mis en service, le superviseur délivre une référence de puissance, P_{reg} , envoyée au convertisseur statique assurant la connexion avec le réseau, permettant à celui-ci l'injection de la puissance correspondante au réseau électrique (Figure 53).

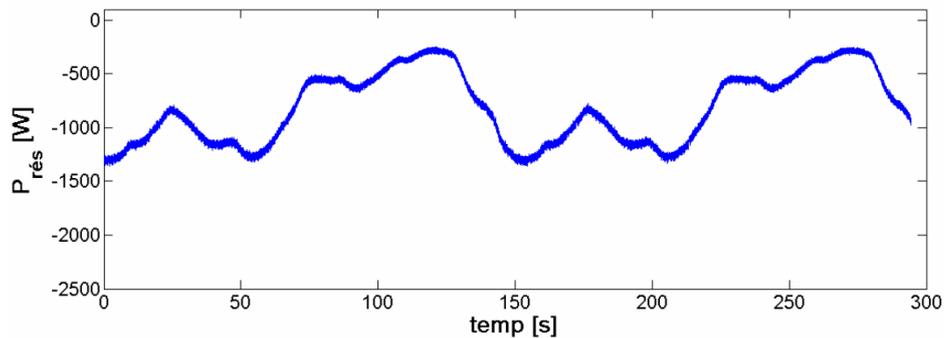


Figure 53 – Puissance active lissée fournie au réseau électrique

Le SISE est pendant ce temps sollicité afin d'absorber ou compenser les écarts de puissance entre génératrice éolienne et puissance injectée au réseau, tout en maintenant la tension du bus continu à sa consigne. La puissance active absorbée par la machine asynchrone et la vitesse de rotation du volant d'inertie sont présentées respectivement aux Figure 54 et Figure 55.

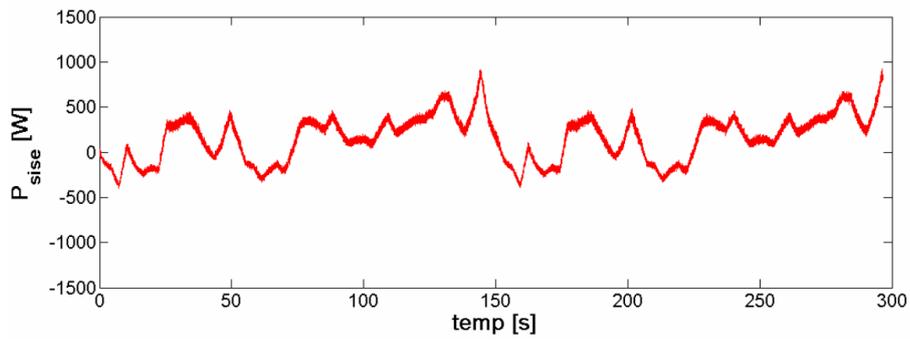


Figure 54 – Puissance active absorbée par la MAS

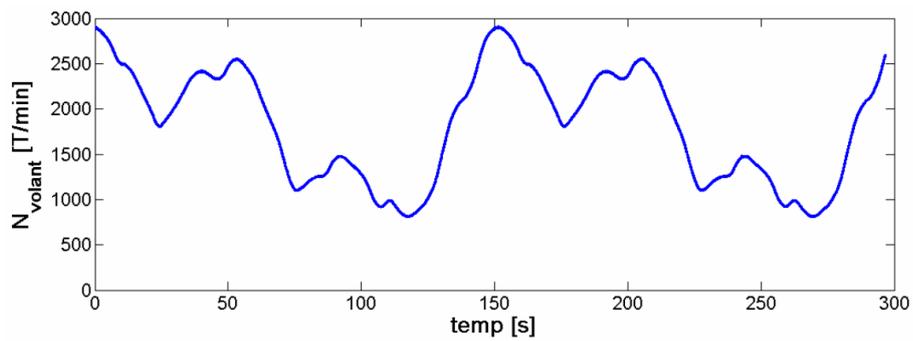


Figure 55 – Vitesse du volant d'inertie

La vitesse du volant d'inertie est maintenue entre ses limites haute (3000T.mn^{-1}) et basse (800T.mn^{-1}). Les conditions sont réunies pour assurer correctement le contrôle de la tension V_{dc} (Figure 56).

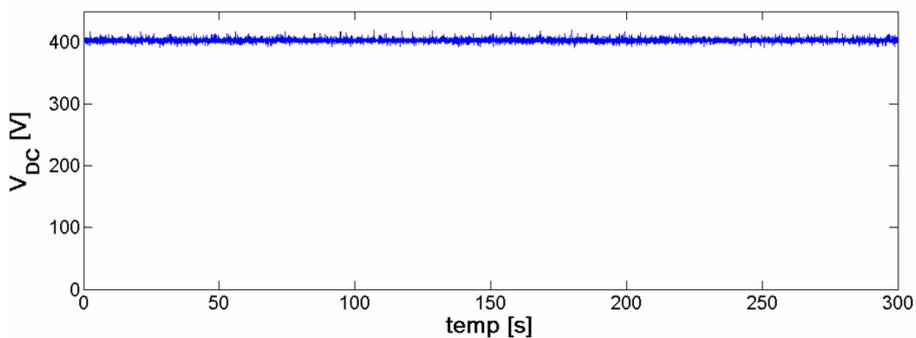


Figure 56 – Tension aux bornes du bus continu

2) Superviseur à puissance constante

Un superviseur permettant de renvoyer une puissance constante, par paliers, a également été développé. La surface correspondante est représentée à la Figure 57.

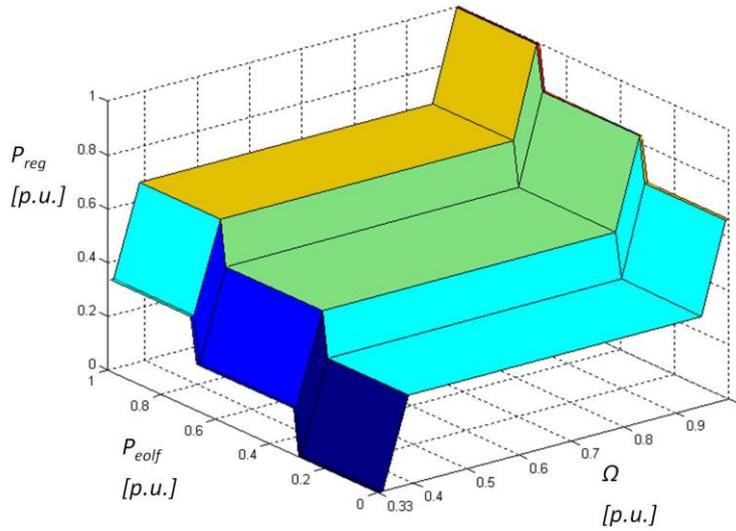


Figure 57 – Superviseur flou, à puissance constante

Pour une vitesse de vent identique à celle du cas précédent (Figure 50), la puissance envoyée vers le réseau à l'allure donnée à la Figure 58.

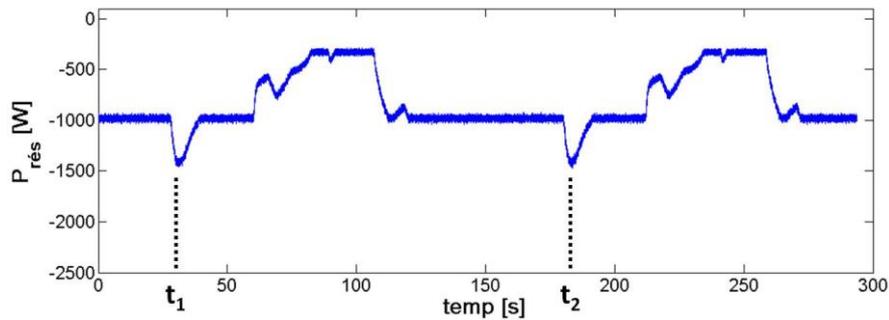


Figure 58 - Puissance envoyée au réseau dans le cas d'un superviseur à puissance constante

La vitesse du volant d'inertie est représentée à la Figure 59. Il apparaît clairement que les phases de fonctionnement limites, haute et basse, du stockage d'énergie, sont ici très fréquemment atteintes. Toutefois, le superviseur ayant pour objectif d'assurer la disponibilité du stockage, il va empêcher à la vitesse de rotation Ω d'atteindre strictement les zones de saturation, haute et basse, en libérant plus de puissance vers le réseau lorsque l'énergie stockée est trop grande (vitesse de rotation du volant Ω trop grande – Cf. Figure 58, instants t_1 et t_2).

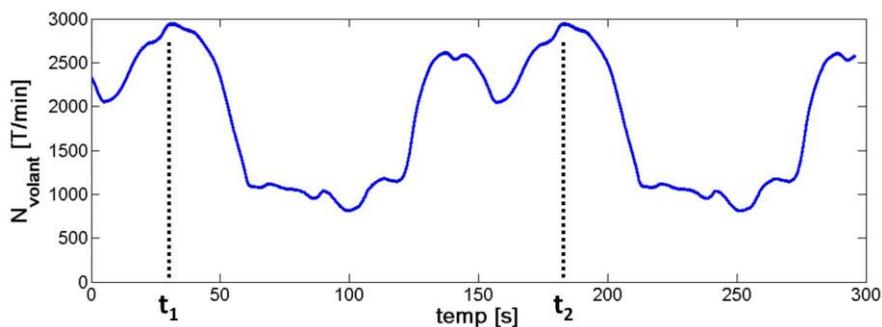


Figure 59 - Vitesse de rotation du volant d'inertie dans le cas d'un superviseur à puissance constante

Cet exemple est l'illustration du lien qui existe entre les objectifs fixés au superviseur et le dimensionnement de la capacité de stockage. Pour le superviseur à puissance

constante, il faudrait une capacité de stockage beaucoup plus importante, car l'objectif fixé en termes de puissance injectée au réseau est très contraignant.

j. Conclusions

Au cours de cette partie, nous avons pu mettre en application les méthodologies de développement de stratégies de supervision et de leur implantation temps réel.

Nous avons vu qu'en fonction des objectifs à atteindre, il n'est pas nécessaire de développer un superviseur entièrement flou. Une association avec d'autres outils tels que l'approche fréquentielle, les correcteurs classiques (type PI, par exemple), est envisageable. En limitant ainsi le nombre de variables d'entrée traitées par le superviseur flou, on aboutit à un nombre limité de règles floues.

Ensuite, nous avons illustré la nécessité de simplifier les résultats issus de la démarche théorique de création du superviseur, afin de permettre une implantation satisfaisante en temps réel. La solution retenue dans cet exemple est la conversion de la surface « floue » en un plan moyen. Dans le cas d'un contrôle vectoriel de la machine asynchrone qui entraîne le volant d'inertie, l'implantation de cette surface simplifiée permet un gain au niveau du temps de calcul dans un rapport de 4.

Enfin, nous avons validé, à l'aide d'essais expérimentaux, le bon fonctionnement du superviseur développé et de son implantation. Il a été montré qu'il est possible d'injecter une puissance active lissée au réseau, alors que la puissance initiale provenant de la génératrice éolienne est fortement variable. Ceci grâce au système de stockage inertiel qui, associé à une supervision adaptée, permet également d'assurer un très bon maintien de la tension du bus continu.

La prochaine partie va nous permettre d'aborder un autre cas d'application illustrant d'autres aspects des méthodologies développées : Celui d'un réseau électrique local de type DC à échanges d'énergie en aéronautique.

2. Réseau embarqué : Réseau local DC à échanges d'énergie en aéronautique

Le développement de réseaux électriques locaux, de type continu à récupération d'énergie, est une conséquence de l'évolution des technologies aéronautiques vers des solutions « plus électriques » [39, 93].

Des sources locales de production d'électricité, des charges bidirectionnelles en puissance, ainsi que des systèmes de stockage d'énergie et de dissipation, sont alors interconnectés via un réseau de distribution DC (architecture étoile, architecture bus, ...), comportant également des filtres et des protections électriques adaptés.

Les systèmes de stockage envisagés doivent assurer au moins trois fonctions au sein de ce réseau local:

- Récupérer l'énergie électrique renvoyée par les charges en phase de restitution (amélioration de l'efficacité énergétique),
- Assurer la fourniture des pointes de puissance consommées par les charges, afin de laisser à la source locale le soin de fournir la puissance moyenne demandée (amélioration du dimensionnement de la source de production et de l'installation),
- Fournir, en cas de défaut sur le réseau local, une alternative de production, pendant une éventuelle phase de reconfiguration du réseau local (accroissement de la disponibilité).

A ces fonctions, doit s'ajouter une contribution à la stabilité du réseau local qui passe par le maintien de la tension du bus continu dans une plage normalisée, en mode de fonctionnement normal [94] ou en défaut [95].

Le développement de stratégies de supervision énergétique adaptées est donc indispensable. Nous montrons dans la présente étude l'élaboration de stratégies différentes, selon les objectifs souhaités.

Cette problématique est abordée au travers des programmes MEDEE7 et RECUPENER :

- Projet MEDEE7-1 :
 - Doctorant : He ZHANG
 - Ingénieur de Recherche : Fabien MOLLET
 - Communications et publications associées : [35, 43, 70, 71, 96-102]
- Projet MEDEE7-2 :
 - Doctorant : Jean-Charles SWIERCZEK
 - Ingénieur de Recherche : Fabien MOLLET
 - Communications et publications associées : [44]
- Projet RECUPENER :
 - Post-Doctorant : Stefan BREBAN
 - Communications et publications associées : [45, 72, 103]

a. Le système énergétique étudié

Le réseau électrique local DC, sujet de l'étude, est présenté à la Figure 60. Il s'agit d'un réseau type que l'on peut trouver, par exemple, au sein des avions plus électriques, dans la nacelle d'un aéronef. Il est constitué d'une source de production électrique locale, génératrice à aimants permanents (MSAP), de deux sources bidirectionnelles en puissance (charges 1 et 2) et d'une charge unidirectionnelle (charge 3). Le contrôle du convertisseur connecté à la génératrice assure le maintien de la tension du bus continu à 270 V dans les phases actives. La connexion des charges au bus continu se fait par l'intermédiaire de harnais (câbles de puissance) et de protections électriques (*SSPC - Solid State Power Controllers*), destinées à protéger ces harnais. La connexion du système de génération local au bus continu se fait *via* un filtre de sortie et un système anti retour composé de diodes.

L'ensemble du système étudié est contenu dans le cadre délimité par le trait discontinu sur la Figure 60. En cas de nécessité, ce réseau local peut également être connecté au réseau alternatif de l'avion, par l'intermédiaire d'un pont redresseur passif, de filtres, et de protections. Cette possibilité n'est pas étudiée ici, et seule la production électrique locale, par l'intermédiaire de la MSAP, est envisagée.

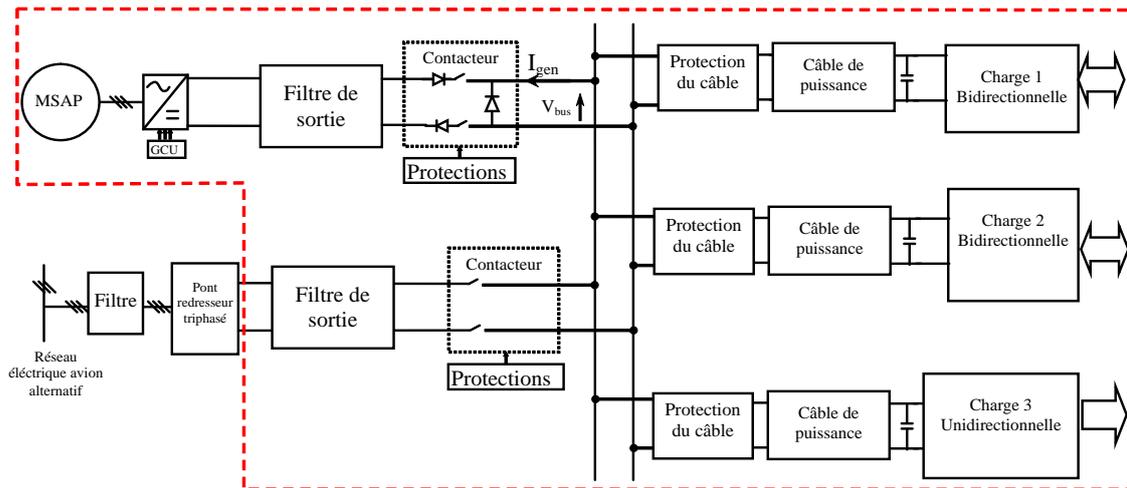


Figure 60 – Réseau électrique DC local

Puisque l'hypothèse de charges bidirectionnelles est retenue, la possibilité d'un bilan de puissance positif au niveau du bus continu doit être envisagée (puissance renvoyée par les charges supérieure à la puissance absorbée par celles-ci).

Une conséquence de cette hypothèse, puisque la puissance électrique ne peut repartir vers la source en raison de la présence des diodes anti retour, est une augmentation de la tension du bus continu. Bien que celle-ci puisse accepter des variations autour de sa valeur initiale de 270 V, comme le montre le gabarit normalisé de la Figure 61, à l'intérieur duquel doit être maintenue cette tension, l'ajout d'un système de stockage associé à un système de dissipation connecté en parallèle sur le bus continu est envisagé (Figure 62). Cette association, stockage et dissipation, est appelée dans la suite « système hybride ».

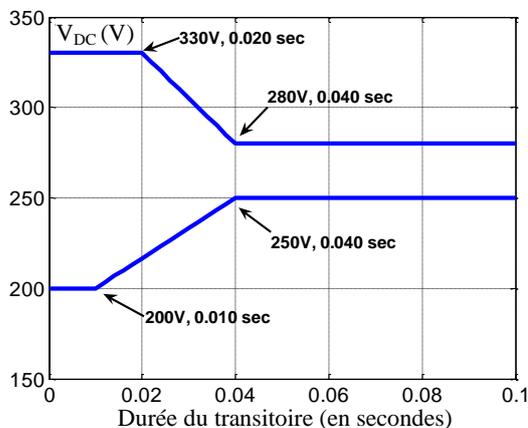


Figure 61 – Standard de tension du bus continu (MIL-STD-704)

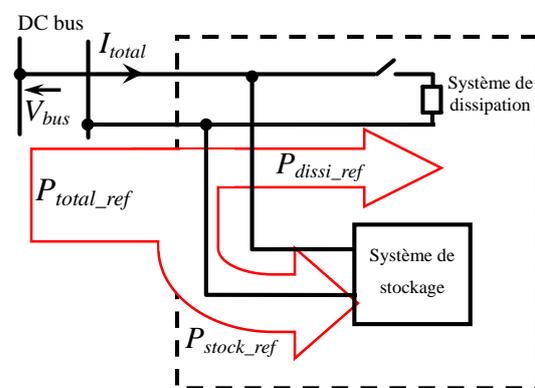


Figure 62 - Système hybride de stockage et de dissipation

b. Le cahier des charges

i. Les objectifs

Les **objectifs** pris en compte pour le développement du superviseur sont :

- **Maintenir** la tension du bus DC ;
- **Maintenir** la fourniture d'énergie par la **source locale** tant que cela est possible ;
- Contribuer au **lissage** des pointes de puissance ;

- **Garantir la disponibilité du stockage.** Dans le présent cas d'application, cela signifie empêcher le stockage d'être soit trop chargé, soit trop déchargé ;
- **Assurer l'efficacité énergétique** au sein du réseau local.

ii. Les contraintes

Les **contraintes** sont ici de natures **technologiques** et **normatives** :

- La **tension du bus continu**, V_{bus} , doit être **maintenue dans un gabarit** imposé par une norme, un standard. Ici, la norme MIL-STD-704 (Figure 61) ;
- Le **stockage**, réalisé à l'aide de supercondensateurs, présente des **limites** en termes de **dynamique** et de **capacité énergétique** ;
- La **source d'alimentation** (MASP) est **unidirectionnelle** en puissance : Aucun retour de puissance n'est autorisé à ce niveau.

iii. Les moyens d'action

Les **moyens d'action** identifiés dans cette étude sont au nombre de trois :

- La **référence** de puissance destinée au **système hybride**, dans sa globalité : P_{total_ref} ;
- Puis, **deux références** de puissance, qui correspondent à la répartition de P_{total_ref} entre les deux dispositifs qui composent le système hybride : P_{stock_ref} pour la **référence** de puissance destinée au **moyen de stockage**, P_{dissi_ref} pour la **référence** de puissance destinée au **système de dissipation**.

c. La structure du superviseur

i. Les grandeurs d'entrée

Les entrées du superviseur sont des mesures qui dépendent des objectifs fixés :

- Le premier est de **maintenir la tension du bus continu**. Une première entrée est donc la **mesure de la tension DC** : V_{bus} .
- Le deuxième est de **maintenir la fourniture d'énergie par la source locale** tant que possible. Une deuxième entrée est donc la **mesure du courant fourni par la source** : I_{gen} .
- Le troisième est de **contribuer au lissage des pointes de puissance**. La **mesure du courant de source** I_{gen} est exploitée à nouveau.
- Le quatrième objectif est d'**assurer la disponibilité du stockage**. Une troisième entrée est donc la **mesure du niveau de stockage** : $Stock_nive$. Cette information est issue de la mesure de la tension aux bornes des supercondensateurs, V_{sc} , selon la relation (13), où C est la capacité des éléments de stockage.

$$Stock_nive = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{sc}^2 \quad (13)$$

ii. Les grandeurs de sortie

Les sorties sont les moyens d'action, soit P_{total_ref} , P_{stock_ref} et P_{dissi_ref} .

La nature des moyens d'action influe sur la structure du superviseur, qui comporte deux niveaux : Niveau 1 et Niveau 2 (Figure 63).

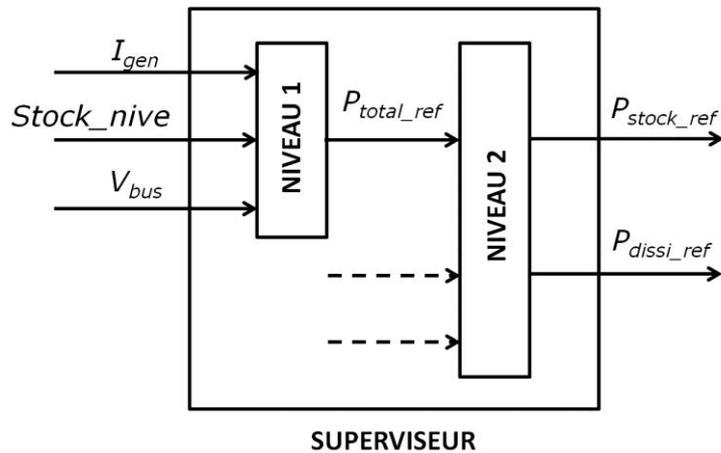


Figure 63 – Superviseur d’un système hybride (stockage + dissipation) dans le cadre d’un réseau local DC à échanges d’énergie

d. Choix des outils de développement

Les travaux de thèse de He ZHANG ont contribué au développement de quatre types de superviseurs [66] :

- le niveau I de supervision pouvant être flou (stratégie MP) ou basé sur un correcteur (stratégie PI),
- le niveau II de supervision pouvant être flou (stratégie VB) ou basé sur un bilan de puissance (stratégie FC).

Le Tableau 7 regroupe, selon chaque stratégie, les objectifs, les contraintes, les moyens d’actions et les outils utilisés pour le développement.

Stratégies	Objectifs	Contraintes	Moyens d’action	Outil
Niveau I				
PI	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien du bus DC 	<ul style="list-style-type: none"> • Gabarit V_{bus} • Limites du stockage • Source principale unidirectionnelle 	P_{total_ref}	Correcteur PI
MP	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien du bus DC • Maintien PMG en service • Gestion des limites du stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Gabarit V_{bus} • Limites du stockage • Source principale unidirectionnelle 	P_{total_ref}	Logique floue
Niveau II				
VB	<ul style="list-style-type: none"> • Maximiser l’utilisation de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Gabarit V_{bus} • Dynamique du stockage 	P_{stock_ref} P_{dissi_ref}	Logique floue
FC	<ul style="list-style-type: none"> • Compenser la dynamique du stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Gabarit V_{bus} • Dynamique du stockage 	P_{stock_ref} P_{dissi_ref}	Bilan de puissance

Tableau 7 - Objectifs, contraintes, moyens d’action et outils relatifs à chaque stratégie

La Figure 64 présente, pour chaque niveau de supervision, les stratégies développées, ainsi que les entrées (mesures) et sorties (moyens d’action) associées.

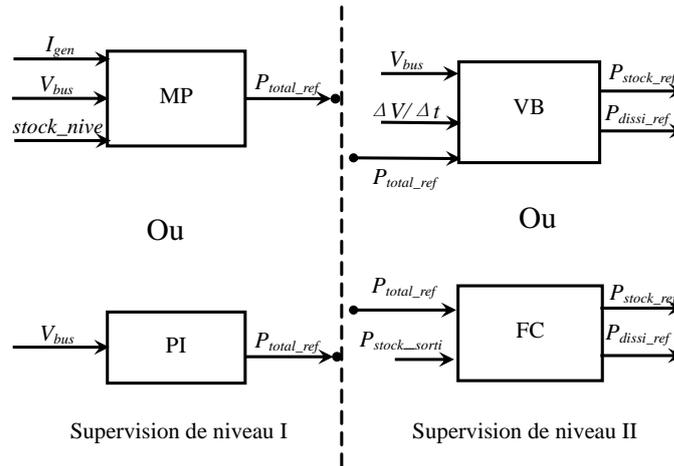


Figure 64 – Entrées et sorties, selon les stratégies et les niveaux de supervision

Le superviseur que nous développons dans les pages à venir, est entièrement réalisé à l'aide de la logique floue (Stratégie MP+VB). Nous procédons à une étude comparative des résultats expérimentaux, en fin de partie, avec le superviseur à stratégie PI+FC, utilisant le correcteur PI pour le niveau I et le bilan de puissance pour le Niveau II.

Pour plus d'éléments sur les développements complets des autres stratégies, le lecteur est invité à se reporter aux références bibliographiques [43, 70, 71, 100].

e. Identification des différents états de fonctionnement : Le graphe fonctionnel

i. Le graphe fonctionnel général

Le graphe fonctionnel général présenté à la Figure 65 est constitué de deux niveaux.

Le niveau 1 (N1) détermine la puissance de référence à destination du système hybride : P_{total_ref} . Positive, cette puissance doit être absorbée par le système hybride, négative, celui-ci doit la restituer au bus DC.

Ce niveau comporte deux niveaux inférieurs, N1.1 et N1.2, qui sont sollicités selon le niveau de puissance produite par la génératrice locale :

- Lorsque celle-ci fournit une puissance, et que le courant qu'elle délivre est donc différent de zéro ($I_{gen} \neq 0$), la tension du bus DC est maintenue par le convertisseur de la génératrice. Alors, le système hybride a comme fonction de lisser la puissance demandée par les charges, tout en garantissant que le niveau de stockage demeure à un niveau moyen ;
- Dans le cas contraire ($I_{gen} = 0$), la tension du bus DC n'est plus maintenue par le convertisseur. Cette fonction incombe alors au système hybride. Cette phase se produit notamment lors des phases de récupération de l'énergie, en présence d'une puissance électrique restituée par les charges.

Le niveau 2 (N2) détermine la répartition de la puissance issue de N1 entre le dispositif de dissipation (P_{dissi_ref}) et le moyen de stockage (P_{stock_ref}). Les objectifs devant être atteints en s'assurant de l'efficacité énergétique du système, le superviseur cherche à privilégier l'usage du stockage en regard de celui de la dissipation.

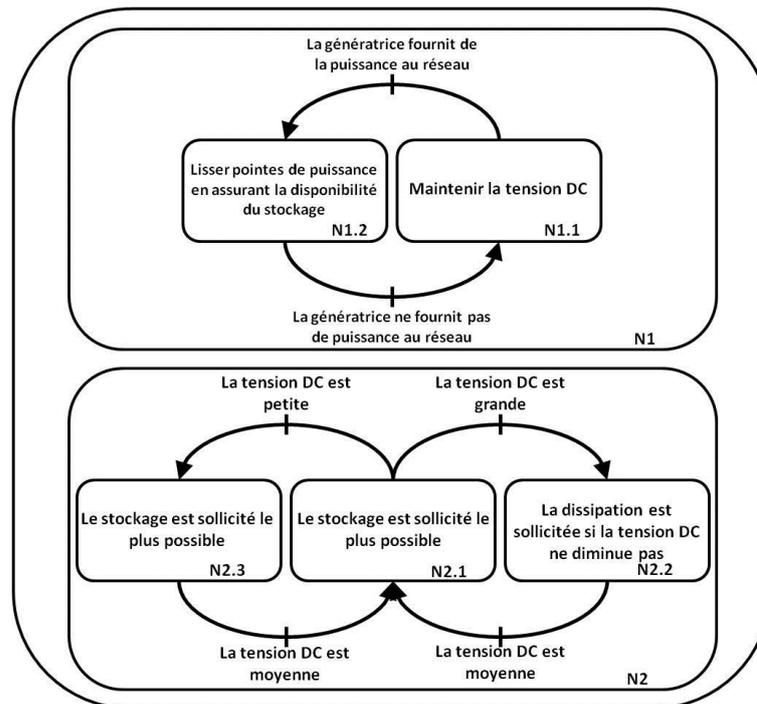


Figure 65 –Graphe fonctionnel général

Cette présentation générale réalisée, nous allons dans un premier temps étudier l'ensemble des niveaux qui constituent le niveau N1, puis nous ferons de même avec le niveau N2.

ii. Les sous-graphes fonctionnels

1) Niveau N1.1 et « descendants »

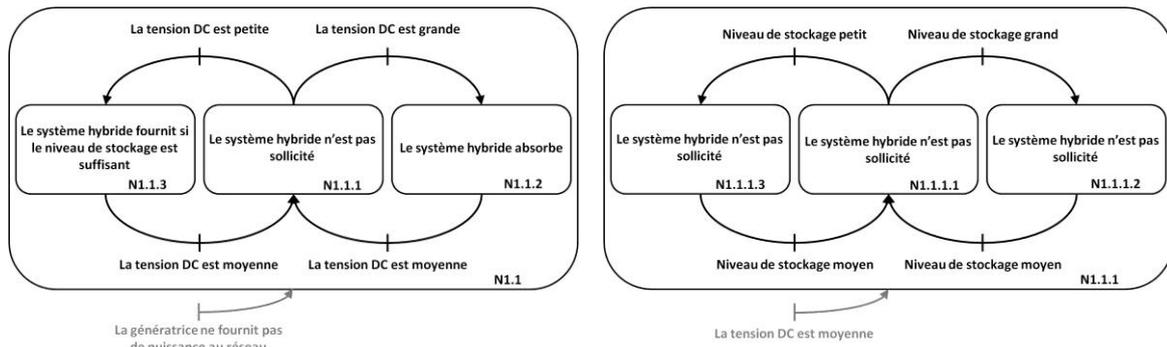
Le niveau N1.1 (Figure 66 (a)) est sollicité lorsque la source locale ne fournit pas de puissance au bus DC, et qu'alors la tension de celui-ci n'est pas maintenue par le convertisseur de la génératrice. Le niveau de la tension V_{bus} conditionne les différentes phases de ce niveau :

- Niveau 1.1.1 : Lorsque la tension V_{bus} est à un niveau moyen (vis-à-vis des contraintes liées à cette tension), le système hybride n'est pas sollicité, car aucune action particulière ne doit être envisagée.
- Niveau 1.1.2 : Lorsque la tension V_{bus} est grande, le système hybride doit absorber la puissance présente en excès au niveau du bus DC.
- Niveau 1.1.3 : Lorsque la tension V_{bus} est petite, le système hybride doit fournir de la puissance au bus DC, tout en veillant à ne pas trop décharger le stockage.

Dans le développement du niveau N1.1.1 (Figure 66 (b)), il est choisi de ne pas solliciter le système hybride, quelque soit le niveau de stockage. Aussi, les trois sous-niveaux possibles s'expriment de la même façon.

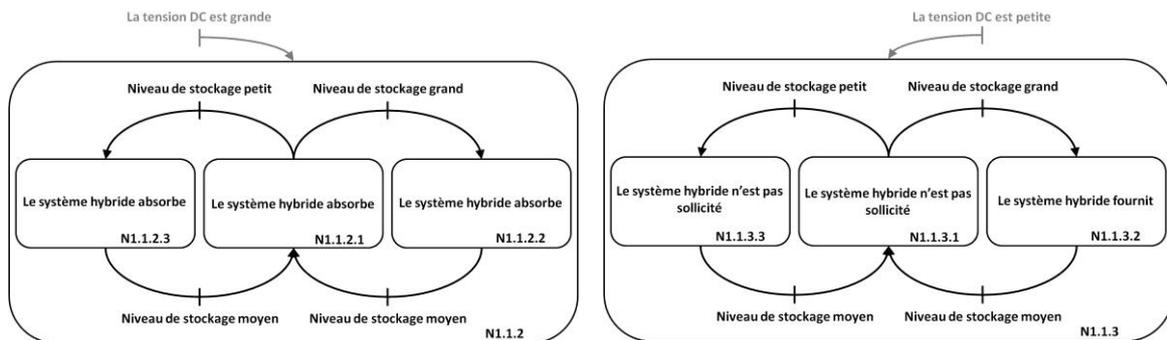
Le niveau N1.1.2 (Figure 66 (c)) est sollicité lorsque la tension du bus DC est grande. Il faut donc que le système hybride absorbe, quelque soit le niveau de stockage. Les trois sous-niveaux s'expriment de façon identique.

Le niveau N1.1.3 (Figure 66 (d)) est sollicité lorsque la tension du bus DC est petite. Il est envisagé que le système hybride délivre de la puissance à destination du bus DC uniquement quand le niveau de stockage est grand. Si le niveau de stockage est moyen ou petit, alors le système hybride n'est pas sollicité.



(a) Graphe fonctionnel de niveau 1.1

(b) Graphe fonctionnel de niveau 1.1.1



(c) Graphe fonctionnel de niveau 1.1.2

(d) Graphe fonctionnel de niveau 1.1.3

Figure 66 – Graphes fonctionnels des niveaux 1.1 et « descendants » (1.1.1, 1.1.2 et 1.1.3)

2) Niveau N1.2 et « descendants »

Le niveau N1.2 (Figure 67 (a)) est sollicité lorsque la génératrice fournit de la puissance au réseau DC. La tension du bus DC est maintenue par la source et son convertisseur. Les transitions ne se font plus grâce à des conditions sur la tension V_{bus} , mais en fonction du niveau de sollicitation de la génératrice :

- Lorsque la génératrice délivre une puissance grande, le système hybride est sollicité pour l'aider (N1.2.2) - (Figure 67 (c)).
- Lorsque la génératrice délivre une puissance petite ou moyenne, le superviseur favorise la gestion du niveau de stockage, afin que celui-ci demeure à un niveau moyen (N1.2.1) et (N1.2.3) - (Figure 67 (b) et (d)).

Le niveau N1.2.1 (Figure 67 (b)) correspond à une fourniture moyenne de la part de la génératrice locale, et favorise le niveau de stockage à un niveau moyen. Le système hybride réagit donc en fonction de l'état du stockage :

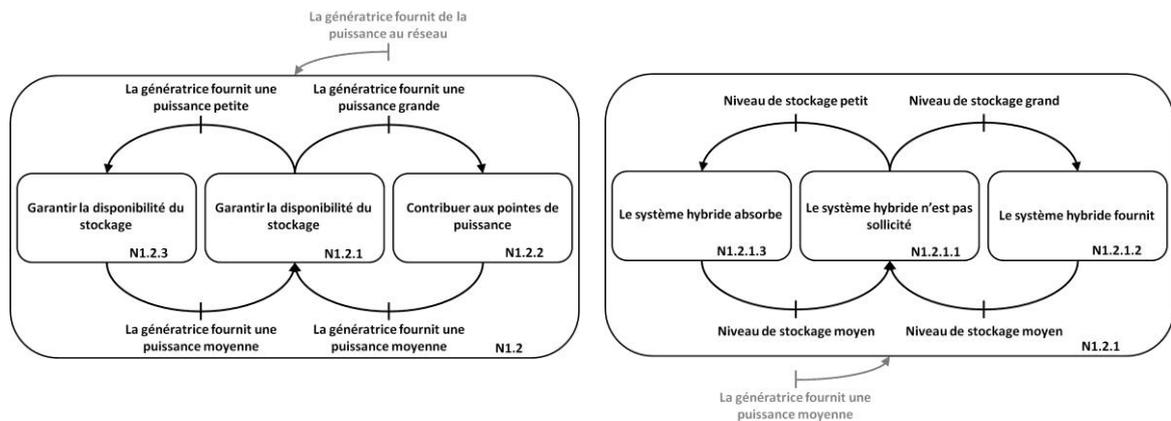
- Un niveau de stockage moyen n'entraîne pas de sollicitation du système hybride (N1.2.1.1).
- Un niveau de stockage grand est à l'origine d'une production de puissance par le système hybride, et donc d'une décharge du stockage (N1.2.1.2).
- Si le niveau de stockage est petit, le superviseur provoque une absorption de puissance par le système hybride, en vue d'une recharge du stockage (N1.2.1.3).

Le niveau N1.2.2 (Figure 67 (c)) correspond à une production de puissance importante par la source locale :

- Le système hybride est sollicité pour venir soutenir la génératrice, que le niveau de stockage soit moyen (N1.2.2.1) ou grand (N1.2.2.2).
- Si le niveau de stockage est petit, aucune contribution de la part du système hybride n'est envisagée (N1.2.2.3).

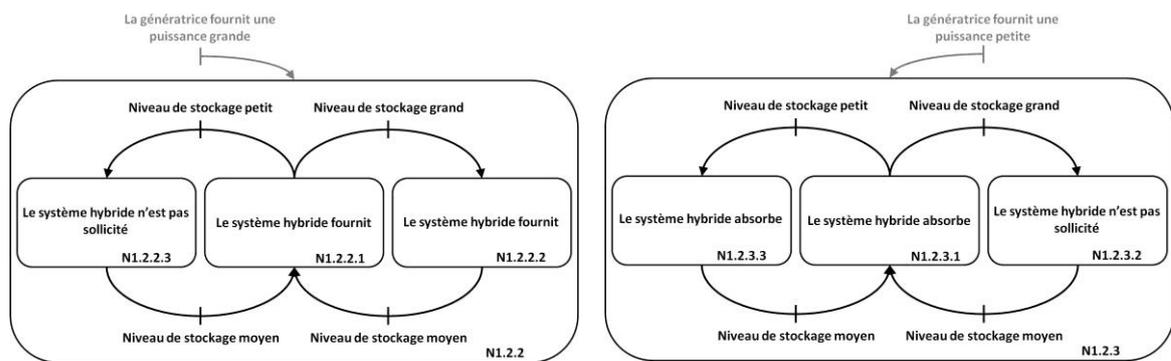
Lorsque le niveau N1.2.3 (Figure 67 (d)) est sollicité, la génératrice délivre une puissance petite. Le principe est ici de mettre à profit cette phase de fonctionnement pour favoriser une recharge, si nécessaire, du stockage :

- Lorsque le stockage est à un niveau petit (N1.2.3.3) ou moyen (N1.2.3.1), le système hybride absorbe de la puissance au bus DC.
- Lorsque le niveau de stockage est jugé grand (N1.2.3.2), aucune charge supplémentaire n'est envisagée, et le système hybride n'est donc pas sollicité.



(a) Graphe fonctionnel de niveau 1.2

(b) Graphe fonctionnel de niveau 1.2.1



(c) Graphe fonctionnel de niveau 1.2.2

(d) Graphe fonctionnel de niveau 1.2.3

Figure 67 – Graphes fonctionnels des niveaux 1.2 et « descendants » (1.2.1, 1.2.2 et 1.2.3)

3) Niveau N2 et « descendants »

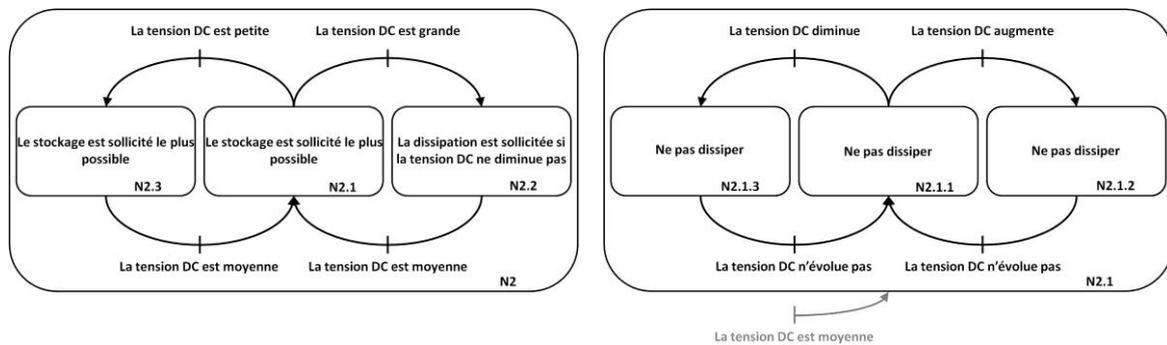
C'est au niveau N2 que se fait la répartition de la puissance de référence issue du niveau N1, vers le système de stockage et la dissipation.

La première répartition en trois sous-niveaux se fait en fonction du niveau de la tension du bus DC (Figure 68 (a)) :

Les niveaux N2.1 et N2.3 correspondent respectivement à des niveaux moyen et petit de la tension V_{bus} .

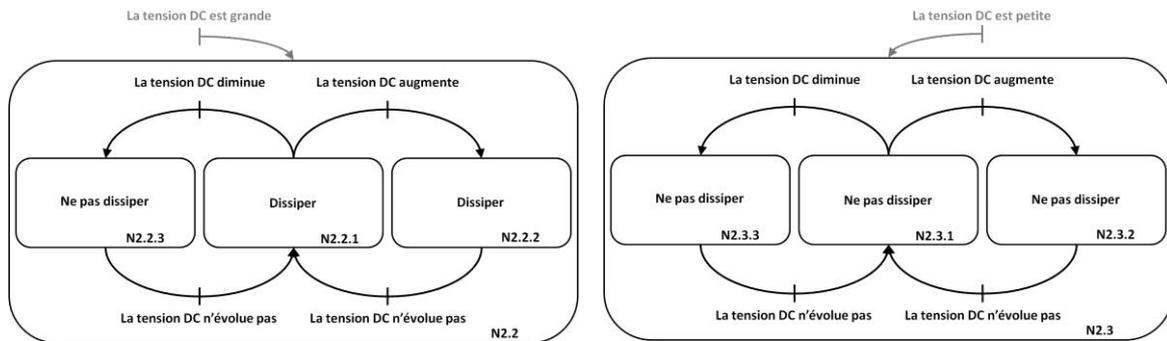
- Dans les phases où le système hybride doit délivrer de la puissance, c'est bien entendu le stockage seul qui est sollicité.
- Dans les phases où le système hybride doit absorber de la puissance, l'absorption par le stockage est favorisée par rapport à la dissipation si elle permet une évolution favorable de V_{bus} . Lorsque la valeur de tension V_{bus} est moyenne, quelque soit son évolution, on cherche à ne pas dissiper, afin de satisfaire à l'objectif d'amélioration de l'efficacité énergétique. Ce principe de fonctionnement est représenté par le niveau N2.1.

Le niveau N2.2 est sollicité lorsque la tension DC est grande. Il est possible que la dissipation soit alors davantage utilisée.



(a) *Graphe fonctionnel de niveau 2*

(b) *Graphe fonctionnel de niveau 2.1*



(c) *Graphe fonctionnel de niveau 2.2*

(d) *Graphe fonctionnel de niveau 2.3*

Figure 68 – Graphes fonctionnels des niveaux 2 et « descendants » (2.1, 2.2 et 2.3)

Le niveau N2.2 est représenté à la Figure 68 (c) :

- Lorsque la valeur de tension V_{bus} est grande, seule une phase décroissante de celle-ci n'entraînera pas la mise en fonctionnement de la dissipation (N2.2.3).
- Si la tension tend à continuer de croître ou à demeurer stationnaire, la dissipation d'énergie sera enclenchée (N2.2.1 et N2.2.2).

Les niveaux N2.1 (Figure 68 (b)) et N2.3 (Figure 68 (d)) correspondent à des phases où la valeur de tension V_{bus} est respectivement moyenne et petite. Quelque soit la tendance de l'évolution de cette tension, il n'est pas fait recours à la dissipation d'énergie (N2.1.1, N2.1.2 et N2.1.3) et (N2.3.1, N2.3.2 et N2.3.3).

f. Les outils

Le cas étudié comporte un nombre important de données d'entrée à traiter, car il nécessite la réalisation de plusieurs objectifs.

La logique floue permet le traitement d'un nombre important de variables, ce qui en fait un outil pertinent pour le développement d'un superviseur multi-objectif.

Pour chaque niveau N1 et N2 du superviseur, la logique floue est donc employée.

Nous comparerons plus loin dans ce mémoire les résultats obtenus avec ce superviseur entièrement flou à ceux obtenus, notamment, avec un superviseur n'utilisant pas la logique floue.

g. Les fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance à déterminer concernent, pour le premier niveau de supervision, N1, les trois variables d'entrée V_{bus} , I_{gen} et S_{stock_nive} , et la variable de sortie P_{total_ref} .

Pour le second niveau de supervision, N2, elles concernent les deux variables d'entrée, V_{bus} et $\Delta V_{bus}/\Delta t$, ainsi que la variable de sortie, k , coefficient de partition intervenant selon la relation (14) :

$$\begin{aligned} P_{dissi_ref} &= k \cdot P_{total_ref} \\ P_{stock_ref} &= (1 - k) \cdot P_{total_ref} \end{aligned} \quad (14)$$

Dans le cas présent, les grandeurs n'ont fait pas l'objet de normalisation.

Les variables sont définies ci-dessous, les initiales reportées sur les fonctions d'appartenance faisant référence aux labels linguistiques simplifiées du Tableau 8.

Labels linguistiques	GRAND NEGATIF	MOYEN NEGATIF	PETIT NEGATIF	ZERO	PETIT	MOYEN	GRAND	GRAND POSITIF
Labels linguistiques simplifiés	GN	MN	PN	Z	P	M	G	GP

Tableau 8 – Labels linguistiques simplifiés

- Pour les variables d'entrée du niveau N1 :
 - $\{I_{gen}, [-70,0], \text{"PETIT NEGATIF"}, \text{"MOYEN NEGATIF"}, \text{"GRAND NEGATIF"}\}$, Figure 69 (a)),
 - $\{V_{bus}, [170,370], \text{"PETIT"}, \text{"MOYEN"}, \text{"GRAND"}\}$, Figure 69 (b)),
 - $\{S_{stock_nive}, [0, 100], \text{"PETIT"}, \text{"MOYEN"}, \text{"GRAND"}\}$, Figure 69 (c)),

Précisons que le niveau de stockage est considéré à 0% ($S_{stock_nive} = 0\%$) lorsque la tension V_{sc} aux bornes des super condensateurs est à la moitié de la tension nominale $V_{sc\ nom}$.

- Pour la variable de sortie du niveau N1 :
 - $\{P_{total_ref}, [-20000,20000], \text{"GRAND NEGATIF"}, \text{"ZERO"}, \text{"GRAND POSITIF"}\}$, Figure 69 (d)).

Les fonctions d'appartenance des variables du niveau N1 (Niveau I de supervision), déterminées de façon empirique, sont regroupées à la Figure 69.

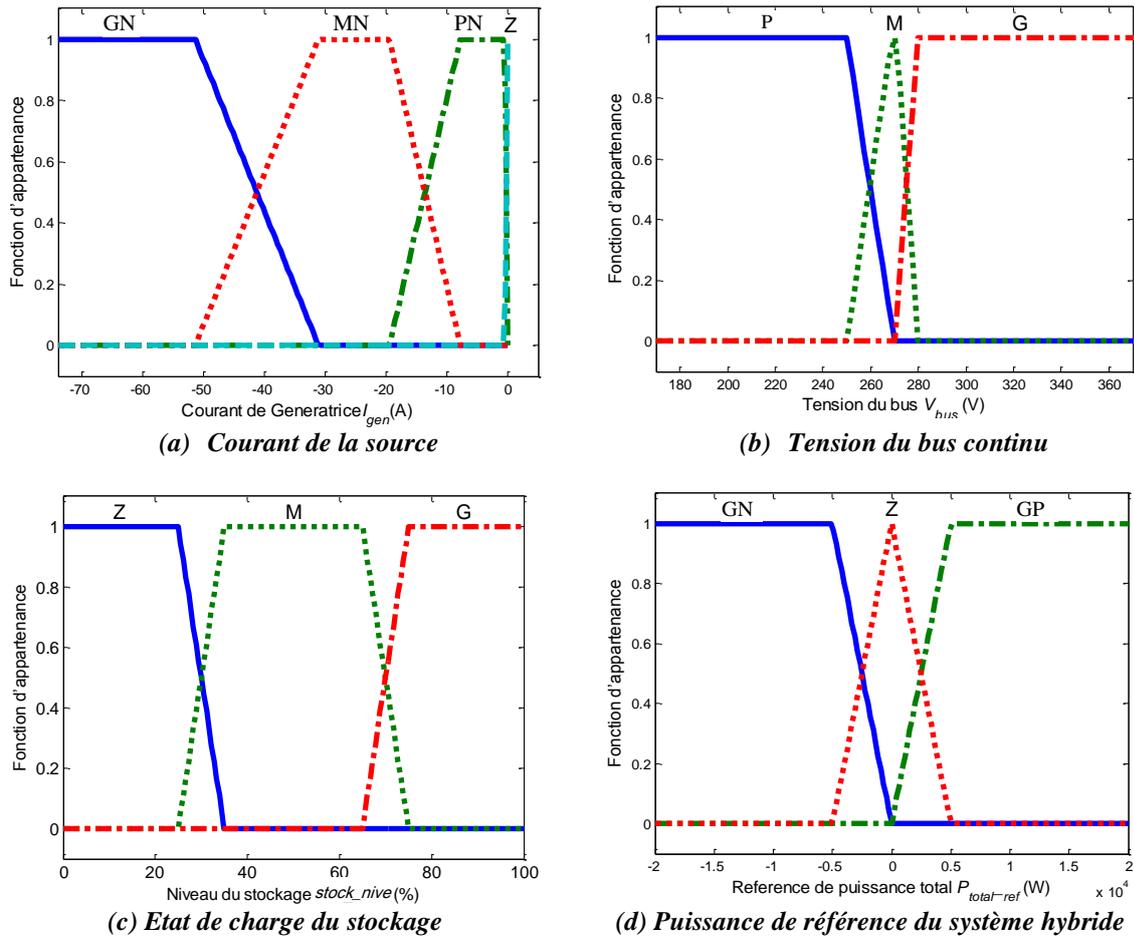


Figure 69 – Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie du niveau I de supervision

- Pour les variables d'entrée du niveau N2 :
 - $\{V_{bus}, [170,370], \text{"PETIT"}, \text{"MOYEN"}, \text{"GRAND"}\}$, Figure 70 (a),
 - $\left\{\frac{\Delta V_{bus}}{\Delta t}, [-10, 10], \text{"GRAND NEGATIF"}, \text{"ZERO"}, \text{"GRAND POSITIF"}\right\}$, Figure 70 (b))
- Pour la variable de sortie du niveau N2 :
 - $\{k, [0, 1], \text{"ZERO"}, \text{"GRAND"}\}$, Figure 70 (c).

Les fonctions d'appartenance des variables du niveau N2 (Niveau II de supervision), déterminées de façon empirique, sont regroupées à la Figure 70.

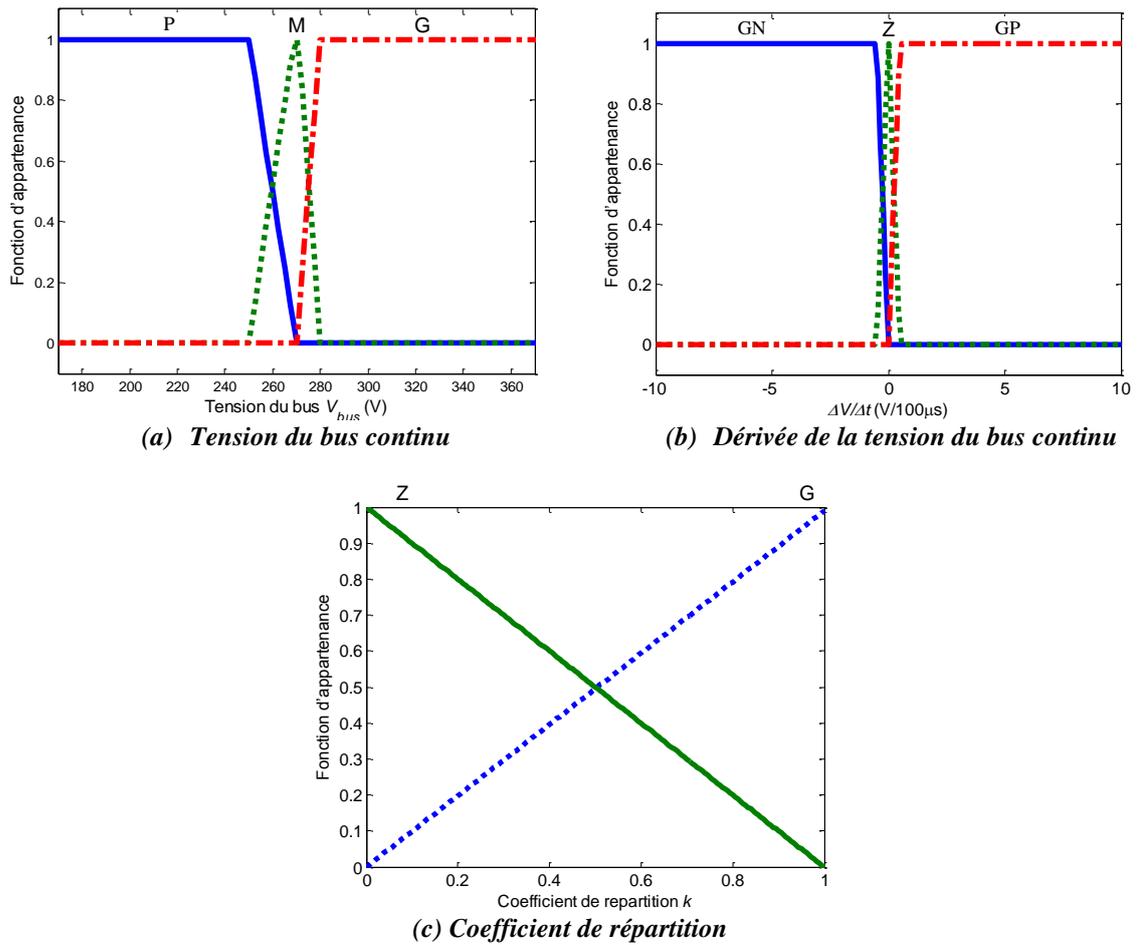


Figure 70 – Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie du niveau II de supervision

h. Le graphe opérationnel

Le graphe opérationnel principal et les sous-graphes opérationnels sont présentés ci-dessous.

Le niveau N1 correspond à la détection du mode : Actif si $I_{gen} \neq 0$, Régénératif si $I_{gen} = 0$ (Figure 71).

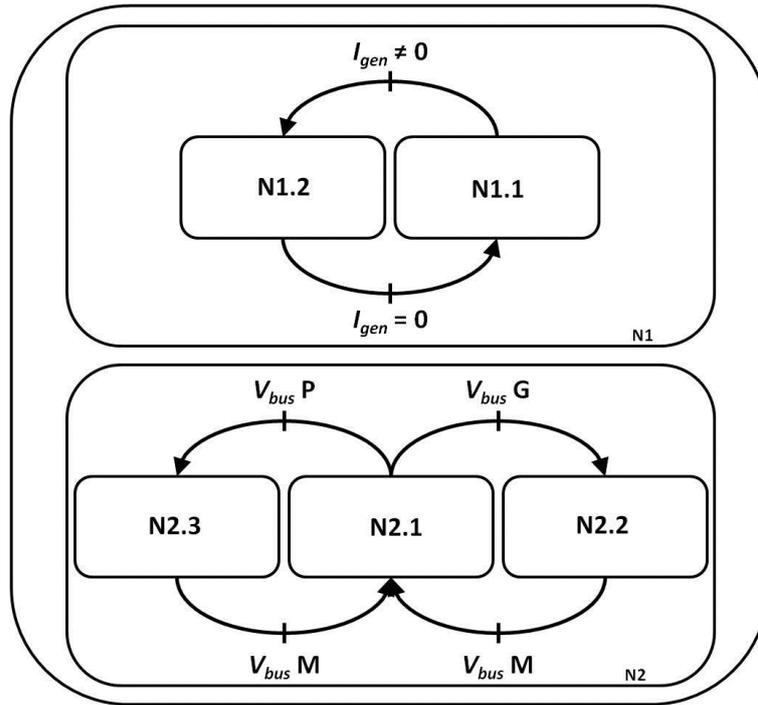
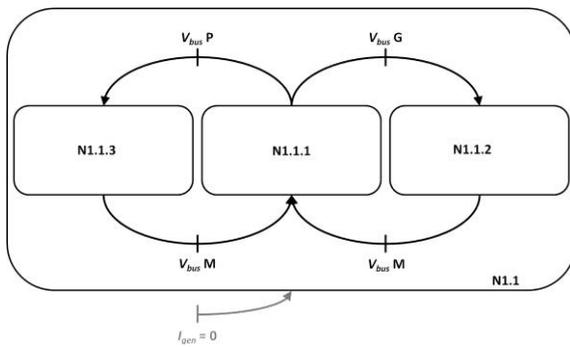
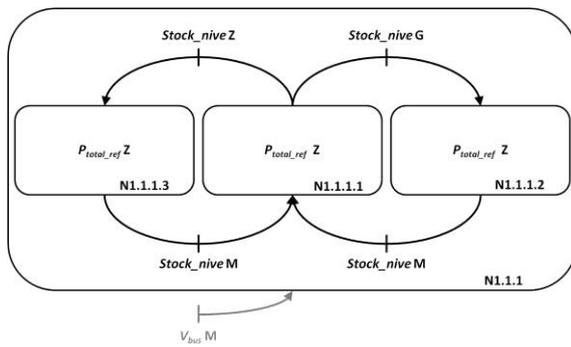


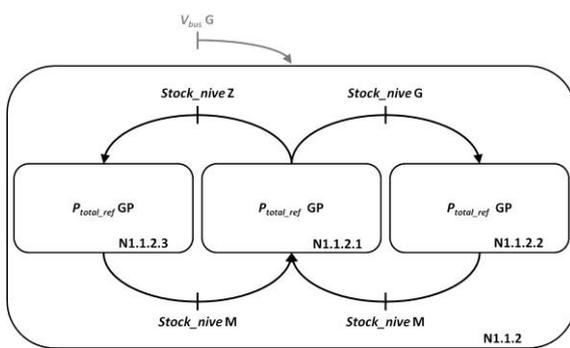
Figure 71 - Graphe opérationnel général



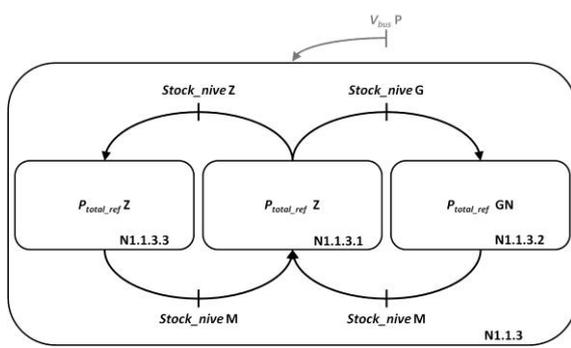
(c) Graphe opérationnel de niveau 1.1



(d) Graphe opérationnel de niveau 1.1.1

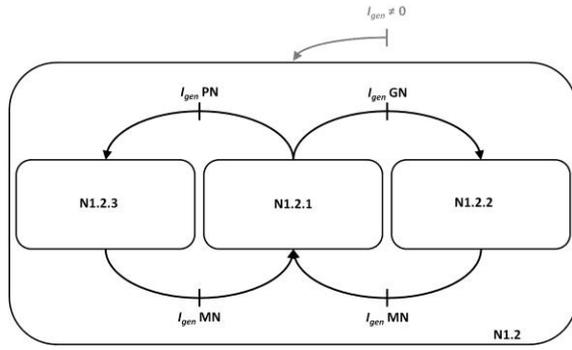


(c) Graphe opérationnel de niveau 1.1.2

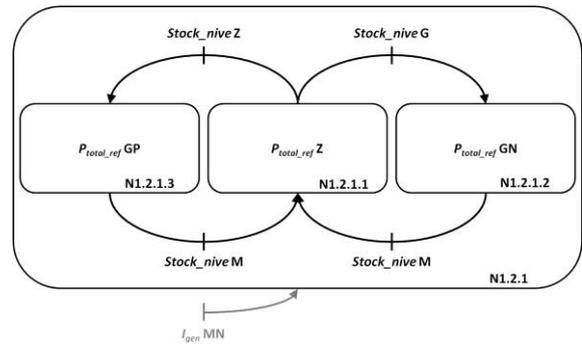


(d) Graphe opérationnel de niveau 1.1.3

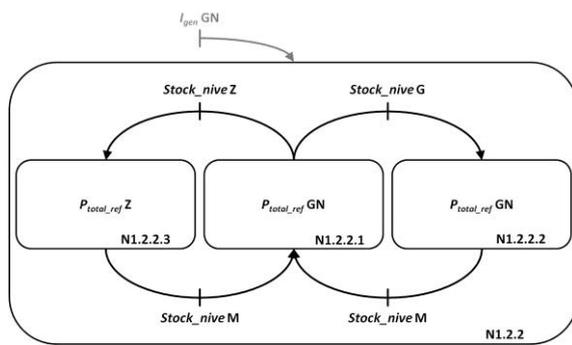
Figure 72 – Graphes opérationnels des niveaux 1.1 et « descendants » (1.1.1, 1.1.2 et 1.1.3)



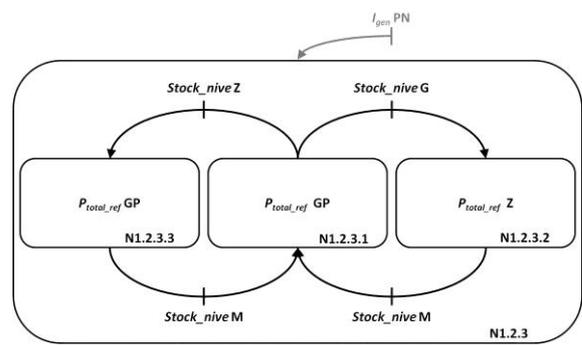
(a) Graphe opérationnel de niveau 1.2



(b) Graphe opérationnel de niveau 1.2.1



(c) Graphe opérationnel de niveau 1.2.2



(d) Graphe opérationnel de niveau 1.2.3

Figure 73 – Graphes opérationnels des niveaux 1.2 et « descendants » (1.2.1, 1.2.2 et 1.2.3)

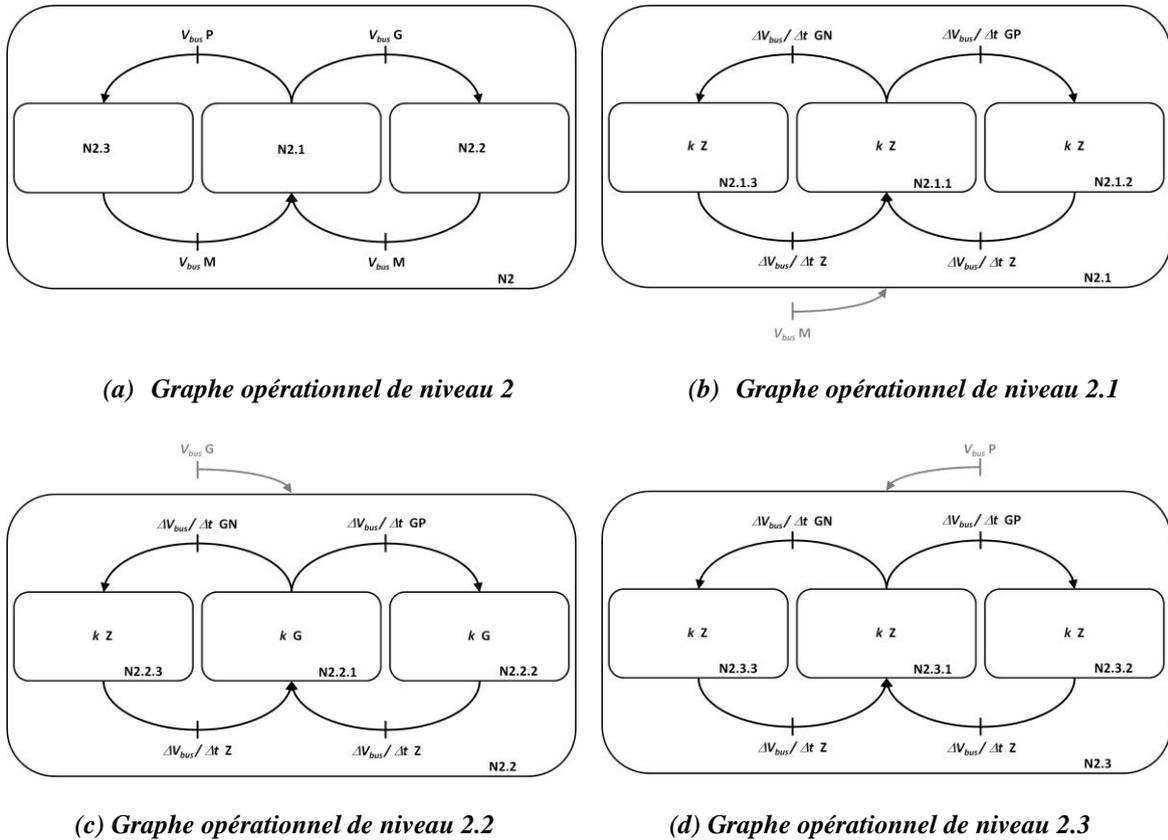


Figure 74 – Graphes opérationnels des niveaux 2 et « descendants » (2.1, 2.2 et 2.3)

Les règles floues du superviseur découlent de ces graphes opérationnels.

Pour le niveau N1.1, deux entrées sont soumises à *fuzzyfication* (V_{bus} et $Stock_{nive}$), chacune à l'aide de trois variables linguistiques. Le nombre de règles est donc de 3^2 , soit 9 règles floues.

Pour le niveau N1.2, deux entrées sont soumises à *fuzzyfication* (I_{gen} et $Stock_{nive}$), chacune à l'aide de trois variables linguistiques. Le nombre de règles est donc de 3^2 , soit 9 règles floues.

Pour le niveau N2, deux entrées sont soumises à *fuzzyfication* (V_{bus} et $\Delta V_{bus} / \Delta t$), chacune à l'aide de trois variables linguistiques. Le nombre de règles est donc de 3^2 , soit 9 règles floues.

Soit, au total, 27 règles floues.

Le Tableau 9 répertorie ces règles, classées selon les sous-niveaux présentés plus haut.

N1	N1.1	N1.1.1	1	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} M$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
			2	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} M$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
			3	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} M$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
		N1.1.2	1	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} G$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total_ref} GP$
			2	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} G$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total_ref} GP$
			3	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} G$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total_ref} GP$
		N1.1.3	1	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} P$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
			2	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} P$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total_ref} GN$
			3	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} P$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
	N1.2	N1.2.1	1	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} MN$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
			2	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} MN$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total_ref} GN$
			3	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} MN$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total_ref} GP$
		N1.2.2	1	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} GN$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total_ref} GN$
			2	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} GN$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total_ref} GN$
			3	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} GN$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total_ref} Z$
N1.2.3		1	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} PN$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total_ref} GP$	
		2	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} PN$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total_ref} Z$	
		3	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} PN$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total_ref} GP$	
N2	N2.1	1	SI	$V_{bus} M$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t Z$	ET SI		ALORS	$k Z$	
		2	SI	$V_{bus} M$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GP$	ET SI		ALORS	$k Z$	
		3	SI	$V_{bus} M$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GN$	ET SI		ALORS	$k Z$	
	N2.2	1	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t Z$	ET SI		ALORS	$k G$	
		2	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GP$	ET SI		ALORS	$k G$	
		3	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GN$	ET SI		ALORS	$k Z$	
	N2.3	1	SI	$V_{bus} P$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t Z$	ET SI		ALORS	$k Z$	
		2	SI	$V_{bus} P$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GP$	ET SI		ALORS	$k Z$	
		3	SI	$V_{bus} P$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GN$	ET SI		ALORS	$k Z$	

Tableau 9 – Les 27 règles floues du superviseur

Nous avons précédemment que la méthodologie développée pour la mise en œuvre de superviseurs à base de règles floues, permet de structurer la démarche de réduction du nombre de règles floues.

Une des pistes à investiguer pour réduire le nombre de règles floues, est de déterminer celles qui aboutissent à la même opération, quelque soit les conditions.

Dans le Tableau 9, nous pouvons relever des règles qui vérifient cette condition :

- Les règles du niveau N1.1.1 aboutissent toutes à l'opération « $P_{total_ref} Z$ », quelque soit la valeur linguistique prise par la variable $Stock_nive$. Les trois règles N1.1.1.1, N1.1.1.2 et N1.1.1.3 peuvent donc se réduire à une seule :
 - SI $I_{gen} = 0$ ET SI $V_{bus} M$ ALORS $P_{total_ref} Z$
- Les règles du niveau N1.1.2 aboutissent toutes à l'opération « $P_{total_ref} GP$ », quelque soit la valeur linguistique prise par la variable $Stock_nive$. Les trois règles N1.1.2.1, N1.1.2.2 et N1.1.2.3 peuvent donc se réduire à une seule :
 - SI $I_{gen} = 0$ ET SI $V_{bus} G$ ALORS $P_{total_ref} GP$
- Les règles du niveau N2.1 aboutissent toutes à l'opération « $k Z$ », quelque soit la valeur linguistique prise par la variable $\Delta V_{bus} / \Delta t$. Les trois règles N2.1.1, N2.1.2 et N2.1.3 peuvent donc se réduire à une seule :
 - SI $V_{bus} M$ ALORS $k Z$

- Les règles du niveau N2.3 aboutissent toutes à l'opération « $k Z$ », quelque soit la valeur linguistique prise par la variable $\Delta V_{bus} / \Delta t$. Les trois règles N2.3.1, N2.3.2 et N2.3.3 peuvent donc se réduire à une seule :
 - **SI $V_{bus} P$ ALORS $k Z$**

Le Tableau 9 peut alors se simplifier, pour contenir un nombre de règles floues réduit à 19, comme le montre le Tableau 10. Notons qu'il est possible de gagner une règle supplémentaire, en regroupant les règles du niveau N2 comme indiqué dans le Tableau 11, pour aboutir finalement à 18 règles floues.

N1	N1.1	N1.1.1	1	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} M$			ALORS	$P_{total\ ref} Z$
		N1.1.2	1	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} G$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total\ ref} GP$
		N1.1.3	1	SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} P$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total\ ref} Z$
	2		SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} P$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total\ ref} GN$	
	3		SI	$I_{gen} = 0$	ET SI	$V_{bus} P$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total\ ref} Z$	
	N1.2	N1.2.1	1	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} MN$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total\ ref} Z$
			2	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} MN$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total\ ref} GN$
			3	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} MN$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total\ ref} GP$
		N1.2.2	1	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} GN$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total\ ref} GN$
			2	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} GN$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total\ ref} GN$
			3	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} GN$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total\ ref} Z$
		N1.2.3	1	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} PN$	ET SI	$Stock_nive M$	ALORS	$P_{total\ ref} GP$
			2	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} PN$	ET SI	$Stock_nive G$	ALORS	$P_{total\ ref} Z$
			3	SI	$I_{gen} \neq 0$	ET SI	$I_{gen} PN$	ET SI	$Stock_nive Z$	ALORS	$P_{total\ ref} GP$
	N2	N2.1		1	SI	$V_{bus} M$				ALORS	$k Z$
N2.2			1	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t Z$	ET SI		ALORS	$k G$
			2	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GP$	ET SI		ALORS	$k G$
			3	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GN$	ET SI		ALORS	$k Z$
N2.3		1	SI	$V_{bus} P$				ALORS	$k Z$		

Tableau 10 – Les 19 règles floues du superviseur simplifié

N2	N2.1 N2.3		1	SI	$V_{bus} M$	OU SI	$V_{bus} P$			ALORS	$k Z$
	N2.2		1	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t Z$	ET SI		ALORS	$k G$
			2	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GP$	ET SI		ALORS	$k G$
			3	SI	$V_{bus} G$	ET SI	$\Delta V_{bus} / \Delta t GN$	ET SI		ALORS	$k Z$

Tableau 11 – Simplification supplémentaire du niveau N2

i. Validation expérimentale

i. L'implantation du superviseur

Le superviseur développé ci-dessus a fait l'objet d'une implantation sous *Matlab*[®]-*Simulink*[®], associé à la boîte à outils *Fuzzy Logic*, afin d'être validé.

La Figure 75 représente la surface issue de cette implantation, pour le superviseur de niveau N1.2. Elle montre l'évolution de la puissance de référence du système hybride, en fonction du courant de génératrice, et du niveau de stockage. Nous y retrouvons une évolution de $P_{total\ ref}$ conforme aux règles présentées dans le Tableau 10, ici pour une valeur de la tension V_{bus} de 270V.

La Figure 76 représente la surface, pour le superviseur de niveau N2. Elle montre l'évolution du coefficient de répartition k en fonction de la tension du bus DC et de sa dérivée.

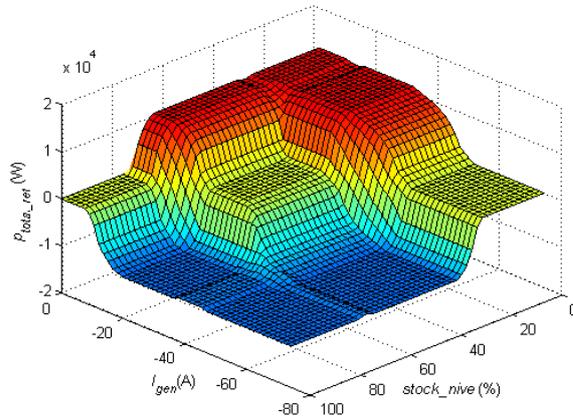


Figure 75 - Surface générée pour le niveau N1.2 lorsque V_{bus} égale 270V

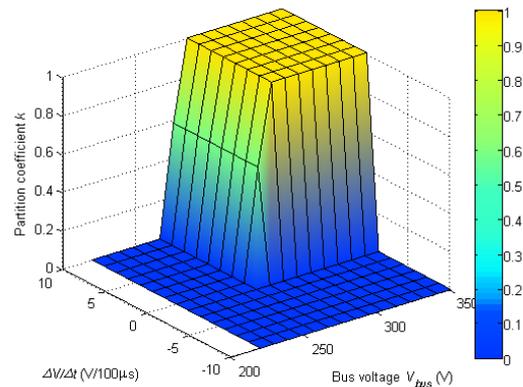


Figure 76 - Surface générée pour le niveau N2

Malgré la simplification opérée précédemment, l'implantation des règles floues pose un problème similaire à celui relaté pour le cas d'application « Eolienne à vitesse variable associée à un système inertiel de stockage d'énergie », où le nombre de lois floues n'était que de 9 : le temps nécessaire aux séquences complètes - acquisition des mesures, traitement algorithmique et restitution - est trop grand.

Dans ces travaux, la simplification est réalisée selon la méthode des « look-up tables » développée p. 24 et suivantes.

Les Figure 77 et Figure 78 montrent une surface issue d'un tableau 3-D, obtenue par discrétisation, respectivement à l'aide de 100 points, et à l'aide de 10 points. Ces courbes étant obtenues lors de l'étape d'implantation en temps réel du superviseur, les valeurs du courant de source et de la puissance sont à l'échelle du banc d'essai de 3kW.

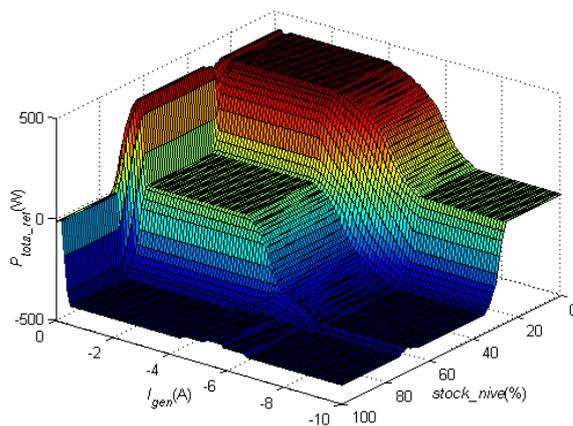


Figure 77 – Surface simplifiée obtenue par discrétisation (100 points)

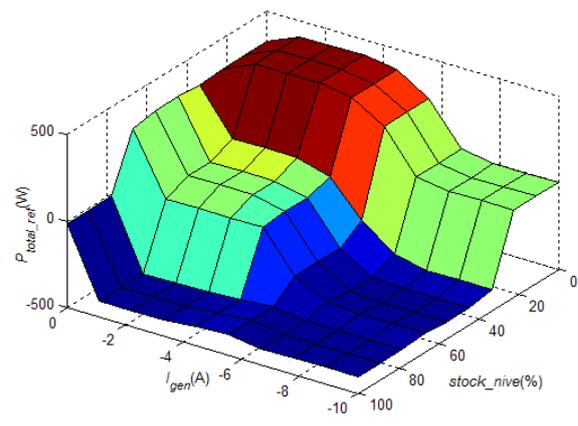


Figure 78 – Surface simplifiée obtenue par discrétisation (10 points)

La surface de la Figure 78 semble a priori la moins précise des deux surfaces, mais elle conserve globalement une allure similaire à celle de la Figure 77.

A titre d'illustration, nous appliquons la méthode d'estimation des écarts présentée précédemment dans le rapport.

Le Tableau 12 regroupe quelques résultats obtenus pour différentes options de discrétisation, portant sur les niveaux N1 et N2, utilisant la logique floue, développées précédemment. Le nombre de points, l'estimation de l'écart et la taille du fichier de points, y sont reportés.

Niveau	Dimension du tableau	Nombre de points pour la discrétisation	Ecart (%)	Taille de tables sous format <i>Matlab</i> ® 6.5 (Ko)
N2	2-D	200	0.7%	316
N2	2-D	100	0.9%	81
N2	2-D	50	2.5%	21
N1	3-D	40	1.9%	1412
N1	3-D	20	5.1%	354
N1	3-D	10	11.7%	90

Tableau 12 - Comparaison de la précision et de la taille des tables pour différents pas de discrétisation

Ce premier tableau permet d'estimer le gain apporté par cette méthode, dans notre cas d'application, en termes de place mémoire. La solution retenue par l'utilisateur sera un compromis entre la taille des tables et l'erreur due à la simplification.

L'utilisation des tables est également à l'origine de gains importants en termes de temps de calcul, comme le montre le Tableau 13. Pour le superviseur entièrement flou MP+VB (Niveaux 1 et 2), le bénéfice en faveur de la solution LT (*Look-up table*) est d'un rapport 12, puisque le temps de calcul chute à 120µs, alors qu'il est d'environ 1,5 ms pour la solution non simplifiée.

Stratégie	Temps de calcul	Stratégie	Temps de calcul	Stratégie	Temps de calcul
PI+VB (LF)	896µs	MP+FC (LF)	673µs	MP+VB (LF)	1473µs
PI+VB (LT)	108µs	MP+FC (LT)	100µs	MP+VB (LT)	120µs

Tableau 13 - Comparaison des temps de calcul nécessaires à l'implantation en temps réel, selon les méthodes retenues : « look-up table » (LT) et logique floue (LF)

Si l'on considère maintenant des superviseurs « mixtes », alliant logique floue et autre outil (Correcteur, bilan de puissance), le temps de calcul est également amélioré. La stratégie PI+VB, pour laquelle le niveau 1 du superviseur utilise un correcteur PI pour le maintien de la tension du bus DC, voit une amélioration dans un rapport 1 à 8. La stratégie MP+FC, pour laquelle le niveau 2 du superviseur utilise un bilan de puissance pour la répartition de puissance entre le stockage et la dissipation, voit une amélioration dans un rapport supérieur à 6.

Ensuite, nous pouvons constater un découplage entre la combinaison de stratégies retenue, et le temps de calcul obtenu avec la méthode LT, contrairement à ce que l'on observe avec la méthode LF. En effet, nous observons que le temps de calcul demeure environ toujours égal à 100µs.

Enfin, il est intéressant de noter que, sans simplification, et pour le matériel à disposition, aucune des trois stratégies utilisant au moins une fois la logique floue pour l'un de ses deux niveaux de supervision, ne voit le temps de calcul associé descendre sous les 400µs d'échantillonnage de la carte à DSP.

ii. La configuration expérimentale

La plateforme, dont le schéma est présenté à la Figure 79, comporte cinq parties: Emulateur de traction, Source unidirectionnelle en puissance, Charge bidirectionnelle, Système de stockage et Système de dissipation [43, 70].

Le système de stockage est construit autour de supercondensateurs de capacité $C_{SC}=165$ F, de tension nominale $V_{sc,nom} = 48V$. Utilisés entre la moitié ($Stock_nive=0\%$) et la totalité ($Stock_nive=100\%$) de cette tension, ils offrent une disponibilité d'énergie d'environ 142.5kJ ou 40 Wh, selon la relation (15). Cette énergie correspond à 75% de l'énergie totale pouvant être stockée dans les éléments de stockage:

$$\Delta E_{SC} = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot \left[V_{SC\ nom}^2 - \left(\frac{V_{SC\ nom}}{2} \right)^2 \right] \quad (15)$$

Le convertisseur DC-DC assurant la liaison avec le bus DC est un hacheur abaisseur de tension, réversible en courant, dont la fréquence de commutation des semi-conducteurs est de 12kHz.

Entre les deux, un filtre inductif L_{SC} dont la valeur, pour les essais présentés, est de 100mH.

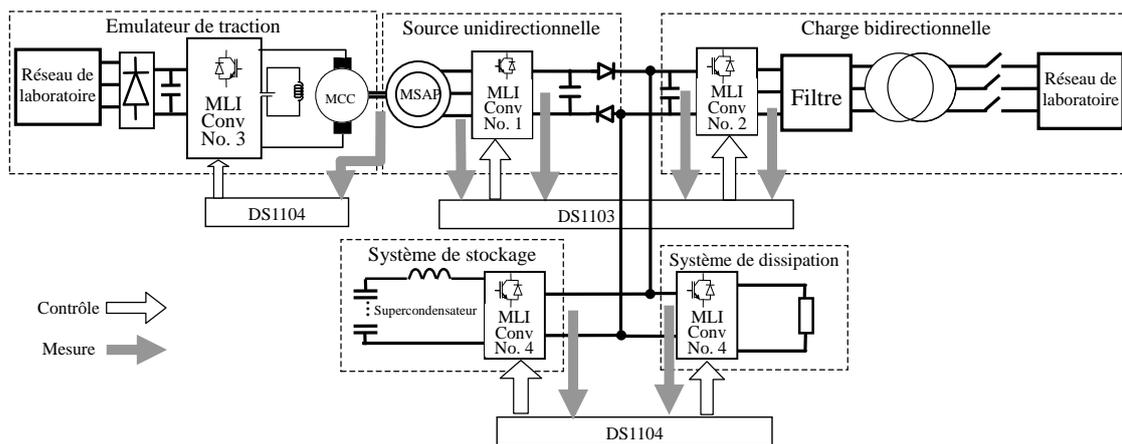


Figure 79 - Banc d'essai avec le système hybride de stockage et de dissipation.

iii. Résultats et analyses

Nous allons dans un premier temps présenter les résultats expérimentaux portant sur le superviseur entièrement flou (MP+VB), développé dans la partie précédente. Ces résultats seront comparés avec ceux obtenus à l'aide d'un superviseur ne contenant aucune règle floue (PI+FC).

1) Le mode opératoire

Pour ces essais, le profil de charge bidirectionnelle retenu est présenté à la Figure 80, et les phases successives sont détaillées dans le Tableau 14. La durée totale d'essai est de 200s, un cycle de 60s étant répété au cours de cette durée.

0s à 2s	La puissance de charge est nulle (ni consommation, ni restitution)
2s à 12s	La charge consomme 500W
12s à 22s	La consommation diminue jusqu'à 200W
22s à 32s	La puissance de charge est nulle
32s à 42s	La charge restitue 200W vers le bus continu
42s à 60s	La puissance de charge est nulle

Tableau 14 – Séquence du profil de charge bidirectionnelle

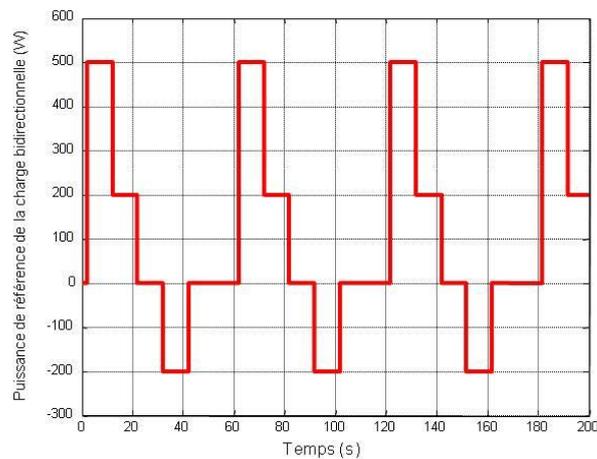


Figure 80 - Scénario de la charge bidirectionnelle

Les grandeurs relevées lors de ces essais sont présentées à la Figure 81. Les courbes présentées sont les tensions de bus continu, V_{dcpmg} et V_{bus} , les puissances P_{gen} , P_{charge} et $P_{hybride}$, les puissances en interne du système hybride, P_{dissi} et P_{sc} et le niveau de stockage en pourcentage, issu de la mesure de la tension du super condensateur.

La convention choisie pour la mesure des puissances est définie ci-dessous :

- Puissance positive : le flux de puissance est orienté du bus continu vers l'équipement. Pour la charge, cela correspond à la phase de consommation ; pour le système hybride, à la phase d'absorption. Il n'est pas possible d'avoir une puissance positive au niveau de la génératrice puisque les diodes anti-retour empêchent le retour de courant.
- Puissance négative : le flux de puissance est orienté de l'équipement vers le bus continu. Pour la charge, cela correspond à la phase de restitution ; pour le système hybride et la génératrice, à la phase d'alimentation.

Dans le cas idéal, la somme des trois puissances indiquées à la Figure 81, P_{charge} , P_{gen} et $P_{hybride}$ doit être nulle. En réalité, ceci n'est pas tout à fait vérifié, en raison des pertes dans les convertisseurs, condensateurs et diodes anti-retour.

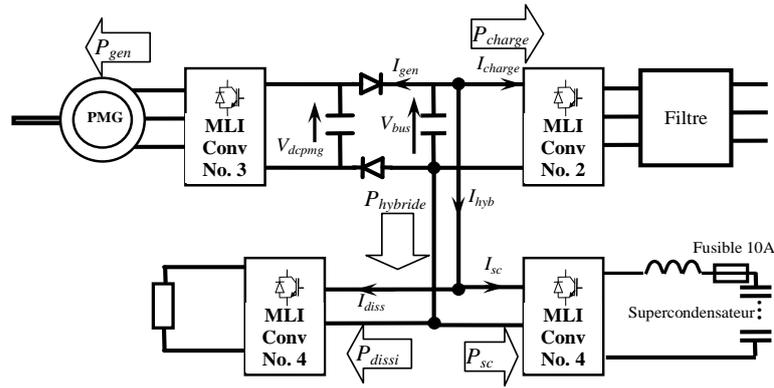


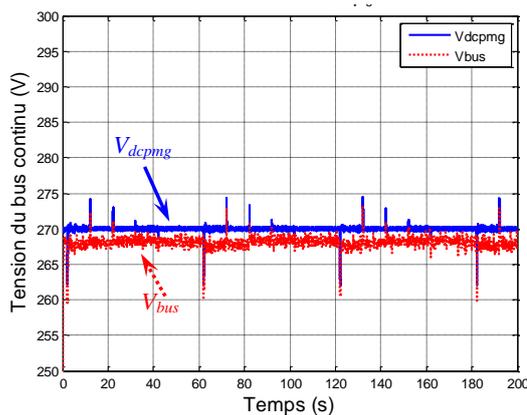
Figure 81 - Définition des variables à observer

2) Résultats expérimentaux portant sur le superviseur entièrement fluo (MP+VB)

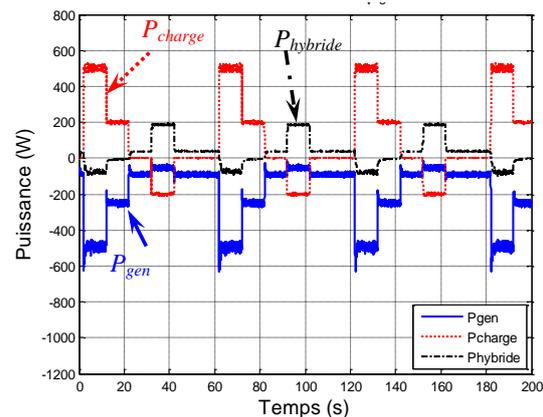
L'un des objectifs fixés à la supervision fluo est d'assurer la disponibilité du stockage. Les essais présentés (Figure 82 à Figure 84) considèrent donc trois cas de valeur initiale d'état de charge du stockage ($SOC_{init} = \text{State Of Charge}_{initial}$) : 50%, 20% et 80%. Ces figures présentent successivement les tensions au niveau du bus continu, les puissances échangées mesurées en ce même point, les puissances au niveau du système hybride et enfin la variation de l'état du stockage.

a) $SOC_{init} = 50\%$

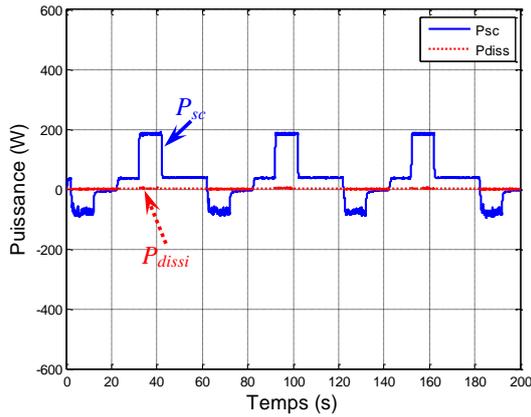
Dans cette configuration, la tension du bus est très bien maintenue (Figure 82 a), notamment en phase régénérative (renvoi de puissance par la charge), sans que le système de dissipation ne soit sollicité. En effet, le stockage qui possède une marge d'absorption suffisante, récupère intégralement, aux pertes près, (Figure 82 c) la puissance renvoyée par la charge (Figure 82 b). En phase active, le stockage ne contribue que modérément à l'alimentation de la charge (Figure 82 c), laissant la plus grande part de fourniture à la génératrice (Figure 82 b). Ce fonctionnement permet donc, outre une dissipation nulle, un maintien de l'état de charge du stockage (Figure 82 d).



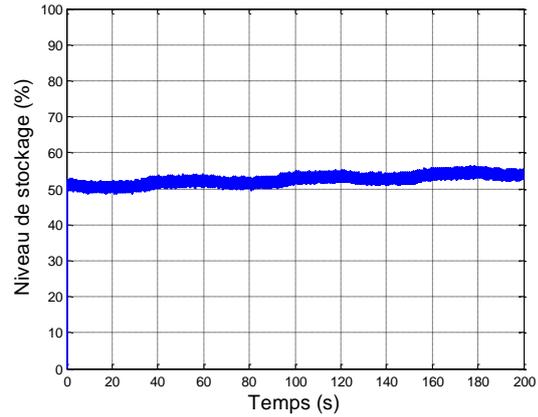
a) Tension du bus continu



b) Puissance au bus continu



c) Puissance du système hybride

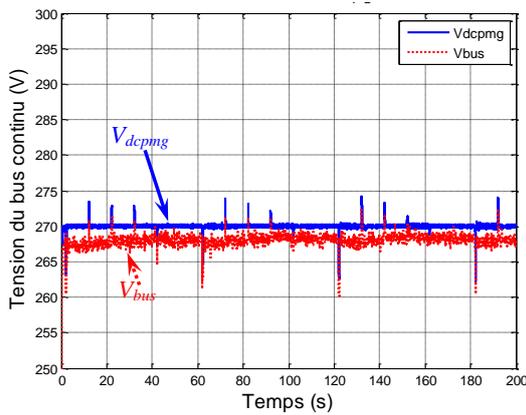


d) Niveau de stockage

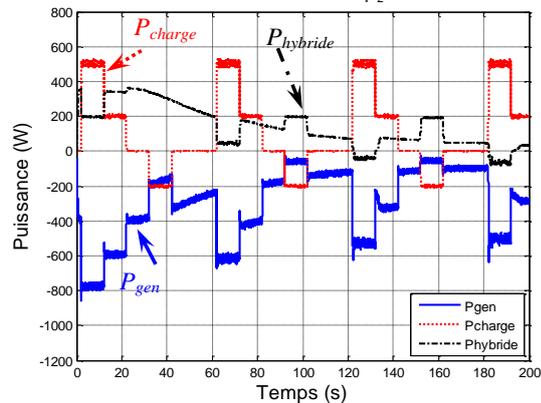
Figure 82 - Essais pour un superviseur totalement flou, état initial du stockage à 50%

b) SOC_{init} = 20%

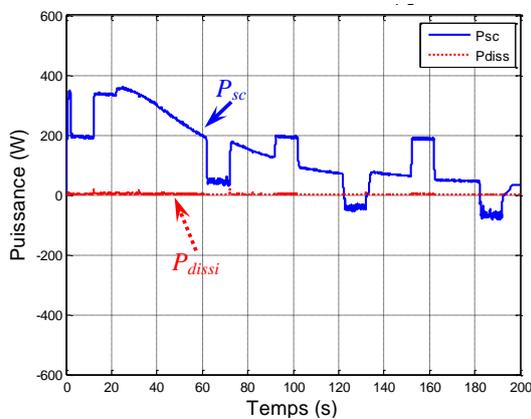
Dans cette configuration, la tension du bus continu est très bien maintenue également (Figure 83 a). Le niveau de stockage étant faible, les retours de puissance, en provenance de la charge, sont intégralement absorbés par le stockage, permettant une absence de dissipation (Figure 83 c). Afin de satisfaire à l'objectif de la disponibilité du stockage, celui-ci va absorber une puissance supplémentaire (Figure 83 c), provenant de la source (Figure 83 b), afin de reconstituer, progressivement, sa réserve d'énergie (Figure 83 d).



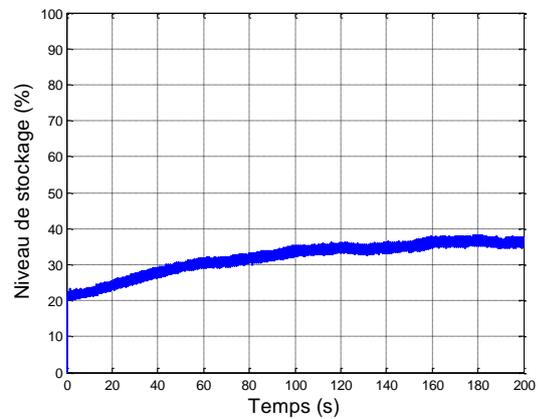
a) Tension du bus continu



b) Puissance au bus continu



c) Puissance du système hybride



d) Niveau de stockage

Figure 83 - Essais pour un superviseur totalement flou, état initial du stockage à 20%

c) $SOC_{init} = 80\%$

Dans cette configuration, la tension du bus continu est très bien maintenue (Figure 84 a), en considérant les contraintes initiales, qui autorisent des variations de celle-ci dans une certaine enveloppe (Figure 61). Les variations que l'on peut donc observer sur cette tension, sont l'illustration de la souplesse introduite par la logique floue, afin de retarder l'intervention du système de dissipation (Figure 84 c), lorsque la tension V_{bus} atteint la limite haute autorisée de 280V, prise en compte dans la fonction d'appartenance du label linguistique « GRAND » liée à cette tension (Figure 69 (b)). L'état de charge important du stockage permet à celui-ci de venir aider la génératrice à fournir les pointes de consommation de la charge (Figure 84 b et c), ce qui contribue à sa décharge (Figure 84 d).

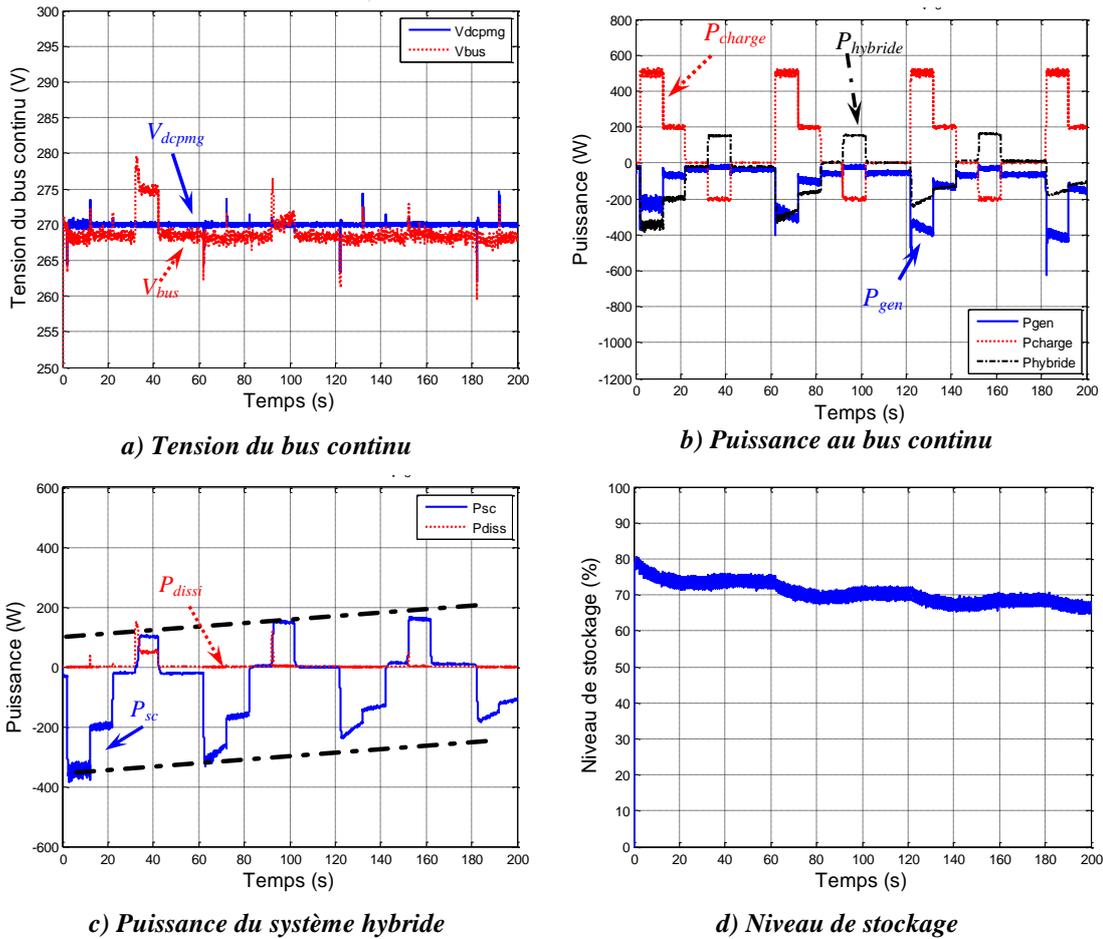


Figure 84 - Essais pour un superviseur totalement flou, état initial du stockage à 80%

3) Comparaison avec un superviseur sans logique floue (PI+FC)

Seuls les résultats de la stratégie mono-objectif PI-FC, développée sans le recours à la logique floue, sont présentés dans cette partie.

Les conditions d'essais sont identiques aux précédentes.

L'objectif de cette stratégie est de maintenir la tension du bus continu, en privilégiant le recours au stockage (Tableau 7).

a) $SOC_{init} = 50\%$

La tension du bus continu est très bien maintenue, conformément à l'objectif souhaité (Figure 85 (a)). Lorsque la charge consomme, elle sollicite le bus continu qui se décharge, et donc le stockage qui compense cette diminution d'énergie au niveau du bus. Par ce biais, le stockage fournit de la puissance en même temps que la source principale, lorsque la charge consomme (Figure 85 (b)). Ce comportement se déroule sans que l'état de charge du stockage ne soit surveillé. Avec un profil de charge plutôt consommateur, tel que c'est ici le cas, le stockage a donc tendance à se décharger (Figure 85 (d)). Lors des phases de restitution de la charge, la dissipation est sollicitée pour compenser la dynamique du stockage (Figure 85 (c)).

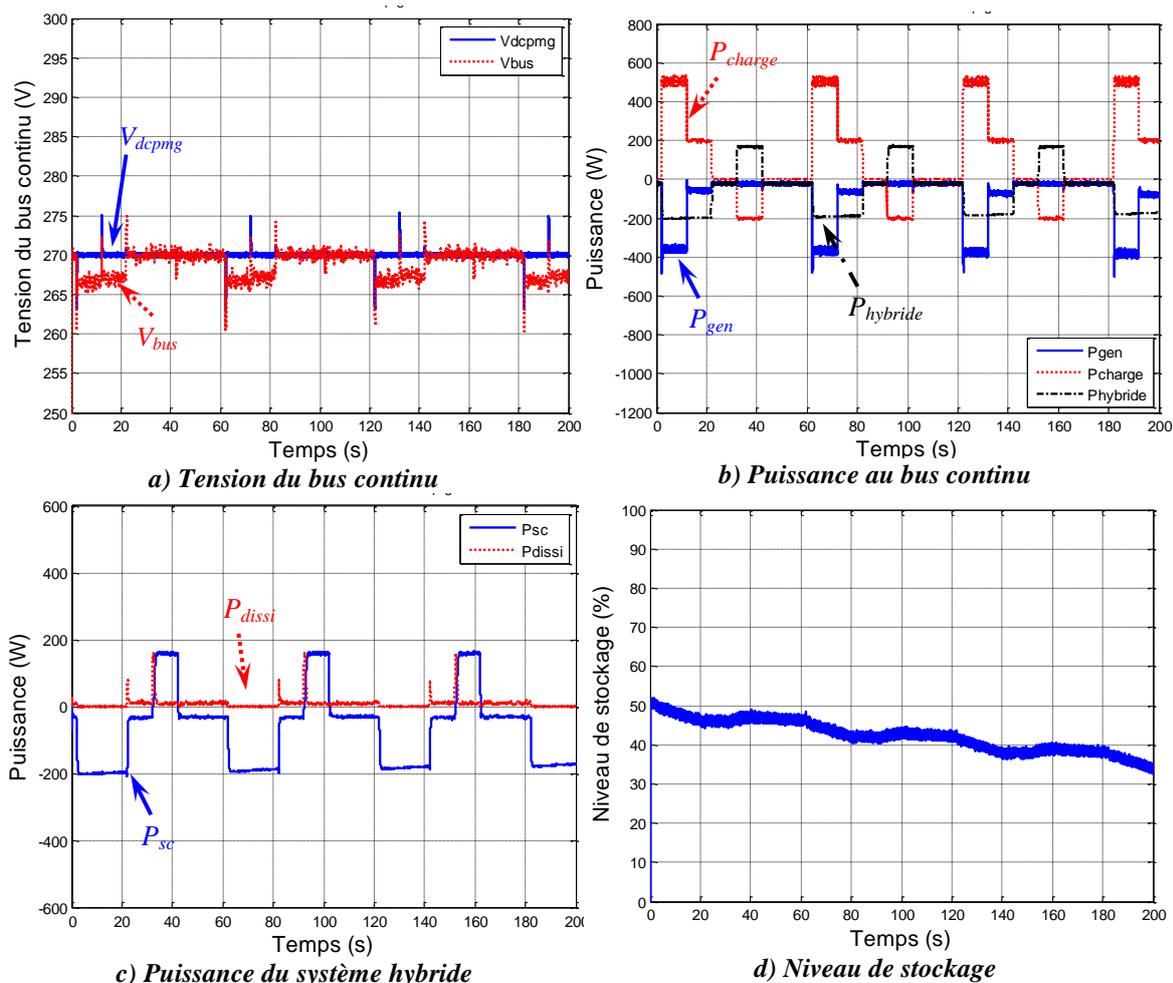
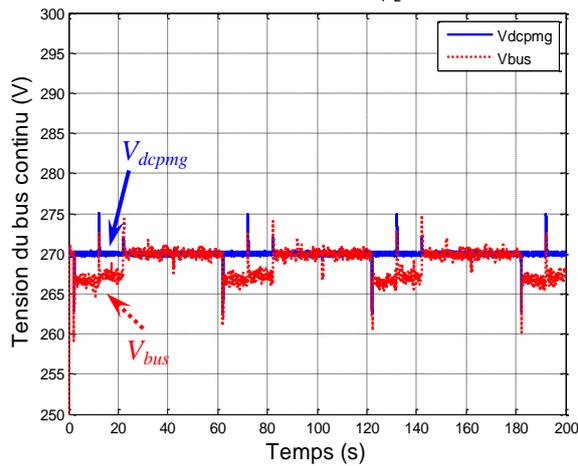


Figure 85 - Essais pour un superviseur totalement flou, état initial du stockage à 50%

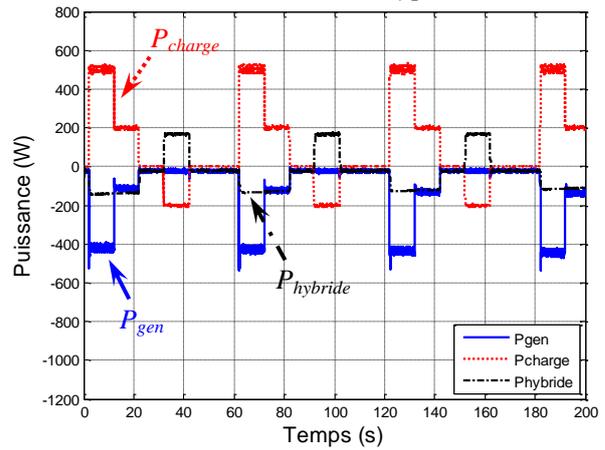
b) $SOC_{init} = 20\%$

L'analyse réalisée pour le cas précédent reste vraie. Le stockage, malgré son état de charge faible, est sollicité pour aider la source principale à alimenter la charge (Figure 86 (b) et (c)), et se décharge donc, en raison de la tendance consommatrice du profil de puissance de la charge (Figure 86 (d)).

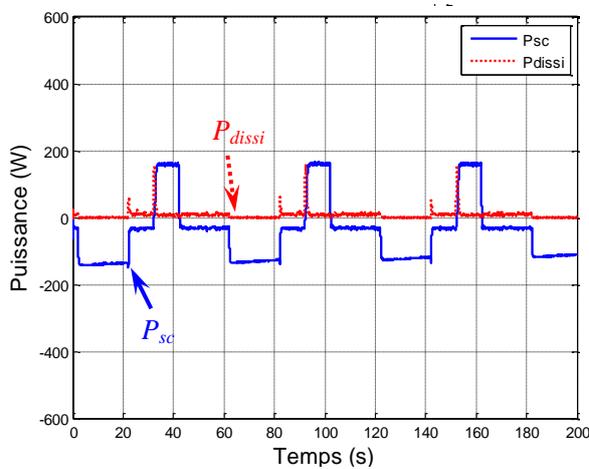
Si une telle tendance se maintient dans le temps, le stockage se videra à terme.



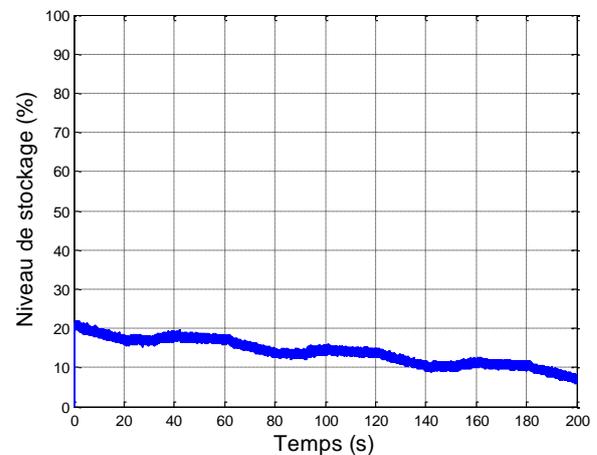
a) Tension du bus continu



b) Puissance au bus continu



c) Puissance du système hybride



d) Niveau de stockage

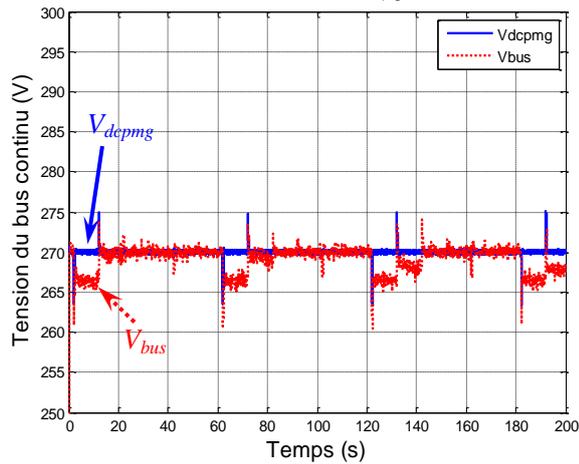
Figure 86 - Essais pour un superviseur totalement flou, état initial du stockage à 20%

c) SOC_{init} = 80%

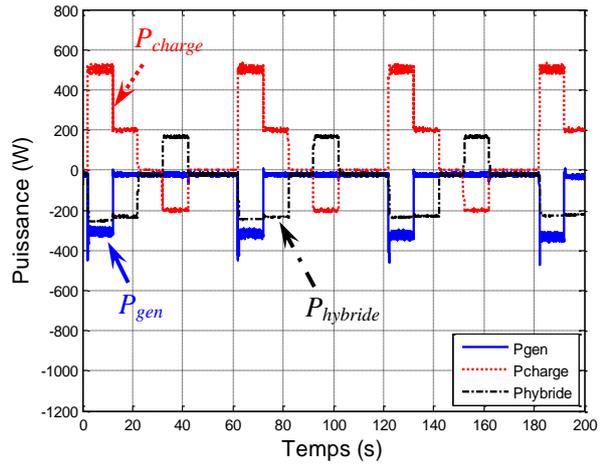
Le présent essai permet de mettre l'accent sur la contribution du stockage au lissage de pointes de puissance.

Le stockage est sollicité (Figure 87 (b) et (c)) pour aider la source principale à hauteur d'environ 220W (contre 200W à 50% d'état de charge et 150W à 20% d'état de charge). Pour rappel, dans le cas du superviseur flou, la contribution du stockage dans le même cas est variable, entre 200W à 350W. Le stockage est donc peu sollicité, alors qu'il pourrait l'être davantage.

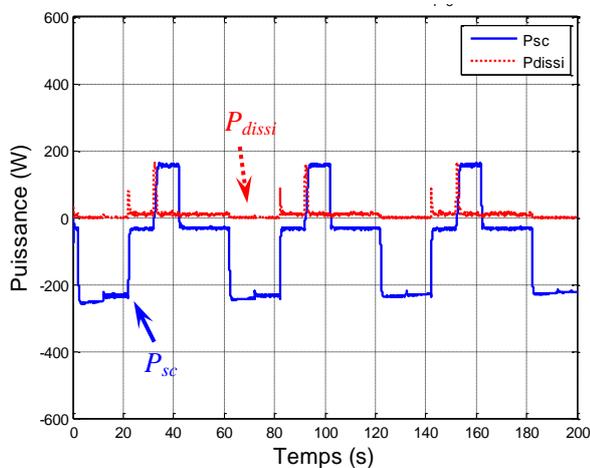
Cette stratégie n'offre donc pas de maîtrise sur la contribution du stockage au lissage des pointes de puissance.



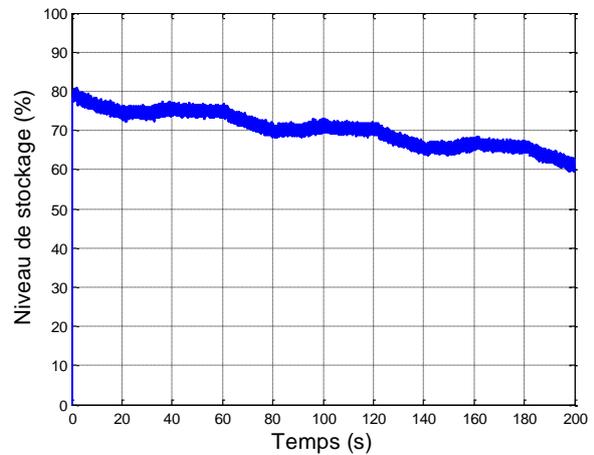
a) Tension du bus continu



b) Puissance au bus continu



c) Puissance du système hybride



d) Niveau de stockage

Figure 87 - Essais pour un superviseur totalement flou, état initial du stockage à 80%

d) Conclusion

Les essais expérimentaux précédents permettent une comparaison qualitative des superviseurs développés, en observant les comportements des différentes grandeurs électriques au sein du réseau étudié.

Afin de mener une démarche quantitative, des indicateurs liés aux objectifs souhaités doivent être développés et analysés.

4) Analyse des indicateurs

Les indicateurs (16) et (17) renseignent respectivement sur l'efficacité énergétique et le maintien de la tension du bus DC. Ils sont développés pour analyser le comportement des superviseurs lors des phases de restitution de puissance par les charges.

ΔW_{Stock} représente les variations de l'énergie stockée, ΔW_{Gen} les variations de l'énergie fournie par la génératrice et ΔW_{Rest} les variations de l'énergie renvoyée par les charges.

Le critère de maintien de tension, où V_{mes} est la mesure de la tension du bus continu, permet de comparer les stratégies lors des phases de restitution de puissance. Il est d'autant plus proche de zéro que la stratégie est performante.

$$Efficacité (\%) = \frac{\Delta W_{Stock}}{\Delta W_{Gen} + \Delta W_{Rest}} \times 100 \quad (16)$$

$$Surface (V.s) = \int |V_{mes} - 270| dt \quad (17)$$

Ces indicateurs, mesurés pour le cas d'essai précédent, sont reportés sur la Figure 88, pour les quatre combinaisons de stratégies. Le but n'est pas ici d'analyser dans le détail le comportement des superviseurs développés, mais plutôt de montrer les informations que l'on peut tirer de ces indicateurs. Notons également que les conditions d'essais ont une influence sur ces résultats, et qu'une analyse plus poussée nécessiterait de plus amples essais, notamment avec des profils de charges différents, des puissances, des capacités énergétiques et des dynamiques de stockages différentes, ...etc.

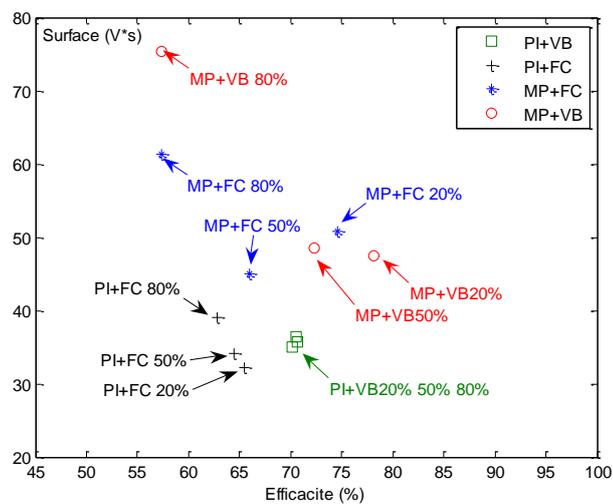


Figure 88 - Indicateurs d'efficacité énergétique et de maintien de tension issus de l'expérimentation

En termes de maintien de tension, on constate que toutes les stratégies utilisant un correcteur PI pour le niveau I de supervision ont un meilleur indicateur. Ceci est cohérent, puisque le correcteur PI cherche à maintenir la tension rigoureusement égale à la référence 270V, alors que la logique floue (stratégie MP) va autoriser la tension du bus continu à évoluer dans une bande de tension autour de cette valeur. Une perspective d'évolution de cet indicateur serait de réussir à traduire cette souplesse laissée au système.

En termes d'efficacité énergétique, les stratégies qui utilisent la logique floue pour le niveau II de supervision, présentent, pour la majorité, de meilleurs indicateurs. Ceci s'explique par la progressivité introduite par la logique floue, dans la mise en action de la dissipation.

5) Optimisation du superviseur flou

Nous appliquons dans cette partie la méthode présentée p.16 et suivantes, qui a fait l'objet d'un développement au travers du projet RECUPENER [104]. La structure globale du superviseur, basée sur deux niveaux (Figure 89), reprend celle vue précédemment. La mesure de la puissance issue de la source, P_{gen} , remplace ici le courant I_{gen} . Le niveau de charge de stockage est noté SOC (State Of Charge).

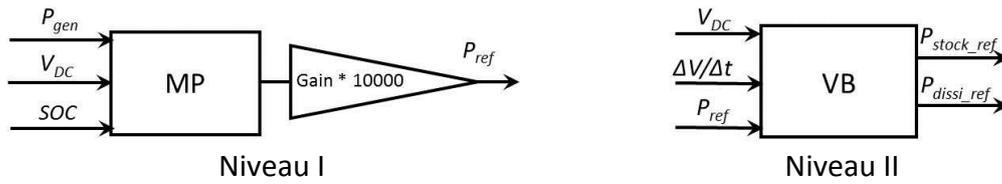


Figure 89 – Structure du superviseur

a) Objectifs et indicateurs

Dans cette étude, deux objectifs sont retenus : la minimisation de la variation de la tension du bus continu et l'augmentation de l'efficacité énergétique par la minimisation de la puissance dissipée. Trois indicateurs sont développés : La déviation moyenne de la tension du bus continu (18), l'écart type de la tension du bus continu (19) et la dissipation moyenne du système de stockage d'énergie (20). Ces indicateurs vont permettre de quantifier la performance des stratégies de supervision par rapport aux objectifs considérés et vont être utilisés dans les phases d'optimisation.

$$Abs_Dev = mean(|V_{mes} - 270|) \quad (18)$$

$$S_Dev = \sqrt{mean(V_{mes}^2) - (mean(V_{mes}))^2} \quad (19)$$

$$Med_Diss = mean(P_{diss}) \quad (20)$$

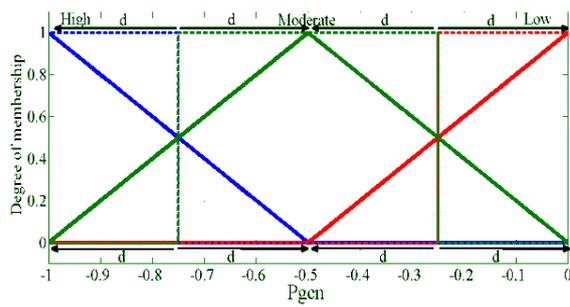
b) Identification des paramètres à optimiser

i) Niveau I du superviseur

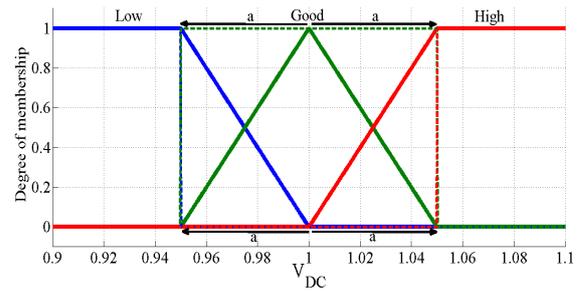
Quatre fonctions d'appartenance (Figure 90), ainsi qu'un gain, sont concernés pour ce premier niveau. Les notations des paramètres à optimiser, ainsi que leurs plages de variations, sont reportées dans le Tableau 15. Dans la suite, lors de la présentation des résultats, les variables et les paramètres respectivement associés, seront confondus, par souci de simplification.

Variable	Paramètre	Plage de variation
P_{gen}	d	[0...0,25]
V_{DC1}	a	[0...0,05]
SOC	e	[0...0,25]
P_{ref}	f	[0...1]
$Gain$	-	[0,05...0,3]

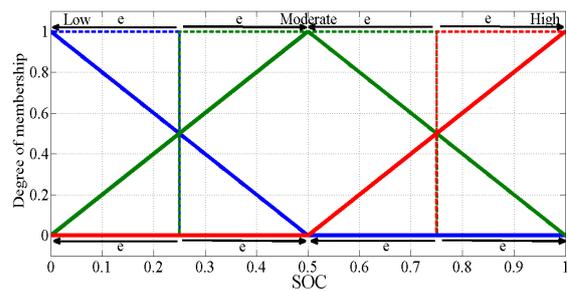
Tableau 15 – Paramètres à optimiser pour le niveau I



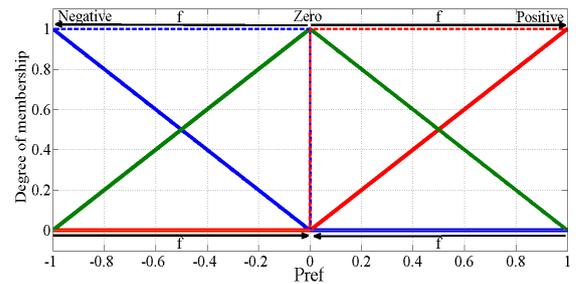
(a) P_{gen} – Paramètre “d”



(b) V_{DC} – Paramètre “a”



(c) SOC – Paramètre “e”



(d) P_{ref} – Paramètre “f”

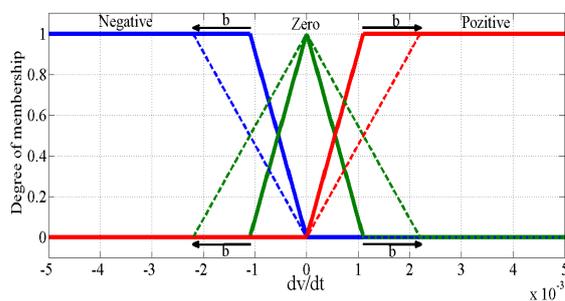
Figure 90 – Quatre fonctions d'appartenance du niveau I

ii) Niveau II du superviseur

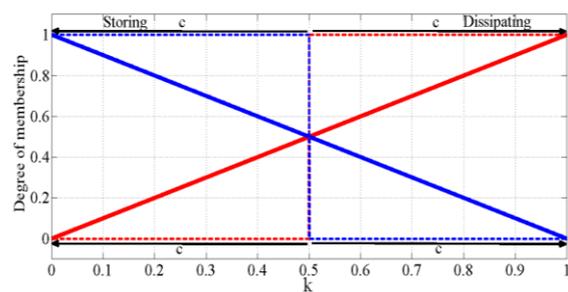
Trois fonctions d'appartenance sont concernées pour ce second niveau (Figure 91). La fonction d'appartenance de la variable d'entrée V_{DC} n'est pas représentée, car similaire à celle reproduite à la Figure 90 (b). En revanche, le paramètre associé de cette fonction (noté g) sera optimisé, car il n'est pas nécessairement identique à celui du niveau I, noté a .

Variable	Paramètre	Plage de variation
V_{DC2}	g	$[0...0,05]$
dV/dt	b	$[0...1,1*10^{-3}]$
k	c	$[0...0,5]$

Tableau 16 – Paramètres à optimiser pour le niveau II



(a) dV/dt – Paramètre « b »



(b) Coefficient de répartition : k – Paramètre « c »

Figure 91 – Deux fonctions d'appartenance du niveau II

La partie suivante va permettre de déterminer l'incidence de chaque paramètre identifié sur les objectifs. Seuls les paramètres influents seront conservés pour l'optimisation.

c) Détermination des paramètres les plus influents

Cette détermination a recours à l'emploi des plans d'expérience. L'étude d'influence des huit paramètres, et la construction des matrices d'expérience et d'effet associées, conduisent à la réalisation de 2^8 essais. Chacune de ces séries d'essais est réalisée pour trois niveaux initiaux de stockage différents : $SOC_{init} = 20\%$, 50% et 80% . Le nombre d'essais s'élève donc à 3×2^8 , soit 768. L'écriture de routines informatiques sous *Matlab*[®] permet de réaliser ce grand nombre de simulations de façon automatique, pour un profil de charge donné (Figure 92). Pour rappel, une puissance positive correspond à une consommation de puissance par la charge, une puissance négative à une restitution.

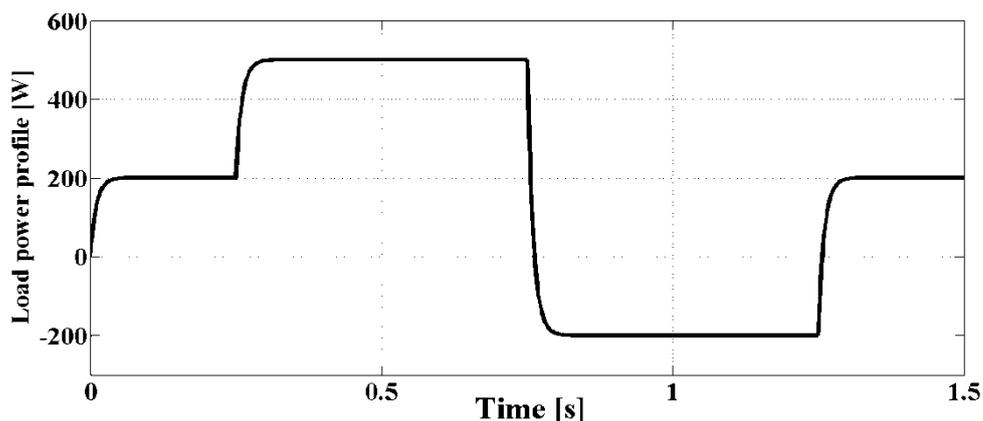


Figure 92 - Profil de charge

Le Tableau 17 est un extrait de la matrice d'expérience, qui réunit les résultats des essais, ainsi que les valeurs des indicateurs correspondantes et leurs moyennes respectives, pour les trois valeurs de conditions initiales du stockage.

Chaque essai, numéroté de 1 à 256, correspond à un jeu de paramètres. Il est reproduit trois fois avec trois SOC_{init} . Les indicateurs *Abs_Dev*, *S_Dev* et *Med_Diss* sont calculés pour chaque SOC_{init} .

On note l'importance de considérer ces différentes valeurs initiales d'état de charge du stockage, au travers des variations des valeurs moyennes prises par les indicateurs pour $SOC_{init} = 20\%$, 50% et 80% .

Nr.	Gain	VDC2	Dv/dt	k	Pgen	VDC1	SOC	Pref	Abs_Dev_20	S_Dev_20	Med_Diss_20	Abs_Dev_50	S_Dev_50	Med_Diss_50	Abs_Dev_80	S_Dev_80	Med_Diss_80
1	0,05	0	0	0	0	0	0	0	2,22	2,98	22,5	2,27	3,05	24,3	3,68	4,92	48,2
2	0,05	0	0	0	0	0	0	1	0,19	0,238	0	0,105	0,145	0	0,399	0,48	0
...
255	0,3	0,05	0,0011	0,5	0,25	0,05	0,25	0	0,17	0,22	0	0,085	0,119	0	4,169	5,77	3,93
256	0,3	0,05	0,0011	0,5	0,25	0,05	0,25	1	0,63	0,798	0	0,141	0,209	0	4,977	8,96	22,4
MOYENNES									1,12	1,481	5,726	0,92	1,228	5,18	3,78	4,8	22

Tableau 17 – Extrait de la matrice d'expériences ($SOC_{init} = 20\%$, 50% et 80%)

Le Tableau 18 est la matrice des effets, pour ces mêmes essais. On note à nouveau l'importance de considérer différents états initiaux du stockage. Par exemple, la variable SOC n'a pas beaucoup d'effet pour un SOC_{init} de 50% , alors qu'elle en a pour 20% et surtout 80% (notamment sur l'indicateur de dissipation, pour $SOC_{init}=80\%$, ce qui est cohérent).

	<i>Abs_Dev_20</i>	<i>S_Dev_20</i>	<i>Med_Diss_20</i>	<i>Abs_Dev_50</i>	<i>S_Dev_50</i>	<i>Med_Diss_50</i>	<i>Abs_Dev_80</i>	<i>S_Dev_80</i>	<i>Med_Diss_80</i>
Gain	-0,7569	-1,0290	-5,7230	-0,7864	-1,0587	-5,2009	0,1932	0,0169	-2,4119
VDC2	0,0717	0,0967	-3,3792	0,0900	0,1218	-2,9908	0,1877	0,2409	-4,6286
dv/dt	0,0001	0,0001	0,0059	0,0002	0,0001	0,0032	0,0091	0,0023	1,2426
k	0,0258	0,0358	-0,4076	0,0466	0,0653	-0,3233	0,3834	0,5311	-2,6581
Pgen	-0,0012	-0,0017	-0,0015	-0,0066	-0,0091	-0,0028	-0,2109	0,1314	-1,3527
VDC1	0,1967	0,2683	1,9070	0,1771	0,2426	2,1221	1,2439	1,2477	9,0006
SOC	0,0236	0,0336	0,5862	0,0001	0,0001	0,0001	-1,3873	-1,2797	-6,8757
Pref	-0,7579	-1,0313	-5,7230	-0,7811	-1,0508	-5,2009	-0,6354	-1,1100	-4,2942

Tableau 18 - Matrice des effets ($SOC_{init} = 20\%, 50\% \text{ et } 80\%$)

Pour déterminer les paramètres influents, il faut comparer, pour chaque variable, la valeur prise par les indicateurs réunis dans la matrice des effets (Tableau 18), aux valeurs moyennes de ces mêmes indicateurs (Tableau 17). Nous avons choisi de considérer comme influente une variable dont l'effet (en valeur absolue) représente plus de 5% de la valeur moyenne de l'indicateur. Dans le Tableau 18, les chiffres notés en caractères gras vérifient cette condition, et les variables correspondantes sont donc considérées comme influentes. Certaines variables sont influentes, quelque soit le SOC_{init} (*Gain*, *V_{DC}*, *k*, *P_{ref}*), d'autres plus particulièrement pour des valeurs de SOC_{init} importantes (*dv/dt*, *P_{gen}*, *SOC*). Cette observation confirme la nécessité de mener les essais pour différentes valeurs de SOC_{init} , sur une large gamme de variation.

Dans la mesure où toutes les variables ont une influence sur les indicateurs, toutes sont conservées pour la phase d'optimisation, que nous présentons maintenant.

d) Optimisation des paramètres

La première étape de la phase d'optimisation est la création de fonctions objectif.

Trois fonctions intermédiaires sont créées dans un premier temps, correspondant à chaque niveau de stockage initial :

$$optval20 = k_1 * \frac{AbsDev20}{AbsDevref} + k_2 * \frac{SDev20}{SDevref} + k_3 * \frac{MedDiss20}{MedDissref} \quad (21)$$

$$optval50 = k_1 * \frac{AbsDev50}{AbsDevref} + k_2 * \frac{SDev50}{SDevref} + k_3 * \frac{MedDiss50}{MedDissref} \quad (22)$$

$$optval80 = k_1 * \frac{AbsDev80}{AbsDevref} + k_2 * \frac{SDev80}{SDevref} + k_3 * \frac{MedDiss80}{MedDissref} \quad (23)$$

Avec :

$$AbsDevref = \frac{AbsDev20 + AbsDev50 + AbsDev80}{3} \quad (24)$$

$$SDevref = \frac{SDev20 + SDev50 + SDev80}{3} \quad (25)$$

$$MedDissref = \frac{MedDiss20 + MedDiss50 + MedDiss80}{3} \quad (26)$$

Les trois coefficients *AbsDevref*, *SDevref* et *MedDissref*, permettent de favoriser dans la même mesure les trois indicateurs considérés.

La pondération réalisée à l'aide des coefficients k_1 , k_2 et k_3 permet, si nécessaire, de privilégier certains objectifs dans la phase d'optimisation. Dans le cas présent, une pondération de 50% porte sur le maintien de la tension du bus continu, et 50% sur l'efficacité énergétique. Les coefficients k_1 et k_2 sont donc choisis chacun à 25% (soit 50% au total) et le coefficient k_3 est choisi égal à 50%.

$$k_1 = 25\% , k_2 = 25\% , k_3 = 50\% \quad (27)$$

Enfin, une fonction globale est créée (28), à partir des trois fonctions intermédiaires (21) à (23), pondérées à l'aide des coefficients K_1 , K_2 et K_3 , choisis en fonction du niveau de stockage global que l'on souhaite favoriser.

$$objfun = K_1 * optval20 + K_2 * optval50 + K_3 * optval80 \quad (28)$$

Dans la présente étude, un niveau de stockage global de 50% est recherché, les coefficients retenus ont donc les valeurs données par (29).

$$K_1 = 25\% , K_2 = 50\% , K_3 = 25\% \quad (29)$$

Les fonctions *objectifs* ainsi créées, sont alors implantées dans un algorithme d'optimisation. Pour cette étude, *Matlab®* a été choisi, associé à la boîte à outil « *Global Optimization Toolbox* ». La Figure 93 présente l'évolution de la meilleure valeur de la fonction objectif *Objfun* et de la moyenne de cette fonction pour tous les individus (au nombre de 80). On peut observer la convergence du meilleur résultat et de la moyenne des résultats de population vers un minimum. Les deux résultats obtenus pour l'itération zéro correspondent à la population initialisée aléatoirement. Le résultat des itérations suivantes correspond aux générations de population de l'algorithme génétique.

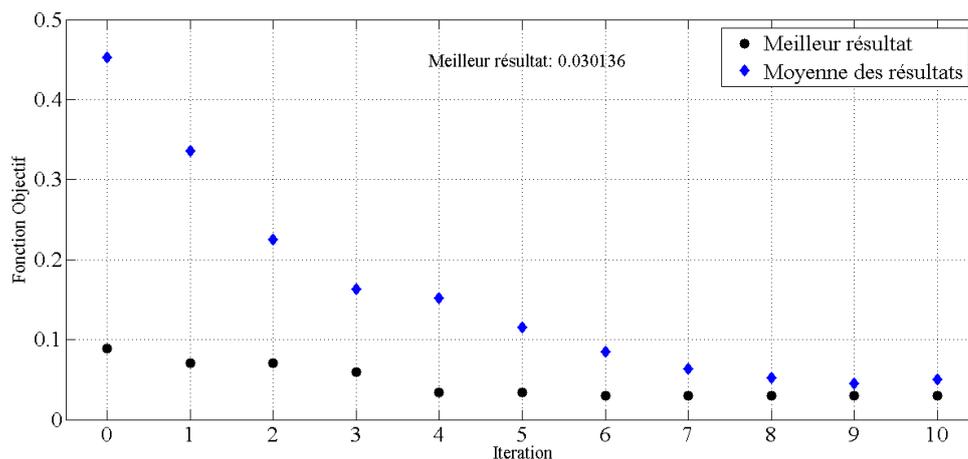


Figure 93 – Evolution de la valeur de la fonction « objectif » *Objfun*

Le Tableau 19 regroupe les valeurs de paramètres obtenues à la suite de la phase d'optimisation. Ils correspondent à la valeur minimale atteinte par la fonction *Objfun*, soit 0,0301.

Cas	Gain	V_{DC2}	dv/dt	k	P_{gen}	V_{DC1}	SOC	P_{ref}	Objfun
Superviseur « Optimisé »	0.099	0.038	3.8e-4	0.014	0.214	5.75e-5	0.174	0.989	0.0301

Tableau 19 – Paramètres obtenus par optimisation

A titre de comparaison, le Tableau 20 regroupe les valeurs de paramètres, ainsi que la valeur de la fonction objectif *Objfun* associée, pour trois cas particuliers de superviseurs :

- « Booléen » : les fonctions d'appartenance ne présentent que des degrés d'appartenance égaux à 0 ou 1,
- « Totalemment flou » : les fonctions d'appartenance sont de forme triangulaire,
- « Optimisé » : les fonctions d'appartenance sont construites à l'aide des paramètres obtenus précédemment.

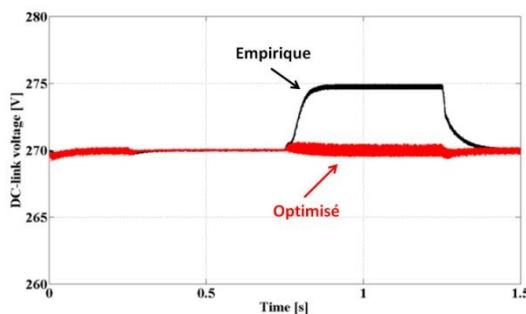
Les deux premiers cas correspondent donc à des valeurs extrêmes des paramètres des fonctions d'appartenance.

Cas	Gain	V_{DC2}	dv/dt	k	P_{gen}	V_{DC1}	SOC	P_{ref}	Objfun
Superviseur « Booléen »	0,05	0,05	0,0011	0,5	0,5	0,05	0	1	0,5249
Superviseur « Totalemment flou »	0,05	0	0	0	0	0	0,25	0	1,7681
Superviseur « Optimisé »	0,099	0,038	3,8e-4	0,014	0,214	5,75e-5	0,174	0,989	0,0301

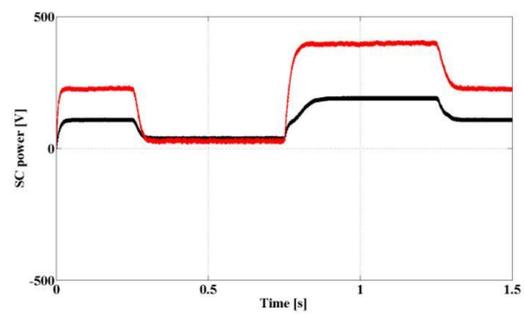
Tableau 20 - Valeur des paramètres du superviseur dans trois cas particuliers : "Booléen", "Totalemment flou" et "Optimisé"

e) Validations

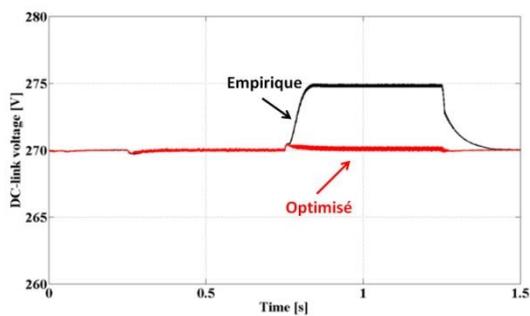
Les Figure 94 et Figure 95 regroupent les résultats de simulation obtenus avec, d'une part, le superviseur optimisé, d'autre part, le superviseur développé dans les travaux de thèse de He ZHANG, présentés précédemment, et obtenu de façon empirique. Le profil de charge est présenté à la Figure 92.



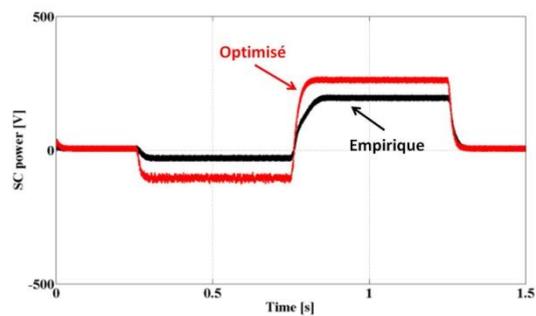
(a) Tension V_{DC} (SOC 20%)



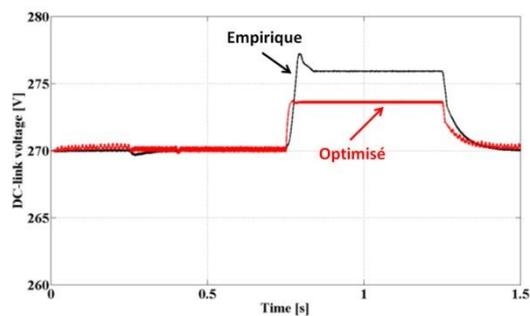
(a) Puissance du stockage (SOC 20%)



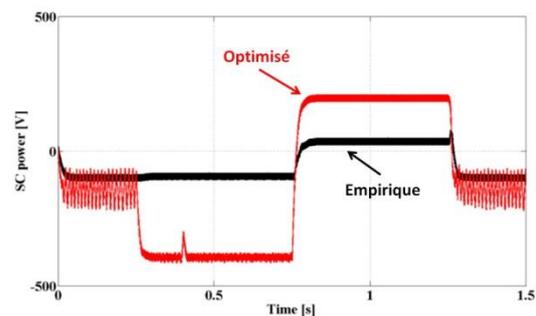
(b) Tension V_{DC} (SOC 50%)



(b) Puissance du stockage (SOC 50%)



(c) Tension V_{DC} (SOC 80%)



(c) Puissance du stockage (SOC 80%)

Figure 94

Figure 95

Les Figure 94 (a) à (c) montrent que la tension du bus continu est mieux maintenue dans le cas du superviseur optimisé, ceci en raison d'une meilleure absorption de puissance par les supercondensateurs (Figure 95 (a) à (c)). La dissipation qui n'est pas sollicitée, pour ce profil de charge, dans les cas $SOC_{init} = 20\%$ et 50% , est sollicitée, pour $SOC_{init} = 80\%$, uniquement dans le cas du superviseur empirique (Figure 96).

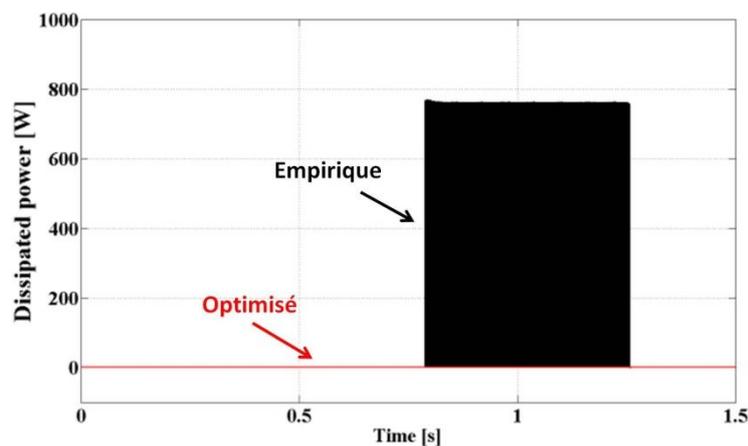


Figure 96 - Puissance dissipée $SOC_{init}=80\%$

Le Tableau 21 regroupe les valeurs prises par les trois indicateurs, dans le cas d'un stockage initial de 20% et 80%, pour quatre types de superviseurs : « Booléen », « Totalement flou », « Empirique » et « Optimisé ». On y observe l'amélioration introduite par le superviseur optimisé, notamment pour la valeur initiale de stockage importante, qui s'explique par une meilleure exploitation du système de stockage.

	Indicateurs Superviseur	Abs_Dev	S_Dev	Med_Diss
SOCinit = 20%	Booléen	0.1727	0.2865	0.0012
	Totalement flou	0.7315	1.5966	11.9985
	Empirique	0.1755	0.3330	0.0373
	Optimisé	0.2212	0.2697	0.0012
SOCinit = 80%	Booléen	1.5084	3.7393	1.3839
	Totalement flou	1.9391	4.0813	7.2204
	Empirique	0.9505	1.8366	6.8417
	Optimisé	0.3396	0.2448	0.0010

Tableau 21 – Indicateurs obtenus pour les différents types de superviseur, pour des valeurs initiales de stockage de 20% et 80%

j. Conclusions

Nous venons d'aborder l'exemple applicatif que constitue un réseau local DC à échanges d'énergie en aéronautique.

Nous avons pu y mettre en application la méthodologie de développement de superviseurs, depuis l'établissement du cahier des charges (objectifs et contraintes), jusqu'à la phase d'optimisation. La problématique de la simplification d'un superviseur flou a été traitée. Dans un premier temps, par une réduction du nombre de règles floues, dans un second temps, par l'utilisation de tables lors de l'implantation matérielle du superviseur.

La mise en œuvre de la phase d'optimisation a été décrite. Celle-ci repose initialement sur la détermination de fonctions objectif, qu'il faut chercher à minimiser. Ces fonctions sont construites sur la base d'indicateurs, qui permettent de s'assurer que les objectifs recherchés sont atteints, et de comparer les performances des différents superviseurs développés, vis-à-vis de ces objectifs.

3. Conclusion

Nous venons de décrire deux cas d'application des développements méthodologiques que nous proposons : Le cas d'une éolienne à vitesse variable, associée à un système inertiel de stockage d'énergie, et celui d'un réseau local DC à échanges d'énergie, utilisant des supercondensateurs.

D. Autres travaux

Je présente dans cette partie d'autres travaux auxquels j'ai contribué : Les travaux de thèse d'Omar BOUHALI [42] [105], Stefan BREBAN [106] et Vincent COURTECUISSSE [73].

Les travaux d'Omar, que j'ai co-encadrés, portent sur la contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique. Cette thèse, co-dirigée par les professeurs BERKOUK (ENP Alger) et FRANCOIS (L2EP), laisse une forte place à l'étude de la commande du convertisseur NPC, notamment en vue de maintenir la tension de chaque condensateur constituant le bus DC. Mon apport concerne les modes d'association des éoliennes et des systèmes de stockage à l'interface électronique de puissance, la supervision énergétique et l'aspect expérimental.

Les travaux de Stefan BREBAN et Vincent COURTECUISSSE portent respectivement sur l'étude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable [107], et sur la contribution d'une éolienne à vitesse variable au réglage

primaire de fréquence [88, 89, 108, 109]. Dans ces deux cas, ma contribution concerne la phase de validation expérimentale.

1. Contribution des convertisseurs multiniveaux NPC au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique

Cette thèse a fait l'objet d'une description lors de la présentation de mes activités de recherche. Je rappellerai donc brièvement les étapes de ce travail, puis présenterai quelques résultats.

a. Présentation des travaux

Les travaux ont d'abord porté sur l'étude de la commande du convertisseur NPC, avec l'objectif de maintenir équilibrés les niveaux de tensions aux bornes des condensateurs du bus continu [42], quelque-soit le nombre de niveaux du convertisseur [110-112].

Ensuite, le raccordement d'éoliennes à vitesse variable et de systèmes inertiels de stockage a été envisagé, au travers de deux configurations : 1 GESI (Générateur Eolien et Système Inertiel) raccordé à l'intégralité du bus continu, qui a pu faire l'objet de validations expérimentales, puis 1 GESI raccordé à chaque condensateur du bus continu.

Enfin, une généralisation à un nombre quelconque de niveaux a été abordée.

Nous présenterons dans cette section les deux cas de raccordement, via un convertisseur 3 niveaux, d'éoliennes et de stockage.

b. Raccordement d'éoliennes et de dispositifs de stockage au réseau, via un convertisseur NPC

i. 1 GESI aux bornes du bus DC

Une première approche consiste à substituer un convertisseur NPC au convertisseur 2 niveaux de la solution classique (Conv.3), présentée à la Figure 30. L'éolienne et le système de stockage (GESI) sont alors connectés aux bornes de l'intégralité du bus continu, comme le suggère la Figure 97 [105, 113].

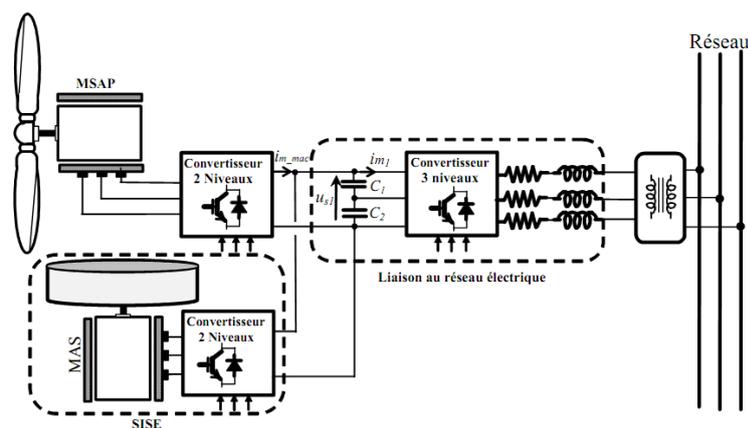


Figure 97 - Eolienne à vitesse variable et stockage inertiel raccordés au réseau via un convertisseur NPC

L'objectif de cette première phase est d'appliquer le superviseur issu des travaux réalisés par G. CIMUCA avec cette architecture de raccordement, et de s'assurer de la pertinence de la commande du convertisseur NPC, visant l'auto-équilibrage des sources de tension flottantes en entrée. Le superviseur à puissance lissé (Figure 47) développé par G. CIMUCA est donc implanté.

Une validation expérimentale est menée sur la plateforme *Energies Electriques*, dont les résultats sont présentés ci-dessous.

La Figure 98 témoigne de l'efficacité de la supervision appliquée à cette architecture, puisqu'une puissance lissée P_{reg} est injectée au réseau, malgré une puissance éolienne $P_{éol}$ fluctuante. Dans le même temps, le volant d'inertie ($0,2 \text{ kg.m}^2$) conserve une vitesse de rotation maintenue entre ses limites haute et basse, sans saturation (Figure 99).

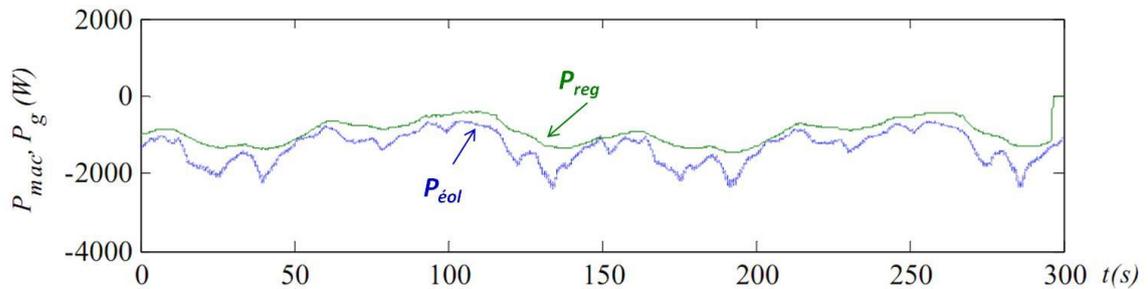


Figure 98 - Puissance éolienne ($P_{éol}$) et puissance lissée injectée au réseau (P_{reg})

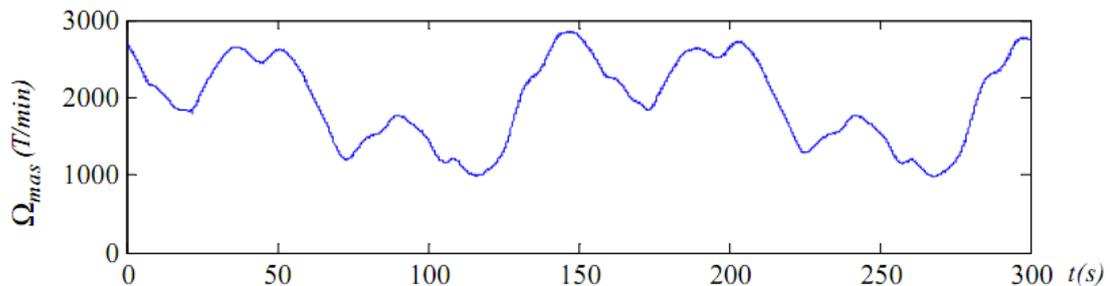


Figure 99 - Vitesse du volant d'inertie

Les formes d'onde des tensions de sortie du convertisseur NPC (Figure 100) présentent 5 paliers correctement équilibrés, de -400V à $+400\text{V}$, par pas de 200V , ce qui témoigne d'un bon comportement de la commande du convertisseur.

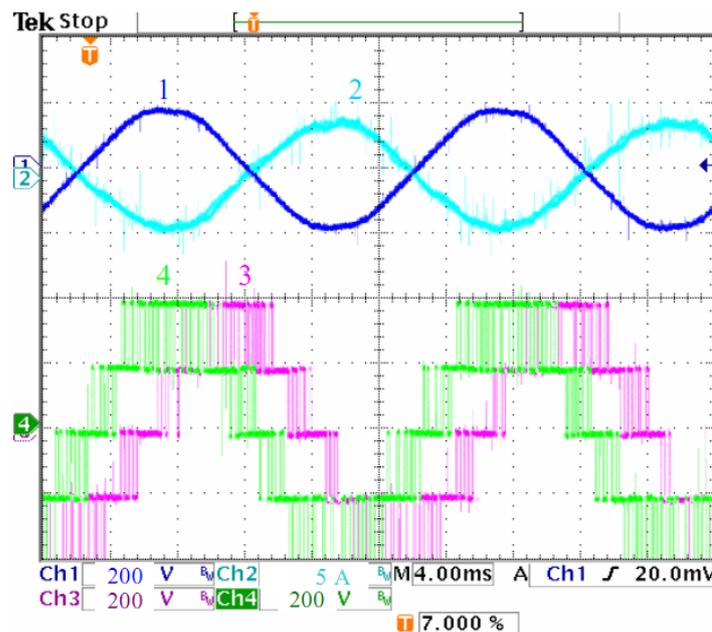


Figure 100 - Tension et courants au niveau du raccordement au réseau électrique AC – (1) Tension réseau AC (v_{s1}), (2) Courant AC (i_{s1}), (3) et (4) Tensions modulées u_{m23} et u_{m13}

ii. 1 GESI aux bornes de chaque condensateur du bus DC

La démarche se poursuit en exploitant les possibilités de connexion au niveau du bus DC, issues de la mise en série de condensateurs, comme le montre la Figure 101, où deux ensembles GESI sont connectés chacun à un condensateur du bus DC.

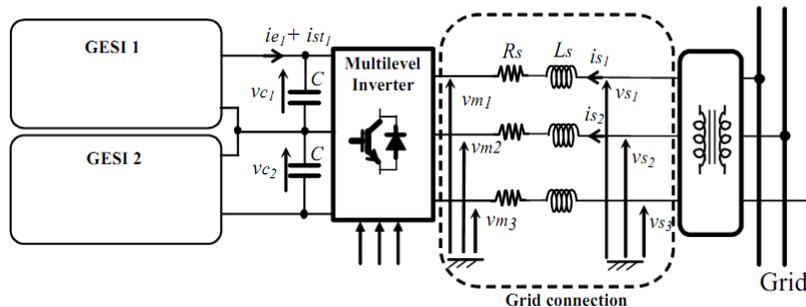


Figure 101 – 2 GESI (Générateur Eolien & Stockage Inertiel) connectés au bus DC d'un convertisseur NPC – Exploitation de la mise en série des condensateurs

La puissance P_{gref} devant être injectée au réseau par le système de production, est estimée à l'aide du même superviseur flou que précédemment.

Le contrôle, à l'aide d'un correcteur, de chaque tension v_{c1} et v_{c2} , permet de déterminer les puissances de référence respectives des dispositifs de stockage, SISE₁ et SISE₂.

Deux possibilités existent pour élaborer la commande du convertisseur NPC: sans ou avec exploitation des vecteurs redondants⁸.

1) Sans utilisation des vecteurs redondants

La Figure 102⁹ représente la puissance éolienne totale (P_{mac}), produite par les deux génératrices éoliennes, ainsi que la puissance renvoyée au réseau (P_g).

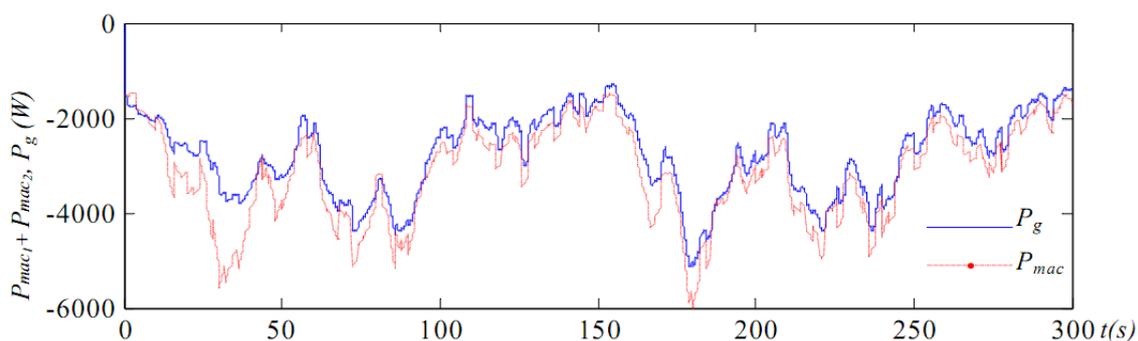


Figure 102 - Puissance éolienne totale (P_{mac}) et puissance injectée au réseau (P_g)

Le maintien de la tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu (Figure 103) est assuré par les systèmes de stockage qui, en raison de sollicitations différentes,

⁸ Des vecteurs redondants représentent des configurations d'états des interrupteurs du convertisseur NPC différentes, à l'origine de sollicitations différentes des condensateurs du bus continu (charge, décharge ou *statu quo*), mais qui permettent d'obtenir en sortie du convertisseur la même tension.

⁹ Cette partie des travaux a fait l'objet de validations par simulation numérique (à l'échelle de puissance de la plateforme), à l'aide de *Matlab Simulink*, une configuration expérimentale n'étant pas réalisable.

voient leurs niveaux de charge évoluer de façons distinctes (Figure 104). L'équilibre des états de charges ne peut alors être garanti, et des phases de saturation peuvent apparaître.

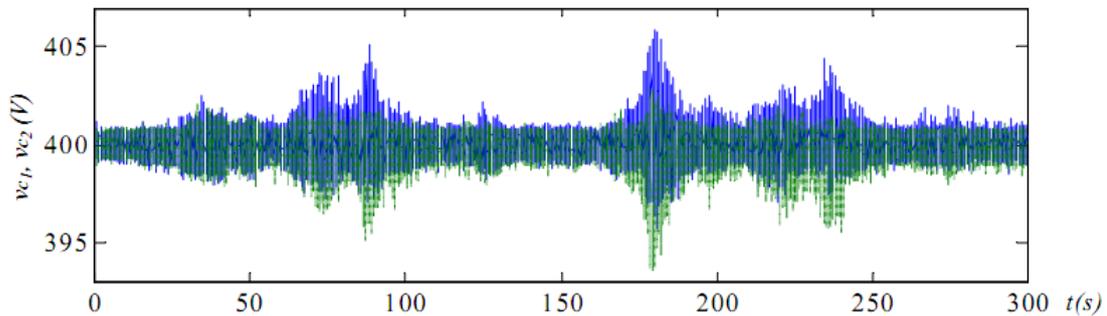


Figure 103 - Tensions aux bornes des deux condensateurs

Le déséquilibre entre les niveaux de stockage se concrétise par une contribution limitée du stockage au lissage de la puissance transmise au réseau, comme cela se voit sur la Figure 102.

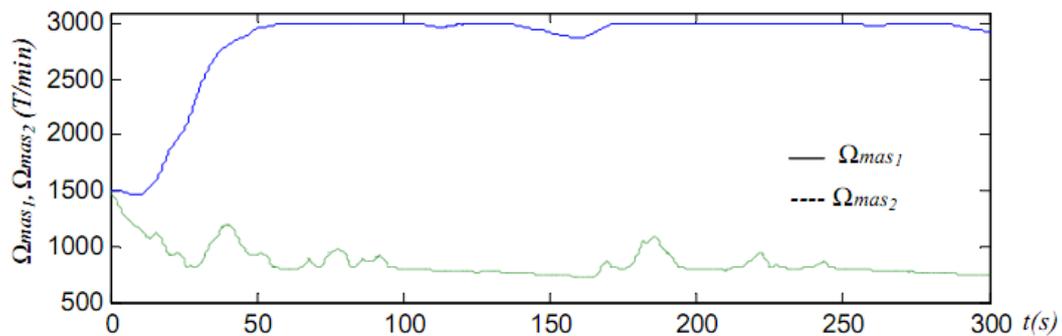


Figure 104 - Vitesse des deux volants d'inertie sans utilisation des vecteurs redondants

2) Avec utilisation des vecteurs redondants

Pour répartir l'énergie totale stockée, c'est à dire tenter d'égaliser les vitesses des deux volants, l'application des vecteurs redondants est envisagée. Pour un même niveau de tension en sortie du convertisseur NPC, elle consiste à appliquer volontairement le vecteur redondant déchargeant le condensateur aux bornes duquel est connecté le volant d'inertie qui a la plus grande vitesse. En conséquence, le système de supervision sollicite beaucoup plus ce dernier pour rééquilibrer le bus, entraînant ainsi la diminution de sa vitesse de rotation. Les Figure 105 et Figure 106 montrent qu'il est envisageable d'équilibrer les deux vitesses de rotation des SISE, et donc les niveaux de stockage, et de maintenir les tensions aux bornes des condensateurs équilibrées.

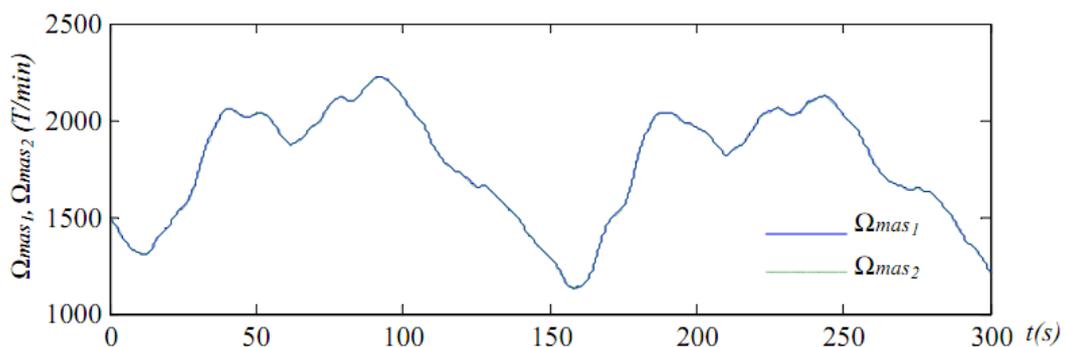


Figure 105 - Vitesses des deux volants d'inertie

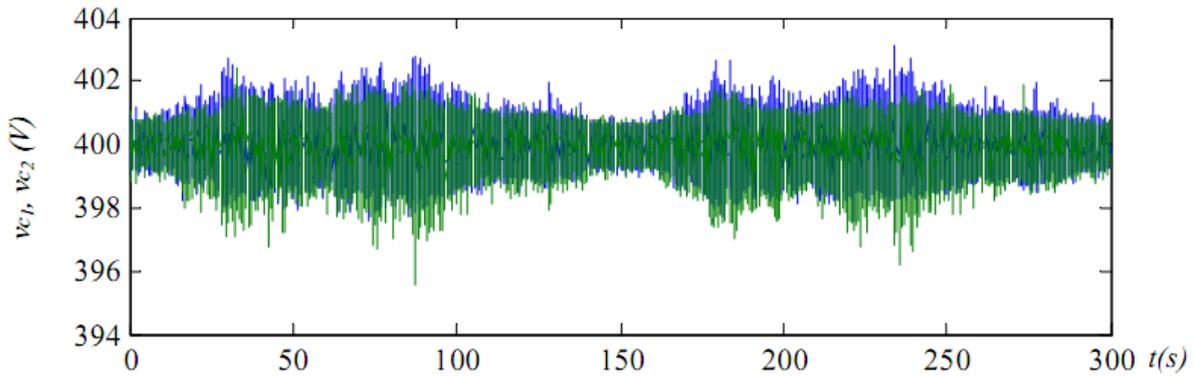


Figure 106 - Tensions aux bornes des deux condensateurs

La meilleure exploitation des dispositifs de stockage permet un meilleur lissage de la puissance P_g injectée au réseau (Figure 107).

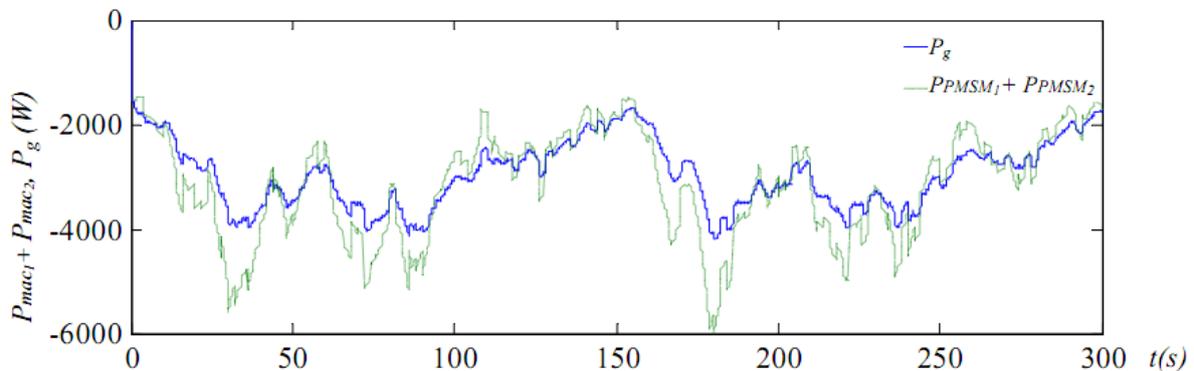


Figure 107 - Puissance éolienne totale (P_{mac}) et puissance injectée au réseau (P_g)

c. Conclusions sur les travaux de thèse d'Omar BOUHALI

Les travaux menés dans le cadre de la thèse d'Omar BOUHALI exploitent le convertisseur multiniveaux, de type NPC, comme interface de raccordement d'éoliennes associées à du stockage inertielle, au réseau électrique.

Cette interface électronique de puissance offre des degrés de liberté, dans un premier temps, pour le raccordement des générateurs éoliens et du stockage, dans un second temps, en termes de commande, en vue, par exemple, de contribuer à l'équilibrage des condensateurs qui constituent le bus DC.

Lors de ces travaux, une supervision à base de logique floue a été implantée, afin de procéder au lissage de la puissance envoyée au réseau. Cette supervision est issue de travaux précédents, réalisés lors de la thèse de Gabriel CIMUCA.

D'abord avec un seul système « Générateur Eolien & Système Inertielle » (GESI) connecté à la totalité du bus DC. Dans cette configuration, la tension totale du bus continu est maintenue par le stockage inertielle, tandis qu'une commande appropriée du convertisseur NPC permet l'équilibrage des tensions aux bornes de chaque condensateur. Le système parvient à envoyer une puissance lissée au réseau. Des essais expérimentaux valident ces résultats.

Enfin, le raccordement de deux GESI est envisagé, chacun aux bornes d'un condensateur du bus DC. Le même superviseur à base de logique floue est implanté. Les essais par simulation montrent que la détermination des références de puissance destinées aux deux systèmes inertiels ne permet pas d'assurer la répartition de l'énergie stockée entre

les deux volants, et les stockages peuvent, au final, saturer, en valeur basse et haute. Il faut alors adapter la commande du convertisseur NPC, afin de contribuer à la répartition de l'énergie stockée, de façon équivalente entre les deux systèmes de stockage.

Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation des convertisseurs multiniveaux dans le cadre du raccordement de la production éolienne, associée à du stockage, au réseau électrique. Tout d'abord, envisager l'étude des solutions de raccordement proposées, en mode de fonctionnement normal, puis en mode de fonctionnement dégradé. Alors, les possibilités offertes par les redondances structurelles, les capacités d'échanges d'énergie entre les systèmes de stockage, ...etc. sont autant de pistes à étudier. De plus, il serait intéressant d'étudier d'éventuelles adaptations des concepts développés dans les présents travaux, à des architectures multiniveaux au développement plus récent, telles que les convertisseurs MMC (Modular Multi-level Converter).

2. Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable

Les travaux de thèse de Stefan BREBAN s'inscrivent dans le contexte de l'intégration de la production décentralisée d'origine renouvelable dans les réseaux électriques, et plus particulièrement les microcentrales hydroélectriques.

Les systèmes de conversion électromécanique utilisés couramment dans les microcentrales hydroélectriques reposent sur les machines synchrones à rotor bobiné ou les machines asynchrones à cage, qui possèdent une configuration simple, mais qui peuvent assurer un fonctionnement efficace seulement à l'aide des dispositifs de contrôle mécanique ou électrique.

Le système de conversion électromécanique, proposé dans ces travaux, utilise une machine asynchrone à double alimentation (MADA), pilotée par le rotor [114, 115]. La MADA est accouplée, sur le même arbre, à une machine synchrone à aimants permanents (MSAP), débitant sur le circuit rotorique de la MADA. Deux convertisseurs à MLI, réversibles, en mode « back-to-back », réalisent l'interface électrique entre les deux machines (Figure 108).

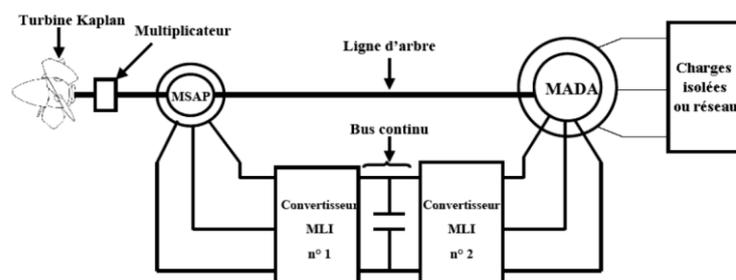


Figure 108 - Structure de microcentrale proposée

L'objectif général de ces travaux est l'étude, par simulations et expérimentations, sur la plateforme d'essais située sur le site de HEI, du fonctionnement de ce système de conversion électromécanique connecté sur réseau ou sur charge isolée [106, 107]. La contribution que j'ai apportée à ces travaux concerne l'aspect expérimental. A titre d'illustration, seuls les essais portant sur le raccordement à une charge isolée sont repris.

a. Les moyens d'essai

La configuration de la plateforme utilisée est présentée à la Figure 109. Elle comporte trois parties :

- L'émulateur de turbine hydraulique,

- Le système électromécanique comprenant, essentiellement, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et la machine asynchrone à double alimentation (MADA),
- Le réseau ou la charge isolée.

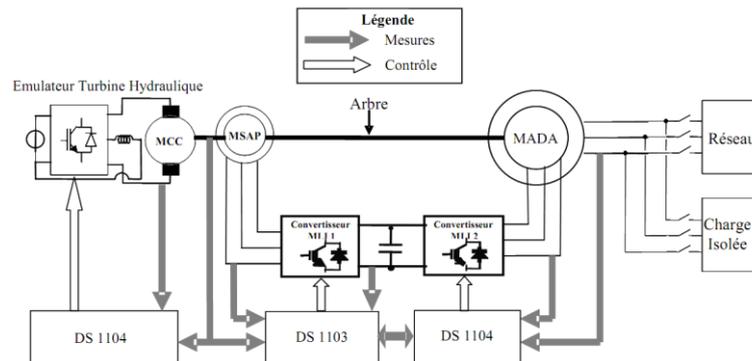


Figure 109 - Schéma de la plateforme expérimentale

b. Résultats expérimentaux du fonctionnement sur charge isolée

La turbine est supposée soumise à un débit hydraulique constant. En ce qui concerne la commande de la MADA, les flux de référence imposés sont ceux qui permettent, à vide, d'obtenir la tension nominale, égale à 130 V. Dans les essais, des charges résistive et inductive réglables sont utilisées, en veillant à permettre un fonctionnement du système sur une plage étendue de vitesses.

La Figure 110 (a) représente la réponse en puissance du système de production aux sollicitations des charges résistive et inductive.

Le système de conversion électromécanique fonctionne à vitesse variable, comme le montre la Figure 110 (b).

En sortie de MADA, les tensions statoriques sont maintenues à leur valeur nominale efficace de 130V (Figure 110 (c)), à la fréquence de 50Hz (Figure 110 (d)).

c. Conclusions

Les travaux de thèse de Stefan BREBAN s'inscrivent dans le contexte de l'intégration de la production décentralisée d'origine renouvelable dans les réseaux électriques, et plus particulièrement les microcentrales hydroélectriques.

Le système de conversion électromécanique, proposé dans ces travaux, utilise une machine asynchrone à double alimentation (MADA), pilotée par le rotor (Figure 108). Le système complet (Figure 109) peut être raccordé au réseau électrique, ou débiter sur une charge isolée. L'étude a également envisagé d'associer ce système de production à une éolienne à vitesse fixe, de connecter un système de stockage sur le bus continu des convertisseurs connectés au rotor de la MADA, ...etc.

Ces travaux ont été validés par de nombreux essais expérimentaux, menés sur la plateforme du L2EP située sur le site de HEI.

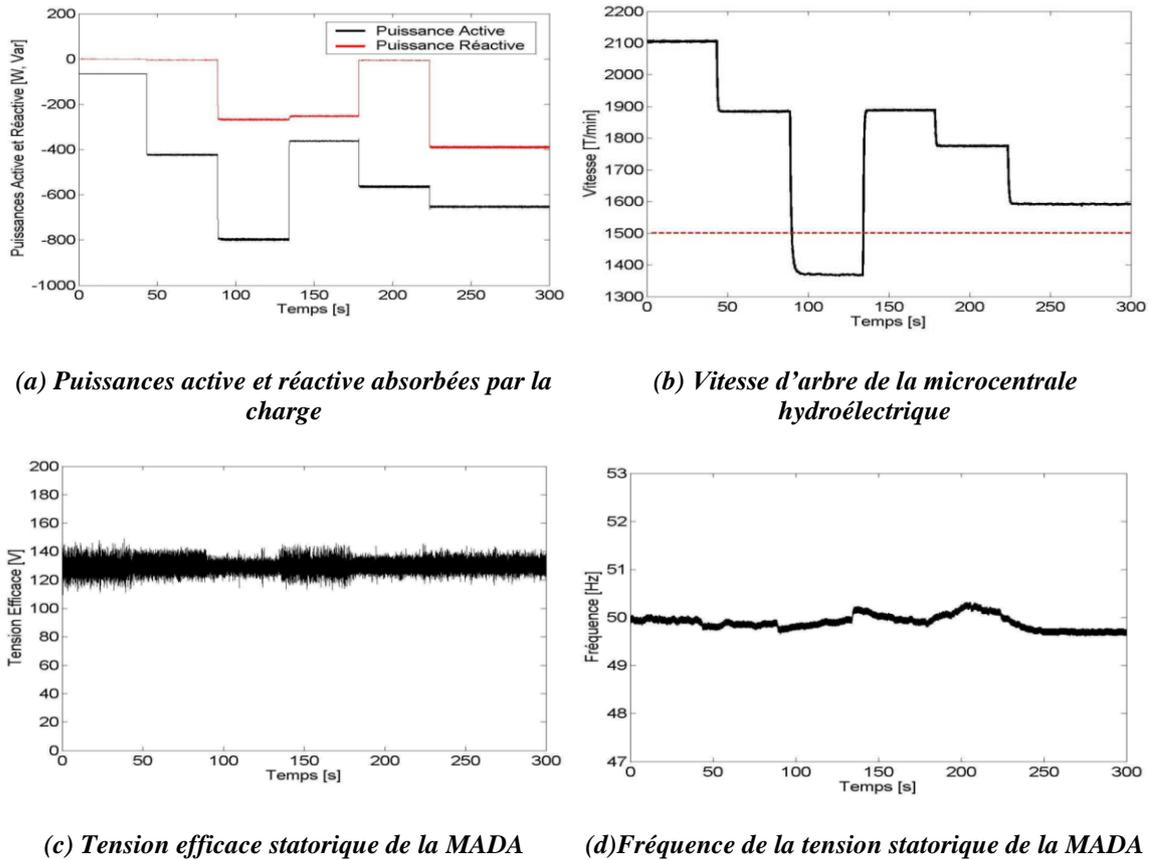


Figure 110 – Relevés expérimentaux du fonctionnement sur charge isolée

3. Contribution d'une éolienne à vitesse variable au réglage primaire de fréquence, basé sur un superviseur à règles floues

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Vincent COURTECUISSÉ [73, 88, 89, 108]. Ma contribution porte essentiellement sur le développement expérimental, en collaboration avec Mostafa EL MOKADEM, post-doctorat sur le projet MEDEE6-1 [88, 89, 108, 109].

Je présente le principe de supervision développé afin de permettre à une éolienne à vitesse variable de participer au réglage primaire de la fréquence, avant d'exposer les résultats de validation expérimentale [88, 89, 108, 109].

a. Problématique

L'éolienne à vitesse variable, sujet de cette étude, est présentée à la Figure 111.

La problématique est ici de contrôler l'éolienne en assurant le maintien d'une réserve d'énergie, afin de libérer celle-ci en fonction de l'évolution de la fréquence des grandeurs du réseau, au point de raccordement. Le comportement du système de production éolien, que l'on souhaite analogue à un système de production classique vis-à-vis de ces variations de fréquence, est rendu possible grâce au convertisseur électronique de puissance qui assure l'interface avec le réseau, et dans lequel un statisme est introduit au niveau de la commande.

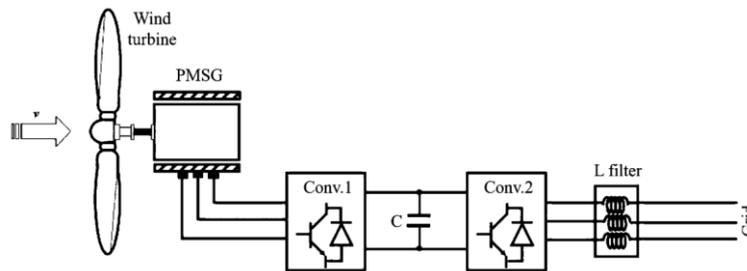


Figure 111 - Eolienne à vitesse variable

Pour éviter, d'une part, la mesure de la vitesse du vent et, d'autre part, la détermination d'un modèle précis de l'éolienne, un superviseur basé sur l'utilisation de la logique floue est retenu. Un objectif est d'assurer une réserve régulière d'énergie, même lorsque le générateur fonctionne sous la puissance nominale. A cette fin, le superviseur détermine simultanément les références de puissance du générateur, ainsi que l'angle de calage de référence des pales de l'éolienne.

b. Stratégie de commande multi variable, à base de règles floues

i. Stratégie de commande et supervision

La complexité de commander l'éolienne en vue d'atteindre les objectifs présentés, réside, dans un premier temps, dans la difficulté d'établir avec précision un modèle mathématique de l'éolienne, et dans un second temps, dans la gestion des différentes variables, dépendantes de données d'entrées fluctuantes et aléatoires (la fréquence du réseau, qui dépend des variations de charge ; La vitesse du vent, liée aux conditions météorologiques). De plus, contrairement à la fréquence, la vitesse du vent que l'on pourrait utiliser pour la commande, est difficilement mesurable avec précision.

Afin de participer au réglage primaire de fréquence, la puissance de référence appliquée à la génératrice éolienne, P_{ref} , doit tenir compte d'une réserve de puissance, sur une large gamme de puissances éoliennes, sans mesure de la vitesse du vent. Cette réserve peut être obtenue en agissant sur le couple de la génératrice et sur l'angle de calage des pales. L'utilisation simultanée des deux méthodes permet d'optimiser les performances, au prix du développement d'une stratégie multi variable de commande, en vue de déterminer P_{ref} . Cette raison, ainsi que le caractère aléatoire et fluctuant des données d'entrée, justifie l'emploi de la logique floue pour le développement des stratégies de commande, en vue de déterminer P_{ref} , avec les objectifs suivants :

- Déterminer les puissances de référence en fonction de la vitesse de la turbine, de la puissance générée et de la fréquence du réseau,
- Permettre un réglage primaire de fréquence, quelque soit la vitesse du vent.

Deux superviseurs flous sont développés : l'un pour la détermination de l'angle de calage de référence β_{ref} , un autre pour la détermination de la référence de puissance destinée à la génératrice éolienne, P_{ref} . Les entrées de ce superviseur sont la vitesse de rotation de la turbine éolienne, la variation de la fréquence du réseau, la puissance de la turbine éolienne et la puissance de référence à envoyer au réseau (Figure 112).

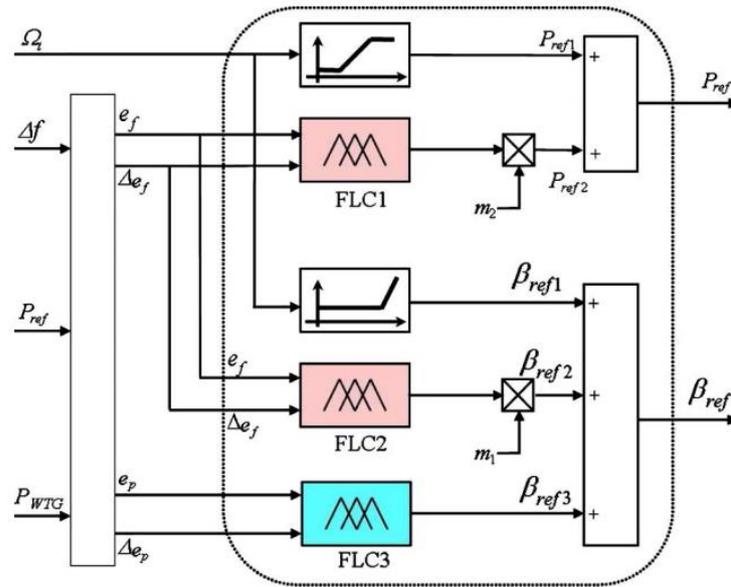


Figure 112 – Superviseur flou

c. Validation expérimentale

Pour ces essais, la plateforme est configurée pour une application éolienne à vitesse variable connectée au réseau, cette fois-ci sans association à un système de stockage (Figure 113).

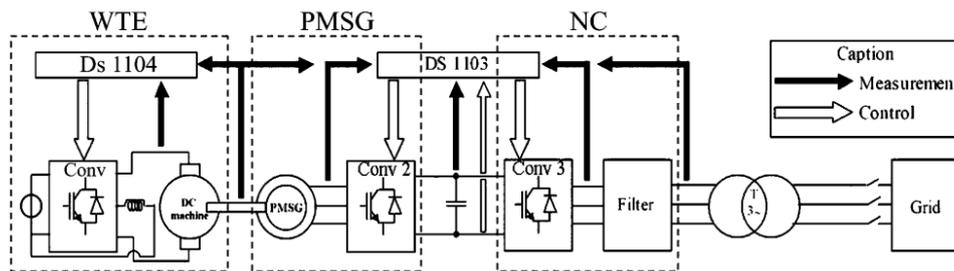


Figure 113 - Configuration de la plateforme expérimentale

i. Implantation du superviseur

L'implantation du superviseur flou a nécessité la simplification des surfaces obtenues à l'issue de l'étude théorique. La méthode utilisant des tables de données, associée à une interpolation linéaire, a donc été mise en œuvre, pour aboutir aux surfaces présentées à la Figure 114.

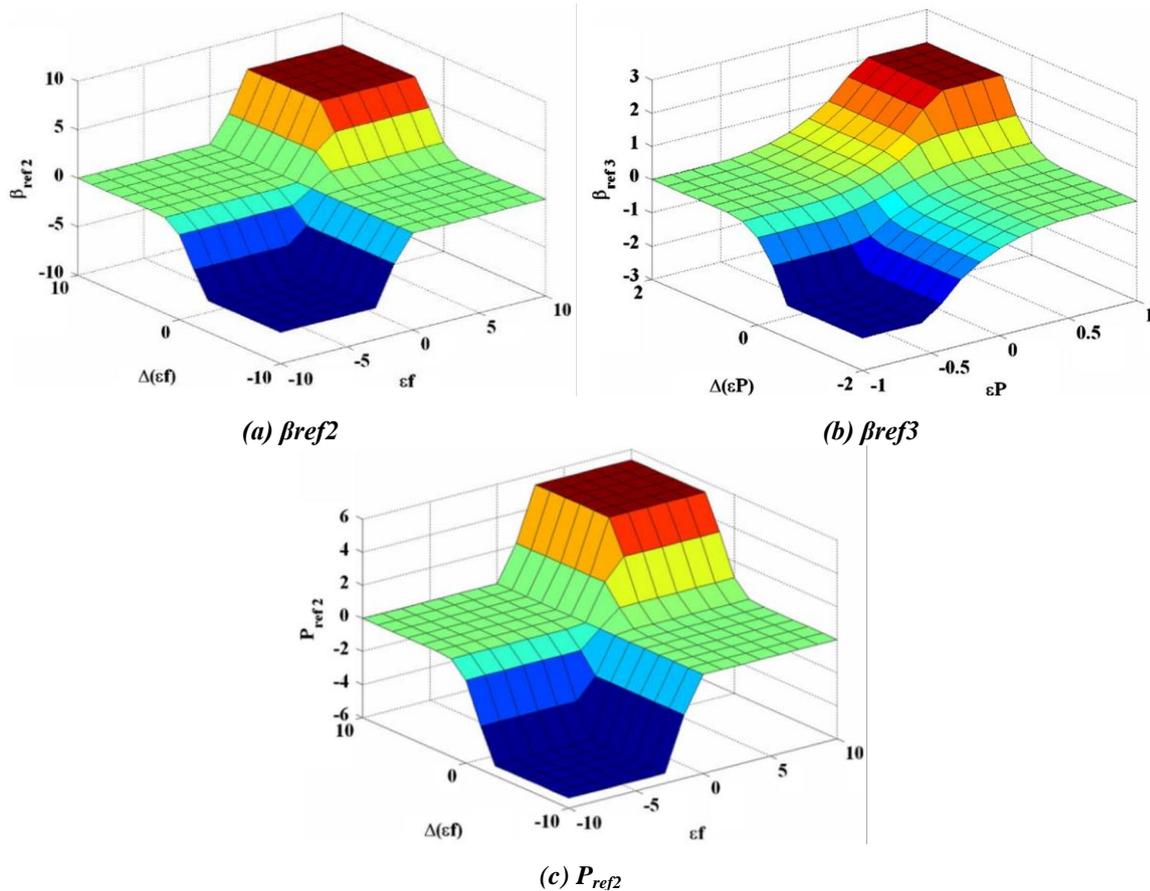


Figure 114 – Les surfaces issues de l'étude théorique du superviseur flou sont simplifiées par la méthode des tables de données

ii. Réglage primaire de fréquence : Mode opératoire

Les installations du laboratoire ne permettent pas d'envisager une variation réelle de la fréquence du réseau électrique auquel est connectée la plateforme. Le stimulus « *variation de fréquence* » envoyé en entrée du superviseur est donc artificiel, se présentant sous la forme d'un échelon Δf , positif ou négatif.

iii. Résultats expérimentaux

Les essais présentés sont obtenus pour un vent moyen (Figure 115).

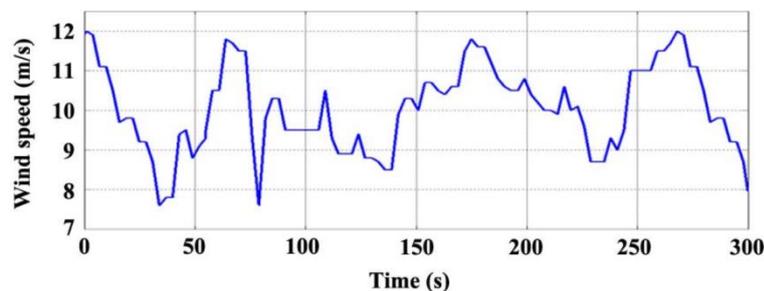


Figure 115 - Vitesse de vent (moyen)

Le superviseur flou permet de maintenir une réserve de puissance, comme le montre le relevé de la Figure 116. Pour l'instant, aucune variation de fréquence n'est considérée.

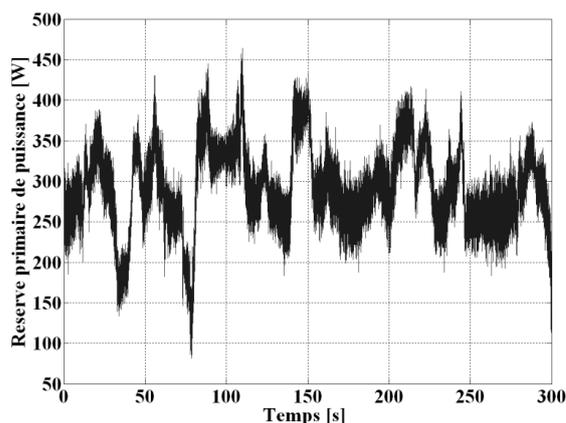


Figure 116 - Réserve primaire de puissance

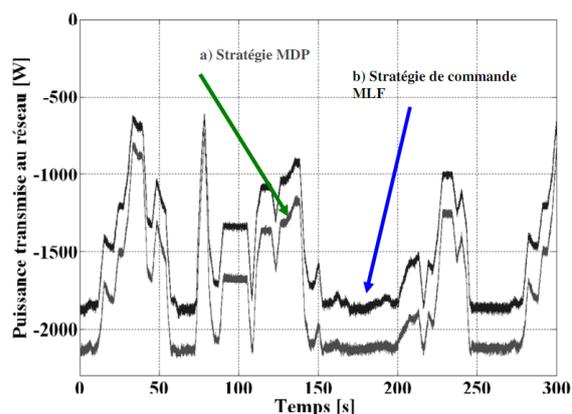


Figure 117 – Puissances renvoyées au réseau (sans variation de fréquence)

Cette réserve entraîne une diminution de la puissance renvoyée au réseau. La Figure 117 montre la puissance injectée au réseau lorsque la puissance de référence de la génératrice est issue d'une stratégie à extraction maximale de puissance (MDP - Figure 117 (a)) et celle obtenue avec un superviseur flou, visant à maintenir une réserve (MLF - Figure 117 (b)).

La Figure 118 montre l'évolution de la vitesse de rotation de la génératrice, en trait pointillé pour la stratégie à extraction maximum de puissance, en trait plein pour la stratégie à réserve de puissance. On observe que celle-ci demeure globalement inférieure à la précédente. La vitesse de rotation ne dépasse pas la valeur nominale, grâce à l'action de l'angle de calage (Figure 119).

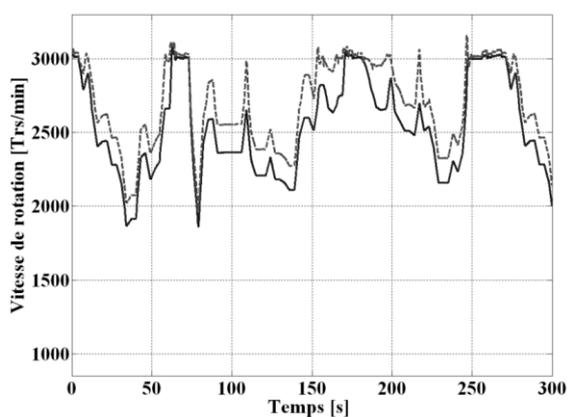


Figure 118 - Vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice

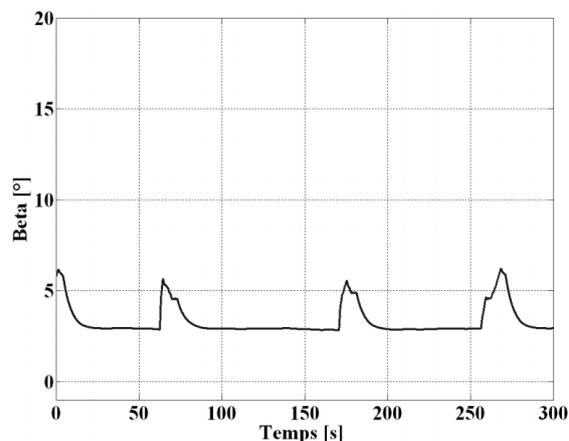


Figure 119 - Angle de calage des pales

Afin d'observer le comportement du système de production éolien aux variations de fréquence du réseau électrique, un stimulus fictif est généré, sous forme d'échelons de fréquence de + 1Hz à 100s et 200s, et - 1Hz à 50s, 150s et 250s (Figure 120).

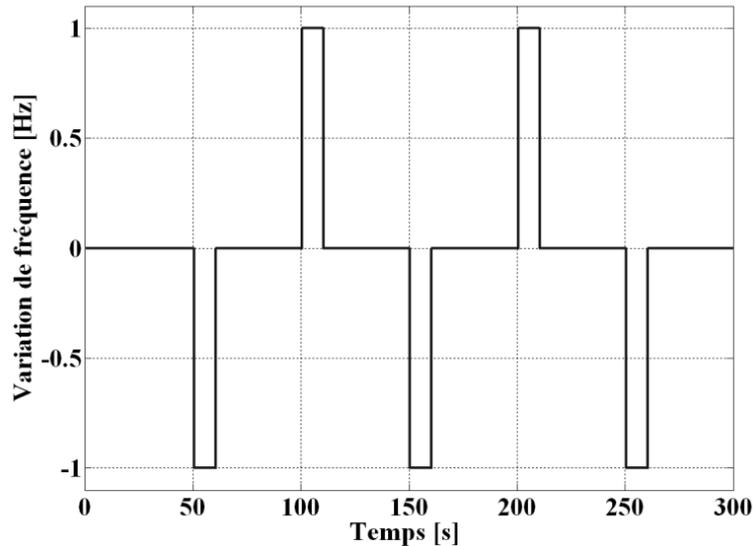


Figure 120 - Echelon fictif de fréquence

La variation (fictive) de fréquence au niveau du réseau sollicite le système de production, via sa réserve de puissance (Figure 121) :

- Lorsque la fréquence du réseau augmente ($\Delta f = +1\text{Hz}$), l'éolienne accroît sa réserve de puissance (Figure 121, à 100s et 200s), afin de réduire la puissance qu'elle injecte au réseau (Figure 122, à 100s et 200s),
- Lorsque la fréquence du réseau diminue ($\Delta f = -1\text{Hz}$), l'éolienne diminue sa réserve de puissance (Figure 121, à 50s, 150s et 250s), afin d'augmenter la puissance qu'elle injecte au réseau (Figure 122, à 50s, 150s et 250s).

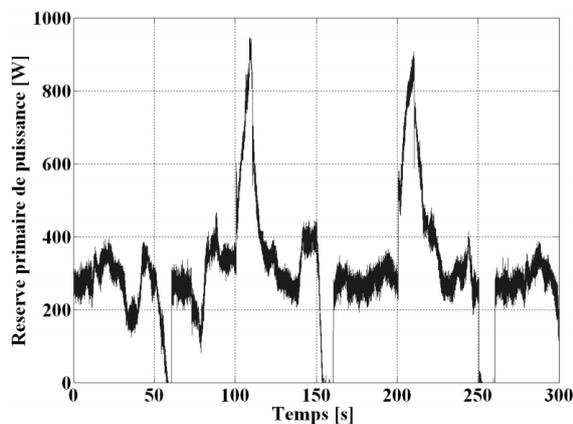


Figure 121 - Réserve primaire de puissance

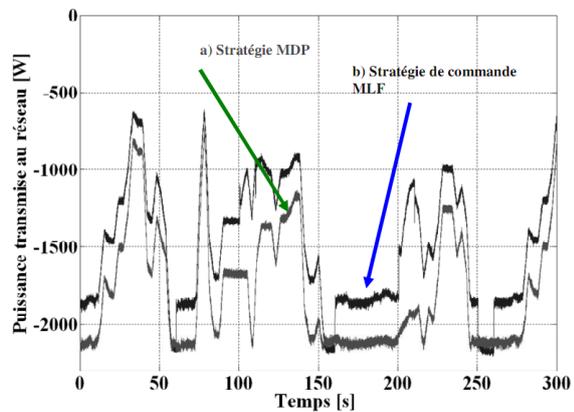


Figure 122 – Puissances renvoyées au réseau (avec variation de fréquence)

La Figure 123 représente l'évolution de l'angle de calage des pales, qui contribue au réglage primaire de la fréquence.

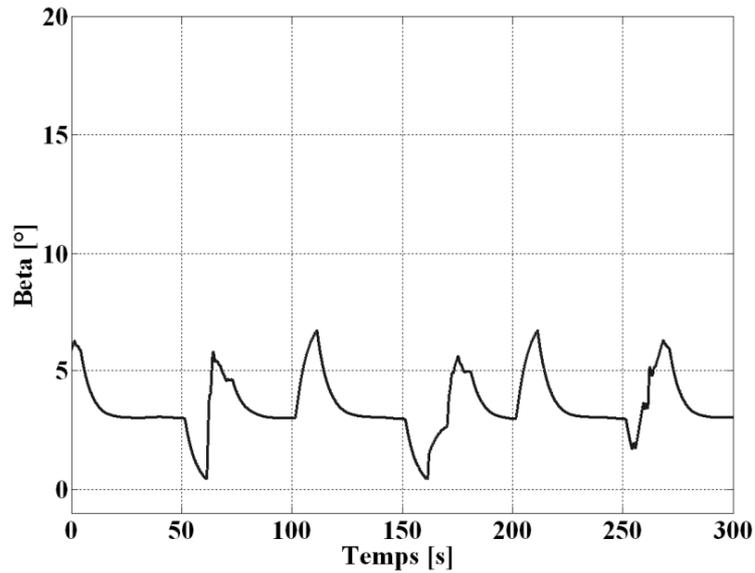


Figure 123 - Angle de calage des pales

d. Conclusion

Les travaux de thèse de Vincent COURTECUISSÉ ont traité de la *Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique*. Une contribution de ces travaux est de déterminer un superviseur flou permettant à une éolienne à vitesse variable seule, de participer au réglage primaire de fréquence. Une part importante de validation expérimentale a permis de valider ces travaux, via des essais menés sur la plateforme *Energies Electriques*.

Ces travaux témoignent des possibilités que l'on peut attendre des systèmes éoliens à vitesse variable, à condition de leur conférer l'«intelligence» nécessaire à la détermination des grandeurs de référence du système.

SYNTHESE

A. Bilan

Depuis mon intégration à l'équipe RESEAUX du L2EP, en juin 2002, mes travaux ont pour **objectifs** de contribuer, tout d'abord, à un **accroissement de la présence des énergies renouvelables dites « subies » dans les réseaux électriques**, puis de contribuer à **rendre plus performants**, d'un point de vue **énergétique**, les **systèmes électriques de puissance**.

Les défis scientifiques que je contribue à relever au travers de ces travaux et des projets que je porte, sont :

- l'**intégration** et la **valorisation du stockage** d'électricité **dans les réseaux électriques** de tout type,
- le développement de **nouvelles architectures HVDC**,
- le développement de **techniques de supervision énergétique temps réel**, adaptées et optimisées pour des systèmes complexes multi sources, multi charges, dont certaines grandeurs peuvent présenter un caractère fortement variable et aléatoire, et pouvant intégrer des dispositifs de stockage (Sources Hybrides d'Energie - SHE).

Ce dernier défi constitue le cœur de ce mémoire scientifique, où mes **contributions méthodologiques** sont présentées, **en vue de développer** :

- des **stratégies de supervision énergétique en temps réel**,
- une démarche structurée d'**optimisation de ces superviseurs**,
- des solutions visant à l'**implantation en temps réel des superviseurs flous**, à des fins de validation expérimentale.

Développements méthodologiques

Le **développement méthodologique des stratégies de supervision énergétique** repose sur une structuration par étapes :

- définir les **objectifs** que l'on souhaite voir atteints par la Source Hybride d'Energie, les **contraintes** internes et externes au système étudié, puis les **moyens d'actions** disponibles. Développer les **indicateurs** nécessaires à la vérification de l'atteinte des objectifs.
- Identifier, en fonction de ces éléments, les **grandeurs d'entrée** (mesures, informations provenant d'autres niveaux de supervision, ...) et de **sortie** (moyens d'action) du superviseur, et élaborer ainsi la **structure du superviseur**.
- Choisir les **outils** adaptés au développement du superviseur. Selon les objectifs visés, des solutions fréquentielles, ou des correcteurs, peuvent être envisagés. Mais en raison du caractère aléatoire de certaines grandeurs et du grand nombre de variables à traiter, la **logique floue** sera également utilisée, menant au développement de **superviseurs flous**.
- Identifier les différents **états de fonctionnement** du système énergétique étudié, ainsi que les **conditions** à l'origine des **transitions** entre ces états.
- Déterminer, de façon empirique, les **fonctions d'appartenance**, permettant de traiter à l'aide de la logique floue, les grandeurs physiques d'entrée et de sortie.

- Déterminer les **règles floues** du superviseur.

Le superviseur ainsi développé peut ensuite être soumis à **optimisation** de ses paramètres. Cette phase est également structurée par étapes :

- Choisir les **objectifs** pour lesquels le superviseur va être optimisé, et développer les **indicateurs** permettant d'apprécier la qualité de l'optimisation.
- Identifier les paramètres à intégrer au processus global. Dans le cas de superviseurs flous, il s'agit des **paramètres des fonctions d'appartenance**, et de gains.
- Déterminer, parmi ces **paramètres**, quels sont **les plus influents** sur les objectifs visés. Cette étape repose sur l'utilisation des **plans d'expérience**.
- Procéder à l'optimisation proprement dite, à l'aide des **algorithmes génétiques**, des paramètres identifiés comme influents.

Enfin, des **méthodologies d'implantation des superviseurs flous, en temps réel**, sont proposées, visant à simplifier les solutions obtenues pour leur intégration au cœur de moyens expérimentaux :

- Une **première solution** repose sur la **linéarisation des surfaces** à trois dimensions, non linéaires, obtenues lorsque l'on représente une grandeur de sortie du superviseur en fonction de deux grandeurs d'entrée. Sa mise en œuvre est simple, mais longue lorsque le nombre de variables augmente, puisque pour chaque grandeur de sortie, il faut alors envisager autant de traitements qu'il y a de paires différentes de variables en entrée.
- Une **seconde solution** repose sur l'utilisation, à la place du superviseur flou, de **tables de données**, construites par échantillonnage des surfaces non linéaires décrites ci-dessus et mémorisation des valeurs prélevées. L'erreur inhérente à cette simplification peut être estimée, et conditionnera le choix du nombre de points à envisager pour l'échantillonnage, en sachant qu'un compromis *erreur vs volume de la mémoire* devra être trouvé, en fonction des contraintes du système informatique accueillant le superviseur.

Au L2EP, sur le site de HEI, ces validations expérimentales sont réalisées sur la **plateforme *Energies Electriques***, dont j'ai pris le développement en main lors de mon arrivée à HEI. Cette plateforme regroupe de nombreux équipements (convertisseurs électroniques de puissance, machines électriques, stockage par volant d'inertie, batterie et supercondensateurs, sources et charges programmables, cartes temps réel dSpace™, ...) permettant d'émuler les Sources Hybrides d'Energie, sur lesquelles portent nos développements.

Deux cas d'application ont été envisagés afin de valider nos développements méthodologiques, visant respectivement les domaines des **réseaux terrestre** et **embarqué** (aéronautique) :

- Une éolienne à vitesse variable associée à un système inertiel de stockage d'énergie,
- Un réseau local DC à échanges d'énergie, utilisant du stockage par supercondensateurs.

Autres travaux

Enfin, ma contribution à d'autres travaux a également été présentée dans le mémoire scientifique.

Les travaux d'Omar BOUHALI, tout d'abord, où l'étude d'une interface électronique de puissance, à base de convertisseurs multiniveaux NPC (Neutral Point Clamped) a été réalisée, en vue de raccorder, au réseau électrique, des générateurs éoliens associés à des systèmes inertiels de stockage d'énergie. Ces dispositifs statiques, en raison d'un bus continu réalisé par la mise en série de condensateurs, offrent des degrés de liberté en termes de connexion des éoliennes et des dispositifs de stockage. Il a été montré qu'un superviseur flou, associé à une commande adaptée du convertisseur (utilisant des redondances de vecteurs de commande), permet un renvoi de puissance lissée vers le réseau électrique, tout en maintenant l'équilibre d'une part, entre les différents niveaux de stockage, d'autre part, entre les différentes tensions de condensateurs.

Les travaux de Stefan BREBAN, ensuite portant sur l'étude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable. Alors que les systèmes de conversion électromécanique utilisés couramment dans les microcentrales hydroélectriques reposent sur les machines synchrones à rotor bobiné ou les machines asynchrones à cage, le système de conversion électromécanique, proposé dans ces travaux, utilise une machine asynchrone à double alimentation (MADA), pilotée par le rotor. L'objectif général de ces travaux est l'étude, par simulations et expérimentations, sur la plateforme d'essais située sur le site de HEI, du fonctionnement de ce système de conversion électromécanique connecté sur réseau ou sur charge isolée.

Les travaux de Vincent COURTECUISSSE et Mostafa EL MOKADEM, enfin, traitant de la contribution d'une éolienne à vitesse variable au réglage primaire de fréquence, basé sur un superviseur à règles floues. Afin d'atteindre cet objectif, la puissance de référence appliquée à la génératrice éolienne, P_{ref} , doit tenir compte d'une réserve de puissance, sur une large gamme de puissances éoliennes, sans mesure de la vitesse du vent. Cette réserve peut être obtenue en agissant sur le couple de la génératrice et sur l'angle de calage des pales. Deux superviseurs flous sont développés : l'un pour la détermination de l'angle de calage de référence β_{ref} , un autre pour la détermination de la référence de puissance destinée à la génératrice éolienne, P_{ref} . Ma contribution a porté sur l'implantation de ces solutions en temps réel, où les méthodes de simplification envisagées précédemment ont été employées.

B. Perspectives

Perspectives portant sur le développement de supervisions énergétiques

A **court terme**, mes perspectives concernent la poursuite des développements méthodologiques des superviseurs flous à court, moyen et long terme. Je compte développer ces perspectives à courte échéance dans des projets actuellement en cours de réalisation.

Nous avons montré que la logique floue est adaptée au développement d'une supervision énergétique multi-variable intégrant plusieurs unités énergétiques (sources, charges, stockages). Il existe deux types de modèles flous : le modèle linguistique (de *Mamdani*), que nous avons utilisé, et le modèle de *Takagi-Sugeno*, qui utilise des fonctions linéaires pour la conclusion des règles [116]. Le calcul de la sortie ne se fait plus par le biais du calcul du centre de gravité d'une surface résultante mais par une pondération des sorties calculées pour chaque règle. Ces poids constituent alors de nouveaux paramètres ayant une probable influence sur les objectifs. Nous pouvons donc envisager de les intégrer au cycle d'optimisation décrit dans ce mémoire, et améliorer les performances du superviseur développé.

Nous avons vu que ce cycle d'optimisation s'articule en deux parties, et utilise deux outils (plans d'expérience pour déterminer l'influence des paramètres sur les objectifs à atteindre, algorithmes génétiques pour la phase d'optimisation proprement dite). Pour la première phase, nous avons utilisé les plans d'expérience factoriels complets à 2 niveaux. Lorsque les systèmes deviennent plus complexes, et que le nombre de paramètres (facteurs) à traiter augmente, recourir aux plans fractionnaires peut être utile pour diminuer le nombre d'expériences à réaliser. La contrepartie réside dans l'interprétation des résultats, car la réduction du nombre d'expériences entraîne une perte d'informations (il manque des valeurs d'interactions). Il faut donc créer soit même des informations de remplacement, réalistes et compatibles avec l'étude menée (sous formes d'hypothèses), qu'il faudra vérifier a posteriori. Pour ce travail, une expertise dans ce domaine sera nécessaire (équipe *Optimisation* du L2EP, ...).

Le développement des superviseurs, ainsi que leur optimisation, devra intégrer les questions du dimensionnement de la capacité des dispositifs de stockage et de leur vieillissement. Dans [103], nous avons proposé une méthode, intégrant le dimensionnement du stockage dans le processus d'optimisation du superviseur flou, *via* la détermination de la tension nominale des supercondensateurs et leur capacité énergétique. Le développement de cette méthode va être poursuivi au travers du projet CONIFER et la thèse de P. PANKOVITS, en mettant à profit l'expertise de l'équipe *Optimisation* du L2EP. La problématique du vieillissement, quant à elle, est particulièrement difficile à prendre en compte, car elle nécessite la connaissance de lois de vieillissement ou des modèles (type impédance) simples et précis [104, 117, 118] afin de réaliser des observateurs. Pour ce travail, une expertise dans ce domaine sera nécessaire (équipe *Electronique de puissance* du L2EP, Laboratoire d'Electromécanique de l'Université de Technologie de Compiègne, ...).

A **moyen terme**, le développement des superviseurs flous devra intégrer des notions probabilistes, afin de mieux prendre en compte le caractère aléatoire de certaines grandeurs des systèmes étudiés et de leur environnement (PFSL - Probabilistic Fuzzy Logic System vs FLS - Fuzzy Logic System) [119-122]. La différence significative entre PFLS et FLS réside dans la procédure de fuzzyfication, basée, dans le cas des PFLS, sur des ensembles flous probabilistes.

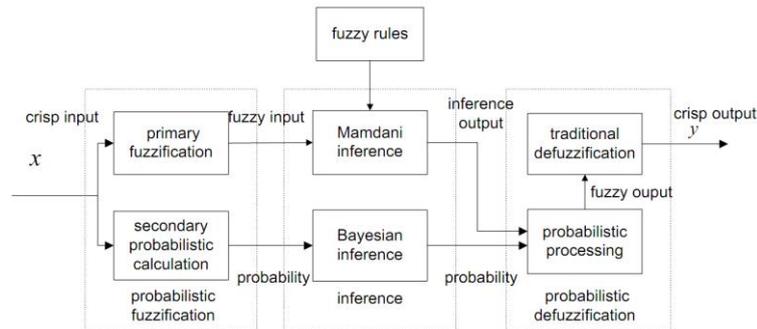


Figure 124 - Structure d'un PFSL

A plus **long terme**, mes perspectives, dans le cadre du développement des réseaux électriques « intelligents » (Smarts Grids), où un grand nombre de Sources Hybrides d'Énergies seront réparties au sein de structures adaptées de réseaux (micro-grids [123], ...), sont de contribuer à la décentralisation des supervisions énergétiques. Afin de permettre à ces systèmes de gagner en autonomie, je pense qu'une capacité à l'auto-apprentissage des paramètres du superviseur devra leur être donnée [124, 125]. Cet auto-apprentissage se substituera à l'expertise humaine à laquelle nous recourons, actuellement, pour le développement des superviseurs énergétiques. Ensuite, une capacité d'auto-organisation devra être déployée (via une intelligence artificielle distribuée et la mise en œuvre d'outils tels que les Systèmes Multi Agents [126] [127]). Au sein de l'équipe RESEAUX, des travaux ont été initiés[56]. Mais pour ces développements, des collaborations devront être mises en place. Au Canada, par exemple, le *Power and Energy Systems Group* de l'*Université de Waterloo*, traite de ce thème de recherche.

Perspectives portant sur le développement de nouvelles architectures de réseaux

En ce qui concerne le développement de nouvelles architectures de réseaux, mes travaux, à ce jour, portent sur les structures de type DC [42, 46]. De ces premiers travaux apparaissent des intérêts pour ces solutions : Des réductions potentielles des pertes électriques, des gains en termes de dimensionnement des câbles, des facilités à interconnecter des unités de production, consommation et stockage entre elles, ... incitent à poursuivre dans cette voie [128].

A **court terme**, dans la continuité des travaux de thèse de P. MONJEAN, une possibilité est à l'étude, de poursuivre le développement de réseaux offshores, en vue de favoriser l'intégration des énergies renouvelables, des dispositifs de stockage et le maintien, voire l'accroissement de la fiabilité. Un projet de thèse est à l'étude.

A **court et moyen termes**, la question de la protection électrique des réseaux DC se pose, et plus particulièrement, en ce qui concerne mes travaux, dans les réseaux DC basse tension (micro grids, embarqués, ...) [129-131]. Une première difficulté dans ce travail est la détection du défaut. En effet, dans des réseaux à échanges d'énergie, des courants inverses parcourant les branches d'alimentation des charges ne sont pas forcément dus à un défaut. Ensuite, les supervisions énergétiques devront être adaptées : afin d'empêcher les systèmes de stockage d'alimenter un défaut, afin de permettre la poursuite du fonctionnement de la partie saine du système énergétique, éventuellement en mode dégradé, ...

A plus **long terme**, et en lien avec ce qui a pu être décrit plus haut, le développement de structures (type DC micro grids), pour les réseaux de petite taille, de structures favorisant la production et la consommation locales, devra être mené [132]. Pour les réseaux embarqués, des études pourraient porter sur des réseaux DC de type maillé, comme cela a été proposé dans [133], en envisageant, tout d'abord, la faisabilité, les possibilités de contrôle, puis la supervision énergétique dans ce genre d'architecture.

ANNEXES

Annexe 1

Participations à jurys de thèses

Thèse de Ludovic LECLERCO

« *Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services système* », soutenue le 14 décembre 2004 à l'Université de Lille1 (France), devant la commission d'examen constituée de : D. GRENIER – Président, B. DAKYO – Rapporteur, P. BASTARD – Rapporteur, A. BOUSCAYROL – Examineur, B. ROBYNS - Directeur de thèse, **C. SAUDEMONT** – Examineur

Thèse de Gabriel CIMUCA

« *Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens* », soutenue le 2 décembre 2005 à l'Université Technologique de Cluj-Napoca (Roumanie), devant la commission d'examen constituée de : R. CIUPA – Président, I. BOLDEA – Rapporteur, A. MIRAQUI – Rapporteur, M.M. RADULESCU - Directeur de thèse roumain, B. ROBYNS - Directeur de thèse français, **C. SAUDEMONT** – Examineur

Thèse d'Omar BOUHALI

« *Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique* », soutenue le 19 avril 2007 à Alger (Algérie), devant la commission d'examen constituée de : M.O. MAHMOUDI – Président, M.N. NAIT SAID – Rapporteur, S. BACHA – Rapporteur, E.M. BERKOUK – Directeur de thèse, B. FRANCOIS – Co-Directeur de thèse, **C. SAUDEMONT** – Examineur, M. TADJINE – Invité

Thèse d'Arnaud DAVIGNY

« *Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie* », soutenue le 11 décembre 2007 à l'Université de Lille1 (France), devant la commission d'examen constituée de : J.C. MAUN – Président, Rapporteur, M. PIETRZAK-DAVID – Rapporteur, A. TOUNZI – Examineur, M. PETIT – Examineurs, B. ROBYNS - Directeur de thèse, **C. SAUDEMONT** – Examineur.

Thèse de Stefan BREBAN

« *Etude du Système de Conversion Electromécanique d'une Microcentrale Hydroélectrique à Vitesse Variable* », soutenue le 12 Décembre 2008, à l'Université Technologique de Cluj-Napoca (Roumanie), devant la commission d'examen constituée de : R. MUNTEANU – Président, E. MONMASSON – Rapporteur, I. BOLDEA –Rapporteur, B. ROBYNS, Co-Directeur de thèse, M.M. RADULESCU, Co-Directeur de thèse, **C. SAUDEMONT**, Examineur.

Thèse de He ZHANG

« *Gestion décentralisée de réseaux continus à forte disponibilité en aéronautique* », soutenue le 24 juin 2010, à l'Université de Lille1, devant la commission d'examen constituée de : F. LABRIQUE – Président, E. MONMASSON – Rapporteur, S. PIERFEDERICI – Rapporteur, N. IDIR – Examineur, M. PETIT – Examineur, B. ROBYNS – Directeur de thèse, **C. SAUDEMONT** – Examineur, R. MEURET.

Thèse de Mehdi NASSER

« Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés », soutenue à HEI Lille, le 5 mai 2011, devant la commission d'examen constituée de : F. LABRIQUE - Président, C. NICHITA - Rapporteur, J-C. VANNIER - Rapporteur, X. GUILLAUD - Examineur, B. ROBYNS - Directeur de Thèse, C. SAUDEMONT - Examineur.

Thèse de Pascal MONJEAN

« *Architecture et gestion de réseaux de production d'énergie électrique offshore* », soutenue à HEI Lille, le 26 septembre 2012, devant la commission d'examen constituée de : F.MEIBODY-TABAR - Rapporteur, X. ROBOAM - Rapporteur, E. MONMASSON - Examineur, X. GUILLAUD - Examineur, B. ROBYNS - Directeur de Thèse, **C. SAUDEMONT** - Examineur, J. DELANOE.

Annexe 2

L'AIE et les principaux scénarios d'étude

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) est un organisme indépendant qui travaille à garantir une énergie fiable, abordable et propre pour ses pays membres, et au-delà. Fondée en réponse à la crise pétrolière de 1973, le rôle initial de l'AIE était d'aider les pays à se coordonner, en vue de trouver une réponse commune aux importantes perturbations liées à l'approvisionnement en pétrole. Bien que cet aspect essentiel de son travail demeure, l'AIE a évolué et a élargi son champs d'action, en fournissant aujourd'hui des statistiques, analyses et recommandations.

Des publications telles que *World Energy Outlook*, *Energy Technology Perspectives*, *Key World Energy Statistics*, et autres *RoadMaps* sont autant de sources d'informations sur l'évolution du secteur de l'énergie à l'échelle mondiale.

Pour établir ses analyses et recommandations, l'AIE émet des hypothèses qui constituent des scénarios d'étude, dont deux principaux, qui servent de référence : Le *Baseline Scenario* et le *BLUE Map Scenario*.

Baseline scenario	BLUE Map scenario
<ul style="list-style-type: none"> Energy-related CO₂ emissions roughly double 	<ul style="list-style-type: none"> Energy-related CO₂ emissions reduced by 50%
<ul style="list-style-type: none"> Primary energy use rises by 84%; carbon intensity of energy use increases by 7% 	<ul style="list-style-type: none"> Primary energy use rises by 32%; carbon intensity of energy use falls by 64%
<ul style="list-style-type: none"> Liquid fuel demand rises by 57% requiring significant use of unconventional oil and synthetic fuels; primary coal demand increases by 138%; gas demand is 85% higher 	<ul style="list-style-type: none"> Liquid fuel demand falls by 4% and biofuels meet 20% of total; coal demand drops by 36%; natural gas falls by 12%; renewables provide almost 40% of primary energy supply
<ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions from power generation more than double; CO₂ intensity of power generation declines slightly to 459 g/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions from power generation are cut by 76%; its CO₂ intensity falls to 67 g/kWh
<ul style="list-style-type: none"> Fossil fuels supply more than two-thirds of power generation; the share of renewable energy increases slightly to 22% 	<ul style="list-style-type: none"> Renewables account for 48% of power generation; nuclear provides 24% and plants equipped with CCS 17%
<ul style="list-style-type: none"> Carbon capture and storage (CCS) is not commercially deployed 	<ul style="list-style-type: none"> CCS is used to capture 9.4 Gt of CO₂ from plants in power generation (55%), industry (21%) and fuel transformation (24%)
<ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions in the buildings sector, including those associated with electricity use, nearly double 	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions in buildings are reduced by two-thirds through low-carbon electricity, energy efficiency and the switch to low- and zero-carbon technologies (solar heating and cooling, heat pumps and CHP)
<ul style="list-style-type: none"> Almost 80% of light-duty vehicles (LDVs) sales rely on conventional gasoline or diesel technology; petroleum products meet more than 90% of transport energy demand 	<ul style="list-style-type: none"> Almost 80% of LDVs sales are plug-in hybrid, electric or fuel-cell vehicles; the share of petroleum products in final transport demand falls to 50%
<ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions in industry grow by almost half, as industrial production increases 	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions in industry fall by around a quarter mainly thanks to energy efficiency, fuel switching, recycling, energy recovery and CCS
<ul style="list-style-type: none"> Total investment in energy supply and use totals USD 270 trillion 	<ul style="list-style-type: none"> Investment is USD 46 trillion (17%) more than in Baseline; cumulative fuel savings are USD 112 trillion higher than in Baseline
<ul style="list-style-type: none"> Non-OECD countries are responsible for almost 90% of growth in energy demand and account for nearly three-quarters of global CO₂ emissions 	<ul style="list-style-type: none"> Non-OECD countries achieve CO₂ emissions reduction of around 30% compared to 2007; OECD countries account for less than one-quarter of global CO₂ emissions, having reduced emissions by 70% to 80% below 2007 levels

Tableau 22 – Principaux scénarios utilisés par l'AIE ([134])

Table 1.1 • Principal policy assumptions by scenario and major region, 2020

	New Policies Scenario	450 Scenario
OECD		
United States	15% share of renewables in electricity generation; push for domestic supplies, including gas and biofuels.	17% reduction in greenhouse-gas emissions compared with 2005 (with access to international offset credits).
Japan	Implementation of the Basic Energy Plan.	25% reduction in greenhouse-gas emissions compared with 1990 (with access to international offset credits).
European Union	25% reduction in greenhouse-gas emissions compared with 1990 (including Emissions Trading Scheme).	30% reduction in greenhouse-gas emissions compared with 1990 (with access to international offset credits).
Non-OECD		
Russia	15% reduction in greenhouse-gas emissions compared with 1990.	25% reduction in greenhouse-gas emissions compared with 1990.
China	40% reduction in CO ₂ intensity compared with 2005 (low-end of targeted range).	45% reduction in CO ₂ intensity compared with 2005 (high-end of targeted range); 15% share of renewables and nuclear power in primary demand.
India	20% reduction in CO ₂ intensity compared with 2005.	25% reduction in CO ₂ intensity compared with 2005.
Brazil	36% reduction in greenhouse-gas emissions compared with business-as-usual.	39% reduction in greenhouse-gas emissions compared with business-as-usual.

Tableau 23 – Hypothèses et scénarios de projections (World Energy Outlook 2010)

Annexe 3

Éléments de logique floue

L'objet de cette annexe est de rappeler quelques notions de la logique floue, utiles à la bonne compréhension de ce mémoire. Pour de plus amples informations, le lecteur pourra se reporter à de nombreux ouvrages et travaux traitant du sujet, parmi lesquels [76-79, 85, 135].

1. Notion d'ensemble flou

La notion d'ensemble flou, contrairement à celle d'ensemble booléen, va permettre une graduation de l'appartenance d'un élément à une classe.

L'ensemble booléen est défini par une fonction caractéristique, notée f , dont les valeurs ne peuvent prendre que les valeurs discrètes 0 et 1. L'ensemble **flou** est défini par une **fonction d'appartenance**, notée μ , pouvant prendre toutes les valeurs de l'intervalle $[0,1]$.

Dans l'exemple de la Figure 125, l'ensemble des valeurs de la vitesse que peut avoir un véhicule en déplacement, représente l'**univers de discours** de la **variable** « Vitesse ». « RAPIDE » est alors une **valeur linguistique** de cette variable.

Supposons que le véhicule se déplace à la vitesse de 60 km/h.

Dans le cas de l'ensemble booléen, on ne considère pas que sa vitesse de déplacement soit « RAPIDE » (Figure 125 (a)).

Dans le cas de l'ensemble flou, on considère que sa vitesse de déplacement est « RAPIDE » avec un **degré d'appartenance** égal à 0,4 (Figure 125 (b)).

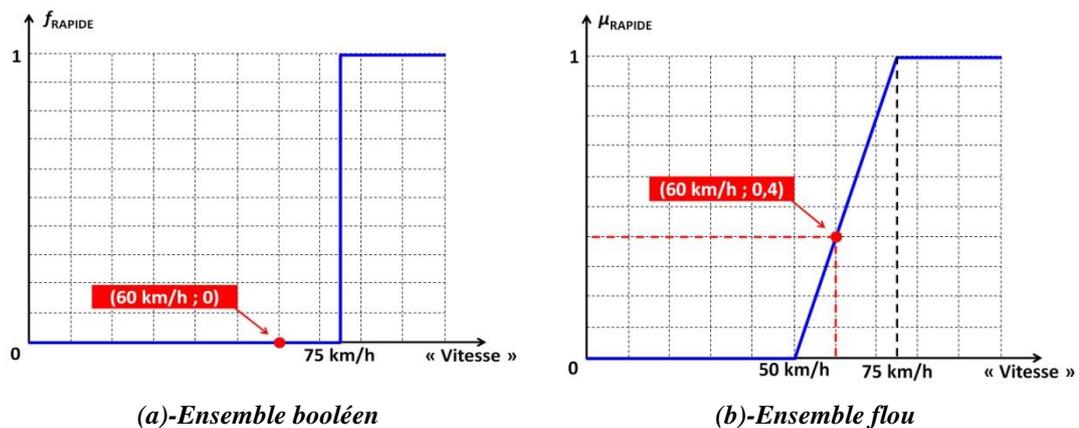


Figure 125 - Représentation de "RAPIDE" dans le cas booléen et flou

2. Construction d'un superviseur flou

La construction d'un superviseur flou comporte trois étapes principales : la **fuzzification**, l'**inférence** et la **défuzzification**.

Elles peuvent être précédées d'une étape de mise en forme des variables d'entrée (**normalisation**) et suivies d'une étape de remise à l'échelle réelle des grandeurs de sortie (**dénormalisation**).

Cette construction repose sur une connaissance experte du système, traduite, dans la **base de connaissance** (Figure 126) par des règles du type : **SI** « Prédicat » **ALORS**

« **Conclusion** ». Le **prédicat** (aussi appelé **prémisse** ou **condition**) est construit par combinaison de différentes propositions, à l'aide d'opérateurs de type ET, OU, NON.

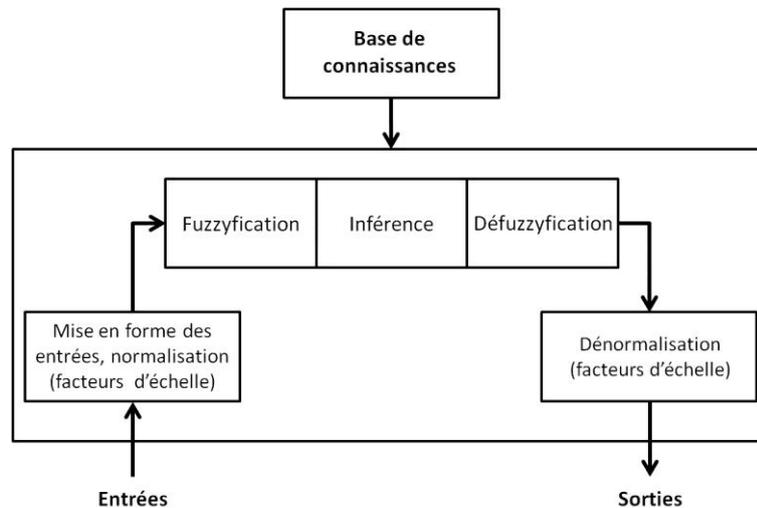


Figure 126 – Structure d'un superviseur flou

a. La fuzzyfication

La **fuzzyfication** est l'opération permettant de passer du domaine réel au domaine flou. Lors de cette étape est déterminé le degré d'appartenance d'une valeur à un ensemble flou. Pour une même valeur de la variable réelle, la valeur du degré d'appartenance sera fonction :

- Des formes¹⁰ choisies pour les fonctions d'appartenance,
- De certains paramètres de ces fonctions d'appartenance¹¹, tels que **hauteur**, **noyau** et **support**, que nous allons décrire maintenant.

Considérons pour cela la Figure 127, qui présente quelques notions, en plus de l'**univers de discours**, utiles à la caractérisation d'un **ensemble flou A** sur l'**univers de discours X** :

- La **hauteur** est le plus fort degré d'appartenance avec lequel un élément de l'univers de discours appartient à l'ensemble flou. Si l'ensemble flou est normalisé, la hauteur vaut 1.
- Le **noyau** est l'ensemble des éléments de l'univers de discours appartenant de façon absolue à l'ensemble flou : $\{x \in X, \text{ tel que } \mu_A(x) = \text{hauteur}\}$.
- Le **support** est l'ensemble des éléments de l'univers de discours pour lesquels la fonction d'appartenance n'est pas nulle : $\{x \in X, \text{ tel que } \mu_A(x) > 0\}$.
- La **coupe de niveau α** est l'ensemble des éléments de l'univers de discours appartenant à l'ensemble flou avec un degré d'appartenance au moins égal à α : $\{x \in X, \text{ tel que } \mu_A(x) \geq \alpha\}$.

¹⁰ Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre toute forme (gaussienne, sigmoïdale, trapézoïdale, triangulaire, ...). Néanmoins, les formes triangulaires et trapézoïdales (linéaires par morceaux) sont le plus souvent employées, car elles facilitent la programmation et simplifient le recueil de l'expertise.

¹¹ Les fonctions d'appartenance que nous envisageons vérifient la notion de partition floue: pour chaque valeur de l'univers de discours, la somme des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous est égale à la hauteur (soit 1 en cas de normalisation).

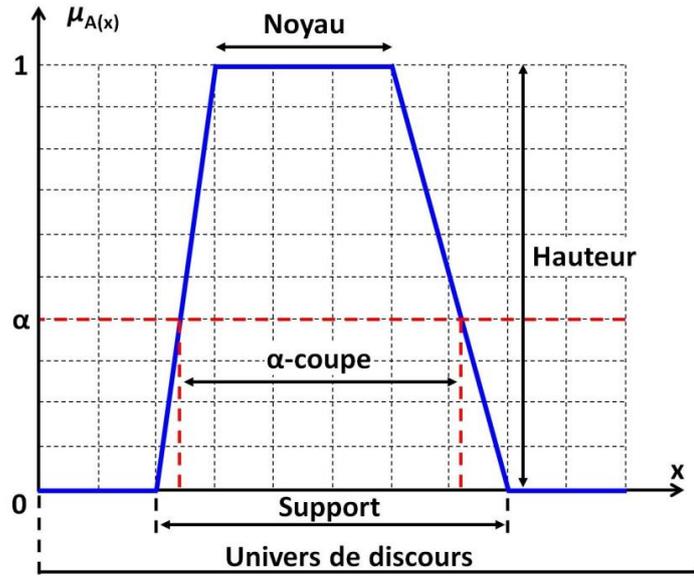


Figure 127 – Grandeurs caractéristiques d'un ensemble flou

Il est commode de représenter la **variable linguistique** par un triplet d'information, contenant le nom de la variable, son univers de discours, et l'ensemble des **caractérisations floues** que peut prendre la variable floue :

{Nom de la variable linguistique, univers de discours, ensemble des caractérisations}

Dans notre exemple précédent, la variable linguistique « Vitesse » peut, par exemple, se représenter par le triplet suivant :

$\{Vitesse, [0,100], "LENT", "MOYEN", "RAPIDE"\}$

La variable « Vitesse » est alors définie, en considérant un intervalle de vitesses possibles borné, sur $[0 \text{ km/h}, 100\text{km/h}]$, et se caractérise par trois ensembles flous « LENT », « MOYEN » et « RAPIDE »¹². Les termes utilisés pour la caractérisation de la variable, ici *LENT*, *MOYEN* et *RAPIDE*, sont des **labels** ou **termes linguistiques**.

Ces fonctions ont ici les caractéristiques suivantes :

- Hauteur : 1 (normalisé)
- Noyaux
 - Noyau_{LENT} = $[0 \text{ km/h}, 25 \text{ km/h}]$
 - Noyau_{MOYEN} = 50 km/h
 - Noyau_{RAPIDE} = $[75 \text{ km/h}, 100 \text{ km/h}]$
- Supports
 - Support_{LENT} = $[0 \text{ km/h}, 50 \text{ km/h}]$
 - Support_{MOYEN} = $[25 \text{ km/h}, 75 \text{ km/h}]$
 - Support_{RAPIDE} = $[50 \text{ km/h}, 100 \text{ km/h}]$

¹² Un nombre plus important d'ensembles flous permet une description plus fine. En revanche, appliqué aux variables d'entrée du superviseur, cela entraîne un accroissement de la complexité du superviseur. La littérature retient souvent les nombres de 3, 5, voire 7.

La vitesse de déplacement considérée dans l'exemple initial, égale à 60 km/h, est donc considérée comme :

- « LENT » avec un degré d'appartenance de 0 ;
- « MOYEN » avec un degré d'appartenance de 0,6 ;
- « RAPIDE » avec un degré d'appartenance de 0,4.

L'étape de **fuzzification** appliquée à la variable « Vitesse » aboutit donc à la représentation de la Figure 128 .

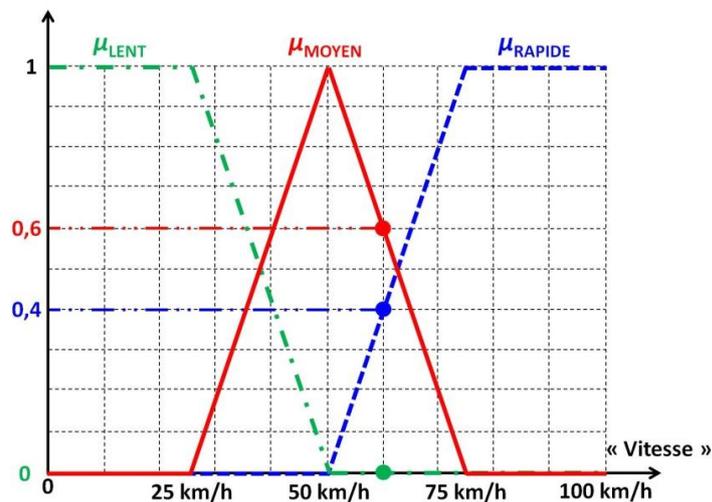


Figure 128 - Un exemple de fonctions d'appartenance des trois ensembles flous « LENT », « MOYEN » et « RAPIDE »

Cette étape sera appliquée à toutes les variables d'entrée et de sortie du superviseur.

La suite du développement du superviseur comporte deux phases : l'inférence et la défuzzification.

b. L'inférence

Le mécanisme d'inférence recourt à un opérateur d'implication (par exemple *min*) pour évaluer le **degré d'activation** de chaque règle et en déterminer l'**implication** (c'est-à-dire, la conclusion). Puis, une phase d'**agrégation**, qui consiste à appliquer l'opérateur *max* aux ensembles flous obtenus pour toutes les règles concernant cette sortie, est réalisée.

Reprenons dans notre exemple précédent de la vitesse de déplacement d'un véhicule, la variable déjà définie «Vitesse», et ajoutons une variable d'entrée «Distance», représentant la distance séparant le véhicule d'un obstacle, et une variable de sortie «Freinage», correspondant à l'intensité du freinage à exercer pour éviter une collision. Supposons que l'étape de fuzzification a été effectuée sur ces deux nouvelles variables.

Envisageons les deux règles du Tableau 24, appliquées au cas d'une valeur « Vitesse » égale à 60 km/h et d'une valeur « Distance » égale à 38m.

...
R ₁	Si	Distance	PETIT	Et	Vitesse	GRAND	ALORS	Freinage	GRAND
R ₂	Si	Distance	PETIT	Et	Vitesse	MOYEN	ALORS	Freinage	MOYEN
...

Tableau 24 – Exemple de règles

Le mécanisme d'inférence détermine le degré d'activation de chaque règle et les implications. L'illustration de la Figure 129 montre que ces degrés valent 0,4 et 0,5 respectivement pour R₁ et R₂.

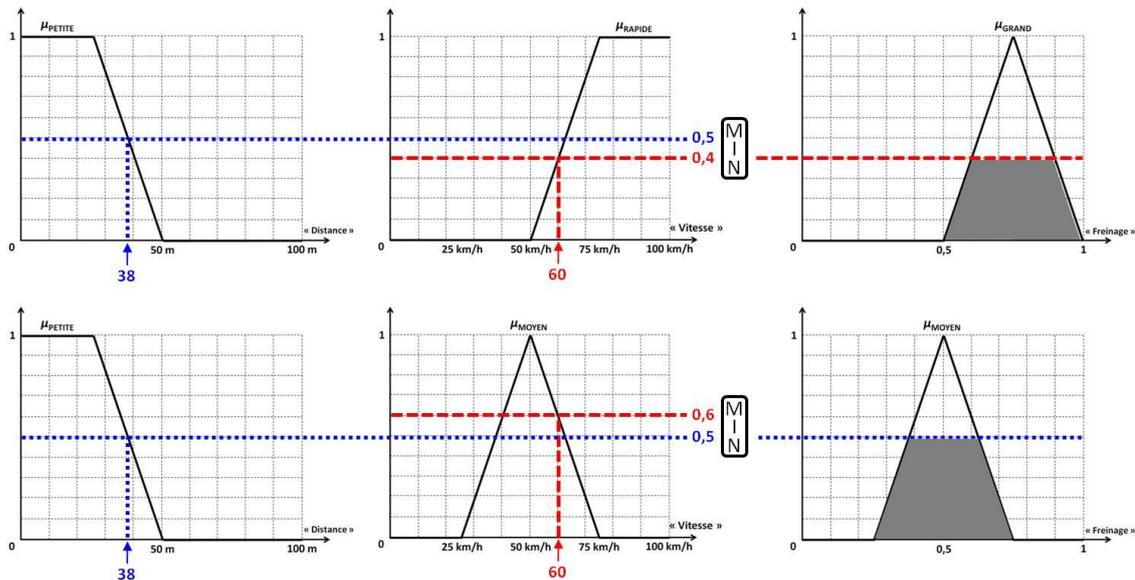


Figure 129 – Illustration du mécanisme d'inférence utilisant la méthode de Mamdani

Degrés d'activation et conclusions des règles R₁ (en haut) et R₂ (en bas)

La dernière étape de cette phase d'inférence utilise l'opérateur *max* (Figure 130). L'ensemble flou résultant pour la variable « Freinage » est obtenu par agrégation des conclusions précédemment déterminées.

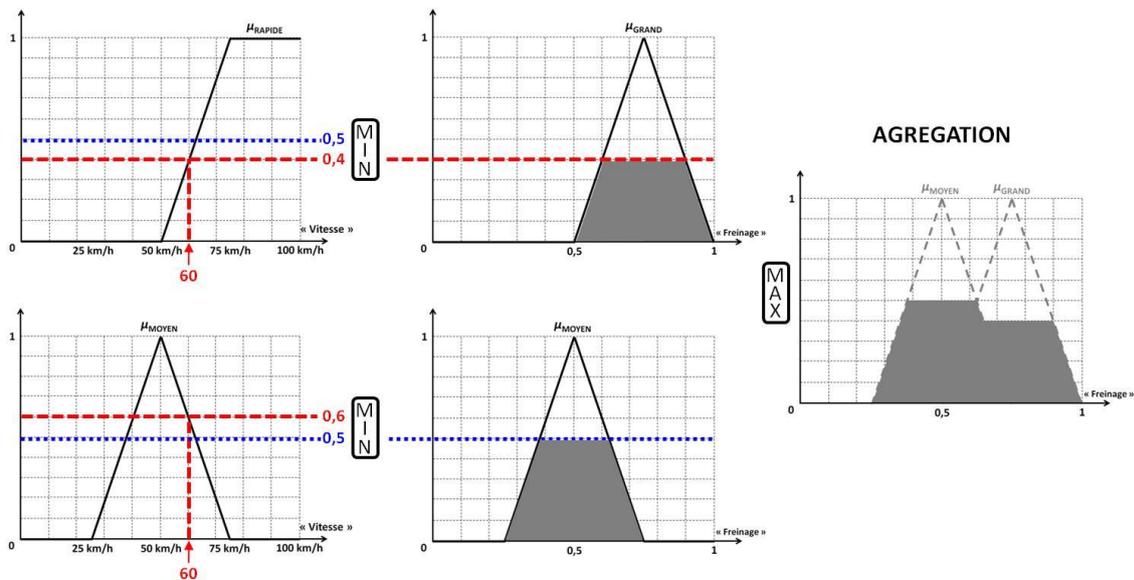


Figure 130 – Ensemble flou résultant de la variable « Freinage » obtenu par agrégation des règles

c. La défuzzyfication

La défuzzyfication consiste à convertir l'ensemble flou résultant obtenu lors de la phase d'inférence, en une grandeur réelle (information pour un opérateur, consigne, ...).

Là aussi, plusieurs méthodes existent. Nous utilisons celle du *centre de gravité*, qui est la plus couramment rencontrée en commande floue (Figure 131).

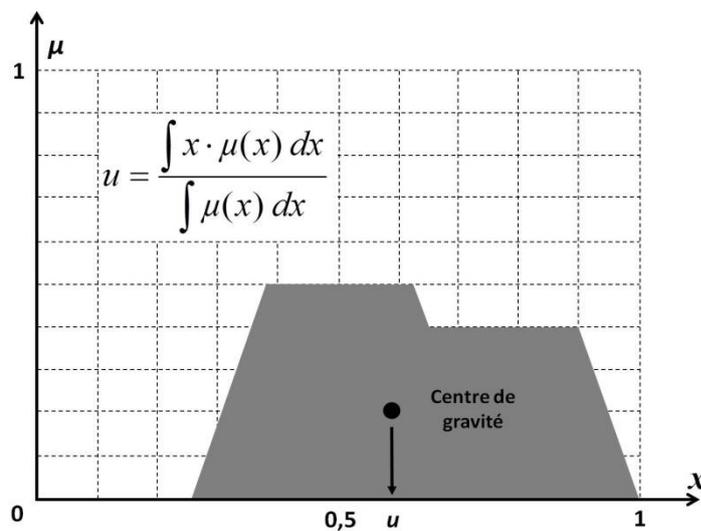


Figure 131 - Défuzzyfication par la méthode du centre de gravité

(où x représente la variable « Freinage »)

Annexe 4

Plateforme Energies Electriques

Dès mon arrivée à HEI, en septembre 2001, j'ai pris en main le développement de la plateforme d'essai, dénommée aujourd'hui *Plateforme Energies Electriques*. Celle-ci s'est construite au travers de la grande majorité des projets de recherche auxquels nous avons participé (projets des pôles MEDEE, AsTech, projets ANR, ADEME), en tant que porteur ou partenaire.

Son principal financement, outre les fonds propres de HEI, a consisté en des fonds européens FEDER, nationaux et régionaux (Nord-Pas de Calais). Initialement, ces fonds ont été consacrés essentiellement à l'acquisition du matériel (machines électriques, convertisseurs, dispositifs de stockage, cartes dSpace Temps réel, charges programmables, ...).

A partir de 2006-2007, des ingénieurs de recherche en CDD, ainsi que des post-Doc, sont venus régulièrement renforcer l'équipe afin de mener les développements expérimentaux inhérents à leurs projets respectifs (MEDEE6-1, MEDEE6-4, MEDEE7-1, RECUPENER, et aujourd'hui MEDEE7-2, OCESE, CONIFER). Jusqu'à cette date, je m'étais chargé de la mise en œuvre de la plateforme, accompagné de certains doctorants, fêrus d'expérimentation, et d'élèves HEI5, dans le cadre de projets de fin d'études menés avec des partenaires industriels, notamment régionaux (Forclum Ingénierie Verquin fut le premier...).

Cette plateforme, d'une puissance d'environ 3kW, a été développée de façon modulaire, afin d'être facilement reconfigurée, en fonction des cas d'application. Ainsi, elle peut, par exemple, émuler :

- un générateur éolien à vitesse variable (Machine Synchrone à Aimants Permanents) raccordé au réseau électrique via un convertisseur AC/DC/AC de type « Dos-à-dos », associé à un dispositif inertiel de stockage d'énergie (thèses de G. CIMUCA, O. BOUHALI et A. DAVIGNY) ou non (Thèses de L. LECLERCQ et V. COURTECUISSÉ),
- un générateur micro-hydraulique (Machine Asynchrone à Double Alimentation) raccordé au réseau électrique ou en mode isolé, interconnecté avec de l'éolien à vitesse fixe (Thèse de S. BREBAN),
- un réseau local DC à échanges d'énergie, interconnectant une source locale (Machine Synchrone à Aimants Permanents), un système de stockage par supercondensateurs et une charge bidirectionnelle en puissance (Thèses de H. ZHANG, J-C SWIERCZEK, Projet RECUPENER),
- ...

Je présente dans cette annexe la configuration « *Eolienne à vitesse variable associée à un Système Inertiel de Stockage d'Energie raccordée au réseau électrique* ». Les descriptions des autres configurations sont disponibles dans les références [70, 72].

1. Présentation de la configuration « Eolienne à vitesse variable associée à un Système Inertiel de Stockage d'Energie raccordée au réseau électrique »

Cette configuration comporte quatre parties (Figure 132) : un Emulateur de Turbine Eolienne (ETE), représentant le comportement d'une turbine éolienne réelle, une Machine

Synchrone à aimants Permanents (MSAP) dont le fonctionnement en génératrice permet de convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, un Système Inertiel de Stockage d'Énergie (SISE) et la connexion de cet ensemble de production d'énergie au réseau 230V triphasé de notre laboratoire, assurée par un filtre, de type L ou LC (CAR). Tous les convertisseurs à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) utilisés sur cette plate-forme sont identiques, de marque SEMIKRON™, construits autour d'IGBT 1200V/50A. Les interfaces de commande et de mesure associées à chaque convertisseur sont réalisées respectivement sur un modèle unique, offrant ainsi un aspect modulaire à ce banc d'essai.

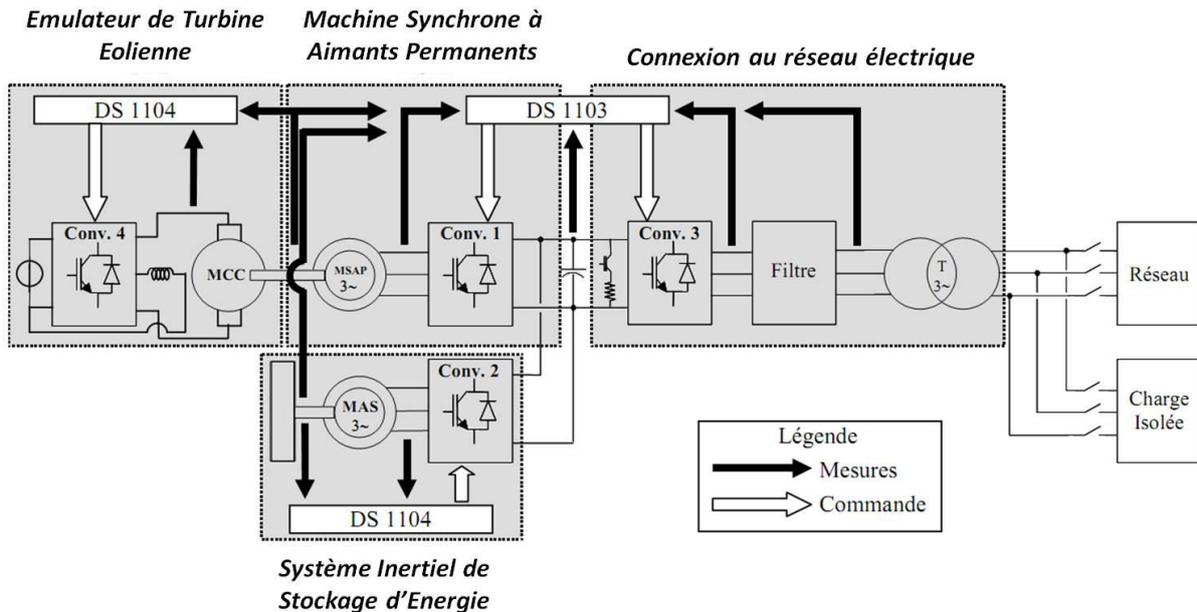


Figure 132 – Schéma synoptique de la plateforme expérimentale

2. Les différentes parties de la plateforme

a. L'Émulateur de Turbine Éolienne

La base de cet émulateur est une Machine à Courant Continu (MCC) de 3 kW, 1500 T.min⁻¹, alimentée par un convertisseur à MLI (Conv.4) : l'induit de la machine par deux bras du convertisseur (hacheur quatre quadrants) et l'excitation par le troisième bras. Ce dernier point a son importance, car lorsque le banc sera amené à travailler à puissance nominale, il sera nécessaire de réduire l'excitation de la MCC afin de lui faire atteindre des vitesses proches de 3000 T.min⁻¹, vitesse de fonctionnement nominal de la machine synchrone. La commande de cet ensemble est assurée par une carte dSPACE™ 1104 (PowerPC603e/TI DSPTMS320F240). Une interface de commande est placée entre cette carte et les drivers des IGBT, afin d'adapter les signaux présentés ou reçus des organes de commande (ordre de commutation et signaux d'erreur) et de réaliser de façon matérielle les ordres complémentaires de commutation des interrupteurs. Une interface de mesure composée d'un capteur de tension et de trois capteurs de courant LEM™ permet les relevés nécessaires à la commande de la machine. Enfin, une mesure de vitesse est réalisée grâce à un codeur incrémental implanté sur la MSAP, connecté à un port dédié sur la carte DS 1104.

b. La Machine Synchrone à Aimants Permanents

La MSAP (2,8 kW/3000 T.min⁻¹) comporte trois paires de pôles. Elle est entraînée mécaniquement par la MCC émulant la turbine éolienne. L'énergie qu'elle fournit est envoyée vers le bus de tension continue de 400V, constitué de condensateurs associés en série et en parallèle, offrant une capacité équivalente de 2200µF et une tension maximale de 800V. Ce

La montée en puissance de la plateforme *Energies Electriques*, les embauches successives d'Ingénieurs de recherche en CDD qu'elle a suscitées au travers de nos projets de recherche, l'intérêt croissant des partenaires pour cet outil, ont conduit la Direction Générale de HEI à consolider l'équipe de développement, en recrutant F. MOLLET comme Ingénieur de recherche, de manière permanente, avec la mission principale de poursuivre le développement et l'exploitation de cet outil dédié à la recherche.

Depuis la rentrée 2012, la plateforme a, de plus, migré vers des espaces plus propices à son expansion, puisqu'elle a rejoint les locaux de la Maison de la Recherche, lieu dédié aux activités de recherche.



La plateforme Energies Réparties - du 13, rue de Toul ...



... à la Maison de la Recherche

Figure 134 – Evolution de la plateforme Energies Réparties (de 2003 à 2012)

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] J. K. Steinke and O. Apeldoorn, "Applying the experience of industrial high power converter design to windpower conversion," presented at the World Energy Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 2002.
- [2] "World demographic trends," Secrétariat Général des Nations Unies, Janvier 2011
- [3] "World Energy Outlook 2010," International Energy Agency, 2010., <http://www.iea.org/>
- [4] A. V. Fedorov, R. C. Pacanowski, P. S. Dekens, M. McCarthy, S. G. Philander, A. C. Ravelo, P. B. deMenocal, and M. Barreiro, "The Pliocene Paradox (Mechanisms for a Permanent El Niño)," *Science*, vol. 1485 (2006); 312, 2006.
- [5] "Changements Climatiques 2007 - Rapport de synthèse," Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat , 2007
- [6] "Key World Energy Statistics," International Energy Agency, 2012
- [7] "Wind Energy Roadmap," International Energy Agency, 2010
- [8] "Solar photovoltaic Roadmap," International Energy Agency, 2010
- [9] P. Pinson, C. Chevallier, and G. N. Kariniotakis, "Trading Wind Generation From Short-Term Probabilistic Forecasts of Wind Power," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1148-1156, 2007.
- [10] X. Jun, P. B. Luh, F. B. White, E. Ni, and K. Kasiviswanathan, "Power Portfolio Optimization in Deregulated Electricity Markets With Risk Management," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1653-1662, 2006.
- [11] J. Zarnikau, "Successful renewable energy development in a competitive electricity market: A Texas case study," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 3906-3913, 2011.
- [12] "Europe's Energy Position : Markets and supply," Market observatory for energy, 2009
- [13] W. P. Mahoney, K. Parks, G. Wiener, L. Yubao, W. L. Myers, S. Juanzhen, L. Delle Monache, T. Hopson, D. Johnson, and S. E. Haupt, "A Wind Power Forecasting System to Optimize Grid Integration," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 670-682, 2012.
- [14] N. Amjady, F. Keynia, and H. Zareipour, "Wind Power Prediction by a New Forecast Engine Composed of Modified Hybrid Neural Network and Enhanced Particle Swarm Optimization," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 265-276, 2011.
- [15] S. Tewari, C. J. Geyer, and N. Mohan, "A Statistical Model for Wind Power Forecast Error and its Application to the Estimation of Penalties in Liberalized Markets," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2031-2039, 2011.
- [16] J. W. Taylor, P. E. McSharry, and R. Buizza, "Wind Power Density Forecasting Using Ensemble Predictions and Time Series Models," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 775-782, 2009.
- [17] W. Yuan-Kang and H. Jing-Shan, "A literature review of wind forecasting technology in the world," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, pp. 504-509.
- [18] G. Sideratos and N. D. Hatzigiargyriou, "An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 258-265, 2007.
- [19] L. Ruey-Hsun and L. Jian-Hao, "A Fuzzy-Optimization Approach for Generation Scheduling With Wind and Solar Energy Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1665-1674, 2007.
- [20] Ahlstrom, L. Jones, R. Zavadil, and W. Grant, "The future of wind forecasting and utility operations," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 3, pp. 57-64, 2005.
- [21] E. Lorenz, J. Hurka, D. Heinemann, and H. G. Beyer, "Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems," *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, vol. 2, pp. 2-10, 2009.
- [22] D. Ramirez, S. Martinez, F. Blazquez, and C. Carrero, "Use of STATCOM in wind farms with fixed-speed generators for grid code compliance," *Renewable Energy*, vol. 37, pp. 202-212, 2012.

- [23] M. Samiei Sarkhanloo, A. Sadeghi Yazdankhah, and R. Kazemzadeh, "A new control strategy for small wind farm with capabilities of supplying required reactive power and transient stability improvement," *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 32-39, 2012.
- [24] S. A. Verne and M. I. Valla, "Direct connection of WECS system to the MV grid with multilevel converters," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 336-344, 2012.
- [25] C. Koroneos and E. Katopodi, "Maximization of wind energy penetration with the use of H2 production—An exergy approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 648-656, 2011.
- [26] N. A. Lahaçani, D. Aouzellag, and B. Mendil, "Static compensator for maintaining voltage stability of wind farm integration to a distribution network," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2476-2482, 2010.
- [27] J. P. Barton and D. G. Infield, "Energy storage and its use with intermittent renewable energy," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 441-448, 2004.
- [28] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, M. A. M. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1002-1016, 2006.
- [29] C. Sudipta, D. W. Manoja, and M. G. Simoes, "Distributed Intelligent Energy Management System for a Single-Phase High-Frequency AC Microgrid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 97-109, 2007.
- [30] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou, "Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 241-248, 2008.
- [31] H. Ghoudjehbklou and H. B. Puttgen, "Optimization Topics Related to Small Power Producing Facilities Operating under Energy Spot Pricing Policies," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 296-302, 1987.
- [32] H. Kanchev, L. Di, F. Colas, V. Lazarov, and B. Francois, "Energy Management and Operational Planning of a Microgrid With a PV-Based Active Generator for Smart Grid Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 4583-4592, 2011.
- [33] Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis, and E. S. Karapidakis, "Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 4, pp. 404-419, 2010.
- [34] R. Barrero, J. Mierlo, and X. Tackoen, "Energy savings in public transport," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 3, pp. 26-36, 2008.
- [35] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, and M. Petit, "Comparison of technical features between a More Electric Aircraft and a Hybrid Electric Vehicle," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, 2008, pp. 1-6.
- [36] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 247-275, 2002.
- [37] C. C. Chan, Y. S. Wong, A. Bouscayrol, and C. Keyu, "Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [Point of View]," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, pp. 603-607, 2009.
- [38] J. A. Rosero, J. A. Ortega, E. Aldabas, and L. Romeral, "Moving towards a more electric aircraft," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 22, pp. 3-9, 2007.
- [39] A. Tenconi and P. W. Wheeler, "Introduction to the Special Section on The More Electric Aircraft: Power Electronics, Machines, and Drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 3521-3522, 2012.
- [40] Y. Khersonsky, N. Hingorani, and K. L. Peterson, "IEEE Electric Ship Technologies Initiative," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 17, pp. 65-73, 2011.
- [41] G. CIMUCA, "Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens," Thèse de doctorat, N° 2005-27, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers - Centre de Lille, 12/2005.

- [42] O. Bouhali, B. Francois, E. M. Berkouk, and C. Saudemont, "DC Link Capacitor Voltage Balancing in a Three-Phase Diode Clamped Inverter Controlled by a Direct Space Vector of Line-to-Line Voltages," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1636-1648, 2007.
- [43] H. ZHANG, "Gestion décentralisée de réseaux continus à forte disponibilité en aéronautique," Thèse de Doctorat de l'Université Lille 1, 2010.
- [44] J.-C. Swierczek, F. Mollet, C. Saudemont, R. Meuret, and B. Robyns, "Power management of a regenerative local HVDC aircraft network using supercapacitors," in *15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe*, Novi Sad, Serbia, 2012.
- [45] S. Breban, C. Saudemont, S. Vieillard, and B. Robyns, "Optimization of fuzzy logic supervisor using experimental design and genetic algorithm for embedded electrical power systems," in *ELECTRIMACS 2011*, Cergy-Pontoise, France 2011.
- [46] P. MONJEAN, "Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu ", École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [47] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3881-3895, 2010.
- [48] S. M. Lukic, C. Jian, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy Storage Systems for Automotive Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 2258-2267, 2008.
- [49] A. L. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 4001-4012, 2010.
- [50] H. Fakhham, L. Di, and B. Francois, "Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load-Following Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 85-94, 2011.
- [51] F. Locment, M. Sechilariu, C. Forgez, and G. Friedrich, "Représentation énergétique macroscopique et structure maximale de commande d'un réseau semi-isolé. Application à une installation photovoltaïque alimentant un bâtiment basse consommation," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 12/5-6, pp. 609-637, 2009.
- [52] Z. Tao and B. Francois, "Energy Management and Power Control of a Hybrid Active Wind Generator for Distributed Power Generation and Grid Integration," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 95-104, 2011.
- [53] F. Alkhalil, F. Colas, and B. Robyns, "Secant generalized method minimizing the fuel and emissions costs in a power station of small cogeneration multimachines,," in *International Conference on Renewable Energy and Eco-Design in Electrical Engineering, IREED*, Lille - France, 2011.
- [54] R. Caldon, A. R. Patria, and R. Turri, "Optimal control of a distribution system with a virtual power plant," in *International conference on Bulk Power System Dynamics and Control*, Cortina d'Ampezzo (ITA), 2004.
- [55] S. Kreuawan, F. Gillon, F. Moussouni, S. Brisset, and P. Brochet, "Optimal design of traction motor in railway propulsion system," in *Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP '07. International Aegean Conference on*, 2007, pp. 343-348.
- [56] H. Fakhham, A. Ahmidi, F. Colas, and X. Guillaud, "Multi-agent system for distributed voltage regulation of wind generators connected to distribution network," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*, 2010, pp. 1-6.
- [57] J. Lagorse, D. Paire, and A. Miraoui, "Système multi-agent pour la gestion d'une alimentation multi source décentralisée," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, pp. 763-784, 2009.
- [58] C. Abbey and G. Joos, "Energy Management Strategies for Optimization of Energy Storage in Wind Power Hybrid System," in *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, 2005, pp. 2066-2072.
- [59] G. Boukettaya, L. Krichen, and A. Ouali, "Fuzzy logic supervisor for power control of an isolated hybrid energy production unit," *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2007.

- [60] V. Courtecuisse, J. Sprooten, B. Robyns, M. Petit, B. François, and J. Deuse, "A methodology to design a fuzzy logic based supervision of Hybrid Renewable Energy Systems," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, pp. 208-224, 2010.
- [61] Z. He, F. Mollet, C. Saudemont, and B. Robyns, "Experimental Validation of Energy Storage System Management Strategies for a Local DC Distribution System of More Electric Aircraft," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3905-3916, 2010.
- [62] C. Abbey, J. Chahwan, and G. Joos, "Energy storage and management in wind turbine generator system," *EPE Journal* vol. 17, 2007.
- [63] C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, and A. Jeunesse, "Energy management and sizing of a hybrid locomotive," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1-10.
- [64] B. Dakyo, M. El Mokadem, C. Nichita, and W. Koczara, "A new method to define power and energy share in a DC link Hybrid wind-diesel powered system by means of storage and dual time-frequency approach," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1-8.
- [65] A. Jaafar, C. R. Akli, B. Sareni, X. Roboam, and A. Jeunesse, "Sizing and Energy Management of a Hybrid Locomotive Based on Flywheel and Accumulators," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 3947-3958, 2009.
- [66] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, and R. Meuret, "Comparison of different DC voltage supervision strategies in a local Power Distribution System of More Electric Aircraft," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, pp. 263-276, 2010.
- [67] G. Cimuca, S. Breban, M. M. Radulescu, C. Saudemont, and B. Robyns, "Design and Control Strategies of an Induction-Machine-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 526-534, 2010.
- [68] L. Leclercq, B. Robyns, and J.-M. Grave, "Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 63, pp. 271-280, 2003.
- [69] G. O. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, and M. M. Radulescu, "Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1074-1085, 2006.
- [70] H. Zhang, F. Mollet, C. Saudemont, and B. Robyns, "Experimental validation of energy storage system power management strategies for a local DC distribution system of More Electric Aircraft," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, n°12, pp. 3905-3916, December 2010.
- [71] H. Zhang, C. Saudemont, and B. Robyns, "Gestion énergétique d'un réseau local DC à récupération d'énergie au sein d'un avion plus électrique," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 12 n° 5-6/2009, p. 763 to 784, 2009.
- [72] S. Breban, C. Saudemont, S. Vieillard, and B. Robyns, "Experimental design and genetic algorithm optimization of a fuzzy-logic supervisor for embedded electrical power systems," *Mathematics and Computers in Simulation*, 2012.
- [73] V. COURTECUISSSE, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique," 2008.
- [74] L. Leclercq, C. Saudemont, B. Robyns, G. Cimuca, and M. M. Radulescu, "Flywheel energy storage system to improve the integration of wind generators into a network," *ELECTROMOTION*, vol. 10, pp. 101-106, 2003.
- [75] S. MORENO and E. PEULOT, "Le GEMMA", Ed. Casteilla, 2009, 978-2-7135-3128-6
- [76] H. Buhler, "Réglage par logique floue", Ed. P. p. e. u. romandes, 1994, 2-88074-271-4
- [77] L. Gacogne, "Eléments de logique floue", Ed. Hermès, 1997, 2-86601-618-1
- [78] P. Borne, J. Rozinoer, J.-Y. Dieulot, and L. Dubois, "Introduction à la commande floue", Ed. Technip, 1998, 2-7108-0721-1
- [79] T. J. Ross, "Fuzzy logic with engineering applications", Ed. Wiley, 2004, 0470860758
- [80] J. FAUCHER, "Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue," INP Toulouse, 2006.

- [81] J. C. Mankins, "TECHNOLOGY READINESS LEVELS / A white paper," Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA1995
- [82] A. Bouscayrol, "Hardware-in-the-loop simulation," in *Industrial Electronics Handbook, second edition*. vol. Control and mechatronics, C. P. T. F. group, Ed., ed, 2011, pp. pp. 33-1/33-15.
- [83] O. Ciftcioglu, "Ordering rules and complexity reduction for fuzzy models," in *Fuzzy Information Processing Society, 2002. Proceedings. NAFIPS. 2002 Annual Meeting of the North American*, 2002, pp. 535-540.
- [84] M. K. Ciliz, "Rule base reduction for knowledge-based fuzzy controllers with application to a vacuum cleaner," *Expert Systems with Applications*, vol. 28, pp. 175-184, 2005.
- [85] V. Lacrose, "Réduction de la complexité des contrôleurs flous - Application à la commande multivariable," Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1997.
- [86] M. Setnes and R. Babuska, "Rule base reduction: some comments on the use of orthogonal transforms," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 31, pp. 199-206, 2001.
- [87] J. Yen and W. Liang, "Simplifying fuzzy rule-based models using orthogonal transformation methods," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 13-24, 1999.
- [88] M. El Mokadem, V. Courtecuisse, C. Saudemont, B. Robyns, and J. Deuse, "Fuzzy Logic Supervisor-Based Primary Frequency Control Experiments of a Variable-Speed Wind Generator," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 407-417, 2009.
- [89] M. El Mokadem, V. Courtecuisse, C. Saudemont, B. Robyns, and J. Deuse, "Experimental study of variable speed wind generator contribution to primary frequency control," *Renewable Energy ELSEVIER*, vol. 34, pp. 833-844, 2009.
- [90] A. Davigny and B. Robyns, "Fuzzy logic based supervisor of a wind farm including storage system and able to work in islanding mode," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 4231-4236.
- [91] R. Cardenas, R. Pena, G. Asher, and J. Clare, "Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 625-635, 2001.
- [92] C. Saudemont, G. Cimuca, B. Robyns, and M. M. Radulescu, "Grid connected or stand-alone real-time variable speed wind generator emulator associated to a flywheel energy storage system," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005, pp. 10 pp.-P.10.
- [93] X. Roboam, "New trends and challenges of electrical networks embedded in “more electrical aircraft”," in *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 26-31.
- [94] P. Magne, B. Nahid-Mobarakeh, and S. Pierfederici, "General Active Global Stabilization of Multiloads DC-Power Networks," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 1788-1798, 2012.
- [95] R. Todd and A. J. Forsyth, "DC-bus power quality for aircraft power systems during generator fault conditions," *Electrical Systems in Transportation, IET*, vol. 1, pp. 126-135, 2011.
- [96] H. Zhang, H. Fakhham, C. Saudemont, and B. Robyns, "Power management strategies in a local DC Power Distribution System of More Electric Aircraft with the help of hybrid storage and dissipation systems," in *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on*, 2009, pp. 1-7.
- [97] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, N. Huttin, and R. Meuret, "Comparison of different DC voltage supervision strategies in a local Power Distribution System of More Electric Aircraft," in *ELECTRIMACS, Québec, CANADA*, 2008.
- [98] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, and M. Petit, "Electrical features comparison between more electric aircraft and hybrid electric vehicles," *Electromotion*, , vol. Vol. 16, N°. 3., pp. pages. 111-119, 9-2009 2009.
- [99] H. Zhang, M. F., C. Saudemont, B. Robyns, and R. Meuret, "Hybrid storage and dissipation systems based power management in a local dc power distribution system of MEA " in *ICAS 2010, NICE*, 2010

- [100] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, and R. Meuret, "Comparison of different DC voltage supervision strategies in a local Power Distribution System of More Electric Aircraft," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, pp. 263–276, October 2010.
- [101] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, N. Huttin, and R. Meuret, "Stability analysis on the DC Power Distribution System of More Electric Aircraft," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 1523-1528.
- [102] H. Zhang, F. Mollet, S. Breban, C. Saudemont, and B. Robyns, "Power flow management strategies for a local DC distribution system of More Electric Aircraft," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) Lille - FRANCE*, 2010.
- [103] F. Mollet, S. Breban, C. Saudemont, R. Meuret, and B. Robyns, "Design and supervision strategies for embedded power systems equipped with energy storage devices," in *EPE*, Birmingham-United Kingdom, 2011.
- [104] B. Multon, H. Ben Ahmed, V. Debusshere, J. Aubry, C. Jaouen, and F. Barruel, "Expériences de recherche en éco-conception dans le domaine du génie électrique," *EJEE*, vol. 5, pp. 433-449, 2012.
- [105] O. Bouhali, B. Francois, E. M. Berkouk, and C. Saudemont, "Power sizing and control of a three-level NPC converter for grid connection of wind generators," *Electromotion journal* vol. 16, n°1, p. 10, 2009.
- [106] S. Breban, "Etude du Système de Conversion Electromécanique d'une Microcentrale Hydroélectrique à Vitesse Variable ", Ecole Nationale des Arts et Métiers - Université Technique de Cluj-Napoca.
- [107] S. Breban, M. Nasser, A. Ansel, C. Saudemont, B. Robyns, and M. M. Radulescu, "Variable Speed Small Hydro Power Plant Connected to AC Grid or Isolated Loads," *EPE Journal*, vol. 17, n°4, Janvier 2008.
- [108] M. El Mokadem, V. Courtecuisse, C. Saudemont, B. Robyns, and J. Deuse, "Experimental study of wind generator participation to primary frequency control," in *Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP '07. International Aegean Conference on*, 2007, pp. 719-724.
- [109] V. Courtecuisse, M. El Mokadem, C. Saudemont, B. Robyns, and J. Deuse, "Experiment of a wind generator participation to frequency control," in *Wind Power to the Grid - EPE Wind Energy Chapter 1st Seminar, 2008. EPE-WECS 2008*, 2008, pp. 1-6.
- [110] O. Bouhali, B. Francois, E. M. Berkouk, and C. Saudemont, "A general modelling and control algorithm of a three-phase multilevel diode clamped inverter by means of a direct space vector control," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 31, n°1, pp. 53-62, July 2005.
- [111] O. Bouhali, E. M. Berkouk, B. Francois, and C. Saudemont, "Direct generalized modulation of electrical conversions including self stabilization of the DC-link for a single phase multilevel inverter based AC grid interface," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 1385-1391 Vol.2.
- [112] O. Bouhali, E. M. Berkouk, C. Saudemont, and B. Francois, "A five-level diode clamped inverter with self-stabilization of the DC-link voltage for grid connection of distributed generators," in *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, 2004, pp. 947-952 vol. 2.
- [113] O. Bouhali, B. Francois, C. Saudemont, and E. M. Berkouk, "Practical power control design of a NPC multilevel inverter for grid connection of a renewable energy plant based on a FESS and a Wind generator," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 4291-4296.
- [114] A. Ansel and B. Robyns, "Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 71, pp. 320-332, 2006.
- [115] F. Khatounian, E. Monmasson, F. Berthereau, E. Delaleau, and J. P. Louis, "Control of a doubly fed induction generator for aircraft application," in *IECON 2003, Roanoke, VA, United States*, 2003, pp. 2709–2714.
- [116] T. TAKAGI and M. SUGENO, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, n°1, p. 17, 1985.
- [117] Y. Thiaux, J. Seigneurbieux, B. Multon, and H. Ben Ahmed, "Load profile impact on the gross energy requirement of stand-alone photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 602-613, 2010.

- [118] D. Dinh Vinh, C. Forgez, K. El Kadri Benkara, and G. Friedrich, "Impedance Observer for a Li-Ion Battery Using Kalman Filter," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 3930-3937, 2009.
- [119] L. Zhi and L. Han-Xiong, "Probabilistic fuzzy logic system: A tool to process stochastic and imprecise information," in *Fuzzy Systems, 2009. FUZZ-IEEE 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 848-853.
- [120] L. Han-Xiong and L. Zhi, "A probabilistic fuzzy logic system: Learning in the stochastic environment with incomplete dynamics," in *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 383-388.
- [121] L. Zhi and L. Han-Xiong, "A probabilistic fuzzy logic system for modeling and control," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 848-859, 2005.
- [122] Z. Geng, L. Han-Xiong, and G. Min, "Design a Wind Speed Prediction Model Using Probabilistic Fuzzy System," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 819-827, 2012.
- [123] R. H. Lasseter, "Smart Distribution: Coupled Microgrids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, pp. 1074-1082, 2011.
- [124] C. Chih-Knan, C. Hung-Yuan, and L. Jin-Jye, "A self-learning fuzzy logic controller using genetic algorithms with reinforcements," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 460-467, 1997.
- [125] S. Teo Lian, M. Bin Khalid, and R. Yusof, "Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithm," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 226-236, 1999.
- [126] G. DI MARZO SERUGENDO, M.-P. GLEIZES, and A. KARAGEORGOS, "Self-organization in multi-agent systems," *The Knowledge Engineering Review*, vol. 20:2, pp. 165-189, 2005.
- [127] I. Zabet and M. Montazeri, "Decentralized control and management systems for power industry via multiagent systems technology," in *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010 4th International*, 2010, pp. 549-556.
- [128] C. Jaouen, B. Multon, and F. Barruel, "Design optimization methodology for power converters based on global energy requirement criteria. Application to a DC-DC flyback structure," in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, 2011, pp. 1-10.
- [129] S. D. A. Fletcher, P. J. Norman, S. J. Galloway, and G. M. Burt, "Determination of protection system requirements for dc unmanned aerial vehicle electrical power networks for enhanced capability and survivability," *Electrical Systems in Transportation, IET*, vol. 1, pp. 137-147, 2011.
- [130] E. B. Mesut and R. M. Nikhil, "Overcurrent Protection on Voltage-Source-Converter-Based Multiterminal DC Distribution Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 406-412, 2007.
- [131] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of Low-Voltage DC Microgrids," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1045-1053, 2009.
- [132] M. Rabinowitz, "Power systems of the future. 4," *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 20, pp. 4-9, 2000.
- [133] C. BAUMANN, "Architecture et gestion d'un réseau continu maillé haute-tension pour l'aéronautique," Doctorat de l'Université de Toulouse, 2009.
- [134] "Energy Technology Perspectives," International Energy Agency, 2010
- [135] F. Chevie and F. Guély, "Cahier technique n° 191 - La logique floue," in *Cahiers Techniques Schneider*, ed, 1998.
- [136] B. Robyns, B. François, P. Degobert, and J. P. Hautier, "Vector Control of Induction Machines", 2012, 978-0-85729-900-0