



**HAL**  
open science

# Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés

Mohamed Mehdi Nasser

► **To cite this version:**

Mohamed Mehdi Nasser. Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés. *Energie électrique. Arts et Métiers ParisTech*, 2011. Français. NNT : 2011ENAM0005 . pastel-00593845

**HAL Id: pastel-00593845**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00593845>**

Submitted on 17 May 2011

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

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

École doctorale n°432 : SMI

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité “ Génie Electrique ”**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Mohamed NASSER**

le 05 Mai 2011

**Supervision de sources de production d'électricité hybrides  
éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou  
isolés.**

Directeur de thèse : **Benoît Robyns**

**Jury**

**M. Cristian NICHITA**, Professeur, GREAH, Université du Havre  
**M. Jean Claude VANNIER**, Professeur, EA 4454, Supélec  
**M. Benoît ROBYNS**, Professeur, L2EP, HEI  
**M. Francis LABRIQUE**, Professeur, LEI, UCL, Belgique  
**M. Xavier GUILLAUD**, Professeur, L2EP, École Centrale  
**M. Christophe Saudemont**, Maître des conférences, L2EP, HEI

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur



# Remerciements

Cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien de la direction de HEI, je tiens à leur exprimer ici, notamment à Monsieur Jean Marc Idoux, Directeur Général, toute ma reconnaissance pour la confiance placée en moi à travers cette thèse doctorale.

Toute ma reconnaissance va aussi à Monsieur Benoît Robyns, Directeur de la Recherche à HEI, pour m'avoir encadré durant les cinq années de thèse. Je vous remercie pour les multiples relectures du manuscrit et l'entière disponibilité dont vous avez fait preuve à chaque fois que j'ai eu besoin de vous.

Merci Arnaud Vergnol pour tes connaissances en Matlab Simulink et tes qualités humaines, elles m'ont permis d'arriver à bon port.

Je tiens à remercier Monsieur Francis LABRIQUE, de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury de cette thèse.

Je remercie les membres du jury, Monsieur Cristian NICHITA, Monsieur Jean Claude VANNIER, Monsieur Xavier GUILLAUD et Monsieur Christophe SAUDEMONT d'avoir accepté d'évaluer mon travail et y apporter leurs remarques constructives.

Durant cette thèse, un facteur important pour la réussite des travaux est le facteur humain. A cet effet, je tiens à remercier tous mes collègues du département EEA : Philippe Biela, Arnaud Davigny, Christophe Saudemont, Jonathan Sprooten, He Zhang et Minh Thang Do.

Enfin, merci à ma famille, à mes parents et mes beaux parents, ceux qui sont là et ceux qui sont partis, à vous qui m'avez soutenu durant mes travaux. Merci à mon épouse Anne qui m'a aidé quand j'avais des baisses de régime et mes enfants Laura, Laetitia, Sarah et Samy.



# Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP) de Lille dans les locaux de l'École des Hautes Études d'Ingénieur (HEI), dans le cadre de mes activités de recherche en tant qu'enseignant-chercheur de ce même établissement. Il conclut environ cinq années de recherche au sein de l'équipe Réseaux (L2EP).

L'objectif de cette thèse est la mise en place d'une supervision multi niveaux d'une source hybride éolien/hydraulique/stockage. A travers l'étude de cette thèse, nous allons brosser un tableau de toutes les étapes franchies pour parvenir à ce résultat. Les aspects concernant le choix de la configuration de notre source hybride, jusqu'à l'implantation expérimentale en passant par la simulation du système, sont décrits dans ce mémoire.



# Table des matières

|  |          |
|--|----------|
| <b>Introduction générale.....</b>  | <b>1</b> |
| <b>Chapitre I : État de l'art et synthèse sur la situation actuelle, perspectives des sources de production d'électricité hydraulique.....</b> | <b>7</b> |
| I.1. Notions générales sur les petites centrales hydroélectriques (PCH) .....  | 9        |
| I.1.1. La définition d'une petite centrale hydroélectrique .....   | 9        |
| I.1.2. Les différents types de PCH .....   | 10       |
| I.1.3. Classement des PCH.....   | 10       |
| I.1.4. La part des PCH parmi les autres formes d'énergies renouvelables dans le monde.....   | 11       |
| I.1.5. Facteurs de rendements des différentes sources d'énergies renouvelables.....  | 11       |
| I.1.6. Principe de l'hydroélectricité .....  | 12       |
| I.2. Microcentrales hydroélectriques: .....  | 13       |
| I.2.1. Les différentes composantes d'une microcentrale hydroélectrique .....   | 13       |
| I.2.2. Les grandeurs caractéristiques de microcentrale hydroélectrique.....  | 16       |
| I.3. Le contexte de la petite hydroélectricité en Europe et en France.....   | 17       |
| I.3.1. Le contexte au sein de l'Union Européenne.....  | 17       |
| I.3.2. Le contexte en France.....  | 18       |
| I.3.2.1. La production totale d'électricité en France.....   | 18       |
| I.3.2.2. La production des PCH en France.....  | 19       |
| I.3.3. Les activités d'une microcentrale hydroélectrique .....   | 20       |
| I.3.4. Le choix de type de turbine d'une microcentrale hydroélectrique.....  | 20       |
| I.3.5. Typologie des turbines:.....  | 22       |
| I.3.5.1. Turbines à action : Turbines Pelton et Crossflow .....  | 23       |
| I.3.5.2. Turbines à réaction : Turbines Francis et Kaplan .....  | 24       |
| I.3.6. Le choix de type d'alternateur .....  | 26       |
| I.3.7. Quelles perspectives pour la petite hydraulique ? .....   | 27       |
| I.4. Paramètres communs à toutes les turbines hydrauliques : .....   | 28       |
| I.4.1. Rendement des turbines hydrauliques.....  | 28       |
| I.4.2. Modèle simplifié d'une turbine hydraulique .....  | 29       |
| I.4.3. Choix de la turbine Kaplan.....   | 30       |
| I.5. Avantages, inconvénients et limites d'utilisation des turbines hydrauliques .....   | 31       |
| I.5.1. Avantages.....  | 31       |
| I.5.2. Inconvénients .....   | 31       |
| I.5.3. Limites d'utilisation des turbines hydrauliques à vitesse fixe.....   | 32       |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| I.6.  | Proposition d'une structure.....   | 33        |
| I.7.  | Conclusion.....  | 35        |
| I.8.  | Bibliographie.....   | 35        |
| <b>Chapitre II : Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable. Validation expérimentale.....</b> |  | <b>37</b> |
| II.1.   | Introduction.....  | 39        |
| II.2.   | Représentation Énergétique Macroscopique (REM) de la micro centrale hydroélectrique.....         | 39        |
| II.2.1.   | Définition de la REM.....  | 39        |
| II.2.2.   | Notations.....   | 40        |
| II.3.   | Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique.....                              | 40        |
| II.3.1.   | Modélisation de la source d'énergie primaire.....  | 41        |
| II.3.2.   | Modélisation de la turbine hydraulique.....  | 41        |
| II.3.3.   | Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.....                                     | 42        |
| II.3.3.1.   | Modélisation des circuits de l'induit.....   | 43        |
| II.3.3.2.   | Modélisation de la partie électromécanique.....  | 44        |
| II.3.4.   | Modélisation de la chaîne de conversion électronique.....  | 45        |
| II.3.4.1.   | Modélisation des convertisseurs statiques.....   | 45        |
| II.3.4.2.   | Modélisation du bus continu.....   | 46        |
| II.3.5.   | Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....                                 | 47        |
| II.3.5.1.   | Modélisation de la partie électrique.....  | 47        |
| II.3.5.2.   | Modélisation de la partie électromécanique.....  | 51        |
| II.3.6.   | Modèle graphique du système complet de génération hydroélectrique.....                           | 51        |
| II.4.   | Stratégie de commande de la microcentrale hydroélectrique connectée sur un site isolé.....       | 53        |
| II.4.1.   | Stratégie de commande de la MADA.....  | 53        |
| II.4.2.   | Stratégie de commande de la MSAP.....  | 57        |
| II.4.3.   | Régulation de la tension du bus continu.....   | 58        |
| II.4.4.   | Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté sur sites isolés..... | 59        |
| II.4.5.   | Simulations.....   | 60        |
| II.4.6.   | Interprétation.....  | 62        |
| II.4.7.   | Conclusion.....  | 62        |
| II.5.   | Validation expérimentale.....  | 62        |
| II.5.1.   | Présentation de la plateforme d'essais.....  | 62        |
| II.5.1.1.   | Émulateur de la turbine hydraulique (ETH).....   | 63        |
| II.5.1.2.   | La machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....  | 63        |
| II.5.1.3.   | La machine asynchrone à double alimentation (MADA).....  | 64        |
| II.5.1.4.   | Les convertisseurs statiques.....  | 64        |
| II.5.2.   | Essais expérimentaux sur un site isolé.....  | 65        |
| II.5.3.   | Interprétation.....  | 66        |

|  |           |
|--|-----------|
| II.5.4. Conclusion.....  | 70        |
| II.6. Modélisation et simulation de la microcentrale hydroélectrique débitant sur un réseau interconnecté ....   | 71        |
| II.6.1. Stratégie de commande en mode de fonctionnement sur réseau interconnecté.....  | 71        |
| II.6.2. Simulations.....   | 73        |
| II.6.3. Interprétation.....  | 76        |
| II.6.4. Conclusion.....  | 76        |
| II.6.5. Essais expérimentaux sur réseau interconnecté.....   | 77        |
| II.6.6. Interprétation.....  | 77        |
| II.7. Conclusion.....  | 80        |
| II.8. Bibliographie.....   | 80        |
| <b>Chapitre III : Association d'un générateur éolien à vitesse fixe avec une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable.....</b> | <b>83</b> |
| III. 1. Introduction.....  | 85        |
| III. 1.1. Système hybride éolien/hydraulique à l'éclusé.....   | 85        |
| III. 1.2. Système hybride éolien/hydraulique à petite échelle.....   | 86        |
| III. 1.3 Conclusion.....   | 89        |
| III. 2. Modélisation et simulation du système hybride éolien/hydroélectrique.....  | 90        |
| III. 2.1. Modélisation du vent.....  | 91        |
| III. 2.2 Modélisation du débit de l'eau.....   | 93        |
| III. 2.3. Modélisation d'une éolienne à vitesse fixe.....  | 94        |
| III. 2.4. Modèle graphique de la source hybride éolien/hydroélectrique.....  | 97        |
| III.2.5. Simulations de la source hybride éolien/hydroélectrique connectée sur site isolé.....   | 97        |
| III. 2.6. Interprétation des résultats.....  | 101       |
| III. 2.7. Validation expérimentale.....  | 101       |
| III. 2.8. Interprétation des résultats.....  | 107       |
| III. 2.9. Conclusion.....  | 108       |
| III. 2.10. Simulations d'une source hybride éolien/hydroélectrique connecté sur réseau de puissance.....   | 108       |
| III. 2.11. Validation expérimentale.....   | 110       |
| III.2.12. Interprétation de résultats.....   | 114       |
| III.2.13. Nécessité d'une gestion multi niveaux.....   | 114       |
| III.3. Les outils pour la construction d'un superviseur multi niveaux.....   | 115       |
| III. 3.1. Différents types de formalisme.....  | 115       |
| III. 3.1.1. Méthodes causales.....   | 116       |
| III. 3.1.2. Méthodes implicites.....   | 116       |
| III. 3.1.3. Méthodes explicites.....   | 116       |
| III. 3.2. Méthodologie retenue pour la construction du superviseur multi niveaux.....  | 116       |
| III. 3.3. Présentation d'une méthodologie implicite améliorée et basée sur la logique floue.....   | 117       |
| III.4. Conclusion.....   | 118       |

|   |            |
|---|------------|
| III.5. Bibliographies .....   | 118        |
| <b>Chapitre IV : Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage connecté à un réseau puissant .....</b> | <b>121</b> |
| IV.1 Introduction .....   | 123        |
| IV.2. Supervision basée sur la puissance hydraulique disponible .....   | 125        |
| IV.2.1 Principe de fonctionnement .....   | 125        |
| IV.2.2. Le superviseur simple .....   | 127        |
| IV.2.2.1. Détermination du cahier des charges du système .....  | 127        |
| IV.2.2.2. Structure du superviseur n°1 .....  | 127        |
| IV.2.2.3. Résultat des simulations .....  | 127        |
| IV.2.2.4. Interprétation des résultats : .....  | 130        |
| IV.2.2.5. Conclusion .....  | 130        |
| IV.2.3. Supervision basée sur la méthodologie implicite avec utilisation de logique floue.....                              | 131        |
| IV.2.3.1. Introduction.....   | 131        |
| IV.2.3.1. Méthodologie pour la construction du superviseur n°2 .....  | 131        |
| IV.2.3.2. Résultat des simulations .....  | 136        |
| IV.2.3.3. Interprétation .....  | 137        |
| IV.2.3.4. Conclusion .....  | 138        |
| IV.3. Supervision basée sur l'écart entre la puissance filtrée et non filtrée de l'éolienne .....                           | 139        |
| IV.3.1. Introduction .....  | 139        |
| IV.3.2. Méthodologie pour la construction du superviseur n°3 .....  | 139        |
| IV.3.2.1. Détermination du cahier des charges du système .....  | 139        |
| IV.3.2.2. Structure du superviseur n°3.....   | 140        |
| IV.3.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels » .....  | 140        |
| IV.3.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance .....  | 142        |
| IV.3.2.5. Détermination des « graphes opérationnels ».....  | 143        |
| IV.3.2.6. Extraction des lois floues .....  | 144        |
| IV.3.3. Résultat des simulations .....  | 144        |
| IV.3.2. Interprétation.....   | 145        |
| IV.3.2. Conclusion.....   | 145        |
| IV.4. Supervision basée sur la puissance hybride .....  | 146        |
| IV.4.1. Introduction .....  | 146        |
| IV.4.2. Méthodologie pour la construction du superviseur .....  | 146        |
| IV.4.2.1. Détermination du cahier des charges du système .....  | 146        |
| IV.4.2.2. Structure du superviseur n°4.....   | 147        |
| IV.4.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels » .....  | 147        |
| IV.4.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance .....  | 150        |
| IV.4.2.5. Détermination des « graphes opérationnels ».....  | 152        |

|  |            |
|--|------------|
| IV.4.2.6. Extraction des lois floues .....   | 153        |
| IV.4.3. Résultat des simulations .....   | 154        |
| IV.4.4. Interprétation.....  | 154        |
| IV.4.5. Conclusion.....  | 155        |
| IV.5 Supervision basée sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation de l'énergie produite par la source hydraulique .....                          | 156        |
| IV.5.1. Introduction.....  | 156        |
| IV.5.2. Fonction d'optimisation .....  | 156        |
| IV.5.3. Structure du superviseur d'optimisation.....   | 157        |
| IV.5.3. Résultat des simulations .....   | 159        |
| IV.5.4. Interprétation des résultats.....  | 162        |
| IV.5.5. Conclusion.....  | 162        |
| IV.6. Comparaison de cinq stratégies de supervision sans l'apport de stockage .....  | 163        |
| IV.7. Conclusion .....   | 164        |
| IV.8. Bibliographie .....  | 165        |
| <b>Chapitre V : Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court terme.....</b> | <b>167</b> |
| V.1. Introduction .....  | 169        |
| V.2. Structure global du système .....   | 171        |
| V.3. Modèle dynamique du système de stockage et sa stratégie de commande.....  | 172        |
| V.4. Superviseur n° 1 .....  | 173        |
| V.4.1. Introduction .....  | 173        |
| V.4.2. Méthodologie pour la construction du superviseur .....  | 174        |
| V.4.2.1. Détermination du cahier des charges du système.....   | 174        |
| V.4.2.2. Structure du superviseur n°1 .....  | 174        |
| V.4.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels » .....  | 175        |
| V.4.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance.....   | 176        |
| V.4.2.5. Détermination des « graphes opérationnels ».....  | 178        |
| V.4.2.6. Extraction des lois floues.....   | 178        |
| V.4.3. Résultat des simulations.....   | 178        |
| V.4.4. Interprétation des résultats.....   | 181        |
| V.4.5. Conclusion .....  | 182        |
| V.5 Superviseur n° 2 .....   | 182        |
| V.5.1. Introduction .....  | 182        |
| V.5.2. Méthodologie pour la construction du superviseur .....  | 182        |
| V.5.2.1. Détermination du cahier des charges du système.....   | 182        |
| V.5.2.2. Structure du superviseur étudié.....  | 182        |
| V.5.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels » .....  | 183        |

|   |            |
|---|------------|
| V.5.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance.....  | 185        |
| V.5.2.5. Détermination des « graphes opérationnels ».....   | 187        |
| V.5.2.6. Extraction des lois floues.....  | 187        |
| V.5.3. Résultat des simulations.....  | 188        |
| V.5.4. Interprétation des résultats.....  | 191        |
| V.5.5. Conclusion.....  | 191        |
| V.6. Superviseur n° 3.....  | 191        |
| V.6.1. Introduction.....  | 191        |
| V.6.2. Méthodologie pour la construction du superviseur.....  | 192        |
| V.6.2.1. Détermination du cahier des charges du système.....  | 192        |
| V.6.2.2. Structure du superviseur étudié.....   | 192        |
| V.6.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels ».....  | 193        |
| V.6.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance.....  | 195        |
| V.6.2.5. Détermination des « graphes opérationnels ».....   | 197        |
| V.6.2.6. Extraction des lois floues.....  | 200        |
| V.6.3. Résultat des simulations.....  | 202        |
| V.6.4. Interprétation des résultats.....  | 205        |
| V.6.5. Conclusion.....  | 205        |
| V.7. Superviseur n° 4.....  | 206        |
| V.7.1. Introduction.....  | 206        |
| V.7.2. Méthodologie pour la construction du superviseur.....  | 206        |
| V.7.2.1. Détermination du cahier des charges du système.....  | 206        |
| V.7.2.2. Structure du superviseur étudié.....   | 206        |
| V.7.2.3. Détermination des graphes fonctionnels du superviseur niveau moyen terme.....  | 208        |
| V.7.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance du superviseur niveau moyen terme.....  | 209        |
| V.7.2.5. Détermination des graphes opérationnels du superviseur niveau moyen terme.....   | 211        |
| V.7.2.6. Extraction des lois floues.....  | 212        |
| V.7.3. Résultat des simulations.....  | 214        |
| V.7.4. Interprétation.....  | 218        |
| V.8. Comparaison des quatre stratégies de supervision.....  | 219        |
| V.9. Conclusion.....  | 220        |
| V.10. Bibliographie.....  | 221        |
| <b>Chapitre VI : Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique associé à un dispositif de stockage à court et à moyen terme.....</b> | <b>223</b> |
| VI.1. Introduction.....   | 225        |
| VI.2. Structure global du système.....  | 227        |
| VI.3. Méthodologie pour la construction du superviseur.....   | 229        |
| VI.3.1. Détermination du cahier des charges du système.....   | 229        |

|   |            |
|---|------------|
| VI.3.2. Structure du superviseur étudié.....                        | 229        |
| VI.4. Résultat des simulations.....                                 | 230        |
| VI.5. Interprétation.....   | 234        |
| VI.6. Conclusion.....   | 235        |
| VI.6. Bibliographies.....   | 236        |
| <b>Conclusion générale et perspectives.....</b>                     | <b>237</b> |
| <b>Annexe 1: Architecture matérielle du banc d'essai.....</b>       | <b>243</b> |
| <b>Annexe 2 : Données de la plateforme expérimentale d'HEI.....</b> | <b>247</b> |
| <b>Annexe 3: Résultats des simulations.....</b>                     | <b>249</b> |



# Introduction générale

Le protocole de Kyoto pour la réduction des gaz à effet de serre, a conduit à un fort développement des énergies renouvelables, et donc à une décentralisation de la production d'énergie électrique.

La production décentralisée d'origine renouvelable se développe actuellement de manière très significative, et la puissance installée est amenée à croître très fortement dans les années à venir. Le problème majeur posé par cette catégorie de source réside dans son caractère aléatoire et fluctuant. En conséquence, aujourd'hui, pour des raisons diverses la majorité des sources d'énergie décentralisées ne participent pas aux services système:

- Incapacité technique. Certaines technologies ne sont pas à priori adaptées.
- Pas de demande de la part des gestionnaires du réseau de transport (GRT)
- Non rentable économiquement

Ainsi, tant que les générateurs éoliens n'étaient présents qu'à très petite échelle sur le réseau haute tension catégorie A (HTA), ils n'avaient d'influence ni sur la qualité de l'énergie, ni sur le fonctionnement et l'exploitation des réseaux. Par conséquent, ils étaient considérés par le gestionnaire de réseaux comme des générateurs passifs, et devaient se déconnecter en cas d'incidents même légers, survenant sur le réseau [Luo 06].

Cependant, dans la mesure où le taux de pénétration des éoliennes deviendra significatif dans les prochaines années, une évolution vers de nouvelles architectures bien adaptées à ces nouveaux générateurs dispersés sera à imaginer pour les décennies à venir.

Cette nouvelle architecture fera des producteurs décentralisés des acteurs à part entière du système électrique.

Une de ces architectures est le concept de système multi sources avec une gestion intégrée et optimisée de l'énergie, auquel différents systèmes de stockage sont associés, afin d'augmenter le taux de pénétration des éoliennes dans les réseaux électriques.

Les générateurs et les systèmes de stockage d'une centrale multi sources peuvent être localisés en différents points du réseau, mais sont gérés par un opérateur industriel unique. Du point de vue des gestionnaires des réseaux de transport et de distribution, ce type de centrale, appelée centrale virtuelle,

doit pouvoir se comporter comme une centrale classique et en conséquence participer pleinement aux services système.

Dans ce contexte, il apparaît intéressant d'associer les sources de productions éoliennes et hydrauliques. En effet, le débit d'eau ne change généralement pas aussi vite que la vitesse du vent, sauf lors d'événements météorologiques exceptionnels mais souvent prévisibles. Dès lors, la petite hydraulique à vitesse variable [Fra 06], [Ans, 06a] et [Ans, 06b] a la capacité de compléter utilement l'éolien. Au regard des caractéristiques du couple et de la puissance mécanique de la turbine hydraulique en fonction de sa vitesse de rotation pour un débit constant, une variation de la vitesse de la turbine entraîne une variation de puissance [Pac 95].

Le développement de l'électronique de puissance en termes de coût et de performances techniques permet d'envisager de faire varier la vitesse de la turbine hydraulique de façon à accroître la productivité totale de la source hybride, mais aussi d'assurer un service au système en participant au réglage de fréquence du réseau par exemple [Hém 99].

L'intérêt de la vitesse variable est de pouvoir extraire le maximum de puissance de la turbine hydraulique quel que soit le débit, et ainsi optimiser le fonctionnement de la turbine [Fra 06]. La vitesse variable de la turbine hydraulique peut compenser les fluctuations du vent et soutenir des générateurs éoliens. L'association d'un ou plusieurs systèmes de stockage à une unité de production hybride peut augmenter les possibilités de gestion d'énergie.

L'originalité de ces travaux est que la source hybride est constituée uniquement par des générateurs électriques à base d'énergie renouvelable. L'avantage de cette solution est le remplacement d'une éventuelle turbine à gaz (source polluante) par une turbine hydraulique à vitesse variable.

Cependant, comme la problématique de l'éolien se retrouve à tous les niveaux temporels de gestion, il est nécessaire de mettre en place une supervision multi niveaux de la centrale virtuelle éolien/hydraulique/stockage envisagée. A chaque niveau correspond des objectifs et des moyens à définir pour répondre à ces exigences.

Afin de guider et rendre systématique la modélisation et la conception de la supervision hybride, une méthodologie de développement de superviseurs à logique floue des centrales multi sources à base d'énergie renouvelable est utilisée [Spr 09], [Cim 06], [Esk 06], [Bou 07] et [Abb 05].

Cette thèse s'intègre dans le thème de Recherche « systèmes multi sources multi stockages » de l'équipe RESEAUX du L2EP, et elle est la suite logique de précédents travaux de Masters, ainsi que des articles rédigés et publiés au sein de l'équipe RESEAUX du L2EP.

A noter que j'ai travaillé en parallèle avec le projet de thèse sur la microcentrale hydraulique à vitesse variable [Bre 08] lors de l'implantation expérimentale de celle-ci au sein du laboratoire L2EP (HEI).

Mon rapport de thèse est structuré en 6 chapitres et 3 annexes. La bibliographie est associée à chaque chapitre.

Le premier chapitre présente l'état de l'art et la synthèse sur la situation actuelle, les perspectives des sources de production d'électricité hydraulique et les hypothèses retenues. Ainsi, les différentes technologies utilisées dans les petites centrales hydroélectriques, les caractéristiques et paramètres des micro-turbines et leur modélisation sont présentés. Les résultats issus de ce chapitre permettront de choisir une structure de couplage mécanique d'une microcentrale hydroélectrique.

Le deuxième chapitre développe dans un premier temps la modélisation des différents composants de la microcentrale hydroélectrique sous forme de Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Ensuite, en les regroupant, un système global est défini. Ce système permet de mettre en avant les différents aspects énergétiques. A partir de cette modélisation, la commande du système global est déduite. Enfin, des simulations et des résultats expérimentaux du système de conversion électromécanique sont présentés.

Le troisième chapitre étudie l'association d'une microcentrale hydraulique et d'une centrale éolienne. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé. D'abord, on présente l'état actuel du système éolien/hydraulique, en regroupant l'ensemble des articles ou contenus d'ouvrages. Ensuite, la modélisation des différentes sources sous forme de (REM) est effectuée. Les simulations et les résultats expérimentaux du système global permettront de conclure sur la nécessité d'une gestion multi niveaux de ce système complexe et d'outils pour sa réalisation.

Le quatrième chapitre présente la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage et connecté à un réseau puissant. Cinq superviseurs ont été testés afin d'optimiser la production de l'énergie hydraulique. D'abord, les superviseurs sont analysés et critiqués. Ensuite, le bilan de chaque superviseur est présenté. Enfin, on propose un tableau comparatif de ces cinq superviseurs suivant trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique.

Le chapitre cinq développe la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court terme connecté sur le bus alternatif. Quatre superviseurs ont été testés et un tableau comparatif de ces quatre superviseurs a été proposé suivant les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique.

Enfin, le chapitre six propose la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à moyen terme connecté sur le bus

alternatif. Un seul type de superviseur tenant compte de prévisions de l'eau et du vent a été testé et analysé.

Une conclusion générale et les perspectives du travail de recherche finiront la thèse.

## **Bibliographie**

- [Abb 05] C. Abbey, G. Joos, « Energy management strategies for optimization of energy storage in wind power hybrid system ». Power Electronics Specialists Conference (PESC2005), 2005, p. 2066-2072.
- [Ans, 06a] A. Ansel, B. Robyns, “Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station”. Mathematics and computers in simulation, vol. 71, issues 4 – 6, 19 June 2006.
- [Ans, 06b] A. Ansel, B. Robyns, “Small hydroelectricity: from fixed to variable speed electromechanical drives,” Electromotion Journal, vol.13, n°2. April-June 2006.
- [Bou 07] G. Boukettaya, L. Krichen, A. Ouali, « Fuzzy logic supervisor for power control of an isolated hybrid energy production unit ». International Journal of Electrical and Power Engineering, 2007, p. 279-285.
- [Breb 08] S. Breban, « Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable », thèse de doctorat présentée en décembre 2008, École Supérieure d'Arts et Métiers de Lille.
- [Cim 06] G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, « Control and performance evaluation of a flywheel energy storage system associated to a variable speed wind generator ». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, 2006, p. 1074-1085.
- [Esk 06] M. N. Eskander, El-Shatter T. F., El-Hagry M. T., « Energy flow management of a hybrid Wind/PV/Fuel cell generation system », Energy Conversion and Management, vol. 47, 2006, p. 1264-1280.
- [Fra 06] J. Fraile –Ardanuy. J. Roman, « Variable speed hydro generation: Operational aspects and control ». IEEE Transactions on energy conversion, vol. 21, no° 2, June 2006, pp. 569-574.
- [Hém 99] G. Hémerly et J. Coulon, « Centrales hydroélectriques et apport de la vitesse variable », REE, n° 11 Décembre 1999, pp 46-52.
- [Luo 06] C. Luo, B. Ooi, “Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms”. IEEE Transactions on power systems, vol.21, N°3. September 2006, pp. 708-716.
- [Pac 95] PACER , “Petites centrales hydrauliques – Turbines hydrauliques,” Report of PACER Program, 1995. Switzerland.

[Spr 09] J. Sprooten V. Courtecuisse, B. Robyns, J. Deuse, « Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multi sources à base d'énergie renouvelable », EJEE vol. 12, N°. 5-6, pp.553-583, 12-2009.



# **Chapitre I : État de l'art et synthèse sur la situation actuelle, perspectives des sources de production d'électricité hydraulique**

Nous présentons l'état de l'art du domaine en regroupant l'ensemble des articles ou contenus d'ouvrages, que nous avons choisi pour commencer cette étude.

Dans le bilan que nous présenterons ensuite, nous donnerons les grands axes de recherche vers lesquels nous avons souhaité nous orienter à la lueur de cette étude. Ensuite, nous situerons notre étude dans le contexte national et international et nous tirerons les premières conclusions.

Ce chapitre présente les différentes technologies utilisées dans les petites centrales hydroélectriques, les caractéristiques et paramètres des micro-turbines et leur modélisation. Les résultats issus de cette étape permettront de choisir la structure de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique pour la suite de cette thèse



## CHAPITRE I

### État de l'art et synthèse sur la situation actuelle, perspectives des sources de production d'électricité hydraulique

#### I.1. Notions générales sur les petites centrales hydroélectriques (PCH)

À côté des centrales de très forte puissance (installations sur des fleuves de plusieurs dizaines de MW) qui nécessitent de grands barrages complexes et coûteux et dont les impacts écologiques et humains sont très importants (modification des cours d'eau, ensablement, inondation de vallées et déplacement de population...), il est possible de produire de l'électricité à partir de petits cours d'eau et d'installations plus simples dites « au fil de l'eau » (simples prises d'eau sur rivières).

##### I.1.1. La définition d'une petite centrale hydroélectrique [Ade 06]

Une PCH se définit comme une installation de production énergétique, d'une puissance inférieure à 10 MW, transformant l'énergie hydraulique d'un cours d'eau en énergie électrique.

La petite hydroélectricité est une forme de production d'énergie répondant aux trois critères fixés dans la définition généralement admise pour les énergies renouvelables :

###### a. Pérennité des ressources

Les énergies renouvelables sont basées sur l'exploitation de flux naturels d'énergie : rayonnement solaire, cycle de l'eau, des vents, flux de la chaleur de la terre, effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Ce sont donc des énergies inépuisables à l'inverse des énergies fossiles et minières (charbons, pétroles, gaz naturel et uranium).

L'énergie hydroélectrique utilise presque exclusivement la partie « terrestre » du cycle de l'eau, c'est-à-dire celle qui concerne l'écoulement de l'eau entre l'arrivée à terre des précipitations (pluies et neiges) et le retour à la mer.

## b. Respect de l'environnement

L'hydroélectricité n'a recours à aucune combustion. Elle n'émet donc aucun gaz pouvant concourir à l'effet de serre, problème majeur à l'échelle planétaire.

## c. Possibilité de production décentralisée.

Le plus souvent, l'énergie hydroélectrique se trouve partout sur la terre. Elle représente une énergie décentralisée, même si les régions de production sont principalement situées en zone montagneuses et en zones rurales.

### I.1.2. Les différents types de PCH

- Les centrales de haute chute : Dans ce cas, la puissance est principalement liée au fort dénivelé (hauteur de chute supérieure à 100 m) entre la prise d'eau et le rejet. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de petite centrale.
- Les centrales de moyenne chute : La puissance est liée à la fois à la hauteur de chute et au débit turbiné. On trouvera notamment ce type de PCH dans le Massif Central.
- Les centrales de basse chute. La puissance dépend alors du débit turbiné. Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste courte. L'ouvrage le plus important est le barrage ou la prise d'eau, le plus souvent construit en béton.

### I.1.3. Classement des PCH

La notion de petite hydraulique est variable selon les pays. A l'heure actuelle, il n'y pas de définition internationale fixant les gammes de puissance des installations. Les notions de petite, mini et micro hydraulique sont présentes dans la littérature et certaines différences sont illustrées au **tableau 1.1** [Dra 01], [Pai 02].

| Pays   | Micro (kW) | Mini (kW) | Petite (MW) |
|--------|------------|-----------|-------------|
| USA    | <100       | 100-1000  | 1-30        |
| France | 20-500     | 500-2000  | 2-10        |
| Chine  | 5-5000     | -         | -           |
| Inde   | <100       | 101-1000  | 1-15        |

**Tableau 1.1.** Définitions de petite, micro, mini hydraulique

#### I.1.4. La part des PCH parmi les autres formes d'énergies renouvelables dans le monde

La micro-hydroélectricité est une technologie éprouvée et parvenue à maturité [Hem 99]. Idéale pour l'électrification des sites isolés, elle apporte un appoint à la production électrique nationale en cas de forte consommation. Une étude menée par l'European Small Hydraulic Association (ESHA) estime les ressources de potentiel de l'Union européenne encore disponible des microcentrales hydrauliques à 1700 MW.

Le **tableau 1.2** présente la part des petites centrales hydrauliques parmi les principales autres formes d'énergies renouvelables dans le monde [Dra 01].

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| Grande hydraulique<br>(>10 MW) | 86%  |
| Petite hydraulique<br>(<10MW)  | 8.3% |
| Éolien et Solaire              | 0.6% |
| Géothermie                     | 1.6% |
| Biomasse                       | 3.5% |

**Tableau 1.2** Production d'électricité à partir des énergies renouvelables.

#### I.1.5. Facteurs de rendements des différentes sources d'énergies renouvelables

L'hydroélectricité est largement acceptée comme une énergie propre et compatible avec les contraintes environnementales, mais cela n'a pas toujours été le cas à cause des importants ouvrages d'art que nécessite la mise en place des grands barrages (déviation de cours d'eau, inondations locales, déplacements de population, etc.). Au-delà du potentiel écologique, une comparaison basée sur un facteur de rendement fonction de l'installation montre que l'hydroélectricité reste la forme la plus rentable de production d'énergie. Ce facteur de rendement est le ratio entre la quantité d'énergie produite par l'installation pendant toute sa durée de vie et l'énergie requise pour la mise en place de l'équipement de production, y compris son alimentation. (Voir **Tableau 1.3**) [Dra 01].

| Installation        | Facteur de rendement |
|---------------------|----------------------|
| Petite hydraulique  | 80-100               |
| Grande hydraulique  | 100-200              |
| Photovoltaïque      | 3-5                  |
| Solaire (thermique) | 20-50                |
| Énergie Éolienne    | 10-30                |

**Tableau 1.3** Facteur de rendement pour différentes centrales d'énergie

### I.1.6. Principe de l'hydroélectricité

L'énergie d'un fluide peut se décomposer en :

- Énergie cinétique

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (1.1)$$

- Énergie potentielle

$$E_p = mgh \quad (1.2)$$

- Énergie de pression

$$E_{pres} = m \frac{p}{\rho} \quad (1.3)$$

Avec :

m (kg) = masse du fluide

v (m/sec) = vitesse du fluide

h (m) = hauteur de chute du fluide

g (m/sec<sup>2</sup>) = accélération de la pesanteur

p (Pa) = pression du fluide

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) = masse volumique du fluide

L'énergie totale par kg de fluide s'exprime donc par l'équation de Bernoulli, en introduisant une hauteur équivalente H utilisée par les Hydrauliciens :

$$\frac{E}{m} = \frac{v^2}{2} + hg + \frac{p}{\rho} = gH \quad (1.4)$$

La puissance hydraulique  $P_{hyd}$  se détermine à partir de l'expression de l'énergie :

$$P_{hyd} = \frac{E}{t} = \frac{gHm}{t} = gH \frac{mV_{ol}}{V_{ol}t} = \rho g H q \quad (1.5)$$

Avec :

$V_{ol}$  (m<sup>3</sup>) = volume

$q$  (m<sup>3</sup>/sec) = débit

$H$  (m) = hauteur nette de la chute

La puissance hydraulique nette s'obtient en déduisant de  $H$  des pertes de charge existant dans les conduites forcées des canaux de dérivations, exprimées en mètre.

## I.2. Microcentrales hydroélectriques: [Ade 06]

La micro-hydroélectricité est idéale pour l'électrification des sites isolés, elle apporte un appoint à la production électrique nationale en cas de forte consommation.

### I.2.1. Les différentes composantes d'une microcentrale hydroélectrique

Une microcentrale hydroélectrique est composée de quatre éléments principaux :

- Les ouvrages de prise d'eau (digues, barrage)

La forme et les dimensions de cet ouvrage sont adaptées à la nature du terrain ou à la conformation du lit du cours d'eau. Il est construit en enrochements, en gabions en terre, en maçonnerie ou en béton. Il peut parfois tirer parti des faciès naturels et ne nécessite aucun aménagement.

La prise d'eau peut également être installée sur un canal d'irrigation ou sur une adduction d'eau potable.

- Les ouvrage d'amenée et de mise en charge (canal d'amenée, conduite forcée)

Un canal d'amenée, en terre ou en béton, et la conduite forcée le plus souvent en acier ou en polyéthylène dirigent l'eau vers la centrale. Le canal est muni d'une grille qui retient les corps solides charriés par le cours d'eau.

Éventuellement, un dessableur favorise le dépôt des particules avant l'entrée dans l'installation (protection contre les crues, isolement du canal, isolation de la turbine, etc.).

Une chambre de mise en charge si le canal d'amenée est à écoulement libre, ou une cheminée d'équilibre s'il s'agit d'une conduite forcée, assure la jonction avec la conduite forcée qui alimente en eau la turbine.

➤ Les équipements de production (turbines, générateurs, système de régulation)

Dans le cas d'une turbine à réaction par exemple, l'eau est guidée par le distributeur pour rentrer sans choc dans la roue. Celle-ci se met en vitesse maximale à la sortie de la roue, cette dernière transforme en énergie mécanique l'énergie fournie par l'eau. Il existe de nombreux types de turbines s'adaptant à différentes contraintes imposées par chaque site.

Un générateur produit l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique de la turbine. C'est en général un alternateur synchrone en réseau autonome et une génératrice asynchrone en réseau connecté pour des puissances inférieures à 1000 ou 2000 kW.

Un système de régulation pour adapter en permanence les variations, parfois brutales, du débit d'eau à la demande des consommateurs (en réseau isolé) et d'utiliser au mieux l'eau disponible (en réseau interconnecté).

Un bâtiment abrite toutes les installations de production et les tableaux de commande qui peuvent être contrôlés sur place ou pilotés à distance.

Une ligne d'évacuation transporte le courant électrique produit, soit à un réseau interconnecté, soit à un réseau isolé.

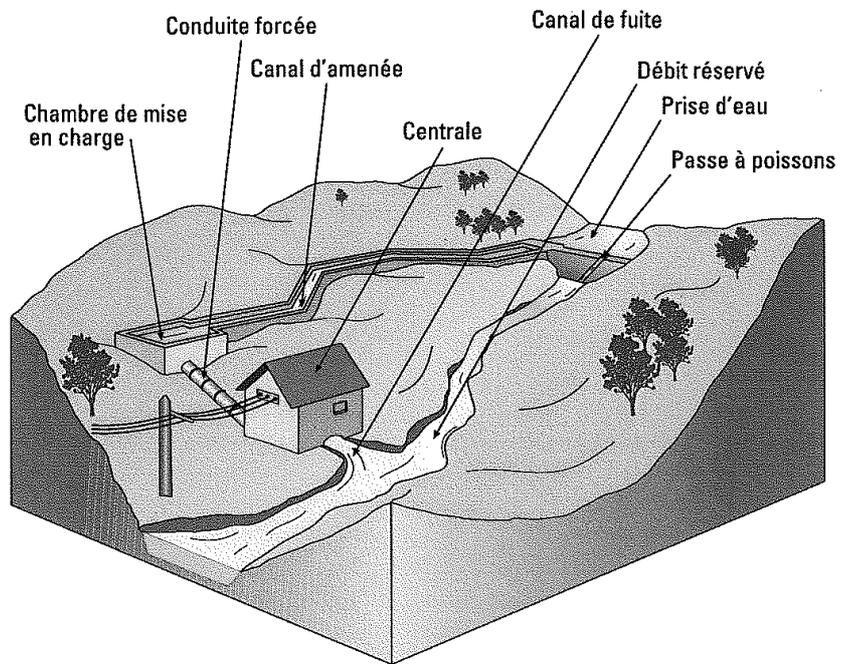
➤ Les ouvrages de restitution

A la sortie de la centrale, les eaux turbinées sont envoyées dans la rivière par un canal de fuite. Ce canal est établi soit à l'air libre, soit en galerie dans le cas où la centrale est souterraine. La longueur du canal de fuite est très variable selon le type d'aménagement.

Les schémas de la figure 1.1 représentent la structure classique d'une microcentrale hydraulique.

### Les différentes composantes d'une PCH

#### Centrale de moyenne et haute chute



#### Centrale de basse chute

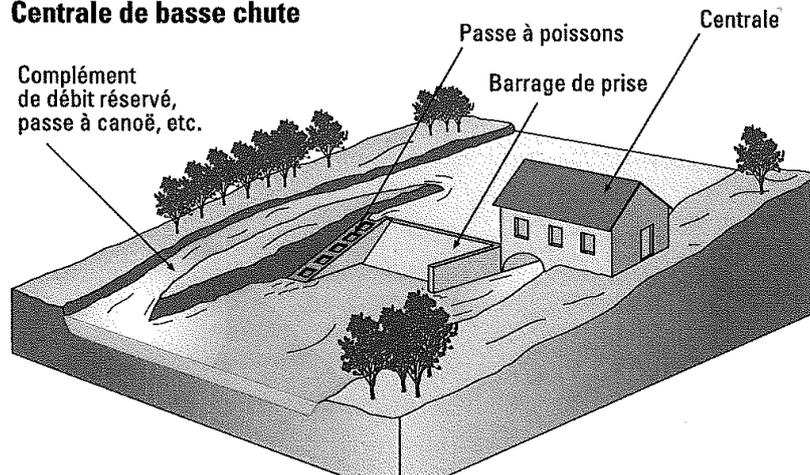


Figure 1.1. Les différentes composantes d'une petite centrale hydroélectrique [Ade 06]

Les performances d'une turbine hydraulique sont influencées par les paramètres de la colonne d'eau alimentant la turbine comme l'inertie et la compressibilité de l'eau, de même que l'élasticité intrinsèque de la canalisation. L'inertie de l'eau a pour effet de retarder la variation du débit suite à une variation de la section de passage de la vanne d'admission.

Des modèles plus précis de turbines hydrauliques font intervenir les influences de l'écoulement de l'eau comme la réflexion à travers la conduite d'amenée. La vitesse de propagation des ondes générées est d'environ 1200 m/s, ce qui n'est à prendre en compte que pour des canalisations très longues.

### I.2.2. Les grandeurs caractéristiques de microcentrale hydroélectrique

Quatre grandeurs caractéristiques permettent d'évaluer l'importance d'un aménagement hydraulique :

- le débit d'équipement,
  - la hauteur de chute,
  - la puissance de l'aménagement,
  - l'énergie électrique produite.
- Le débit d'équipement ( $Q$ ) est le débit maximum susceptible d'être turbiné par la centrale, c'est-à-dire le débit maximum absorbé par toutes les turbines lorsque celles-ci fonctionnent ensemble à pleine puissance. Il s'exprime en  $m^3/sec$ .
  - La hauteur de chute brute ( $H_b$ ) est la différence d'altitude, exprimée en mètre, entre le niveau de l'eau à la prise d'eau (côté de surface libre en eaux moyenne) et le niveau de l'eau au droit de la restitution. Elle s'exprime en m.
  - La hauteur de chute nette  $H$  tient compte des pertes de charge hydrauliques dans les ouvrages d'amenée et de restitution. Elle s'exprime en m.
  - La puissance est une fonction combinée du débit d'équipement et de la hauteur de la chute. Elle est exprimée en kilowatts (kW) ou mégawatts (MW).

On distingue habituellement la puissance brute de la puissance nette.

- La puissance hydraulique brute s'exprime par la puissance potentielle

$$P_{hydb} = 9,81QH_b\rho \quad (1.6)$$

$\rho$ : Masse volumique du fluide ( $kg/m^3$ )

- La puissance nette représente la puissance effective

$$P_{hyd} = 9,81QH\rho \quad (1.7)$$

### **I.3. Le contexte de la petite hydroélectricité en Europe et en France [Eur 08]**

Dans quelle mesure la petite hydroélectricité pourrait-elle contribuer aux objectifs fixés par l'Europe en matière d'énergies renouvelables? Quelle part pourrait représenter l'hydroélectricité dans la production électrique française ?

Le rapport [Eur 08] rappelle le contexte de la petite hydroélectricité en Europe et en France.

#### **1.3.1. Le contexte au sein de l'Union Européenne**

Les interrogations et les inquiétudes concernant les conséquences environnementales de la production d'énergie électrique au moyen de combustibles fossiles ou radioactifs ont été propices au développement des énergies renouvelables et de la production décentralisée.

Ainsi, les pays de l'Union Européenne se sont engagés à baisser leurs taux d'émissions de gaz à effet de serre de 8%, avec un objectif établi pour la période 2008-2012. Cet engagement conjoint est également connu sous la domination de « bulle européenne ». A l'intérieur de cette bulle, chaque pays européen possède un objectif propre. Celui-ci prend en compte les spécificités de chacun, à savoir son taux d'émission de gaz à effet de serre, sa structure énergétique, ainsi que son activité économique. La France devra mettre en œuvre les moyens nécessaires et suffisants pour atteindre une consommation moyenne de 20% d'énergie finale d'origine renouvelables à l'horizon 2020 [Ade 09].

Dans ce contexte, l'hydroélectricité se place très favorablement car elle représente à elle seule 94,3 % de la production électrique mondiale à base d'énergies renouvelables.

En Europe occidentale, la grande hydroélectricité a quasiment atteint sa saturation alors que l'on estime à 1700 MW le potentiel d'évolution des petites centrales hydrauliques ; il est alors intéressant d'envisager le développement de micro turbines hydrauliques pouvant, par exemple, fonctionner au fil de l'eau ou en moteurs afin de réaliser un stockage d'énergie potentielle. De plus, en générateurs la petite hydraulique constitue la solution économique et environnementale la plus envisageable pour l'alimentation des sites isolés.

La petite Hydroélectricité est bien moins médiatique que d'autres filières, elle ne fait pas moins partie intégrante du système européen de production d'électricité renouvelable. Elle est notamment utilisée comme un appoint à la production électrique nationale en cas de pic de consommation. Elle contribue à la sécurité de l'approvisionnement tout en garantissant une certaine stabilité de prix.

Il existe de nombreuses incitations pour promouvoir le développement de la filière hydroélectrique européenne, tels les systèmes de tarif d'achat utilisés dans des nombreux pays comme

l'Allemagne, la France ou l'Autriche. Mais il existe aussi des contraintes réglementaires et environnementales. La directive-cadre dans le domaine de l'eau a conduit les États membres à revoir leur législation nationale afin d'assurer la préservation écologique des rivières. La filière de la petite hydraulique a donc dû s'adapter, en développant des installations et des technologies ayant le moins d'impact possible sur le milieu naturel (mise en place d'échelles à poissons, etc.). En tenant compte de ces contraintes, la petite hydroélectricité peut être une alliée de poids dans l'atteinte des objectifs de la directive européenne sur la production d'électricité d'origine renouvelable.

Le juste équilibre n'est cependant pas toujours simple à trouver, ce qui explique sans doute pourquoi le secteur se développe lentement. En 2007, le parc européen (puissance en fonctionnement) a connu une croissance de 2,2% (+276,9 MW), ce qui porte sa capacité totale à 12791,2 MW. La filière a permis la production de 38,8 TWh électriques, en légère baisse (1,4%) par rapport à 2006, année durant laquelle 39,3 TWh avaient été produits.

Les chiffres collectés auprès des différents pays montrent que le secteur de la PCH représente des volumes de plusieurs dizaines de milliers d'emploi, dont 9400 en Allemagne, 6660 en Espagne, 3900 en France et 1100 en Autriche.

**L'Italie** est l'État qui dispose toujours du parc de petit hydraulique le plus important au niveau européen. D'après TERNA (le gestionnaire du réseau électrique italien), il s'élève à 2522,3 MW en 2007, ce qui représente une augmentation de 2,2% par rapport à 2006. Malgré tout, la production est en baisse de 9,8%, puisque 7100,1 GWh ont été produits contre 7875 GWh l'année précédente. La petite hydroélectricité est éligible au système de certificat vert mis en place dans la péninsule. Ce dispositif oblige les producteurs et les importateurs à injecter de l'électricité d'origine renouvelable sur le réseau (4,55% en 2008). En Italie, pour les centrales de puissance inférieure à 1 MW, les installations peuvent bénéficier d'un tarif d'achat qui s'élevait, en 2008, à 22 c€/kWh.

### **I.3.2. Le contexte en France**

#### **I.3.2.1. La production totale d'électricité en France**

En France, la production totale d'électricité est de 549,1 TWh en 2008 [Deg 09]. Elle se répartit en 418,3 TWh nucléaires (76,2%), 68,1 TWh hydrauliques (12,4%), 56,9 TWh thermiques classiques

(10,4%) et 5,7 TWh éoliens et photovoltaïques (1,0%). La figure 1.2 représente l'origine de la production d'électricité en France [Ade 06].

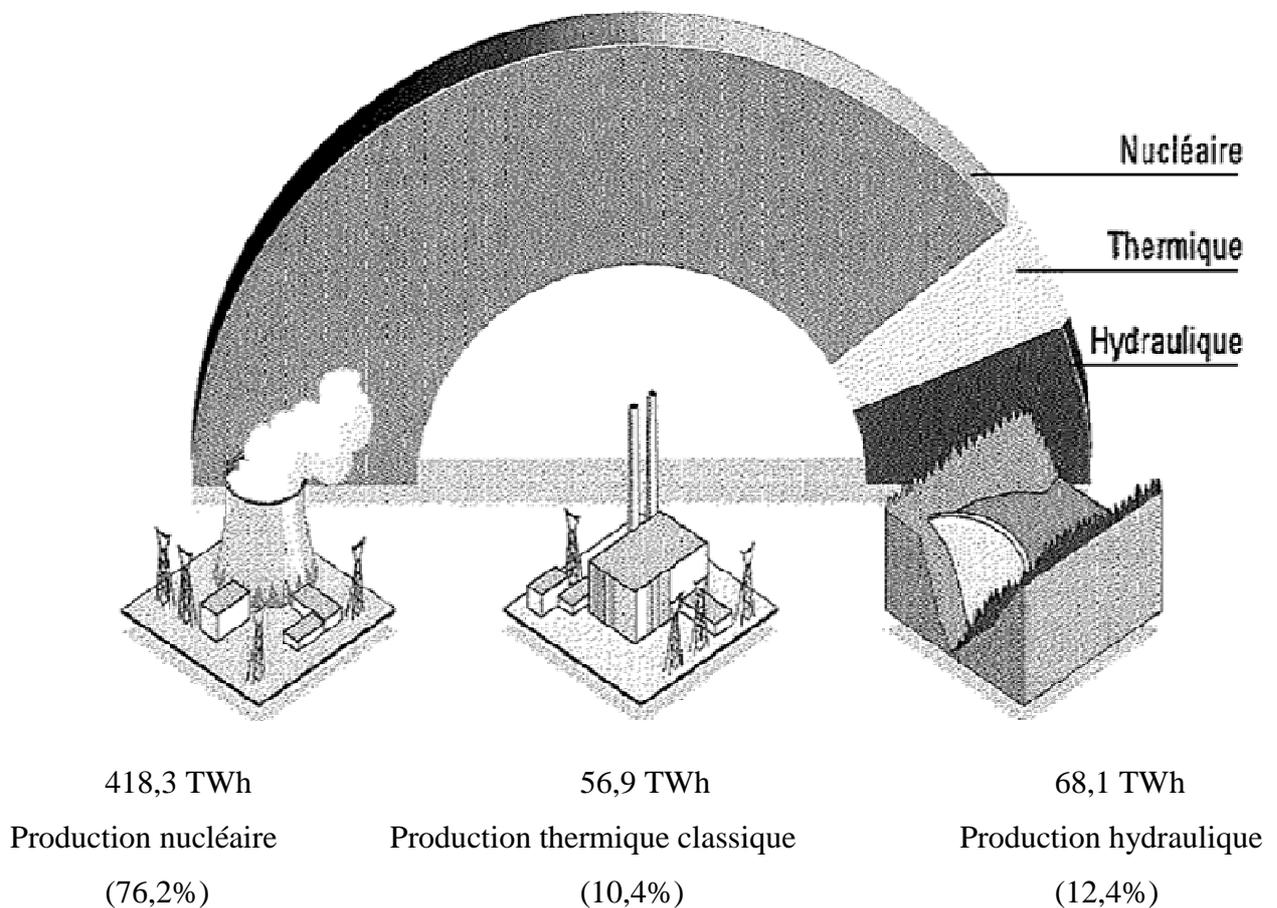


Figure 1.2. Production d'électricité en France [Ade 06]

### I.3.2.2. La production des PCH en France

La France possède le deuxième parc de l'Union européenne avec, selon la direction générale de l'énergie, une puissance totale de 2060 MW en 2007. La production est en hausse de 2% par rapport à 2006 avec 6221 GWh produits. **En France** c'est l'arrêté du 1er mars 2007 qui définit le tarif d'achat de l'électricité applicable aux installations hydrauliques. Celui-ci s'élève à 6,07 c€/kWh, auxquels s'ajoute une prime comprise entre 0,5 et 2,5 c€/kWh pour les petites installations (<12 MW), et une prime comprise entre 0 et 1,68 c€/kWh en hiver selon la régularité de la production. La prime versée à la régularité de production existait déjà dans l'ancien système (elle a été définie par le décret du 25 juin

2001). En revanche, la mise en place d'une prime spécifique pour les petites installations est une véritable nouveauté.

**En France**, la production annuelle de la PCH est de 7,5 TWh, environ 10% de la production hydraulique et 1,5% du total de l'énergie nationale. Sur 250 kms de rivière, il y a 1700 PCH avec 1800 MW de puissance installée [Cle 94].

L'objectif, à l'horizon 2010, est de produire 12 TWh de PCH, avec 2800 MW de puissance installée [Ade 06].

### **I.3.3. Les activités d'une microcentrale hydroélectrique**

L'installation d'une microcentrale hydroélectrique regroupe trois activités principales : le génie électrique, le génie mécanique et le génie civil. La turbine hydraulique convertit l'énergie de la chute de l'eau en énergie mécanique sur son arbre. La décision finale du choix de la turbine, de l'équipement électrique, du génie civil est déterminée par les potentialités du site et la puissance à installer.

### **I.3.4. Le choix de type de turbine d'une microcentrale hydroélectrique**

En général, le choix du type de turbine dépend principalement du débit, de la hauteur de chute et de la vitesse de rotation de l'arbre. De plus, pour les installations où le débit est suffisamment constant tout au long de l'année, il est également possible d'utiliser des groupes turbopompes, ce système permettant de stocker une grande quantité d'énergie potentielle en amont de l'installation en heures creuses et de la restituer aux heures de forte consommation.

La figure 1.3 résume les domaines d'utilisation des turbines sur des courbes de débit, de hauteur de chute et de puissance.

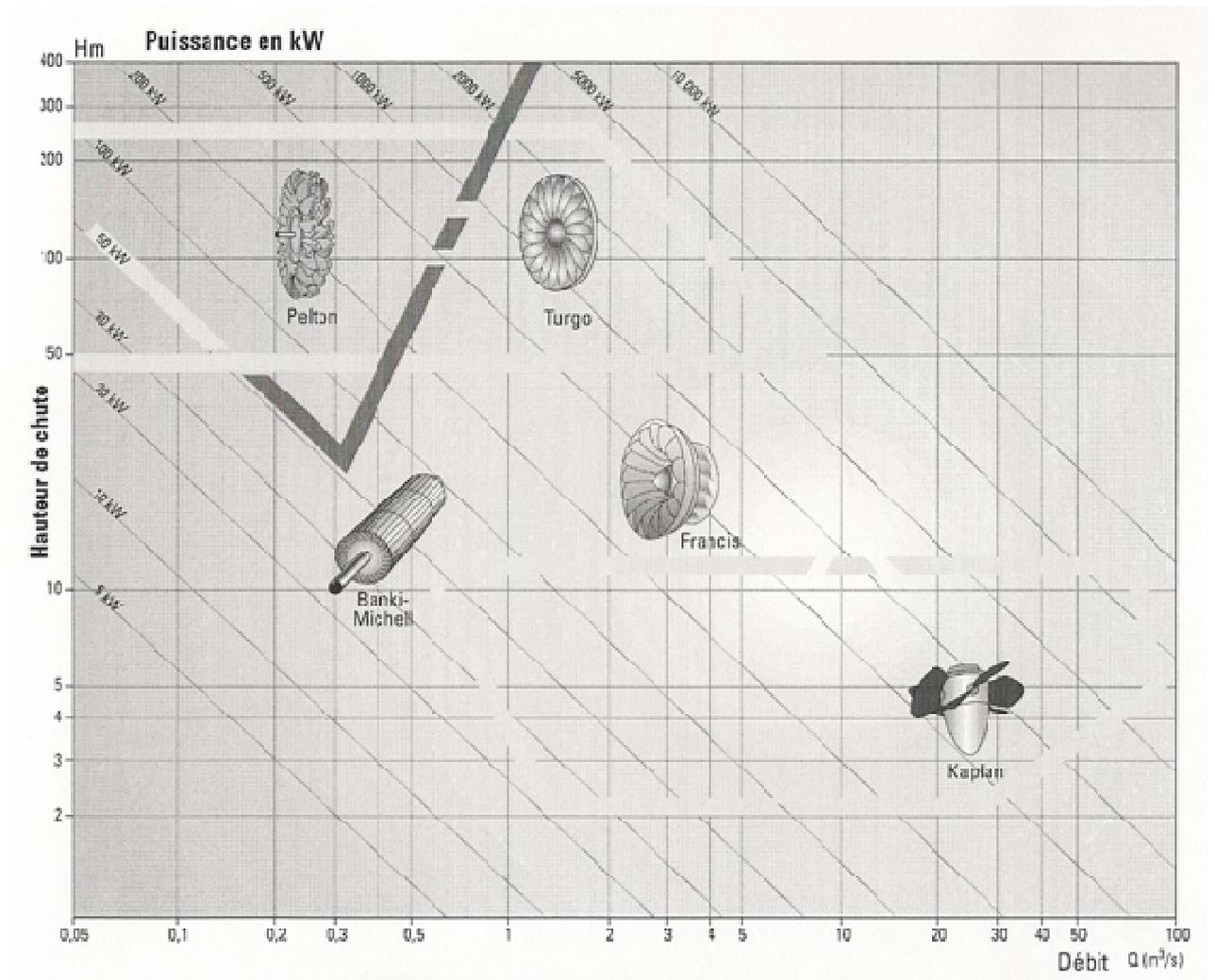


Figure 1.3 : Domaines d'utilisation des turbines dans les microcentrales. [Pac 95a]

**Le tableau 1.4** [Pac 95a] permet de faire un premier classement pour identifier les types de turbines adaptées aux microcentrales hydroélectriques.

| NOM                 | PELTON   | CROSS FLOW  | FRANCIS  | KAPLAN   |
|---------------------|--|---|--|--|
| TYPE                | <b>Turbine à action :</b><br>L'eau est mise en vitesse maximale dans l'injecteur.<br>Toute l'énergie dans le jet entraîne la rotation de la roue et de l'eau ressort en pluie (énergie cinétique). |   | <b>Turbine à réaction :</b><br>L'eau est guidée par le distributeur pour rentrer sans choc dans la roue. Celle-ci se met en vitesse maximale à la sortie de la roue. Cette machine utilise à la fois l'énergie cinétique et la différence de pression. |  |
| DEBIT               | 20 à 1000 L/sec  | 20 à 7000 L/sec   | 100 à 6000 L/sec   | 300 à 10000 L/sec  |
| HAUTEUR             | 50 à 400 m   | 10 à 150 m  | 5 à 100 m  | 2 à 10 m   |
| VITESSE DE ROTATION | 500 à 1500 tr/min  | Faible  | Jusqu'à 1000 tr/min  | Faible   |
| CARACTERISTIQUES    | Arrivée d'eau réglable par les injecteurs qui permettent de conserver de bons rendements. Encombrement réduit par liaison directe turbine-générateur.  | Construction simple mais rendement relativement faible. Multiplicateur encombrant entre turbine et générateur | Excellent rendement si le débit varie entre 60 et 100% de son débit nominal. Fonctionnement sans multiplicateur.   | Bon rendement. A utiliser pour les forts débits et les faibles chutes. |

**Tableau 1.4** Les quatre types principaux de turbines

### I.3.5. Typologie des turbines:

Chaque machine est présentée par un tableau de données numériques exprimant toutes ses caractéristiques principales. Une coupe détaillée illustre les parties constituant la turbine.

### I.3.5.1. Turbines à action : Turbines Pelton et Crossflow

#### Principe de fonctionnement :

Un jet d'eau agit sur des augets en forme de double cuillère placés à la périphérie de la roue. Ce jet exerce une force hydraulique sur l'auget en rotation, effort qui est converti en couple sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air.

#### I. Turbine Pelton :

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue.

La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.

La figure 1.4 présente schématiquement une turbine Pelton.

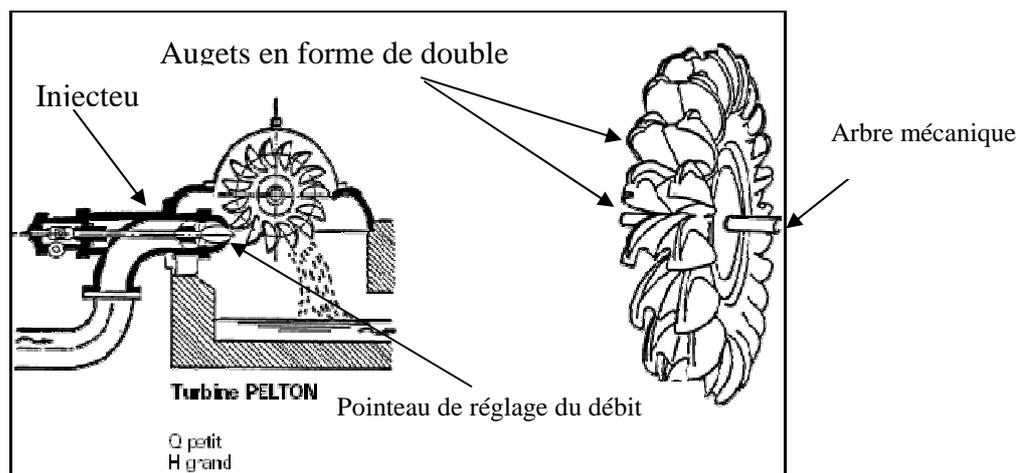


Figure 1.4 : Turbine Pelton [Pac 95]

## II. Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell):

La turbine Crossflow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales

- Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon.
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilée.
- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

La figure 1.5 représente la turbine Crossflow.

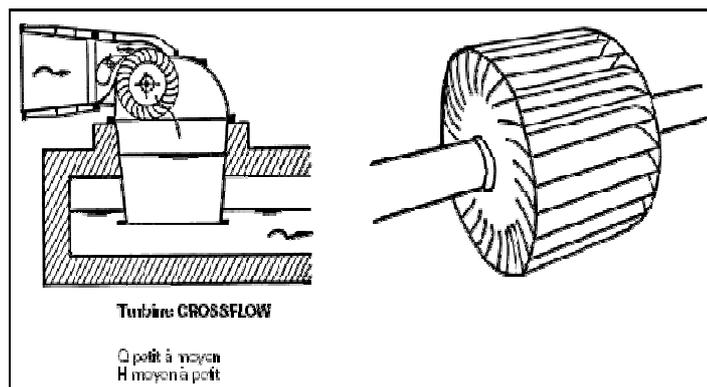


Figure 1.5: Turbine Crossflow [Pac 95]

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice.

### I.3.5.2. Turbines à réaction : Turbines Francis et Kaplan

#### Principe de fonctionnement :

Une turbine à réaction est une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche en forme de spirale et des aubages directeurs fixes ou mobiles. Les aubages de la turbine sont profilés de manière à donner aux filets d'eau une direction

parallèle à l'axe de rotation à la sortie de la turbine. C'est à la fois l'énergie cinétique de l'eau et la différence de pression entre l'intrados et l'extrados des aubages qui génère le couple, contrairement aux turbines à action pour lesquelles seule l'énergie cinétique de l'eau est impliquée.

### I. Turbine Francis :

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l.s-1 et 6000 l.s-1). Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min).

La figure 1.6 représente la turbine Francis.

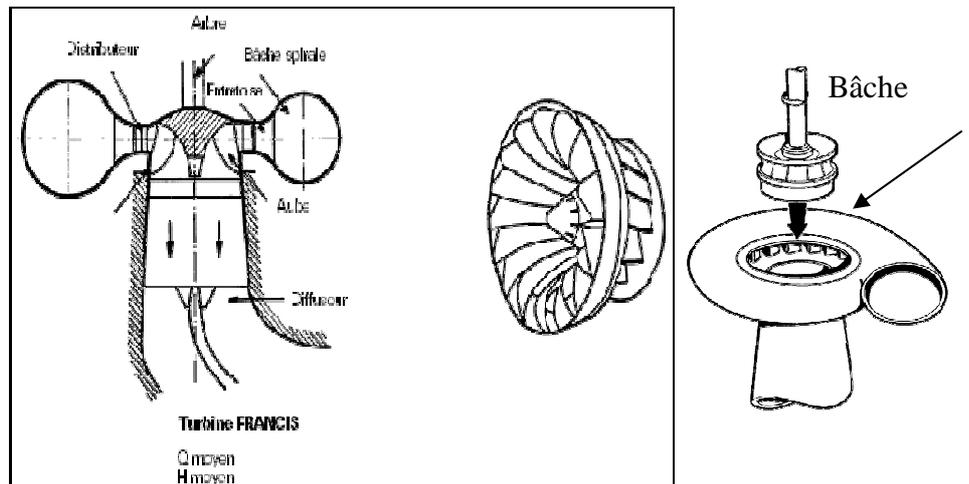


Figure 1.6 : Turbine Francis [Pac 95]

## II. Turbine Kaplan :

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 l.s-1 à 15000 l.s-1. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible.

La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement  $\eta_t$  de la turbine.

La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles.

La figure 1.7 représente la turbine Kaplan.

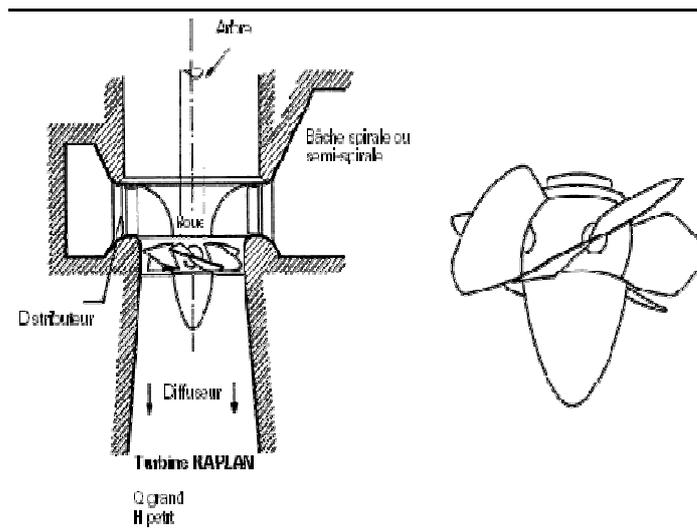


Figure 1.7: Turbine Kaplan [Pac 95d]

### I.3.6. Le choix de type d'alternateur

Dans les microcentrales, on rencontre principalement :

- Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné

Elles restent les génératrices les plus utilisées pour générer une tension alternative sinusoïdale. Pour fournir une fréquence constante, il faut un système de régulation mécanique du débit d'eau permettant de maintenir une vitesse constante de la turbine.

Le rendement hydraulique global est diminué du fait des pertes de charge introduites par la vanne de régulation.

- Les machines asynchrones à cage débitant sur un réseau ou sur charge isolée.  
Son utilisation reste encore limitée mais devrait rapidement évoluer du fait du coût relativement faible de la machine asynchrone par rapport à la machine synchrone. En fonctionnement autonome, la génératrice asynchrone pose des problèmes importants de stabilité en tension et en fréquence. Il faut des capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine, et le fonctionnement ne peut se faire qu'avec une plage de vitesse restreinte. Les charges utilisées ne doivent par conséquent pas être exigeantes en tension et en fréquence.
- Les Machines asynchrones à double alimentation  
Actuellement, il existe très peu d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les microcentrales hydrauliques. Toutefois des exemples d'applications intéressantes existent dans les systèmes éoliens [Mul 02], [Kel 00] et son utilisation est envisagée dans l'aéronautique. Elle permet de pallier aux problèmes précédents de stabilité de la machine asynchrone à cage et autorise réellement un fonctionnement à vitesse variable. Une excitation auxiliaire fournie aux enroulements du rotor permet de contrôler la tension et la fréquence au stator. Cette structure sera étudiée dans le chapitre 2 de cette thèse.

### **I.3.7. Quelles perspectives pour la petite hydraulique ?**

La petite hydraulique est une source d'électricité indispensable dans la conquête des objectifs définis par la directive européenne en termes de production énergétique d'origine renouvelable. Non-émettrice de CO<sub>2</sub>, elle constitue une solution intéressante pour répondre aux objectifs européens de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'avenir de la filière dépend donc de la manière dont ces directives seront transposées et appliquées au niveau national.

D'après l'European Small Hydropower Association, qui regroupe les producteurs du continent, le potentiel de l'Union pour la petite hydraulique est encore considérable, en particulier dans la région des Balkans. La puissance du parc pourrait aussi augmentée grâce à la rénovation d'installations existantes. La croissance des capacités de production après réhabilitation peut être substantielle, sans pour autant nécessiter de démarches administratives trop contraignantes.

EurObserv'ER, dont la projection repose sur un taux de croissance annuel moyen de l'ordre de 1,7%, estime à environ 13450 MW la capacité européenne totale en 2010. L'objectif affiché dans le livre blanc est de 14000 MW. Pour l'atteindre, cela nécessiterait un taux de croissance annuel moyen de la filière de l'ordre de 3,1%.

#### I.4. Paramètres communs à toutes les turbines hydrauliques :

L'allure des courbes de rendements en fonction des débits et les caractéristiques couple vitesse est commune à toutes les catégories existantes de turbines hydrauliques.

##### I.4.1. Rendement des turbines hydrauliques

La figure 1.8 présente l'évolution du rendement rapporté au rendement maximum de la turbine en fonction du débit rapporté au débit maximal. La courbe 1 correspond à une turbine Pelton, la courbe 2 à une turbine Kaplan, la courbe 3 aux turbines Francis et Crossflow et la courbe 4 à une pompe inversée. On peut constater que le rendement est fortement variable avec le débit.

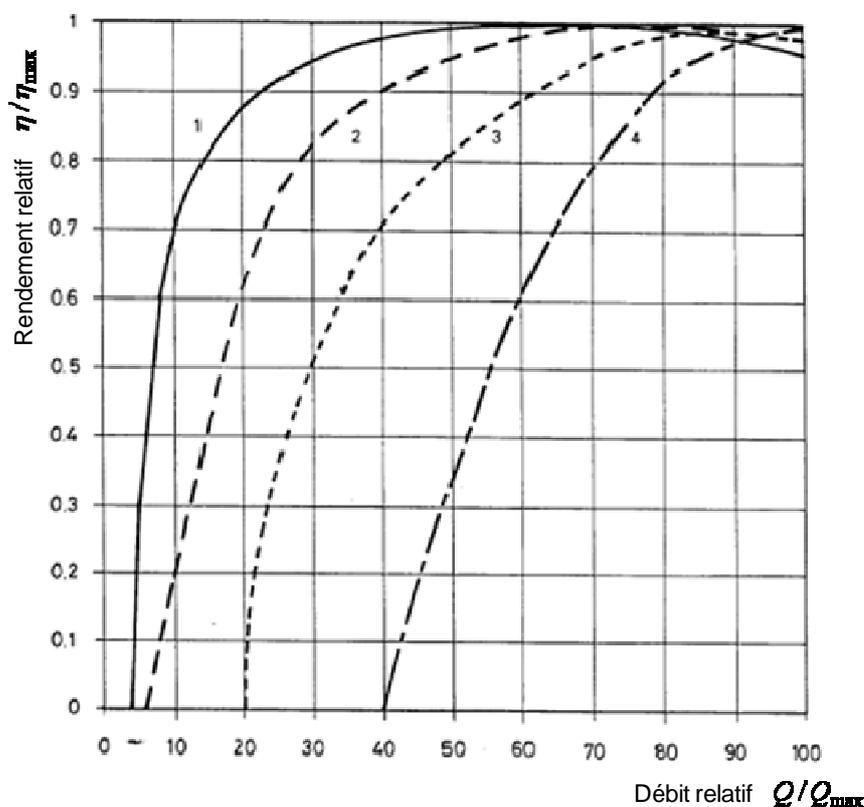


Figure 1.8. Formes des courbes de rendements de différentes turbines pour des débits variables [Pac 95]

La puissance mécanique  $P_{mec}$  se calcule à partir de la mesure du couple  $C_{mec}$  sur l'arbre de la turbine et de la mesure de la vitesse de rotation  $\Omega$  du modèle

$$P_{mec} = C_{mec} \Omega \quad (1.8)$$

En définitive, le rendement hydraulique  $\eta_{hyd}$  est calculé par :

$$\eta_{hyd} = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} \quad (1.9)$$

#### I.4.2. Modèle simplifié d'une turbine hydraulique

Le modèle de turbine considéré est un modèle simple, statique, qui ne prend pas en compte certains paramètres hydrauliques tels que l'inertie et la compressibilité de l'eau, ainsi que l'élasticité de la conduite d'amenée à la turbine. Nous supposons que le débit de l'eau ainsi que l'orientation des aubes directrices et des pales, dans le cas d'une turbine Kaplan, sont constants. Sa caractéristique couple-vitesse est pratiquement linéaire comme représenté à la figure 1.9 où  $C$  représente le couple à débit constant délivré par la turbine et  $\Omega$ , la vitesse de rotation [Pac 95].

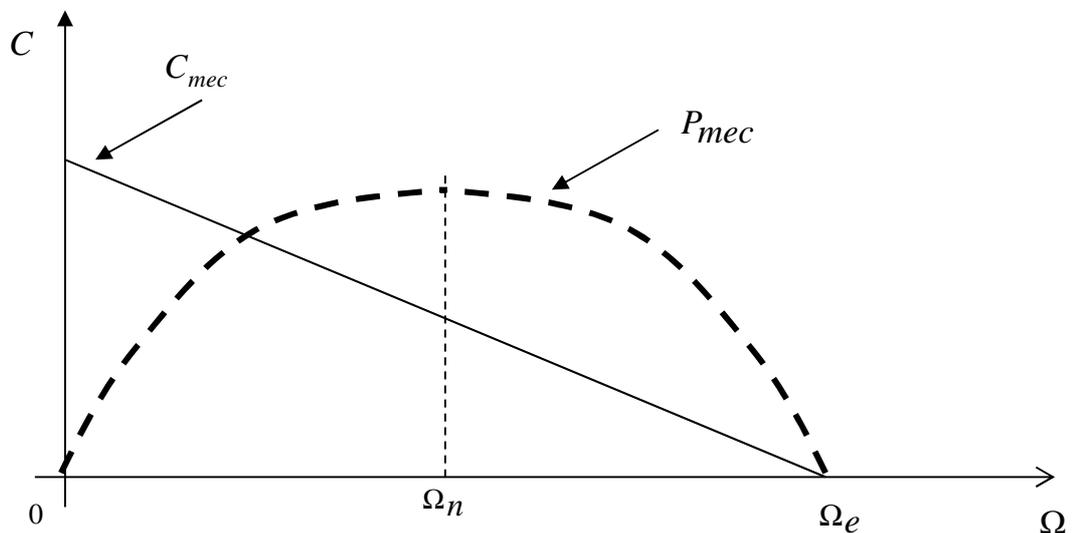


Figure 1.9: Caractéristique couple vitesse d'une turbine Kaplan [Pac 95]

L'allure de cette caractéristique, commune à toutes les catégories existantes de turbines hydrauliques, permet d'en déduire la puissance mécanique fournie, notée  $P_{mec}$ , est de forme parabolique. On distingue par ailleurs la vitesse d'emballement de la turbine  $\Omega_e$  qui correspond à un

fonctionnement pour lequel le débit est non nul, mais aucune charge n'est connectée à la génératrice de sorte que le couple est nul. Cette vitesse d'emballement est comprise entre 1,8 et 3 fois la vitesse nominale. Les générateurs associés aux turbines hydrauliques doivent être dimensionnés pour résister à ces survitesses. L'équation de la caractéristique couple-vitesse de la turbine, sous débit et chute nominaux, est donnée ci-dessous (1.10), en considérant une vitesse d'emballement de la turbine étudiée égale à 1,8 fois la vitesse nominale:

$$C_{mec} = C_n \left( 1,8 - \frac{\Omega}{\Omega_n} \right) \quad (1.10)$$

Le couple  $C_n$  est donné par les conditions de référence de l'installation i.e. la hauteur de chute nette nominale  $H$  et la vitesse de rotation nominale  $\Omega_n$  cette dernière dépend des caractéristiques mécaniques de la turbine (vitesse spécifique).

La vitesse pour laquelle le couple mécanique s'annule est la vitesse d'emballement  $\Omega_e = 1.8\Omega_n$  correspondant à un fonctionnement à vide de la turbine (Couple résistant nul).

Cette formule est valable pour un débit nominal  $Q_n$  constant et une hauteur de chute nominale  $H$ .

### **I.4.3. Choix de la turbine Kaplan**

Notre choix s'est porté sur la turbine Kaplan comme générateur de couple mécanique sur l'arbre de la machine asynchrone. Les turbines Kaplan sont les plus appropriées pour le turbinage des basses chutes, critère important pour les microcentrales au fil de l'eau.

La turbine Kaplan à pales variables et distributeur fixe a un bon rendement pour des débits variant entre 30 et 100 %.

Elles ont des caractéristiques similaires à celles des éoliennes, comme par exemple le réglage de l'orientation des pales (pitch control), même si le principe de fonctionnement diffère légèrement.

## **I.5. Avantages, inconvénients et limites d'utilisation des turbines hydrauliques**

La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. Il s'agit, bien entendu, d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission de gaz à effet de serre ni de polluants.

Elle engendre la création d'emplois locaux pour la gestion du fonctionnement des installations.

### **I.5.1. Avantages**

Les microcentrales hydrauliques présentent plusieurs avantages parmi lesquels le fait qu'il s'agisse de la technologie la mieux maîtrisée des énergies renouvelables. En effet, on peut noter les critères suivants :

- Équipement caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie ;
- Simplicité de l'entretien et frais de fonctionnement faibles ;
- Énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère directement aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

### **I.5.2. Inconvénients**

Les micros centrales hydrauliques, si elles sont mal intégrées dans leur environnement, peuvent également présenter des impacts négatifs sur l'environnement pouvant générer des perturbations de diverses natures :

- Atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée ;
- Bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse de l'alternateur, le transformateur et l'écoulement de l'eau, pouvant provoquer une gêne pour le voisinage proche ;
- Prise d'eau pouvant entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières ;
- Installation pouvant constituer un obstacle à la migration des poissons.

Cependant, si la micro centrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées :

- En assurant le respect du débit réservé, qui par définition est un débit permettant de maintenir la vie aquatique malgré la présence d'une centrale hydroélectrique ;
- Par la mise en place de passes à poissons qui permettent aux poissons de remonter le cours d'eau
- En assurant l'intégration de la centrale dans le paysage ;
- En outre, au niveau de l'entretien des cours d'eau, le dégrilleur peut jouer un rôle non négligeable en éliminant les éléments flottants. En effet, l'eau achemine des débris qui s'accumulent sur la grille destinée à protéger la turbine de ces éléments ; ainsi la fonction du dégrilleur est de retirer ces éléments qui pourraient endommager la turbine.

### **I.5.3. Limites d'utilisation des turbines hydrauliques à vitesse fixe**

Cette technologie présente néanmoins quelques limites quant aux coûts d'investissement pouvant être assez importants pour certaines installations et à la nécessité d'avoir des sites appropriés en termes de cours d'eau et de chute.

Pour rentabiliser au mieux une centrale hydraulique, on a tout intérêt à produire le maximum d'électricité annuellement et faire fonctionner le générateur électrique le plus souvent possible avec des rendements maximaux. Si le débit de la rivière est plus faible que le débit optimal pour la turbine, la solution classique est un réglage mécanique du débit d'eau dans la turbine. On modifie le degré d'ouverture de la turbine (par action, notamment, sur les pales orientables des turbines Kaplan). On conserve ainsi un rendement élevé quel que soit le débit turbiné. Le problème intervient lorsque l'on couple la turbine au générateur électrique :

Si le générateur est une machine synchrone alors la vitesse de rotation de cette dernière est fixe et imposée par la fréquence du réseau 50 Hz. La régulation mécanique doit tenir compte de cette contrainte. Si le générateur est une machine asynchrone, alors, la variation de vitesse autour d'une vitesse synchrone reste relativement faible (5 à 10%). La solution économique pour le turbo alternateur est alors d'alimenter le rotor par un convertisseur délivrant une fréquence égale à la différence entre la vitesse de rotation et la fréquence du réseau. La puissance du convertisseur est réduite et est égale sensiblement à l'écart de vitesse en % multiplié par la puissance transmise au stator.

## **I.6. Proposition d'une structure**

On considère un système de conversion d'énergie hydraulique connecté à un réseau de puissance ou à une charge isolée. Pour cela nous envisageons d'utiliser une machine asynchrone à double alimentation (MADA) couplée mécaniquement et électriquement à une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) de faible puissance.

Une turbine Kaplan associée à un multiplicateur de vitesse entraîne les deux machines (figure 1.10). La MADA reçoit l'énergie nécessaire à son excitation de la MSAP couplée sur le même arbre mécanique. La liaison électrique entre les deux machines est assurée par deux convertisseurs de puissance via un bus continu. Les deux convertisseurs MLI sont utilisés en mode back to back.

Le choix de cette structure se justifie par :

- Fonctionnement en autonome de la microcentrale hydroélectrique.
- la volonté de réduire la puissance transitant à travers les convertisseurs et donc leur coût.
- le coût des machines électriques : une installation avec génératrice synchrone à aimants permanents de même ordre de puissance nominale que la charge serait plus coûteuse.
- profiter des avantages qu'offre une génératrice à vitesse variable et à fréquence constante
  - adaptation aisée pour tout type de turbine (hydraulique, hydrolienne).
  - application possible sur une turbine hydrolienne en supprimant la régulation mécanique de la vitesse (actuellement utilisée).
  - Pour les turbines hydrauliques, on peut envisager la suppression des régulateurs hydromécaniques puisque le fonctionnement envisagé du système se ferait sous ouverture constante de la vanne de réglage du débit. Sous un débit variable, le couple fourni par la turbine dépend de sa vitesse de rotation. L'inconvénient serait cependant l'utilisation du système bague-balais.

### **Micro centrale hydroélectrique à vitesse variable envisagée**

Le schéma proposé de la petite centrale hydro électrique est représenté dans la figure 1.10. Comme la plupart de ces usines, celle étudiée est considérée au fil de l'eau menant à l'utilisation d'une turbine hydraulique de Kaplan bien adaptée pour les basses altitudes. La turbine est associée à un multiplicateur de vitesse à cause de sa petite vitesse de rotation. La turbine entraîne une MADA dont

l'excitation de son rotor est fournie par le stator de la MSAP, via deux convertisseurs triphasés MLI et un bus continu. Les trois machines sont couplées sur le même axe mécanique. Le convertisseur 1 commande la tension du bus continu pour équilibrer la puissance active du stator de la MSAP et celle du rotor de la MADA. Le convertisseur 2 commande la MADA pour le fonctionnement sur charges isolées ou sur un réseau de puissance.

Ce type de schéma quand la machine synchrone est à rotor bobiné est appelé commande statique de Kraemer [Kel 00]. Il mérite d'être noté qu'une structure similaire est également envisagée dans le domaine aéronautique pour l'alimentation du réseau électrique de l'avion [Kha 03] : la turbine hydraulique est alors remplacée par un moteur à réaction. On peut souligner que le schéma proposé est différent de celui d'une configuration classique dont le rotor et le stator de la MADA sont reliés via deux convertisseurs MLI.

Les articles [Ans, 06a] et [Ans, 06b] traitent le modèle, la structure du système et son fonctionnement sur charges isolées où la fréquence et la tension efficace du stator de la MADA sont régulées.

La figure 1.10 représente schématiquement la microcentrale hydro électrique à vitesse variable.

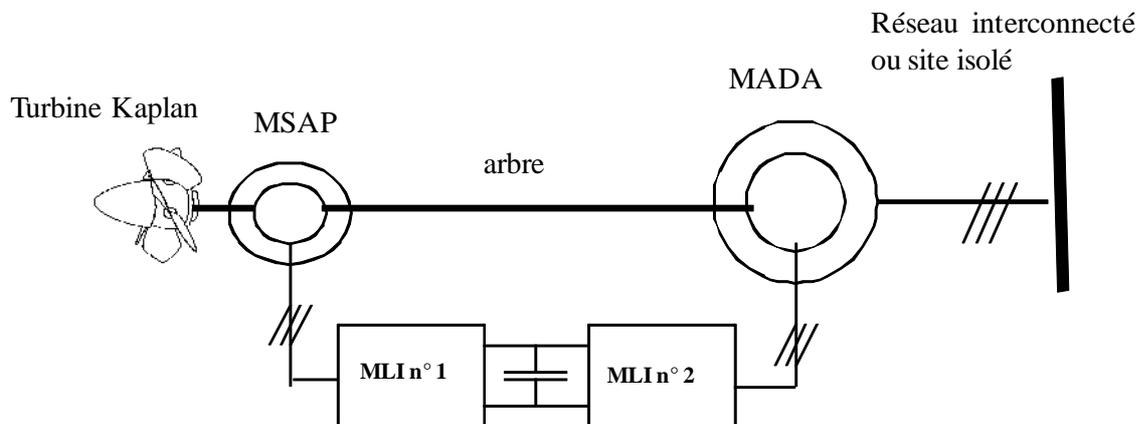


Figure 1.10. Schéma d'une micro centrale hydro électrique à vitesse variable

## **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, l'état de l'art actuel des microcentrales, les turbines hydrauliques et leur principe de fonctionnement ont été présentés. Il en ressort que les microcentrales offrent des perspectives intéressantes pour l'avenir de la production décentralisée d'énergie électrique. Les turbines hydrauliques « classiques » offrent des perspectives intéressantes du fait du coût du génie civil particulièrement faible et d'une forte intégration dans divers fleuves ou rivières. Pour les microcentrales au fil de l'eau, les turbines Kaplan sont les plus appropriées pour les basses chutes et autorisent un pitch control (orientation des pales) comme les éoliennes.

L'analyse issue de ce chapitre a permis de proposer une structure originale de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique. Nous verrons en détail dans le chapitre suivant, la modélisation et la simulation de cette source hydroélectrique.

## **I.8. Bibliographie**

- [Ade 06] ADEME, « Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité », formation Hydro, Grenoble, session du 19 au 22 septembre 2006, pp. 6-17.
- [Ade 09] ADEME/DER, « Eco technologies pour le futur »: S. Biscaglia, LILLE 10 et 11 juin 2009
- [Ans 06a] A. Ansel, B. Robyns, “Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 71, n°. 4-6, pp. 320-332, June 2006.
- [Ans 06b] A. Ansel, B. Robyns, “Small hydroelectricity: from fixed to variable speed electromechanical drives,” *Electromotion*, vol.13, n°2, April 2006 pp. 111-126.
- [Cle 94] CLER (Comité de liaison des Énergies renouvelables, 1994) « Le potentiel des PCH en France ».
- [Dge 09] DGEC, « Électricité en France, principaux résultats en 2008 » DGEC (Direction Générale de l'Énergie et du Climat), 05 Juin 2009.
- [Dra 01] C. Dragu, T. Sels, R. Belmans, “Small Hydro Power – State of the Art and Applications”, *International Conference on Power Generation and Sustainable Development*, (AIM), Liège, Belgium, October 8-9, 2001; pp. 265-270.
- [Eur 08] EurObservER report 2008, « États des énergies renouvelables en Europe ». Edition 2008, pp. 30-35.

- [Hém 99] G. Hemery, J. Coulon, “Centrales hydroélectriques et apport de la vitesse variable”, Revue de l'Électricité et de l'Électronique, Décembre 1999, pp. 46-52.
- [Kel 00] C. R. Kelber and W. Schumacher, “Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines,” VSSH<sub>y</sub> 2000 - European Conference Variable Speed in Small Hydro; Grenoble, France; 26-28 January 2000.
- [Kha 03] F. Khatounian, E. Monmasson, F. Berthereau, E. Delaleau and J.P. Louis, “Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application,” IECON 2003, Roanoke, Virginia, United States, 2-6 november 2003, pp. 2709-2714.
- [Mul 02] S. Müller, M. Deicke, R.W. De Doncker, “Doubly fed induction generator systems for wind turbines”. IEEE. Industry Applications magazine, May-June 2002, pp. 26-33.
- [Pac 95] Rapport (PACER), en Suisse “Petites centrales hydrauliques –le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine”, 1995.-ISBN 724.747.f
- [Pac 95a] Rapport (PACER), en Suisse “Petites centrales hydrauliques, le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine”, 1995.-ISBN 3-905232-55-3.
- [Pai 02] Oliner Paish, “Small Hydro Power: Technology and Current Status”« Renewable and Sustainable energy reviews ». February 6, 2002

# **Chapitre II : Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable. Validation expérimentale**

Le chapitre deux développe dans un premier temps la modélisation des différents composants de la microcentrale hydroélectrique retenue, sous forme de Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Ensuite, en les regroupant, un système global est défini. Ce système permet de mettre en avant les différents aspects énergétiques. A partir de cette modélisation, la commande du système global est déduite. Enfin, des simulations et des résultats expérimentaux du système de conversion électromécanique sont présentés.

Les simulations et les résultats expérimentaux confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable



## Chapitre II

### Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable. Validation expérimentale

#### II.1. Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons choisi une structure originale de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique, nous nous proposons dans ce chapitre la modélisation et la simulation de celle-ci.

L'objectif de la modélisation est de remplacer l'objet physique coûteux et d'utiliser celle-ci comme outil de simulation ou de conception. L'objectif du modèle consiste à prédéterminer et à étudier le comportement de l'objet aux différentes sollicitations. Il existe différents types de modèles pour réaliser les objectifs de la modélisation.

Un système de production électrique est un système complexe qui comprend beaucoup de grandeurs physiques et d'équations mathématiques. Nous avons donc choisi le modèle graphique, et plus précisément la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [Bou 00], celle-ci nous permettra d'obtenir une macro-représentation des grandeurs échangées entre la microcentrale hydroélectrique et le réseau interconnecté ou les sites isolés.

#### II.2. Représentation Énergétique Macroscopique (REM) de la micro centrale hydroélectrique

On présentera dans un premier temps la modélisation des différents composants de la microcentrale hydroélectrique sous forme de REM, ensuite nous allons les regrouper dans un système global afin de mettre en avant les différents aspects énergétiques.

##### II.2.1. Définition de la REM

La REM permet la représentation des systèmes énergétiques complexes en vue de leur commande. Elle est la continuité du modèle Graphique Informationnel Causal (GIC) [Hau 96]. Cette représentation est un compromis entre une « description matricielle » (vision physique) et « fonctionnelle » (pour l'inversion). Elle est basée sur la systémique (description externe par action – réaction) et par une description interne causale. La modélisation par REM repose donc sur une mise en avant des aspects énergétiques, mais aussi sur la nécessité d'imbriquer des modèles de niveaux différents.

## II.2.2. Notations

Le produit d'une entrée et d'une sortie d'un élément constitutif donne une puissance. Par exemple, si l'entrée est une tension, alors la sortie sera obligatoirement un courant. Les variables sont soit des scalaires (pression, débit) soit des vecteurs, mais l'entrée et la sortie correspondante doivent avoir la même nature.

## II.3. Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique

La modélisation et la simulation du fonctionnement sur site isolé, respectivement sur réseau puissant, seront traitées.

La figure 2.1 représente la structure de la microcentrale hydro électrique à vitesse variable étudiée.

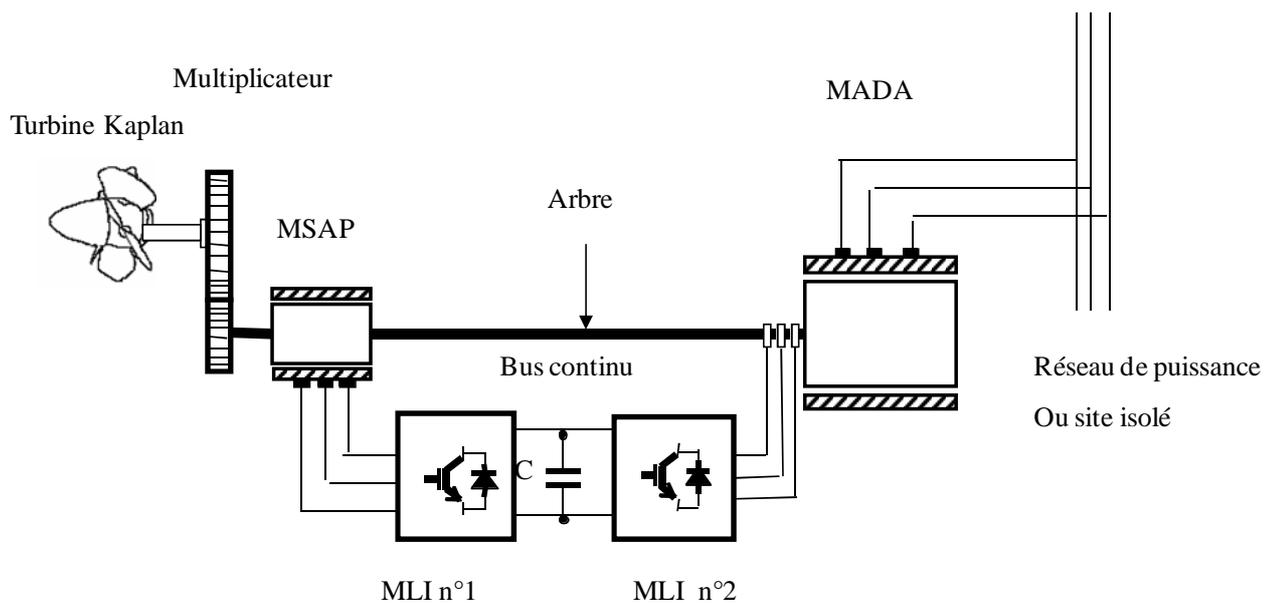


Figure 2.1 Structure de la microcentrale hydro électrique à vitesse variable étudiée

On présentera dans un premier temps la modélisation des différents composants de la source hydroélectrique sous forme de REM.

### II.3.1. Modélisation de la source d'énergie primaire

La source mécanique du modèle SM à savoir l'eau, fournit un débit hydraulique  $q$  et en réaction reçoit une pression  $p$  exercée par la turbine. Le produit de ces deux quantités est égal à la puissance hydraulique  $P_{hyd}$ . La figure 2.2 fait apparaître la source mécanique du modèle. L'expression de la puissance hydraulique est:

$$P_{hyd} = pq \quad (2.1)$$

Il faut faire attention de dissocier source et générateur. En effet, une source est aussi bien un récepteur d'énergie qu'un générateur.

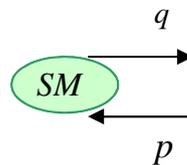


Figure 2.2 REM de la Source mécanique

### II.3.2. Modélisation de la turbine hydraulique

La puissance mécanique  $P_{mec}$  en sortie de la micro turbine hydraulique est obtenue à partir de la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  et le rendement  $\eta_t$  de celle-ci. L'expression de la puissance mécanique est :

$$P_{mec} = \eta_t P_{hyd} = C_{turbine} \Omega_{arbre} \quad (2.2)$$

La figure 2.3 fait apparaître le modèle de la turbine hydraulique.

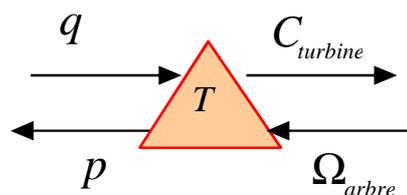


Figure 2.3 REM de la turbine hydraulique

## Modélisation de l'arbre de transmission

Le modèle dynamique simplifié de l'arbre mécanique repose sur les équations suivantes.

$$\frac{d\Omega_{arbre}}{dt} = \frac{1}{J} C_{arbre} \quad (2.3)$$

$$C_{arbre} = C_{turbine} + C_{em-ms} + C_{em-mada} \quad (2.4)$$

Où  $J$  représente l'inertie totale, qui apparaît sur le rotor du générateur,  $C_{arbre}$  est le couple total,  $C_{em-ms}$  est le couple électromagnétique de la machine synchrone à aimant permanent MSAP,  $C_{em-mada}$  est le couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

La figure 2.4 fait apparaître le modèle de l'arbre.

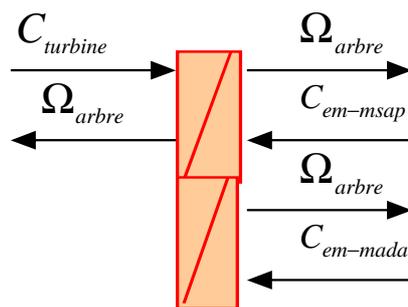


Figure 2.4 REM de l'arbre

### II.3.3. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone (MSAP) est représentée (figure 2.5) par le modèle de Park dans un référentiel lié au champ tournant.

L'induit de l'alternateur synchrone est relié, via les convertisseurs de puissance, au rotor de la génératrice asynchrone. La machine synchrone joue donc à la fois le rôle d'excitatrice de la machine principale, la rendant ainsi autonome, et celui de régulateur de la tension du bus continu représenté par un condensateur à la (figure 2.2). En conséquence, il est possible de ne dimensionner cette machine que pour la puissance de glissement de la MADA

### II.3.3.1. Modélisation des circuits de l'induit

Les équations classiques de la MSAP sont:

$$v_{dms} = R_{ms} i_{dms} + L_d \frac{di_{dms}}{dt} - \omega_{ms} L_q i_{qms} \quad (2.5)$$

$$v_{qms} = R_{ms} i_{qms} + L_d \frac{di_{qms}}{dt} + \omega_{ms} (L_d i_{dms} + \Phi_f) \quad (2.6)$$

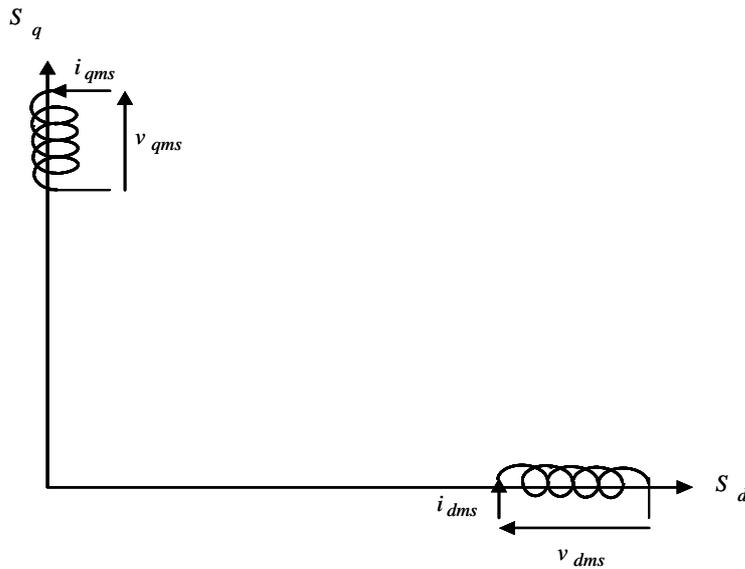


Figure 2.5 Représentation des enroulements dans les axes  $d$  et  $q$

Dans ces équations, l'indice "ms" est relatif à la machine synchrone.  $v_{dms}$  et  $v_{qms}$  sont les composantes de Park des tensions du stator de la machine,  $\omega_{ms}$  est la pulsation des tensions,  $i_{dms}$  et  $i_{qms}$  représentent les courants du stator.  $R_{ms}$ ,  $L_d$  et  $L_q$  modélisent respectivement la résistance d'enroulement, l'inductance d'axe direct et l'inductance d'axe en quadrature de l'alternateur. La quantité  $\Phi_f$  désigne quant à elle le flux d'excitation engendré par les aimants permanents.

Nous constatons que les termes  $\omega_{ms} L_q i_{qms}$  et  $\omega_{ms} (L_d i_{dms} + \Phi_f)$  sont des forces électromotrices mettant en évidence un couplage entre les axes  $d$  et  $q$ . Nous convenons alors de noter :

$$e_{dms} = \omega_{ms} L_q i_{qms} \quad (2.7)$$

$$e_{qms} = \omega_{ms} (L_d i_{dms} + \Phi_f) \quad (2.7a)$$

La figure 2.6 fait apparaître le modèle des circuits de l'induit.

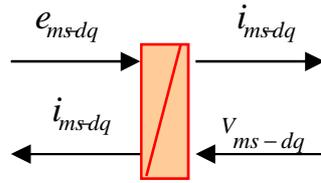


Figure 2.6 REM de l'induit de la MSAP

### II.3.3.2. Modélisation de la partie électromécanique

L'expression du couple de la machine synchrone est la suivante :

$$C_{ms} = \frac{3}{2} p_{ms} [(L_d - L_q) i_{dms} i_{qms} + \Phi_f i_{qms}] \quad (2.8)$$

$p_{ms}$  est le nombre de paire de pôles de la machine synchrone

Ce modèle de la conversion électromécanique est vu comme un système dynamique avec la vitesse et les courants comme entrées et le couple électromagnétique et les forces électromotrices comme sorties.

Ce modèle est représenté par la figure 2.7.

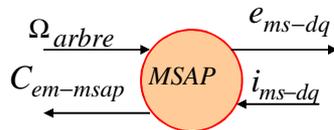


Figure 2.7 REM de la partie électromécanique de la MSAP

## II.3.4. Modélisation de la chaîne de conversion électronique

### II.3.4.1. Modélisation des convertisseurs statiques

Deux convertisseurs statiques MLI n°1 et MLI n°2 sont utilisés (figure 2.8) .L'un est appelé redresseur (MLI n°1) il est connecté à l'induit de la MSAP et l'autre (MLI n°2) est appelé onduleur et il est connecté au rotor de la MADA.

Les convertisseurs de puissance, dont le fonctionnement est basé sur les commutations d'interrupteurs semi-conducteurs, sont par nature des systèmes discrets. Prendre en compte ces phénomènes dans la modélisation s'avère intéressant dans le cadre d'une étude d'impact des convertisseurs sur le spectre des courants et tensions, mais ceci conduit à opter pour un pas de calcul très faible dépendant de la fréquence de commutation des composants électroniques. Les temps de simulation deviennent alors importants. Pour pallier à ce problème, nous adoptons un modèle continu équivalent des convertisseurs, modèle décrit notamment dans [Lab 98] et [Rob 01], et qui permet de retenir dans l'analyse du système uniquement les composantes utiles des signaux électriques. Ce modèle permet également d'aborder plus simplement le problème de la commande.

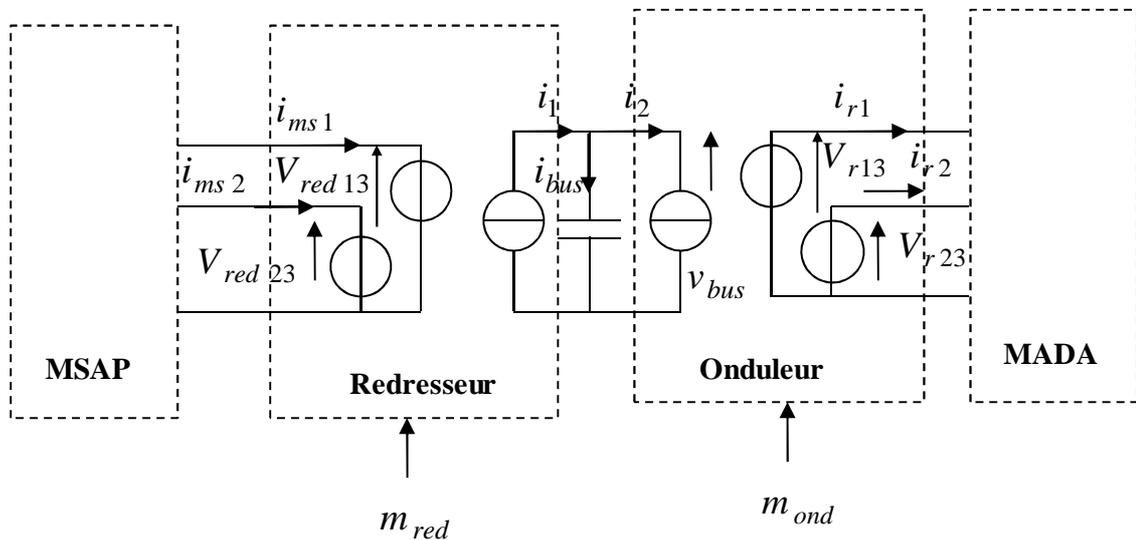


Figure 2.8 Représentation schématique des convertisseurs statiques

Pour le redresseur:

$$i_1 = m_{red} i_{ms} \quad (2.9a)$$

$$V_{red} = m_{red} V_{bus} \quad (2.9b)$$

Pour l'onduleur :

$$V_r = m_{ond} V_{bus} \quad (2.9c)$$

$$i_2 = m_{ond} i_r \quad (2.9d)$$

$m_{red}$  et  $m_{ond}$  sont les fonctions de conversion pour le redresseur et pour l'onduleur, en prenant des valeurs comprises entre  $-\sqrt{\frac{3}{2}}$  et  $\sqrt{\frac{3}{2}}$ .  $V_{red}$ ,  $V_r$  sont les tensions composées dépendantes de la tension du bus continu  $V_{bus}$  et  $i_1$ ,  $i_2$  sont les sources du courant dépendantes des courants alternatifs  $i_{ms}$ ,  $i_r$ .

Le modèle de ce convertisseur est alors décrit, dans le référentiel de Park [Rob 01].

Les figures 2.9a et 2.9b présentent la modélisation REM respectivement du convertisseur MLI 1 et du convertisseur MLI 2. Où  $v_{rdq}$  et  $i_{rdq}$  font référence aux tensions et courants du rotor de la MADA.

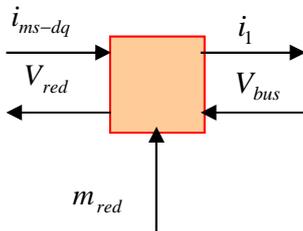


Figure 2.9a REM du redresseur

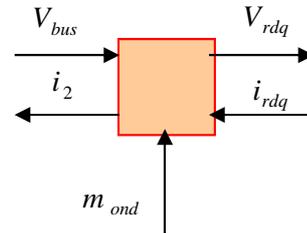


Figure 2.9b REM de l'onduleur

### II.3.4.2. Modélisation du bus continu

L'évolution de la tension du bus continu  $v_{bus}$  est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dv_{bus}}{dt} = \frac{1}{C_{bus}} i_{bus} \quad (2.10)$$

$$i_{bus} = -i_1 - i_2 \quad (2.11)$$

Le bus continu est modélisé par un condensateur (figure 2.10)

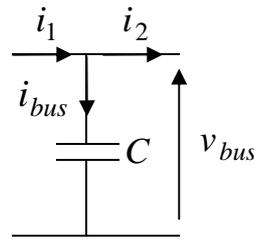


Figure 2.10 Schéma électrique du bus continu

Son modèle est présenté par le bloc REM du Bus continu à la figure 2.11.

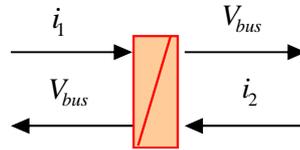


Figure 2.11 REM du bus continu.

## II.3.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

### II.3.5.1. Modélisation de la partie électrique

Cette machine est également modélisée dans le référentiel de Park (figure 2.12), les axes d et q étant solidaires du champ tournant. Dans ces conditions, les équations de la machine (2.12) à (2.15) font intervenir directement la pulsation des grandeurs du stator  $\omega_s$  et celle de la vitesse mécanique de l'ensemble de la masse tournante  $\Omega_{arbre}$ .

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (2.12)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \quad (2.13)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - p_{mada}\Omega)\Phi_{rq} \quad (2.14)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - p_{mada}\Omega)\Phi_{rd} \quad (2.15)$$

Dans ces équations,  $R_s$  et  $R_r$  modélisent la résistance des enroulements respectivement du stator et du rotor,  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  désignent les tensions du stator respectivement d'axe direct et en quadrature alors que  $v_{rd}$  et  $v_{rq}$  font référence aux tensions du rotor.  $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}$  et  $i_{rq}$  représentent les composantes des courants au stator et au rotor. De même,  $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}$  et  $\Phi_{rq}$  désignent les composantes de flux qui s'expriment en fonction des inductances de la machine suivant les équations :

$$\Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (2.16a)$$

$$\Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad (2.16b)$$

$$\Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \quad (2.17a)$$

$$\Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \quad (2.17b)$$

$L_s, L_r$  et  $M$  représentent les inductances cycliques respectivement du stator, du rotor et la mutuelle entre armatures.

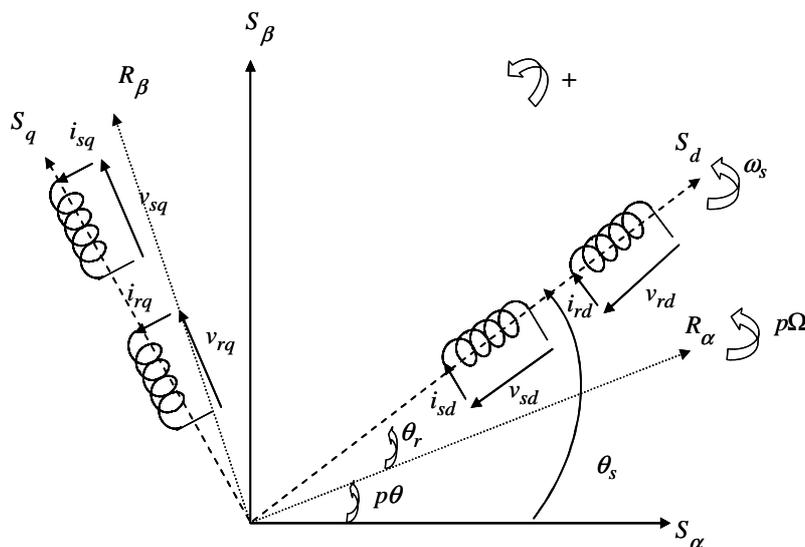


Figure 2.12 Représentation des enroulements dans les axes  $d$  et  $q$

Une machine électrique, en fonctionnement génératrice, peut être considérée comme une source du courant en raison de sa nature inductive. Puisque la MADA doit fournir une puissance électrique aux charges inductives, un conflit apparaît entre les dispositifs inductifs des deux composants, basés sur la loi physique d'alternance de source, par conséquent la MADA ne devrait pas être considérée comme une source de tension. Pour résoudre ce problème, on propose une approche

intermédiaire. Elle consiste à considérer la MADA comme source des forces électromotrices décrites ci-dessous. Les relations (2.16a) et (2.16b) peuvent être modifiées avec l'aide de (2.17a) et (2.17b), conduisant à deux nouvelles expressions (2.19a) et (2.19b) de  $\Phi_{sd}$  et  $\Phi_{sq}$ .

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{rd} - M i_{sd}) \quad (2.18a)$$

$$i_{rq} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{rq} - M i_{sq}) \quad (2.18b)$$

$$\Phi_{sd} = \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} \quad (2.19a)$$

$$\Phi_{sq} = \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rq} \quad (2.19b)$$

Où  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  est le coefficient de dispersion de la MADA

En accord avec (2.19a) et (2.19b) les équations (2.12) et (2.13) deviennent:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + \left( \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_s \Phi_{sq} \right) \quad (2.20)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \left( \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \omega_s \Phi_{sd} \right) \quad (2.21)$$

Puis, les f.é.m.  $e_{sd}$  et  $e_{sq}$  sur l'axe d et q peuvent être définies:

$$e_{sd} = \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (2.22a)$$

$$e_{sq} = \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \quad (2.22b)$$

Les figures 2.13a présente la modélisation REM du stator de la MADA.

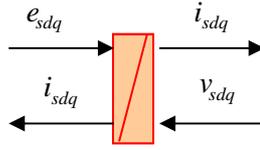


Figure 2.13a REM du stator de la MADA

Ceci mène à changer (2.20) comme suit :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + e_{sd} \quad (2.23)$$

De la même manière (2.21) peut être modifié et donne

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + e_{sq} \quad (2.24)$$

Par conséquent, la MADA est alors considérée comme une source de tension ( $e_{sd}$  et  $e_{sq}$ ) alimentant sa propre impédance du stator et l'impédance de la charge isolée. Ce choix est approprié pour modéliser la machine et également pour la commande vectorielle de celle-ci.

De la même manière, on peut établir les nouvelles expressions pour les tensions du rotor:

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + e_{rd} \quad (2.25)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_{rq} \quad (2.26)$$

Avec :

$$e_{rd} = \frac{M}{L_s} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - (\omega_s - p_{mada} \Omega) \Phi_{rq} \quad (2.27)$$

$$e_{rq} = \frac{M}{L_s} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + (\omega_s - p_{mada} \Omega) \Phi_{rd} \quad (2.28)$$

Les figures 2.13b présente la modélisation REM du rotor de la MADA.

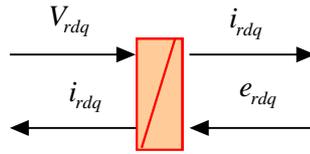


Figure 2.13b REM du rotor de la MADA

L'expression de couple produit par la MADA est alors:

$$C_{mada} = \frac{3}{2} p_{mada} (\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \quad (2.29)$$

### II.3.5.2. Modélisation de la partie électromécanique

La figure 2.14 fait apparaître le modèle électromécanique de la MADA.

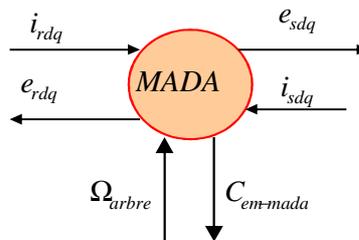


Figure 2.14 REM de la conversion électromécanique de la MADA

### II.3.6. Modèle graphique du système complet de génération hydroélectrique

La REM du modèle du système complet de génération hydroélectrique est obtenue en associant l'ensemble des graphiques. Elle donne une macro-représentation des grandeurs échangées entre la microcentrale hydroélectrique et le réseau interconnecté ou les sites isolés.

Ce modèle graphique met en évidence la complexité du système caractérisée par trois couples mécaniques différents appliqués sur l'axe, et la liaison électrique dont le composant principal est le condensateur du bus continu. Les expressions (2.23) et (2.24) prouvent que la commande de tension du stator de MADA implique les f.é.m. L'expression (2.22) souligne que les flux du rotor de la MADA, participeront nécessairement au processus de commande. Afin d'adapter la représentation classique de la REM aux besoins de notre structure, nous proposons de la modifier afin d'améliorer le modèle de la MADA en ajoutant les flux du rotor.

L'approche précédemment décrite mène à l'introduction des flux du rotor ou des courants magnétisants du rotor qui sont des combinaisons linéaires des courants du stator et du rotor. En conséquence, cette proposition implique à considérer ces flux ou les courants magnétisants comme variables d'état du rotor.

Ce modèle comprend un élément hexagonal, appelé le «commutateur de variable d'état», qui permet de choisir les variables d'état les plus appropriées de notre structure. Puisque la microcentrale doit réguler ses tensions, les flux semblent être des variables d'état les mieux adaptés. Dans notre cas, la commande de flux du rotor est considérée. En fait la présence du flux dans la REM implique naturellement le couplage magnétique.

Le «commutateur de variable d'état», est représenté par un hexagone (orange), proposé par [Ans 06a].

La figure 2.15 présente la REM du commutateur de variables

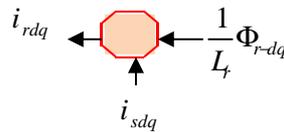


Figure 2.15 Éléments de commutation de variables

Pour effectuer cette amélioration l'équation (2.17) peut être modifiée comme suit:

$$\frac{1}{L_r} \Phi_{rd} = i_{rd} + \left( \frac{M}{L_r} \right) i_{sd} \quad (2.30a)$$

$$\frac{1}{L_r} \Phi_{rq} = i_{rq} + \left( \frac{M}{L_r} \right) i_{sq} \quad (2.30b)$$

En effet, comme  $\left( \frac{M}{L_r} \right)$  est le rapport des courants de la MADA,  $\left( \frac{\Phi_{rd}}{L_r} \right)$  et  $\left( \frac{\Phi_{rq}}{L_r} \right)$  sont le courant magnétisant direct et en quadrature du rotor appelés respectivement  $i_{rmd}$  et  $i_{rmq}$ , alors les f.é.m. du stator peuvent être exprimées en fonctions de ces courants à l'aide de (2.19a) et (2.19b):

$$e_{sd} = M \frac{d}{dt} i_{rmd} - \omega_s M i_{rmq} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \quad (2.31)$$

$$e_{sq} = M \frac{d}{dt} i_{rmq} - \omega_s M i_{rmd} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} \quad (2.32)$$

Elles peuvent être exprimées aussi en fonction des flux du rotor :

$$e_{sd} = \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_s \frac{M}{L_r} \left( \Phi_{rq} + \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sq} \right) \quad (2.33)$$

$$e_{sq} = \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - \omega_s \frac{M}{L_r} \left( \Phi_{rd} + \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sd} \right) \quad (2.34)$$

La figure 2.16 présente la REM du modèle global de la microcentrale hydroélectrique

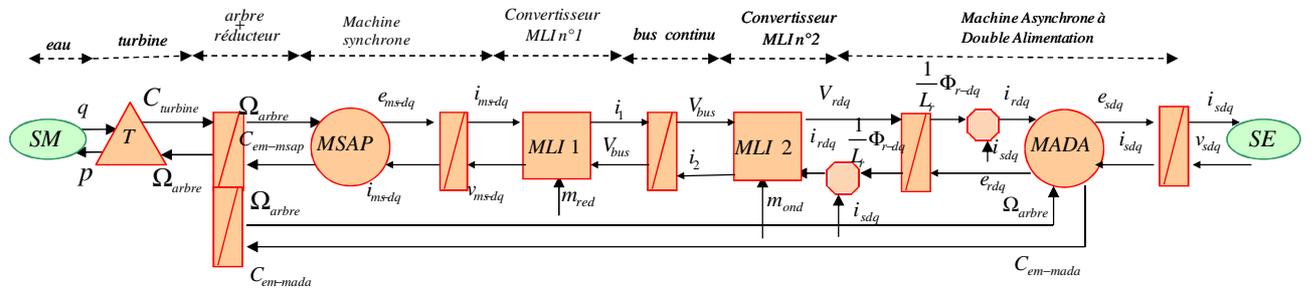


Figure 2.16 REM du modèle global de la microcentrale hydroélectrique

## II.4. Stratégie de commande de la microcentrale hydroélectrique connectée sur un site isolé [Bre 07], [Ans 06a]

Dans un premier temps, on procèdera à la commande du convertisseur MLI 2 afin de piloter la MADA par le rotor avec orientation du flux du rotor. On réalisera ensuite la commande du convertisseur MLI 1 en vue de réguler la tension du bus continu.

### II.4.1. Stratégie de commande de la MADA

L'architecture du dispositif de commande est obtenue en inversant la REM du modèle. La figure 2.17 présente la commande de la tension de la MADA déduite de la REM.

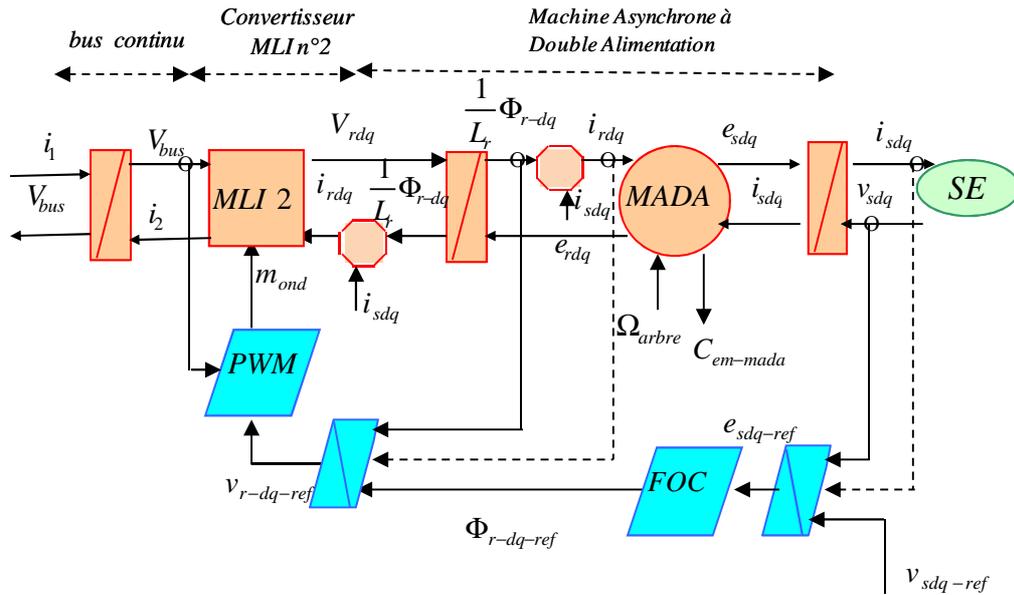


Figure 2.17 Commande de la tension de la MADA déduit de la REM

La microcentrale hydroélectrique étudiée alimente des charges isolées dont les tensions évaluées entre phases ont une valeur efficace de 400V et une fréquence de 50 hertz. En conséquence, la commande du système doit réguler ces deux grandeurs pour les garder aux valeurs souhaitées quelle que soit la charge. Ceci est assuré par le convertisseur MLI 2. D'ailleurs, la tension du bus continu doit être constante pour assurer le bilan énergétique entre le rotor de la MADA et la machine synchrone MSAP. Ceci est assuré par le convertisseur MLI 1. On peut noter que la détermination de la stratégie de commande est effectuée en supposant que le système a atteint le régime permanent. Ceci implique que  $\frac{d}{dt}\Phi_{rd}$  et  $\frac{d}{dt}\Phi_{rq}$  sont considérés nuls dans les équations (2.33) et (2.34). Évidemment, cette hypothèse n'est pas employée pour la synthèse de la boucle de contrôle des flux. Pour déterminer la stratégie générale de commande, une méthode directe est d'inverser le graphe du processus de la REM, comme représenté dans la figure 2.17, supposant que toutes les grandeurs peuvent être mesurées ou estimées. L'indice « réf » indique la valeur de référence.

Chaque rectangle barré est un élément de stockage, alors celui-ci est associé à une boucle de réaction afin de réguler sa sortie en fonction d'une des deux variables de ses entrées, la deuxième variable étant considérée comme une perturbation représentée par une ligne pointillée. Toutefois on peut noter que la loi causale implique que la tension  $v_s$  ne soit pas un résultat mais une entrée qui doit être régulée. L'action sur les courants du stator de la MADA serait une solution théorique valable, mais, ces courants sont imposés par la charge isolée. La seule possibilité qui reste est de commander la

f.é.m. du stator, considérant les courants du stator comme perturbations. Le résultat de la boucle de réaction de tension du stator est alors une valeur de référence de la f.é.m.  $e_{sref}$  comme représenté dans figure 2.17. Les équations (2.23) et (2.24) nous montrent qu'en régime permanent, la différence entre la f.é.m.  $e_s$  et la tension  $v_s$  est uniquement due à la chute de tension de la résistance d'enroulement du stator. En conséquence, un PI est choisi comme correcteur de cette boucle extérieure. La régulation de la f.é.m. du stator est obtenue par la commande vectorielle de flux (CVF ou FOC) qui permet de déterminer le flux de référence du rotor souligné par la REM en inversant le processus. Par conséquent, le flux du stator est orienté sur l'axe direct  $d$  du repère de Park. Les flux de référence du rotor sont obtenus avec l'aide de (2.16) et (2.17) menant aux équations suivantes :

$$\Phi_{sqref} = 0, i_{rq} = -\frac{L_s}{M} i_{sq} \text{ et } \Phi_{rqref} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sq} \quad (2.35)$$

Si le champ de stator est correctement orienté c'est-à-dire  $\left( \Phi_{rqref} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sq} \right)$ , alors, d'après les équations (2.33) et (2.35),  $e_{sd}$  est nulle en régime permanent,  $v_{sd} \approx 0$  si on néglige la chute de tension ohmique. Par conséquent, d'après l'équation (2.34) la f.é.m. du stator  $e_{sq}$  est régulée par  $\Phi_{rd}$  dont la valeur de référence est donnée par l'équation (2.36).

$$\Phi_{rdref} = \frac{L_r}{\omega_s M} e_{sqref} - \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sd} \quad (2.36)$$

La figure 2.16 montre que les flux du rotor peuvent être régulés par  $v_{rd}$  et  $v_{rq}$  tensions de rotor. En vue de décrire les boucles internes, les équations (2.14) et (2.15) peuvent être modifiées comme suit avec l'aide de l'équation (2.18).

$$\Phi_{rd} = \left( \frac{T_r}{1 + T_r s} \right) (v_{rd} + C_{rd}) \quad (2.37)$$

$$\Phi_{rq} = \left( \frac{T_r}{1 + T_r s} \right) (v_{rq} + C_{rq}) \quad (2.38)$$

$s$  est l'opérateur de Laplace,  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  la constante de temps du rotor de la MADA et :

$$C_{rd} = \frac{MR_r}{L_r} i_{sd} + \omega_r \phi_{rq} \quad (2.39)$$

$$C_{rq} = \frac{MR_r}{L_r} i_{sq} - \omega_r \phi_{rd} \quad (2.40)$$

$C_{rd}$  et  $C_{rq}$  représentent la somme de chute de tension produite par les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  de stator et les f.é.m. dû au couplage d'axe d et q du repère de Park. Dans les boucles de commande, ces termes doivent être compensés. La commande en modulation de largeur d'impulsion du convertisseur MLI 2 permet l'application des tensions calculées  $(v_{rd}; v_{rq})$  aux enroulements de rotor. La figure 2.18 récapitule cette commande présentée sous forme de schéma bloc. Dans ce schéma,  $C_d(\Phi)$ ,  $C_q(\Phi)$  et  $C(v)$  sont des correcteurs consacrés respectivement à  $\Phi_{rd}$ ,  $\Phi_{rq}$  et  $v_{sq}$ . Ils permettent de contrôler l'orientation des axes. Dans ce schéma, les grandeurs avec tilde représentent une estimation des valeurs des variables précédemment présentées et déterminées par des mesures des courants du stator et du rotor. D'une part, la commande de  $\Phi_{rq}$  est dédiée à l'orientation de flux du stator, pour assurer partiellement le découplage des axes d et q; d'autre part la commande de  $\Phi_{rd}$  est dédiée à la f.é.m. de l'axe q  $e_{sq}$  et par conséquent la régulation de tension  $v_s$  du stator. La figure 2.17 et la figure 2.18 sont donc deux représentations complémentaires.  $\omega_r$  est la pulsation des courants du rotor.

La figure 2.18 présente la commande de la tension du stator de la MADA sous forme de schéma bloc.

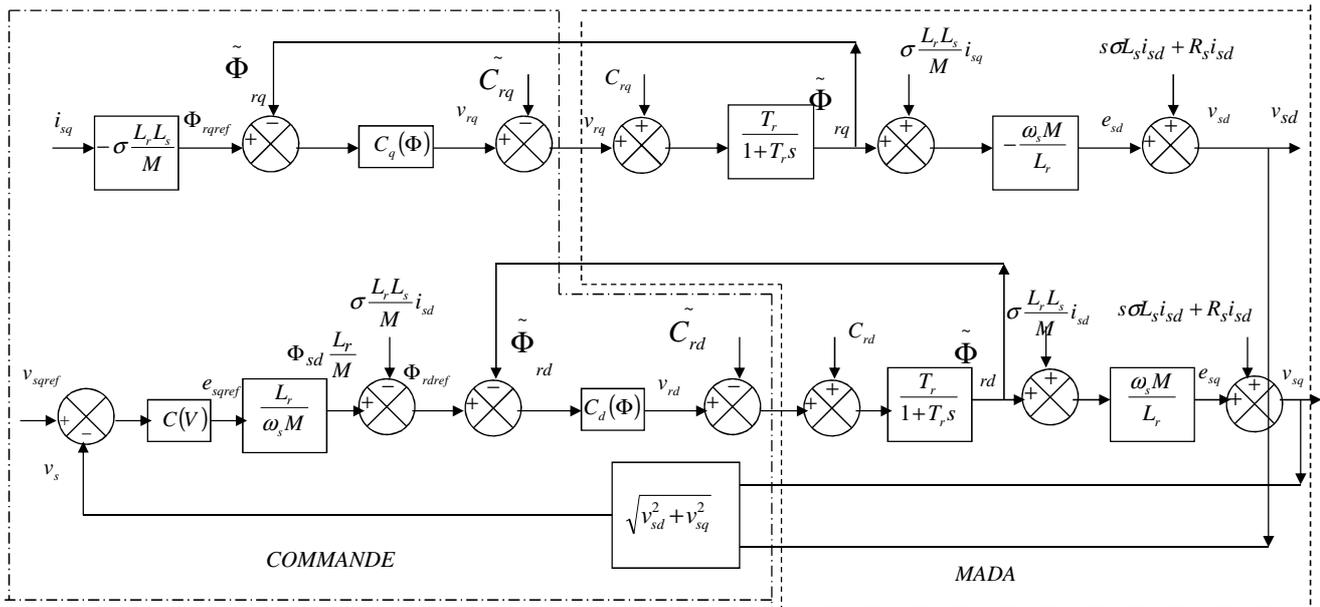


Figure 2.18 Commande détaillée de la tension du stator de la MADA en schéma bloc.

La fréquence de tension du stator doit être maintenue à la valeur de 50Hz malgré les variations de ce point. Pour une machine à double alimentations, la fréquence du stator  $f_s$  est liée à la fréquence du rotor  $f_r$  et la vitesse de rotation  $\Omega$  par la relation suivante :

$$f_r = \left| f_s - \frac{p_{MADA} \Omega}{2\pi} \right| \quad (2.41)$$

$p_{MADA}$  : désigne le nombre de paires de pôles de la MADA

#### II.4.2. Stratégie de commande de la MSAP

L'architecture du dispositif de commande est obtenue en inversant la REM du modèle. La figure 2.19 présente la commande de la MSAP et du bus continu déduit de la REM

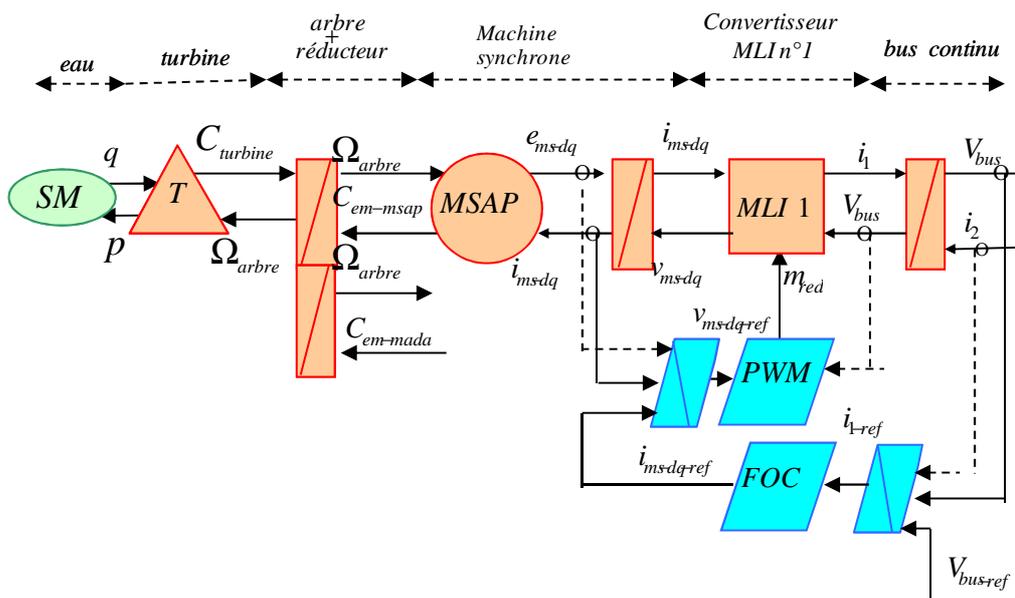


Figure 2.19 Commande de la MSAP et le bus continu déduit de la REM

Cette commande est effectuée par le convertisseur MLI n°1 afin de maintenir la tension du bus continu à sa valeur nominale. La MSAP est représentée comme une source de tension f.é.m. reliée à un élément de stockage inductif et le convertisseur MLI n°1, le condensateur du bus continu (élément de stockage capacitif) est relié au convertisseur MLI n°2 et est considéré comme une source de tension.

La figure 2.10 est une représentation schématique du bus continu; il définit les courants utilisés dans la REM de la figure 2.19. La stratégie de commande est alors déduite de ce modèle macroscopique. Le processus est représenté dans la figure 2.20 qui montre deux boucles de commande interne et externe ainsi que la tension du bus continu. Une boucle calcule le courant continu  $i_1$  en sortie du convertisseur MLI 1. Le courant de la MSAP doit être régulé à sa valeur de référence, ceci est obtenu grâce à la commande vectorielle qui permet de déterminer  $i_{msref}$ .

### II.4.3 Régulation de la tension du bus continu

Cette régulation est réalisée par le convertisseur MLI 1 connecté au stator de la machine synchrone comme représenté dans la figure 2.19. En admettant que le courant  $i_2$  du bus continu soit considéré comme une perturbation, la régulation de la tension  $v_{bus}$  passe par le contrôle du courant  $i_1$  en sortie du convertisseur MLI 1.

On établit en premier lieu un asservissement du courant  $i_{dms}$  à 0 de sorte que, en régime permanent et en négligeant la chute de tension due à  $R_{ms}$ , les expressions (2.6) et (2.7) deviennent :

$$v_{dms} = -\omega_{ms} L_q i_{qms} \quad (2.42a)$$

$$v_{qms} = \omega_{ms} \Phi_f \quad (2.42b)$$

La relation (2.42a) montre que la variable de régulation est  $v_{dms}$ . Pour déterminer la valeur de référence de  $i_{qms}$ , on pose l'égalité entre les puissances électriques au stator de la MSAP et sur le bus continu, les pertes dans le convertisseur étant négligées ceci mène à :

$$\frac{3}{2} v_{qms} i_{qmsref} = v_{bus} i_1 \quad (2.43)$$

$$i_{qmsref} = \frac{3}{2} \frac{v_{bus} i_1}{\omega_{ms} \Phi_f} \quad (2.44)$$

La deuxième boucle du courant produit alors la tension de la MSAP suivant le schéma de la figure 2.19. L'étape suivante est la détermination du schéma détaillé de commande représenté en schéma bloc dans la figure 2.20.

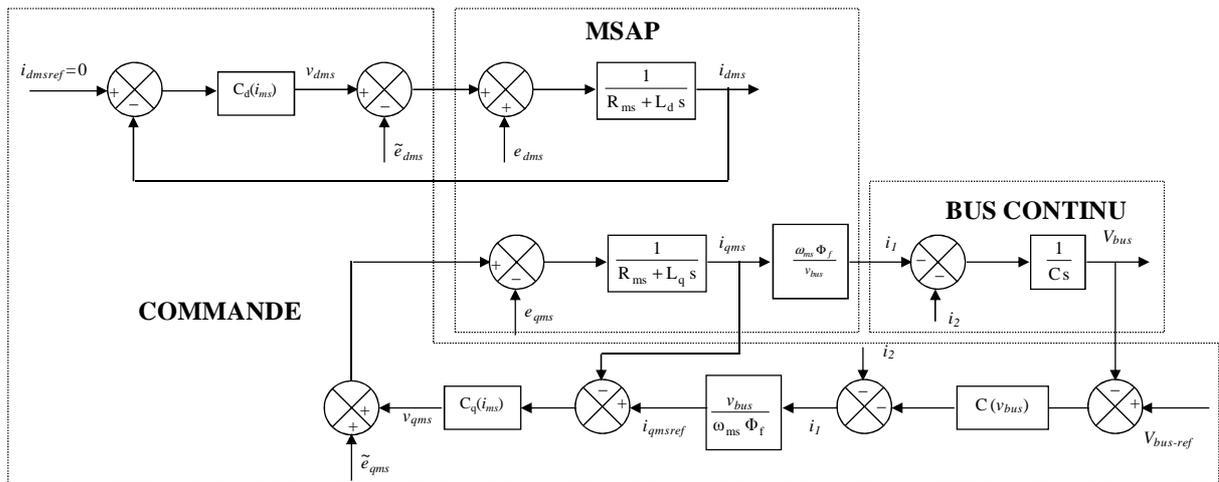


Figure 2.19 Schéma bloc de commande du bus continu

Dans la figure 2.19  $C_d(i_{ms})$ ,  $C_q(i_{ms})$  et  $C(v_{bus})$  sont des correcteurs dédiés respectivement à  $i_{dms}$ ,  $i_{qms}$  et le contrôle de la tension du bus continu  $V_{bus}$ .

#### II.4.4. Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté sur sites isolés

Le modèle graphique de la commande du système complet de génération hydroélectrique est obtenu en associant les deux graphiques précédents. La figure 2.21 présente le modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté à un site isolé.

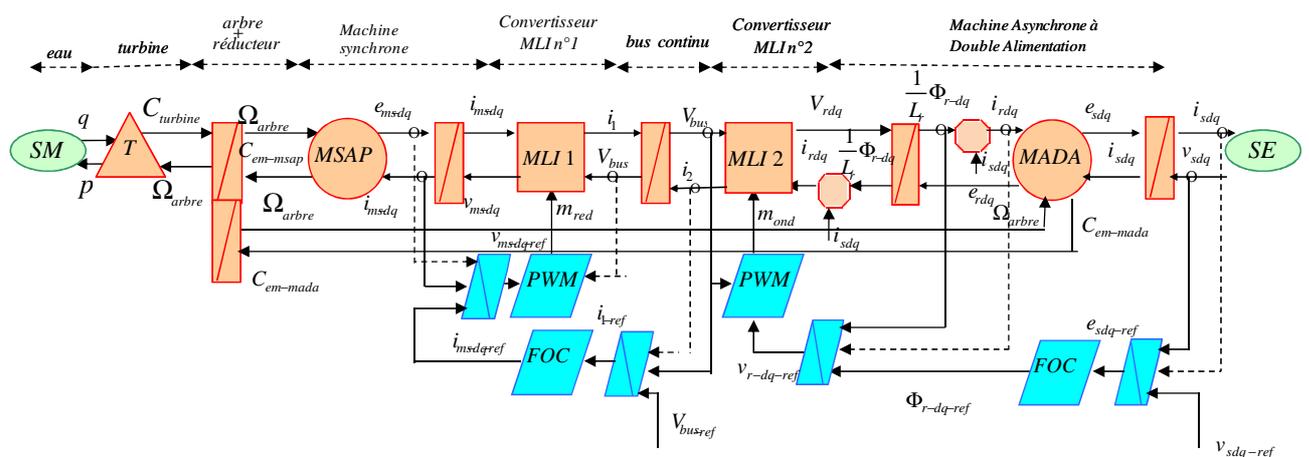


Figure 2.21 Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté sur sites isolés

## II.4.5. Simulations

### Caractéristiques des éléments simulés

Des simulations ont été effectuées avec le logiciel Simulink<sup>TM</sup>. On considère une petite centrale hydro-électrique au fil de l'eau de 300 kW soumise à un débit et à une hauteur fixe. Le système est basé sur une MADA de quatre pôles, alimentant une charge isolée avec un facteur de puissance de 0.8. Le scénario simulé est le suivant : A  $t = 0 \text{ sec}$ ,  $P_S = 0 \text{ kW}$  ; à  $t = 1 \text{ sec}$ ,  $P_S = 50 \text{ kW}$  à  $t = 50 \text{ sec}$ ,  $P_S = 190 \text{ kW}$ , à  $t = 100 \text{ sec}$ ,  $P_S = 300 \text{ kW}$ ,  $t = 150 \text{ sec}$ ,  $P_S = 190 \text{ kW}$ ,  $t = 200 \text{ sec}$ ,  $P_S = 50 \text{ kW}$ .

Les courbes présentées de la figure 2.22 à la figure 2.24 correspondent aux résultats de simulation.

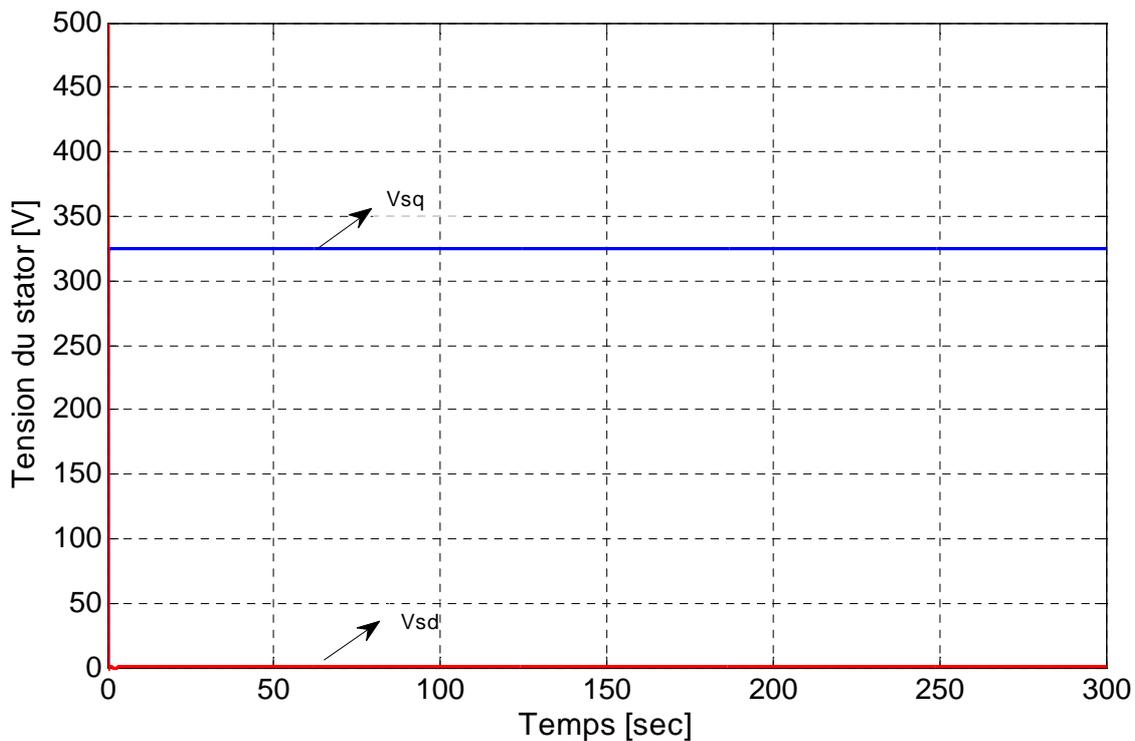


Figure 2.22 Tension du stator  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$

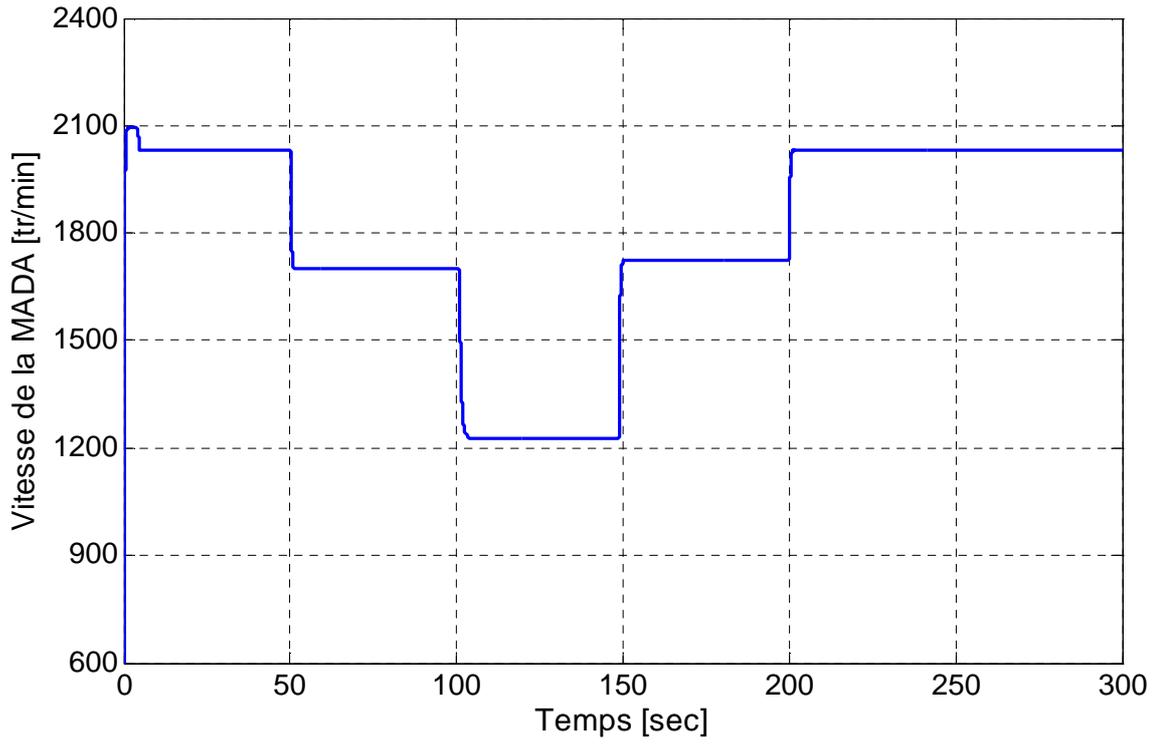


Figure 2.23 Vitesse de rotation de la MADA

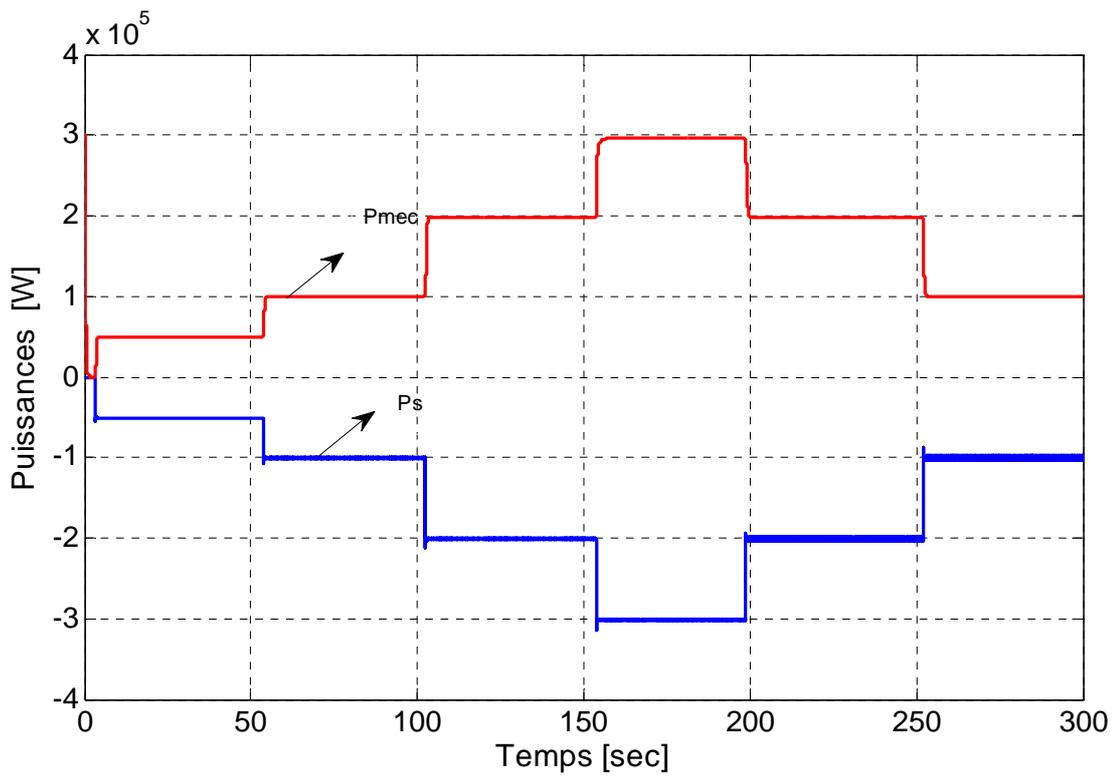


Figure 2.24 Puissances de la turbine  $P_m$  et de la MADA  $P_s$

## II.4.6. Interprétation

La figure 2.22 montre que malgré la variation de la charge,  $v_{sd}$  est nulle et  $v_{sq}$  est régulée. La figure 2.23 montre que la vitesse de rotation baisse lorsque la charge augmente. En effet, la vitesse de rotation de l'ensemble tournant dépend des puissances et des caractéristiques mécaniques de chaque machine. Pour  $0 < t < 100$  sec, la MADA fonctionne en mode hypersynchrone (la vitesse de la turbine dépasse 1500 tr/min). Pour  $100 < t < 150$  sec, la MADA fonctionne en mode hyposynchrone (sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à 1500 tr/min). En accord avec la figure 2.23, la MADA a la capacité de fonctionner en hypersynchronisme et aussi en hyposynchronisme. La figure 2.24 montre la puissance mécanique  $P_m$  fournie par la turbine hydraulique, elle est égale à  $P_s$  si on néglige les pertes des machines.

## II.4.7. Conclusion

Les simulations confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable en hypersynchronisme et aussi en hyposynchronisme. On peut obtenir le point de fonctionnement optimum du générateur à n'importe quelle vitesse. La tension du stator est maintenue à sa valeur nominale malgré l'évolution de la puissance appelée par la charge. La fréquence du générateur est régulée autour de 50 Hz.

La phase suivante est la validation expérimentale des lois de commande étudiées.

## II.5. Validation expérimentale

### II.5.1. Présentation de la plateforme d'essais

Un banc d'essai est disponible dans le laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de puissance (L2EP) de Lille, dans les bâtiments de l'école des Hautes Études d'Ingénieurs (HEI) de Lille [Annexes 1 et 2]. Celui-ci est flexible et il comporte un maximum d'éléments produits en série. J'ai participé à la création de la plateforme expérimentale et aux essais du système de conversion électromécanique de la microcentrale hydroélectrique. Le développement de ce banc d'essai a permis d'évaluer et d'étudier les différentes stratégies de commande des générateurs hydro/éoliens associés à un système de stockage d'énergie. Dans la suite, la microcentrale hydroélectrique sera examinée expérimentalement sur réseau interconnecté ou sur un site isolé.

Cette plateforme d'essais comporte un émulateur de turbine hydraulique (ETH), représentant le comportement d'une turbine hydraulique réelle, basé sur une machine à courant continu (MCC), une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) et une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dont le fonctionnement en génératrice permet de convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, ensemble mécaniquement couplé. Deux convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion MLI font le lien entre le rotor de la MADA et le stator de la MSAP. Le troisième convertisseur MLI alimente la (MCC). Les interrupteurs des convertisseurs utilisés sont de marque SEMIKRON, construit autour d'IGBT 1200V/50A, ils sont commandés par des cartes DSPACE.

#### **II.5.1.1. Émulateur de la turbine hydraulique (ETH)**

La base de cet émulateur est une machine à courant continu (MCC) de 3 kW, 1500 tr/min, alimenté par un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI n°3). L'induit de la machine est alimenté par deux bras du convertisseur (hacheur à quatre quadrants) et l'excitation par le troisième bras. Ce dernier point a son importance, car lorsque le banc sera amené à travailler en fonctionnement hypersynchrone, il sera nécessaire de réduire l'excitation de la MCC afin de lui permettre d'atteindre des vitesses supérieures à 1500 tr/min. La commande de cet ensemble est assurée par une carte DSPACE™ 1104. Une interface de commande est placée entre cette carte et les drivers des IGBT, afin d'adapter les signaux reçus des organes de commande 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 courants 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 DSPACE™ 1104.

#### **II.5.1.2. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP)**

La MSAP (2,8 kW, 3000 tr/min) comporte 3 paires de pôles. Elle est entraînée mécaniquement par la MCC émulant la turbine hydraulique (ETH). L'énergie qu'elle fournit est envoyée vers le bus de tension continue. Son induit est relié au bus de tension continu 400 V par un convertisseur MLI n°1. Ce dernier est contrôlé par une carte DSPACE™ 1103. Un codeur incrémental est nécessaire à la capture de la vitesse de la MSAP. Celui-ci est directement connecté à un slot dédié sur la borne d'extension de la carte DSPACE™ 1103.

### II.5.1.3. La machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La MADA (3 kW, 1500 tr/min) comporte deux paires de pôles. Elle est entraînée mécaniquement par la MCC émulant la turbine hydraulique (ETH). L'énergie qu'elle fournit par son stator est envoyée soit vers le réseau électrique soit vers une charge isolée. Son rotor est relié au bus de tension continue 400 V par un convertisseur MLI n°2. Ce dernier est contrôlé par une carte DSPACE™ 1104.

### II.5.1.4. Les convertisseurs statiques

Deux convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion MLI font le lien entre le rotor de la MADA et le stator de la MSAP. Les interrupteurs des convertisseurs utilisés sont de marque SEMIKRON™, construit autour d'IGBT 1200V/50A, ils sont commandés par des cartes DSPACE.

La figure 2.25 montre la structure mise en jeu pour cette étude. Comme les enroulements du stator et du rotor de la MADA sont en couplage étoile, la mesure de deux courants du rotor et du stator est nécessaire et suffisante.

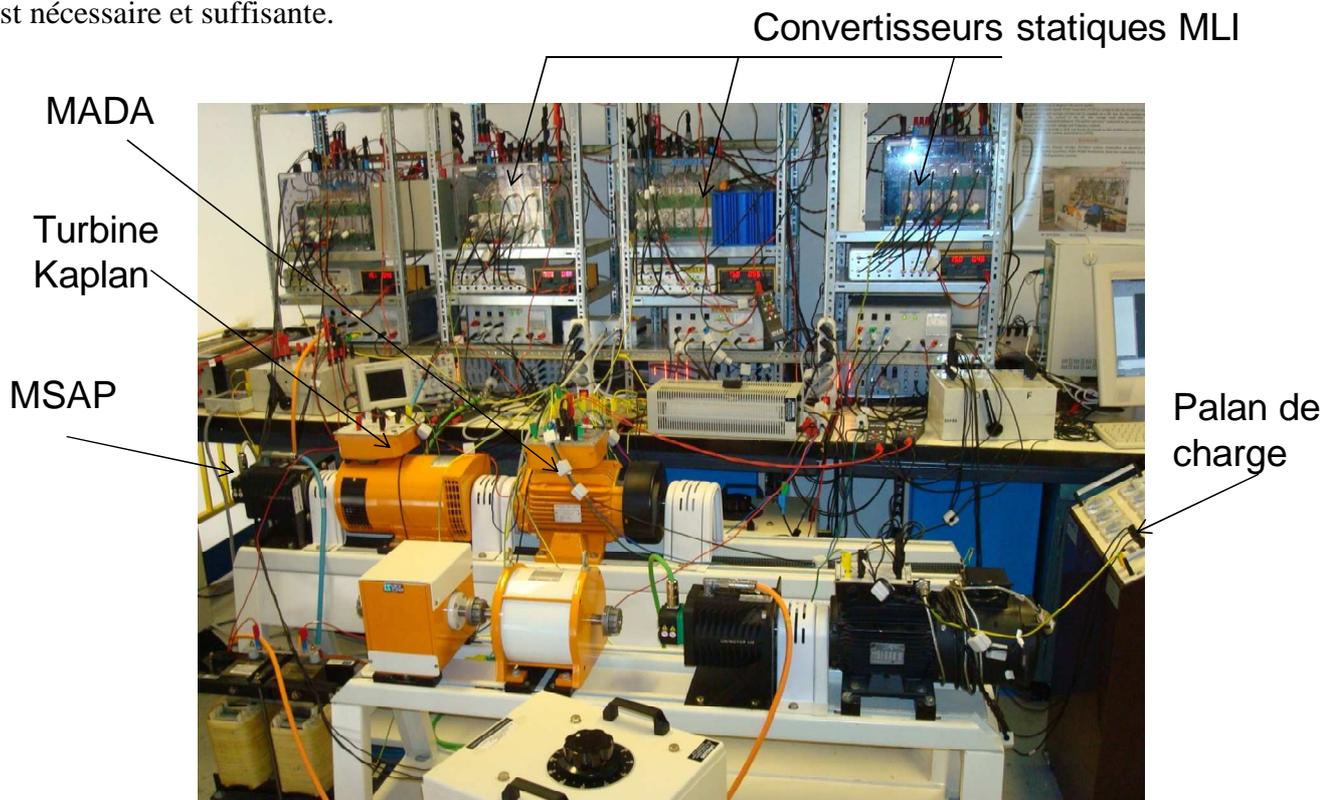


Figure 2.25 Banc d'essai adapté à l'étude du générateur hydroélectrique connecté sur sites isolés

En effet les valeurs des courants du stator sont nécessaires pour évaluer les termes de perturbation de la MADA, ceux de couplage et les flux du rotor commandés comme décrits dans les sections précédentes. Les valeurs des courants du rotor sont aussi bien utiles pour calculer les flux du rotor. La tension instantanée du stator est également mesurée pour calculer les puissances active et réactive transmises par le générateur, quand la machine débite sur charge isolée, afin de maintenir la valeur efficace de la tension constante et réguler la fréquence.

### II.5.2. Essais expérimentaux sur un site isolé [Bre 07]

La microcentrale hydroélectrique est examinée expérimentalement sur un site isolé (figure 2.26).

Des essais ont été réalisés sur un intervalle de 300 secondes comme suit :

L'émulateur de la turbine est placé de telle sorte que le débit fixe est de 0.9 p.u. À  $t = 157$  sec, le débit est diminué à une valeur de 0.8 p.u. et ensuite à  $t = 190$ sec il est augmenté jusqu'à sa valeur initiale.

La MADA est branchée sur une charge résistive variable dont la variation peut être traitée seulement point par point et non pas de manière continue. La tension (composée) efficace de référence entre phases de la charge est de 225 V.

La tension de référence du bus continu est fixée à 200 V, afin de s'adapter aux tensions du rotor de la MADA.

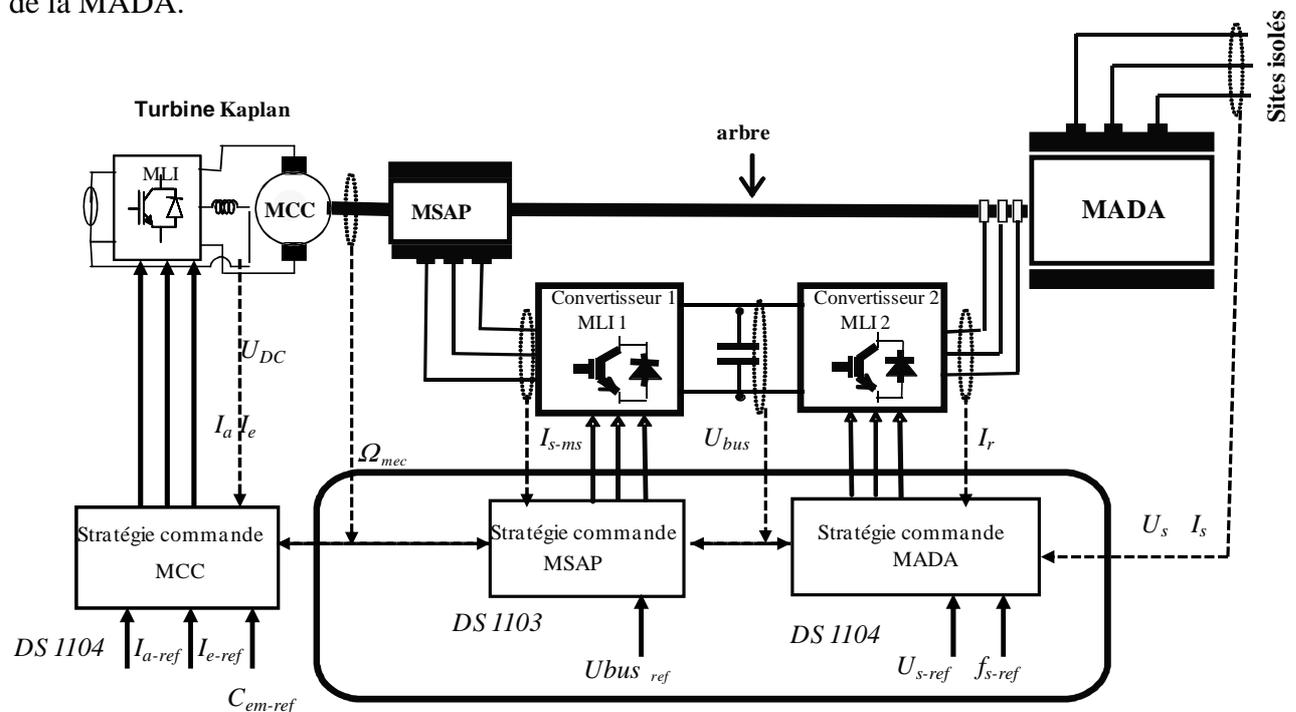


Figure 2.26 Schéma de banc d'essai

### II.5.3. Interprétation

Les courbes présentées de la figure 2.27 à la figure 2.33 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental. Ils montrent respectivement le débit simulé de la turbine, la vitesse de rotation, la fréquence de tension du stator de la MADA, la tension efficace entre phases du stator de la MADA, la puissance active fournie à la charge par la MADA (on peut remarquer que les puissances sont positives contrairement aux résultats de la simulation), la tension du bus continu et la puissance mécanique transmise de la turbine (émulateur).

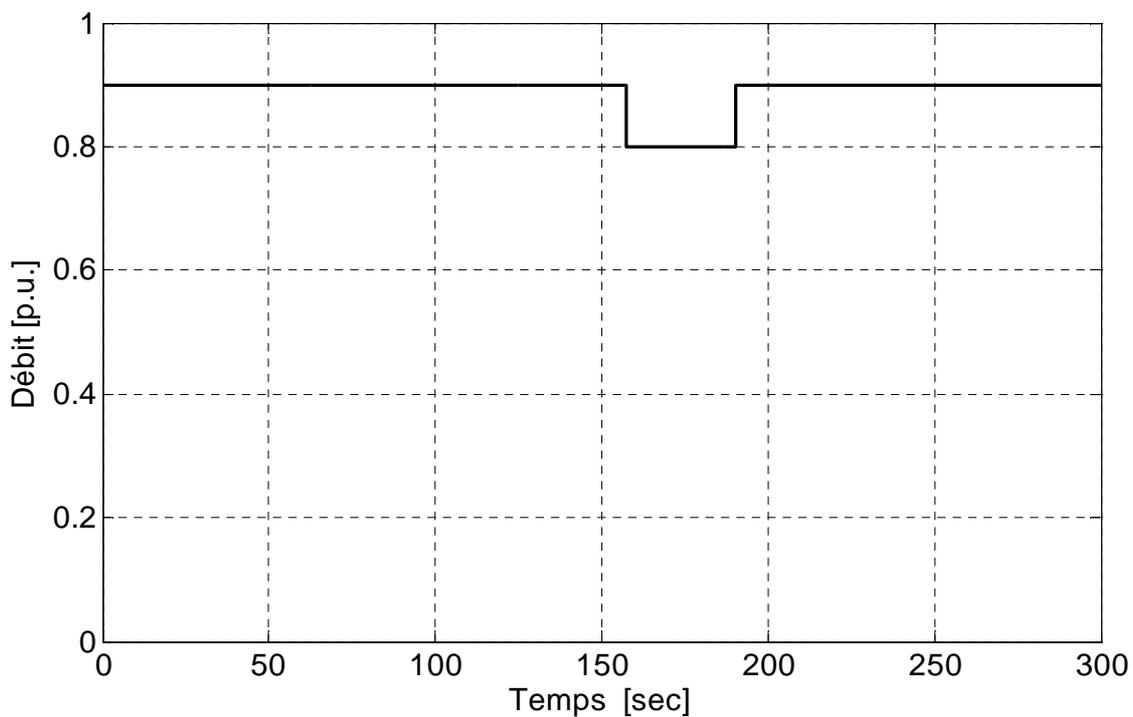


Figure 2.27 Débit d'écoulement d'eau.

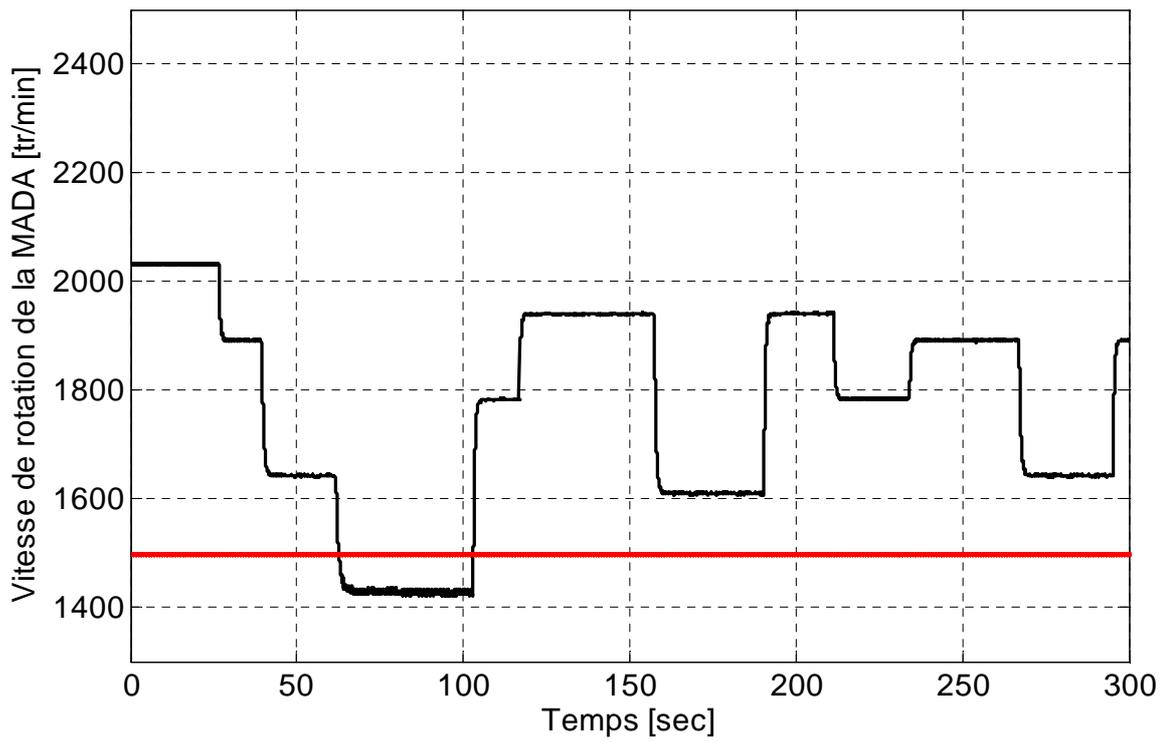


Figure 2.28 Vitesse de rotation de la MADA.

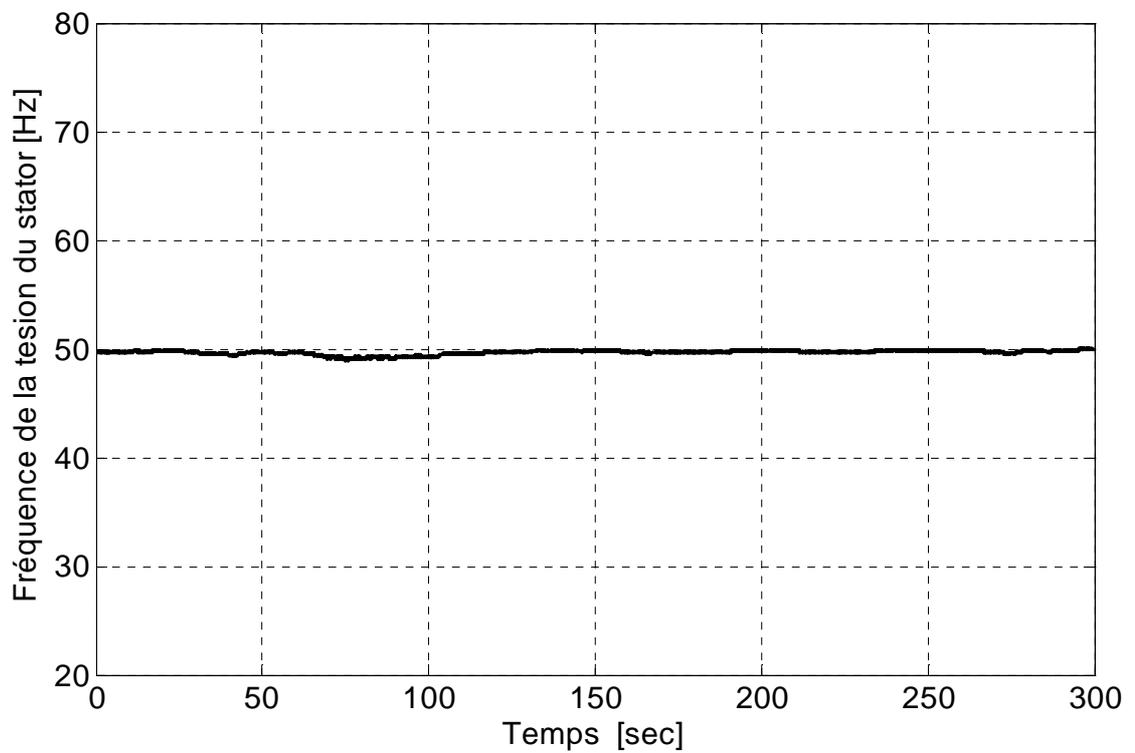


Figure.2.29 Fréquence de la tension du stator de la MADA.

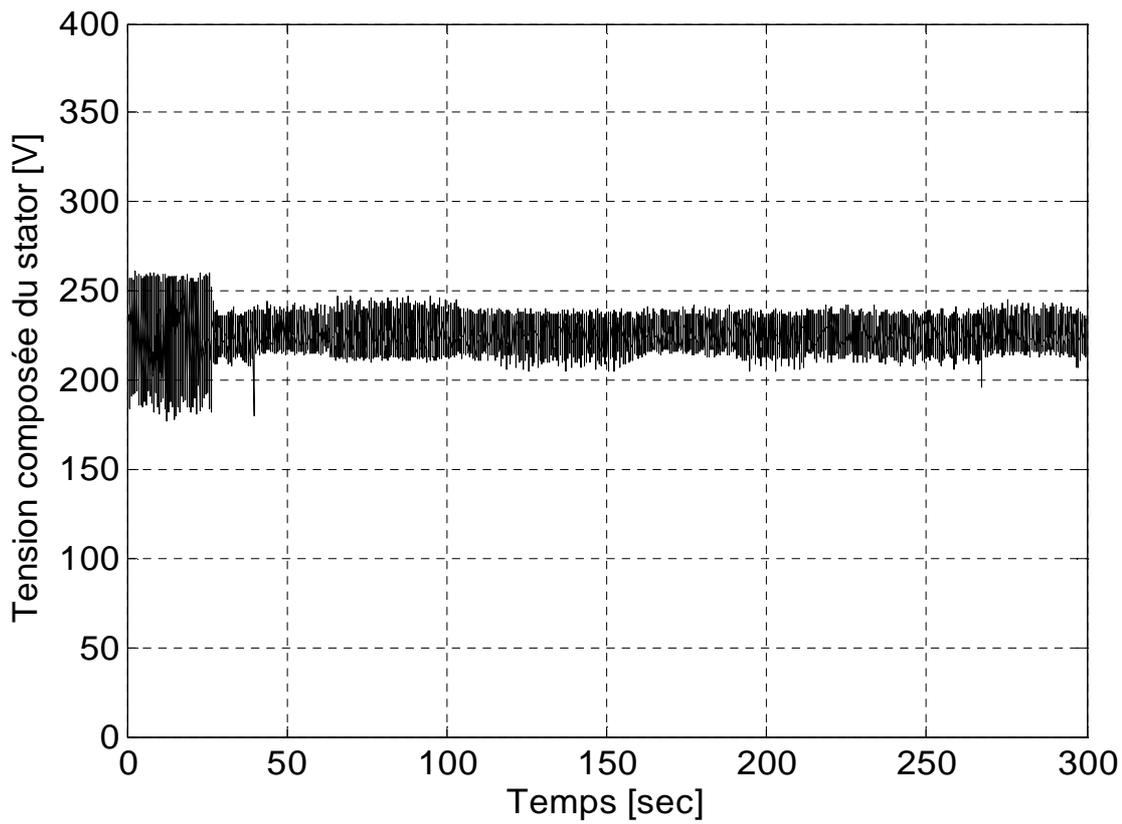


Figure 2.30 Tension composée efficace au stator de la MADA.

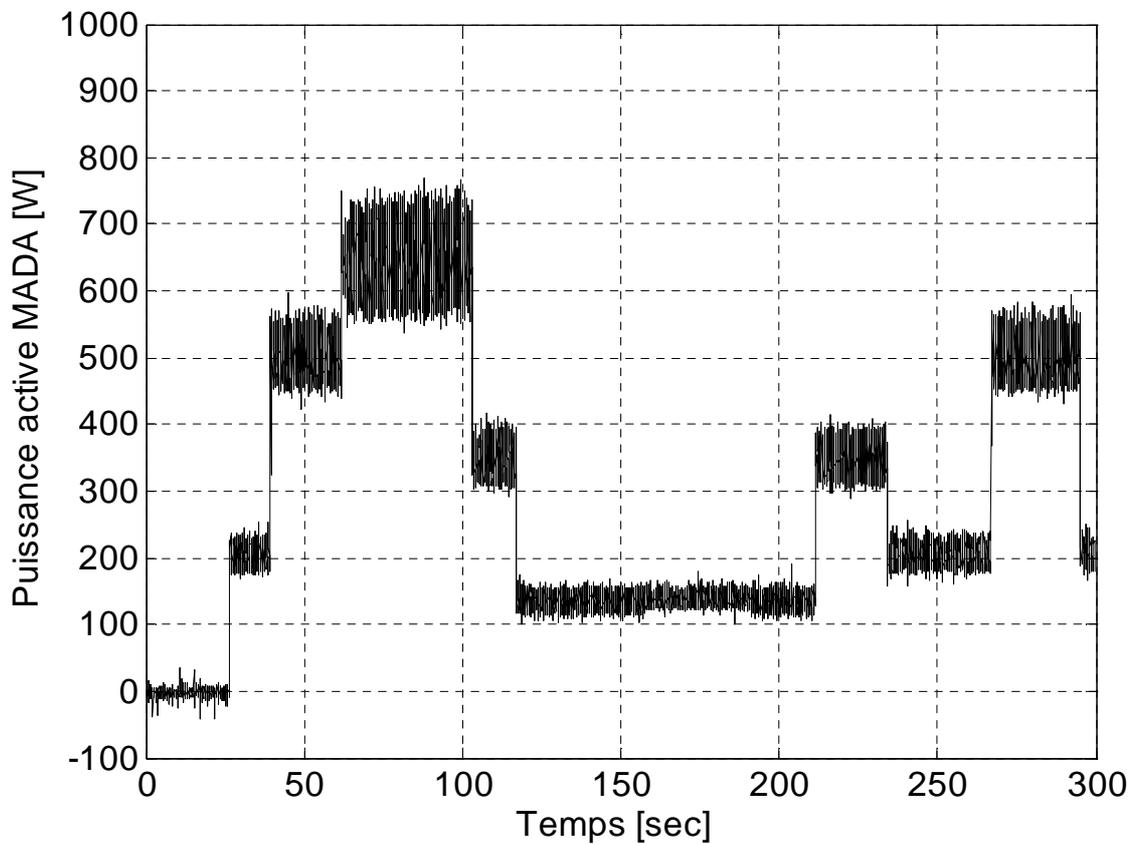


Figure 2.31 Puissance active fournie par la MADA

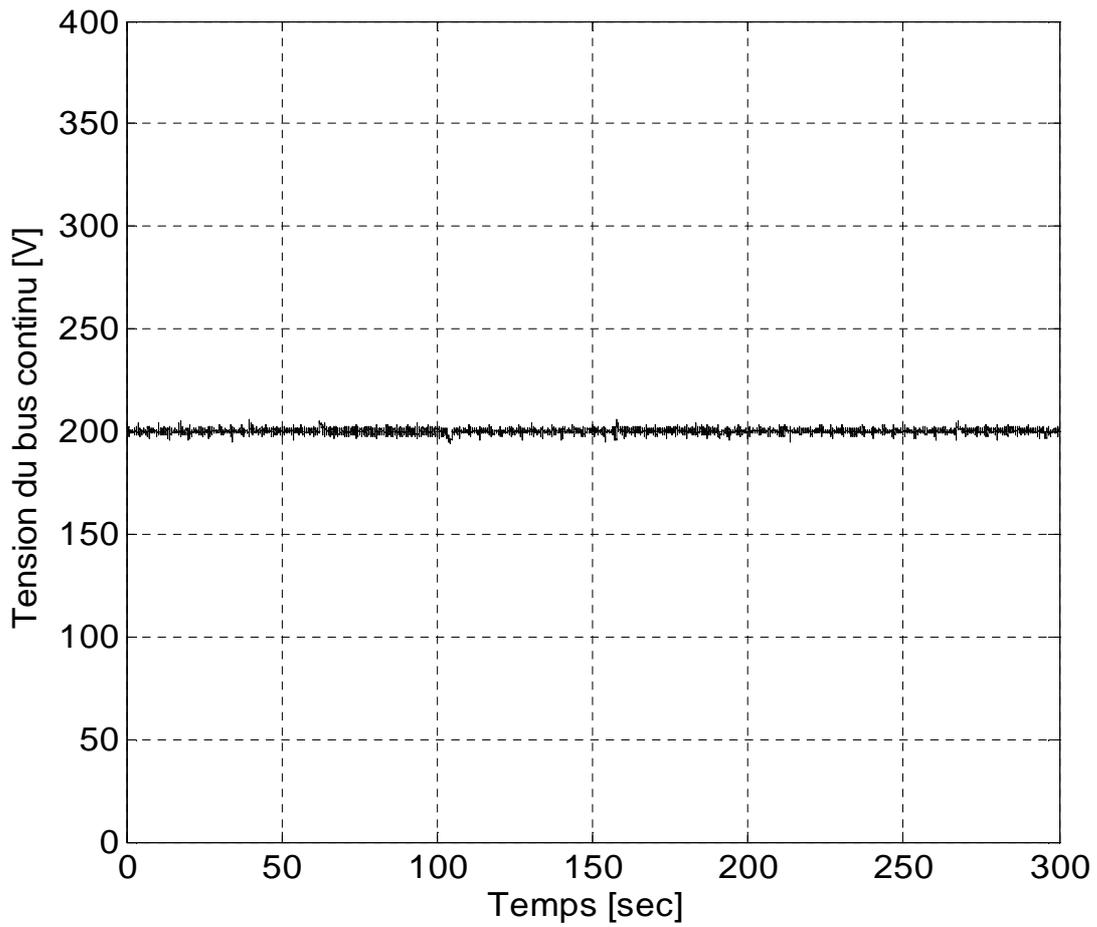


Figure 2.32 Tension de bus continu DC

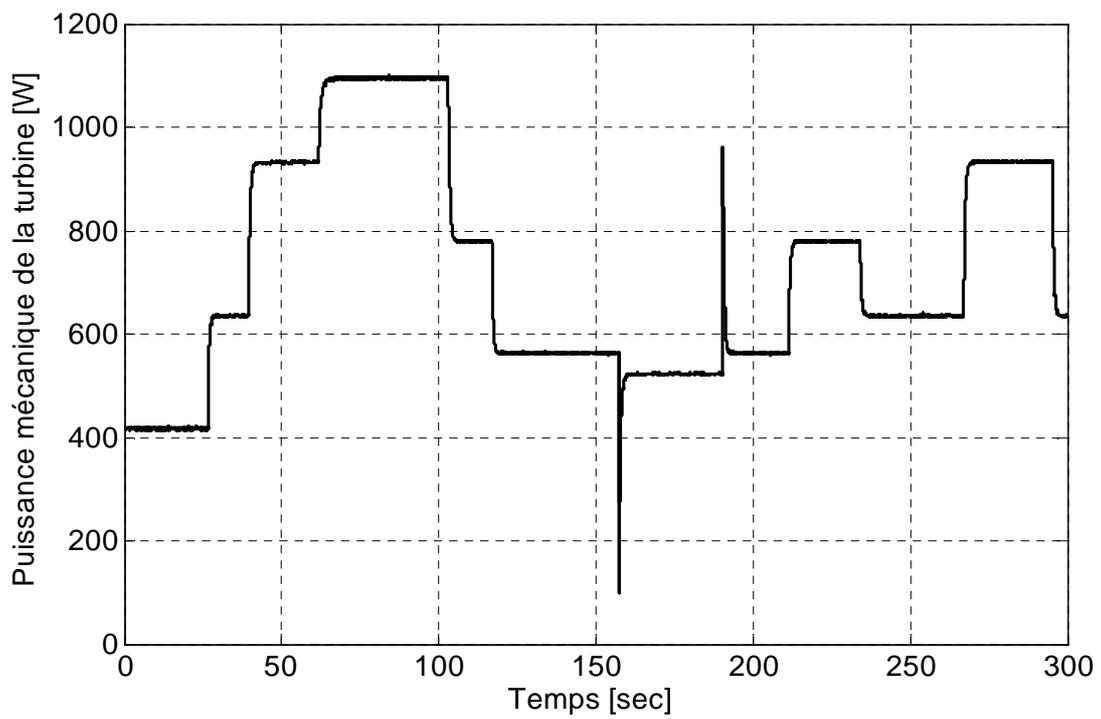


Figure 2.33 Puissance mécanique de la turbine hydraulique

Ces résultats confirment la possibilité pour la stratégie de commande de faire fonctionner le système à vitesse variable en dessous et au-dessus de la vitesse de synchronisme comme montré à la figure 2.28 et à fréquence fixe côté charges isolées. Cette dernière grandeur (fréquence) est bien régulée quel que soit la charge, comme montré dans figure 2.29, et malgré les variations intempestives de la charge. La figure 2.30 montre la tension efficace du stator de la MADA, elle est relativement stable malgré les oscillations significative de l'amplitude en fonctionnement à vide au moment de démarrage à  $t = 27$  sec . Les fluctuations de la tension peuvent être observées aussi dans le graphique de puissance de la figure 2.31. La figure 2.32 montre que la tension du bus continu est bien régulée pour toutes les valeurs de la charge. Dans la figure.2.33, on peut noter que la puissance mécanique transmise de la turbine est supérieure à la puissance électrique fournie à la charge à cause de toutes les pertes produites dans le système, comme les pertes mécaniques, les pertes fer et Joules du stator de la MADA et de la MSAP, les pertes fer et Joules du rotor de la MADA et les pertes des convertisseurs de puissance. Les pertes fer et Joule du rotor de la MADA sont significatives seulement quand le glissement l'est aussi. D'autre part, la figure 2.33 souligne que, quand le débit est soudainement modifié, une variation rapide de la vitesse mécanique se produit en raison d'un changement de la caractéristique mécanique de turbine. Comme confirmé par la figure 2.33, la puissance électrique n'est pas influencée par cette coupure, seulement le point de réglage mécanique est modifié : la vitesse diminue de manière significative et la puissance mécanique transmise atteint une valeur légèrement plus faible que précédemment alors que les pertes mécaniques et les pertes dans le rotor de la MADA deviennent plus petites. Ceci montre la capacité du système à travailler dans une condition où le débit est variable. Pour conclure, ces résultats expérimentaux permettent de valider la stratégie de commande en mode de fonctionnement sur charges isolées.

#### **II.5.4. Conclusion**

Les résultats expérimentaux confirment la capacité du système de conversion électromécanique de fonctionner à vitesse variable en hypersynchronisme et aussi en hyposynchronisme. Cela permet d'utiliser toute la plage de vitesse de la caractéristique mécanique de la turbine. Malgré l'évolution du point de fonctionnement, la microcentrale hydroélectrique arrive à maintenir la tension efficace du site isolé à une valeur constante. La fréquence est bien régulée autour de 50 Hz. Au niveau du couplage entre les deux convertisseurs, la tension du bus continu est bien régulée à 200 V.

## II.6. Modélisation et simulation de la microcentrale hydroélectrique débitant sur un réseau interconnecté

### II.6.1. Stratégie de commande en mode de fonctionnement sur réseau interconnecté [Bre 06], [Ans 06a]

Dans le cas du raccordement sur un réseau de puissance, les flux du stator sont fixés par le réseau et ne sont par conséquent pas réglables; en régime permanent et en négligeant les chutes de tensions, (2.12) et (2.13) deviennent:

$$v_{sd} = -\omega_s \Phi_{sq} \quad (2.45)$$

$$v_{sq} = +\omega_s \Phi_{sd} \quad (2.46)$$

Dans cette configuration, il est nécessaire de prendre en considération dans le modèle de la MADA l'expression de la puissance active  $P_s$ , fournie par la MADA, et la puissance réactive  $Q_s$ , fournie ou consommée,  $P_s$  et  $Q_s$  sont exprimées comme suit :

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad (2.47)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}) \quad (2.48)$$

On note que la transformation de Park initiale permet de conserver l'amplitude efficace du courant et non pas la puissance apparente. Alors on choisit le repère d-q attaché au stator en orientant le flux du stator sur l'axe d afin d'éliminer l'une des deux composantes de tension du stator de la MADA, ici  $v_{sd}$ .

Ainsi, si  $V_s$  représente la valeur efficace de la tension du réseau, alors, on peut écrire, à l'aide de (2.12) et (2.45) :

$$\Phi_{sq} = 0 \quad (2.49)$$

$$i_{sq} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_{rq} \quad (2.50)$$

$$v_{sd} \approx 0 \quad (2.51)$$

$$v_{sq} \approx V_s \sqrt{2} \quad (2.52)$$

Ceci nous conduit à de nouvelles expressions de  $P_s$  et de  $Q_s$  :

$$P_s = -\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{MV_s}{\sigma L_s L_r} \Phi_{rq} \quad (2.53)$$

$$Q_s = -\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{MV_s}{\sigma L_s L_r} \Phi_{rd} + \frac{3V_s^2}{\sigma L_s \omega_s} \quad (2.54)$$

Les formules (2.33), (2.34), (2.53) et (2.54) impliquent une approche unifiée de la commande de la microcentrale hydroélectrique utilisant uniquement les flux du rotor pour le fonctionnement sur réseau interconnecté ou sur îlotage. Cette considération explique pourquoi on a choisi d'écrire (2.33) et (2.34) en fonction des flux du rotor et non pas du stator.

On suppose que la fréquence et la valeur efficace de la tension du réseau ne changent pas dans cette configuration. Le but de la stratégie de commande de ce système est alors de fournir au réseau la puissance active et la puissance réactive demandée pour sa gestion. On suppose aussi que les références de puissance ont été calculées par un algorithme de supervision qui doit coordonner plusieurs générateurs décentralisés. Les expressions (2.53) et (2.54) montrent que chaque type de puissance peut être commandé par un axe menant à un découplage parfait des deux puissances. Là où la puissance active dépend de  $\Phi_{rq}$  la puissance réactive dépend de  $\Phi_{rd}$ . On peut rappeler que cette considération est valable si le flux du stator est orienté sur l'axe d et si  $R_s$  est négligeable. La stratégie de commande de la MADA est alors basée sur le même principe qu'en mode de fonctionnement sur sites isolés.

On obtient la commande en inversant le processus de la REM représenté dans la figure 2.34. Ce schéma est semblable à celui représenté dans la figure 2.20, la différence est située sur les calculs de référence de flux du rotor. Supposant que la microcentrale fournit au réseau électrique une puissance et est soudainement débranchée suite à un incident, le système de commande est capable de commuter la MADA sur un site isolé à condition de détecter le défaut.

La figure 2.34 présente le modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique débitant sur réseau interconnecté.

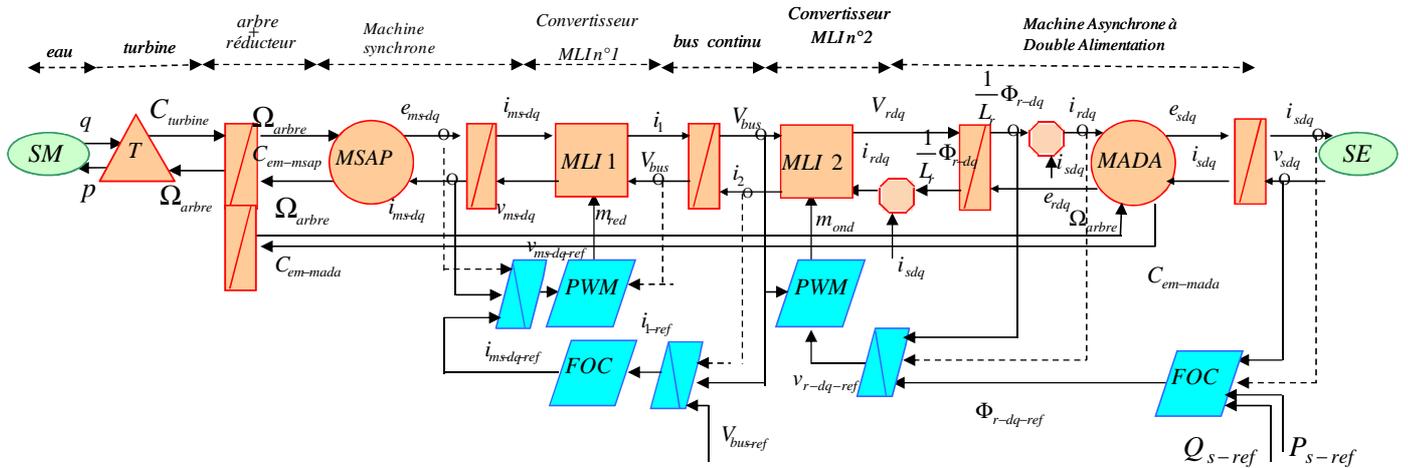


Figure 2.24 Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique débitant sur réseau interconnecté.

## II.6.2. Simulations

Des simulations ont été effectuées avec le logiciel Simulink<sup>TM</sup>. On considère une petite centrale hydro-électrique au fil de l'eau de 300 kW soumise à un débit et à une hauteur fixe. Le système est basé sur une MADA de quatre pôles, 1500 tr/min et une turbine de Kaplan. Le scénario simulé est le suivant : A  $t = 0$  sec ,  $P_s = 0kW$  ; à  $t = 1$  sec ,  $P_s = 50kW$  à  $t = 50$  sec ,  $P_s = 190kW$  , à  $t = 100$  sec ,  $P_s = 300kW$  , à  $t = 150$  sec ,  $P_s = 190kW$  , à  $t = 200$  sec ,  $P_s = 50kW$  .

Les courbes présentées de la figure 2.35 à la figure 2.38 correspondent aux résultats de simulation.

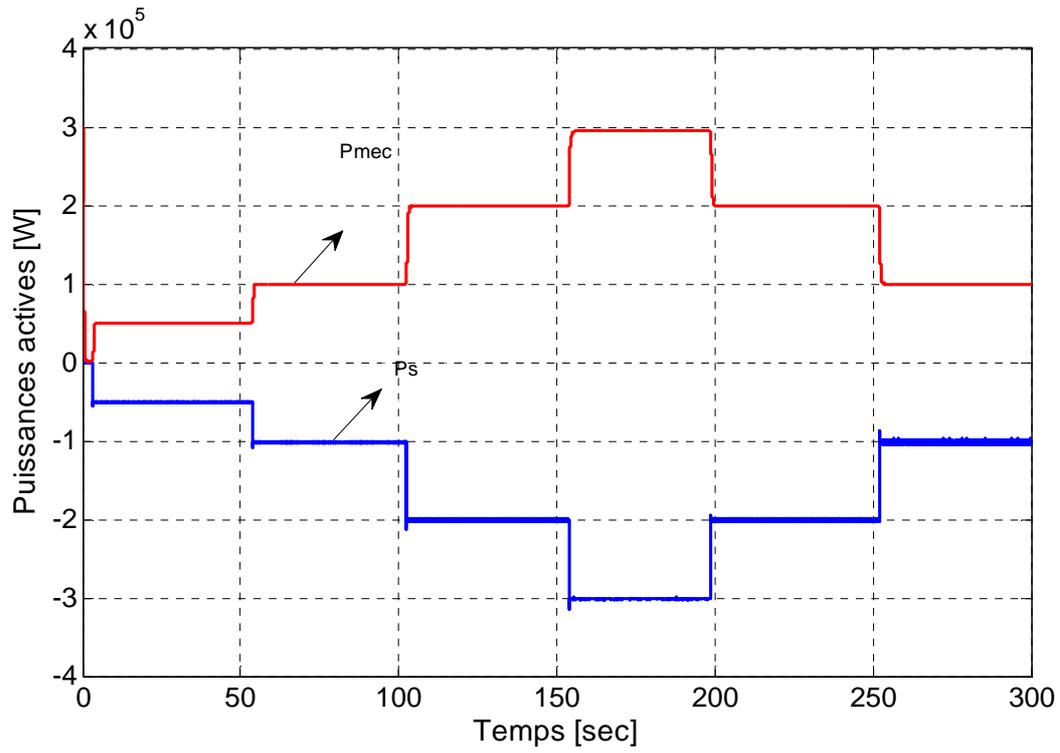


Figure 2.35 Puissance active ( $P_s$ ) fournie par la MADA et Puissance mcanique ( $P_m$ ) fournie par la turbine.

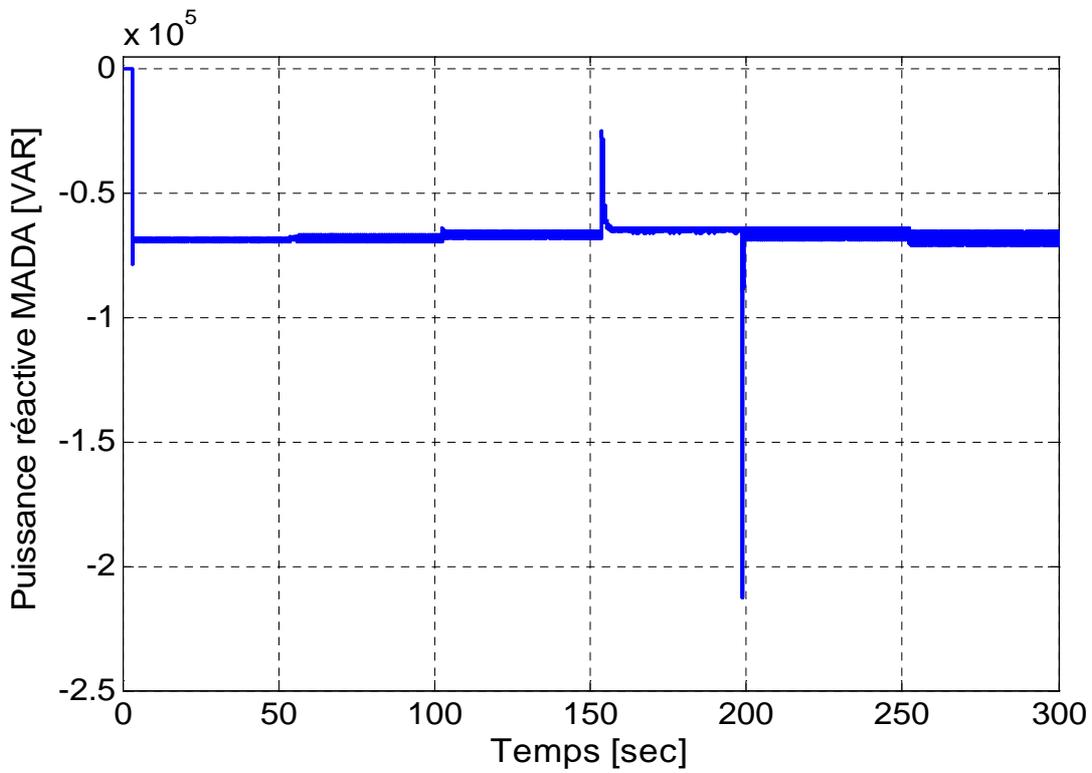


Figure 2.36 Puissance ractive ( $Q_s$ ) du stator de la MADA

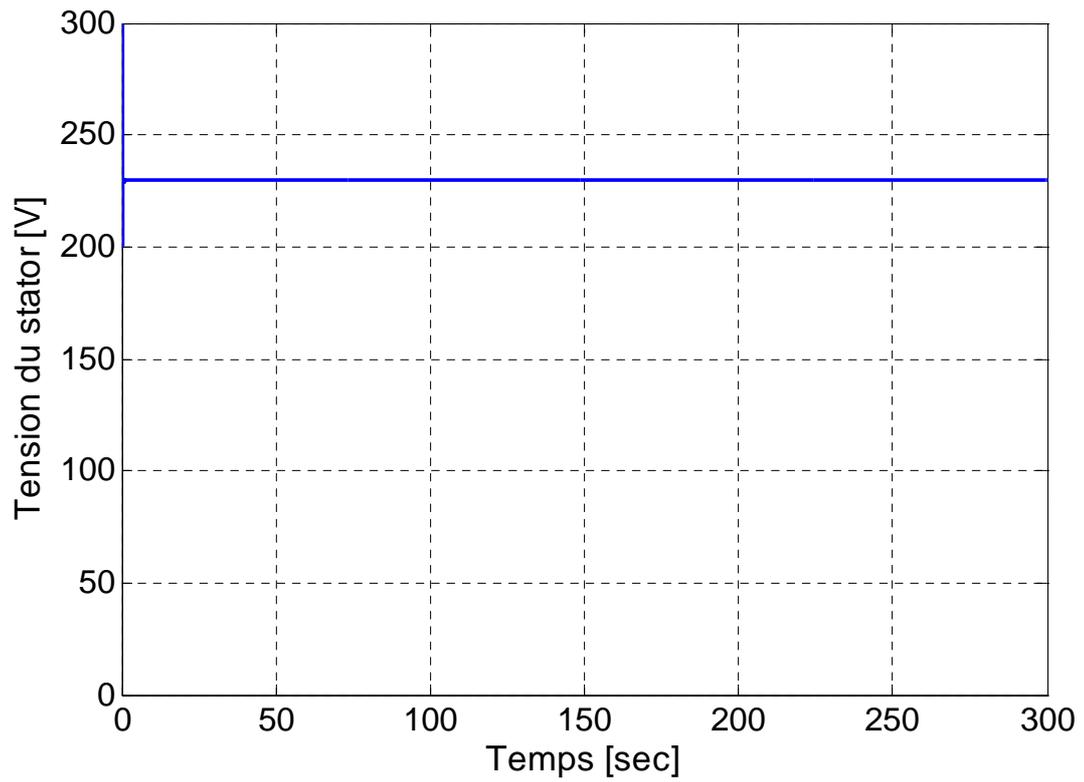


Figure 2.37 Tension simple du stator de la MADA

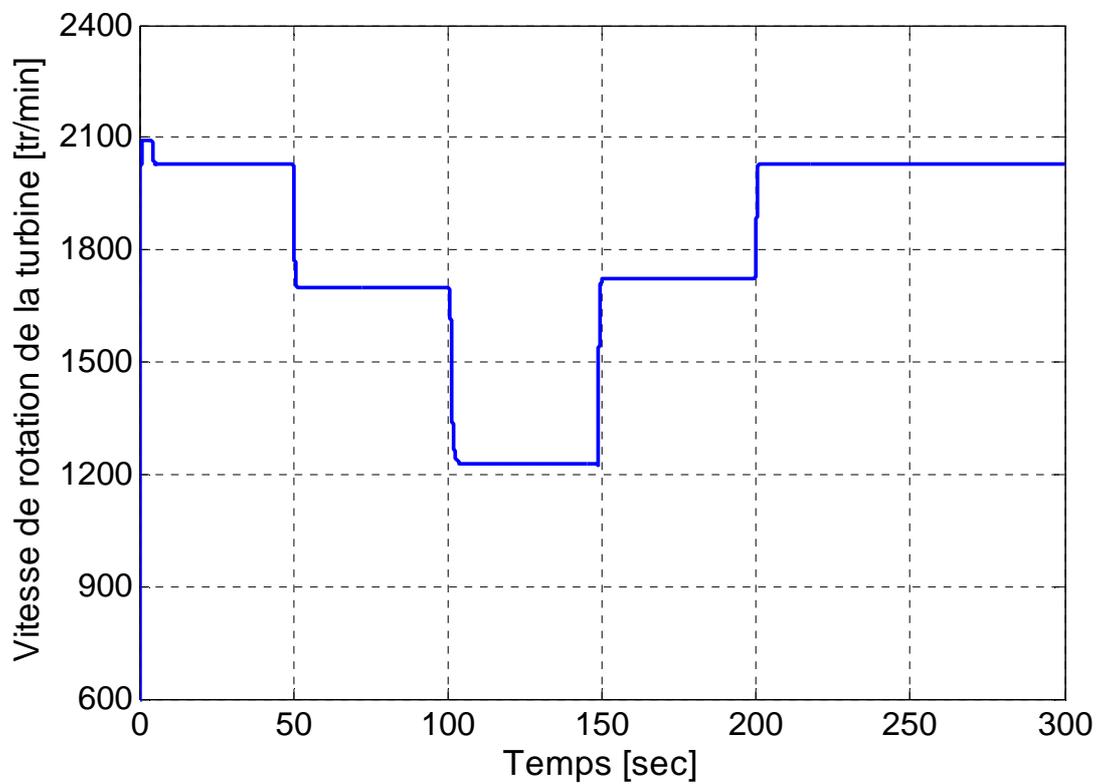


Figure 2.38 Vitesse de rotation de la turbine.

### **II.6.3. Interprétation**

La figure 2.35 montre la puissance active fournie par la MADA ( $P_s$ ) et la puissance mécanique assurée par le système de turbine/multiplicateur de vitesse ( $P_m$ ). Les courbes présentées de la figure 2.36 à figure 2.38 montrent respectivement la puissance réactive de la MADA, la tension efficace entre phase et neutre du stator et la vitesse de rotation de la turbine qui change selon la puissance active fournie. Cette vitesse peut être supérieure ou inférieure à la vitesse synchrone. En mode hypersynchrone (la vitesse de la turbine dépasse 1500 tr/min), la puissance active du rotor alimente la MSAP qui fonctionne par conséquent comme moteur. Tandis que, dans le fonctionnement hyposynchrone la MSAP fonctionne en générateur.

### **II.6.4. Conclusion**

Les simulations confirment la capacité de la microcentrale hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable étant connectée sur réseau puissant. Les consignes de puissances modifient les points de fonctionnement de la MADA. La tension et la fréquence du stator sont imposées par le réseau électrique.

## II.6.5. Essais expérimentaux sur réseau interconnecté [Bre 07], [Ans 06a]

La microcentrale hydroélectrique est examinée expérimentalement sur réseau interconnecté (figure 2.39). Des essais ont été réalisés sur un intervalle de 300 secondes, de plus, l'émulateur de la turbine est placé de telle sorte que le débit fixe est de 0.9 p.u. La MADA est branchée directement sur un réseau puissant. La tension (composée) efficace entre phases est de 225 V et la fréquence est de 50 Hz. Enfin, la tension de référence du bus continu est fixée à 200 V afin de s'adapter aux tensions du rotor de la MADA.

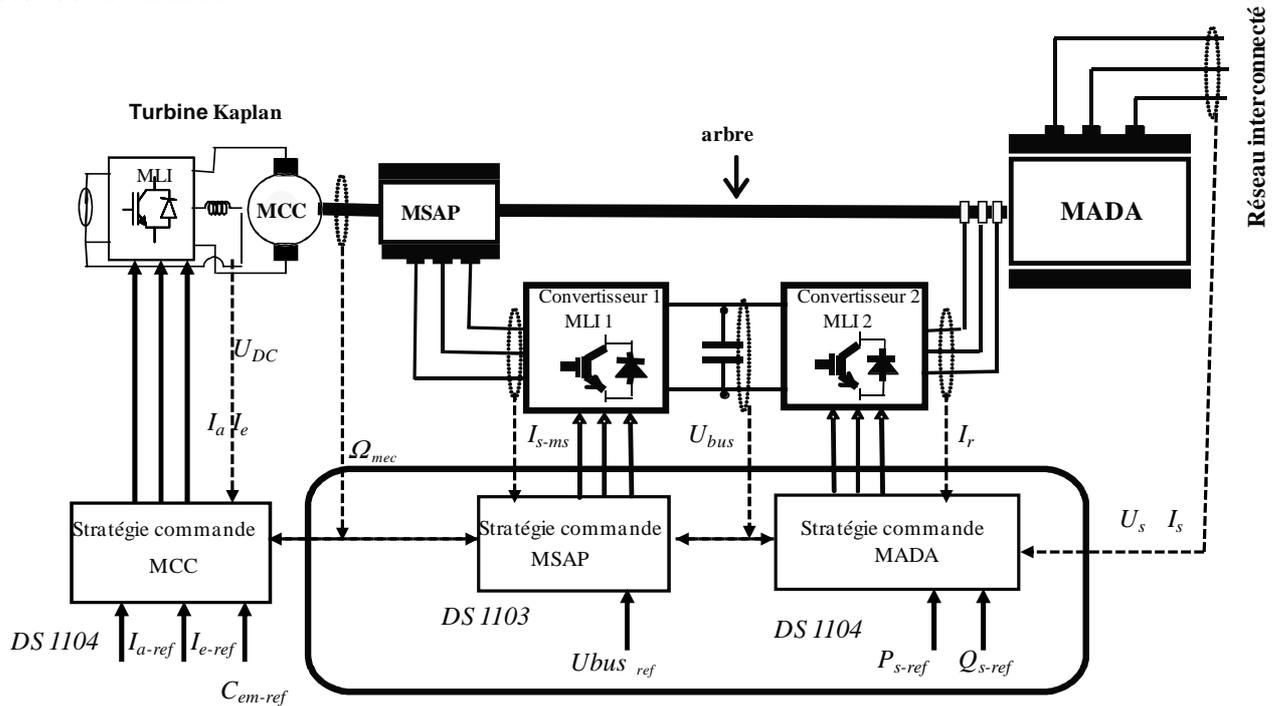


Figure 2.39 Banc d'essai adapté à l'étude du générateur hydroélectrique débitant sur réseau interconnecté

## II.6.6. Interprétation

Les courbes présentées de la figure 2.40 à la figure 2.43 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental [Annexes 1 et 2].

La figure 2.40 montre la capacité de la microcentrale hydroélectrique de contrôler les puissances débitées sur le réseau. On voit aussi que, selon les besoins, on peut générer ou absorber de la puissance réactive. La figure 2.41 présente la puissance mécanique transmise de la turbine (émulateur), cette puissance est proche de celle fournie par la MADA aux pertes près. La figure 2.42 présente la vitesse de rotation mécanique de la turbine qui varie en deçà et au-delà de la vitesse de synchronisme et la figure 2.43 présente la tension du bus continu qui est bien régulée à 200 V.

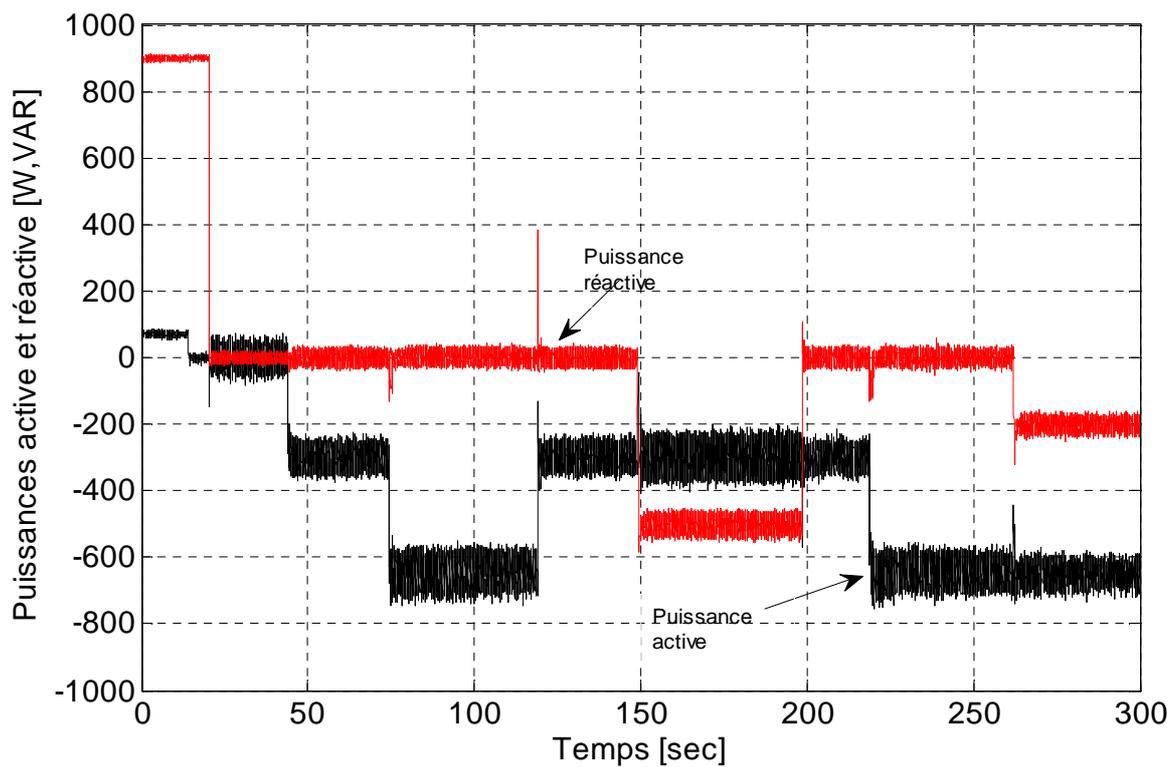


Figure 2.40 Puissances active et réactive fournies au réseau

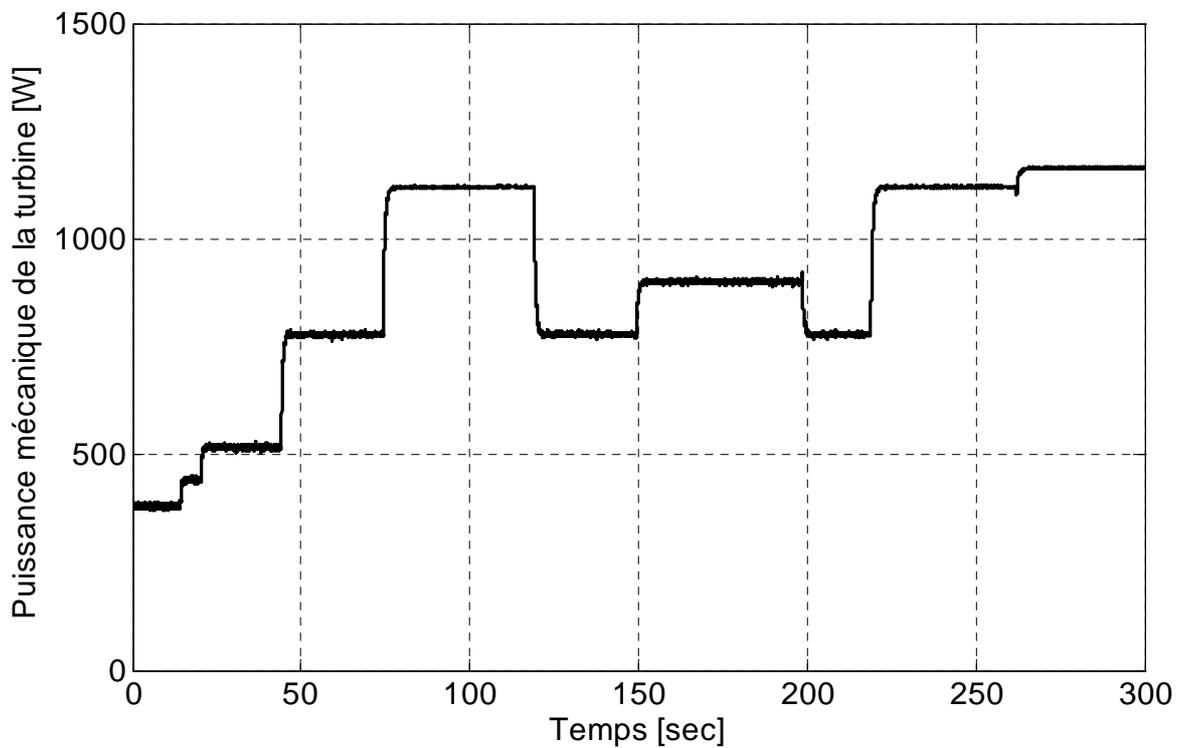


Figure 2.41 Puissance mécanique de la turbine.

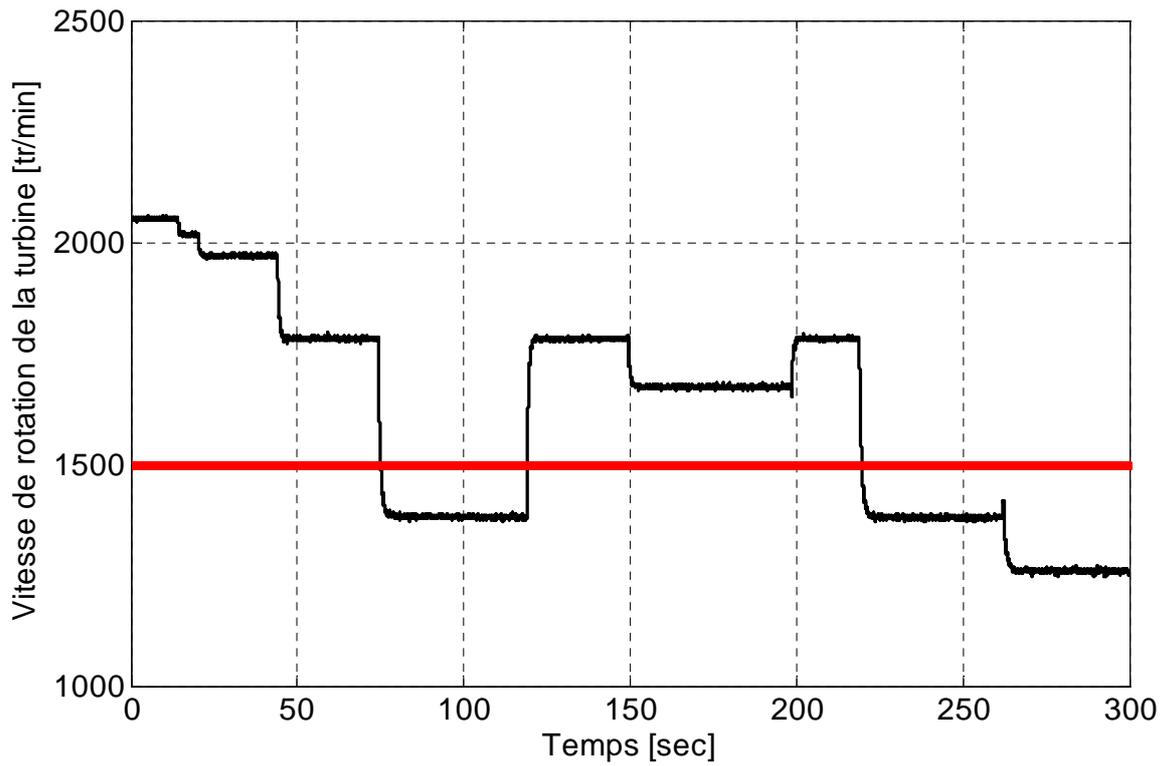


Figure 2.42 Vitesse de rotation de la MADA

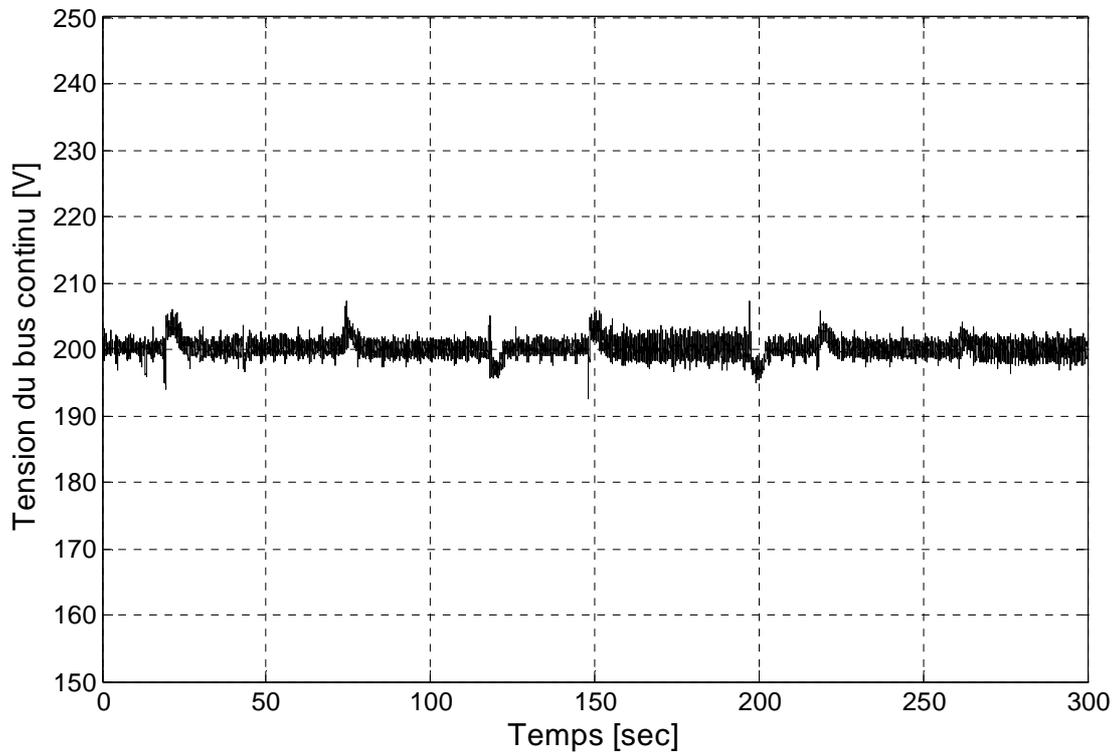


Figure 2.43 Tension du bus continu

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des différents composants de la microcentrale sous forme de REM est proposée. La simulation et la validation expérimentale d'une microcentrale hydro électrique à vitesse variable capable de fonctionner sur site isolé ou sur réseau électrique puissant ont été présentées. Selon la configuration étudiée, une approche unifiée de commande du système impliquant le contrôle du flux du rotor de la MADA est déterminée. Des simulations ont été effectuées conduisant à une analyse de la transition du mode connecté sur réseau au mode connecté sur site isolé. Des résultats expérimentaux obtenus sur un banc d'essai de 3 kW, sur deux cas possibles sur sites isolés ou sur réseau interconnecté ont été validés.

Les simulations et les résultats expérimentaux confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'association de la microcentrale hydraulique étudiée avec une centrale éolienne. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé.

## II.8. Bibliographie

- [Ans 06a] A. Ansel, B. Robyns, "Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 71, n°. 4-6, pp. 320-332, june 2006.
- [Ans 06b] A. Ansel, B. Robyns, "Small hydroelectricity: from fixed to variable speed electromechanical drives," *Electromotion*, vol.13, n°2, April 2006 pp. 111-126.
- [Bou 00] A. Bouscayrol, X. Guillaud, Ph. Delarue, "Macro modélisation des conversions électromécaniques. Application à la commande des machines électriques », *Revue International de Génie Electrique* 3 (2000), N° 2, p. 257-282.
- [Bre 07] S. Breban, M. Nasser, A. Ansel, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, "Variable speed small hydro power plant connected to AC grid or isolated loads". *EPE Journal*, vol.17, n°4, 2007, pp.29-36.
- [Hau 96] J. P. Hautier, J. Faucher, 'Le Graphe Informationnel Causal, outil de modélisation et de synthèse des commandes des processus électromécanique', *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 785, Cahier Spécial de l'Enseignement Supérieur, 1996 pp. 167-189.
- [Lab 98] F. Labrique, H. Buyse, G. Séguier, R. Bausière, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Commande et comportement dynamique", Tome 5, *Technique et Documentation*, Lavoisier, 1998.

- [Pac 95a] Rapport (PACER), en Suisse “Petites centrales hydrauliques –le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine”, 1995.-ISBN 3-905232-55-3.
- [Rob 01] B. Robyns, M. Nasser, F. Berthereau, F. Labrique, "Equivalent continuous model of a variable speed wind generator", ELECTROMOTION, vol.8, n°4, 2001, pp. 202-208.



# **Chapitre III : Association d'un générateur éolien à vitesse fixe avec une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable**

Le chapitre trois étudie l'association d'une microcentrale hydraulique et d'une centrale éolienne. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé. D'abord, un état de l'art du système éolien/hydraulique est présenté. Ensuite, la modélisation des différentes sources sous forme de (REM) est effectuée. Les simulations et les résultats expérimentaux du système global permettront de conclure sur la nécessité d'une gestion multi niveaux de ce système complexe et d'outils pour sa réalisation



## **Chapitre III**

### **Association d'un générateur éolien à vitesse fixe avec une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable**

#### **III. 1. Introduction**

Le contexte actuel de dérégulation de l'électricité, les interrogations et les inquiétudes concernant les conséquences environnementales de la production d'énergie électrique au moyen de combustibles fossiles ou radioactifs, a déclenché depuis quelques années un véritable enthousiasme en faveur de l'utilisation des énergies renouvelables comme en témoignent les nombreux articles de recherche et de presse grand public qui paraissent régulièrement.

Les moyens de production basés sur les énergies renouvelables souffrent d'une dépendance à l'égard de la disponibilité d'énergie primaire. L'exemple des générateurs éoliens est significatif parce que le vent est aléatoire et difficilement prévisible d'un jour à l'autre. Les mêmes remarques peuvent être faites pour l'énergie solaire dans les pays où le climat est tempéré. Par contre, les microcentrales hydrauliques peuvent être considérées comme une exception. En effet, le débit d'eau ne change pas généralement aussi vite que la vitesse du vent ou le rayonnement solaire, sauf lors des événements météorologiques exceptionnels comme la tempête. Dès lors, la microcentrale hydraulique a la capacité de compléter utilement une éolienne. Elle peut compenser des fluctuations du vent et soutenir des générateurs éoliens.

Certains lieux géographiques, comme par exemple la petite île de l'archipel des Canaries, El Hierro, en Espagne, va devenir la première île du monde entièrement alimenté en électricité par un ensemble d'éoliennes et petites centrales hydrauliques.

Dans cette étude, nous avons choisi une source hybride composée d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable et un générateur éolien à vitesse fixe.

#### **III. 1.1. Système hybride éolien/hydraulique à l'éclusé**

Tout d'abord, il nous faut définir le terme d'hydraulique à l'éclusé : on classe dans cette catégorie les installations hydrauliques ayant un réservoir de stockage d'une capacité inférieure à 400 heures à puissance nominale. La plupart des installations ont en fait des capacités de stockage de quelques dizaines d'heures, afin de répondre à la pointe journalière d'électricité.

[Gra 05] propose une étude qui permet de prouver l'efficacité du couple hydraulique à l'écluse / éolien pour le passage de la pointe hivernale. Car, en associant ces deux sources, elles peuvent garantir une énergie disponible pour les pointes de consommation bien plus importante que si les deux sources sont prises individuellement.

[Cas 04] montre que l'énergie éolienne peut servir à sécuriser la garantie de puissance de l'hydraulique au moment de l'extrême pointe de consommation hivernale et que le couple hydraulique - éolien permet ainsi d'éviter la consommation de l'énergie thermique.

[Jar 04] présente dans cet article un système hybride hypothétique à Oaxaca au Mexique. Il montre la possibilité de garantir la puissance nominale d'une éolienne en l'associant à une source hydraulique pour compenser le comportement aléatoire du vent.

[Cam 03] donne une autre méthode de contrôle de centrale hybride éolien - hydraulique basée sur des agents intelligents qui représentent un programme autonome, et capable d'observer son environnement, capable de communication de manière intelligente. Ceux-ci fonctionnent tellement vite qu'ils peuvent faire des opérations en temps réel. La puissance peut être commandée rapidement.

### **III. 1.2. Système hybride éolien/hydraulique à petite échelle**

[Som 03] expose l'étude de faisabilité d'une implantation d'une centrale hybride hydraulique - éolienne dans l'île de Crète en Grèce, celle-ci a son propre réseau électrique. La centrale choisie comporte une usine de désalinisation. Cette dernière va pouvoir absorber le surplus d'énergie de la ferme éolienne et pourra desservir quelques zones éloignées dépourvues d'eau. Si par contre, l'énergie éolienne ne peut pas répondre à la demande, c'est le système hydraulique qui va produire de l'énergie utilisant l'eau stockée dans le réservoir supérieur.

Quand le système hybride se retrouve en difficulté (production réduite de la ferme éolienne et faible niveau dans le réservoir), c'est un groupe diesel qui fournira les besoins du réseau.

Pour vérifier la faisabilité de cette installation, une page de travail Excel a été construite pour simuler l'opération de l'ensemble de la centrale hybride. Grâce à cette page, on peut estimer le nombre et la puissance nominale des éoliennes nécessaires, la puissance nominale de la centrale hydraulique et la taille des réservoirs, le nombre d'heures où il manque de l'énergie et les pertes engendrées par cette centrale.

Le tableau Excel prend en compte la vitesse du vent de chaque zone, le nombre et la puissance de chaque pompe, le type de turbine hydraulique et éolienne ainsi que la capacité du réservoir le plus haut. Celui-ci permet d'obtenir toutes les valeurs correspondantes au fonctionnement de la centrale (puissance générée par le parc éolien, puissance à stocker, puissance à générer par les turbines hydrauliques, les pertes engendrées) à partir de données du vent prises toutes les 10 minutes. Les calculs sont basés sur de vraies mesures de vitesse de vent. Ainsi, le programme est réalisé de manière à ce que, quand il y a trop d'énergie éolienne, celle-ci est stockée par l'intermédiaire des pompes d'un réservoir à un autre. Si par contre, l'énergie éolienne ne peut pas répondre à la demande, c'est le système hydraulique qui va produire de l'énergie utilisant l'eau stockée dans le réservoir supérieur.

D'après le programme mis en place, des résultats ont été présentés. La figure 3.1 illustre le nombre d'heures en fonction de chaque mois sur une période d'un an, auxquelles le système éolien / hydraulique ne peut pas répondre à la demande de manière satisfaisante.

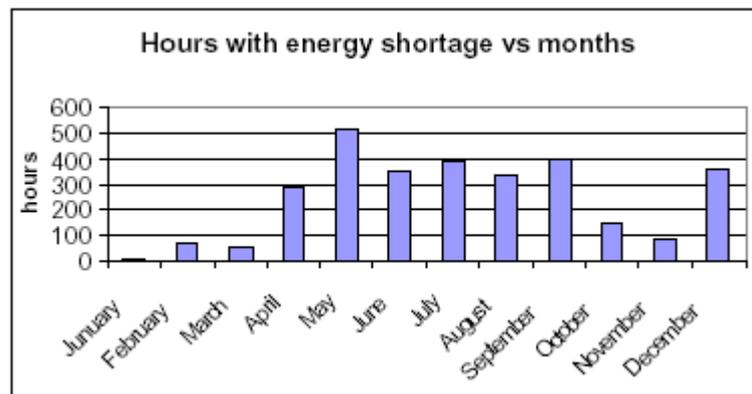


Figure 3.1 Manque d'énergie de la centrale hybride [Som 03]

La figure 3.2 montre que la demande est plus forte en été qu'en hiver et qu'il y a un manque d'énergie. Avec un nombre plus important d'éoliennes, l'apport d'hydraulique est moins important.

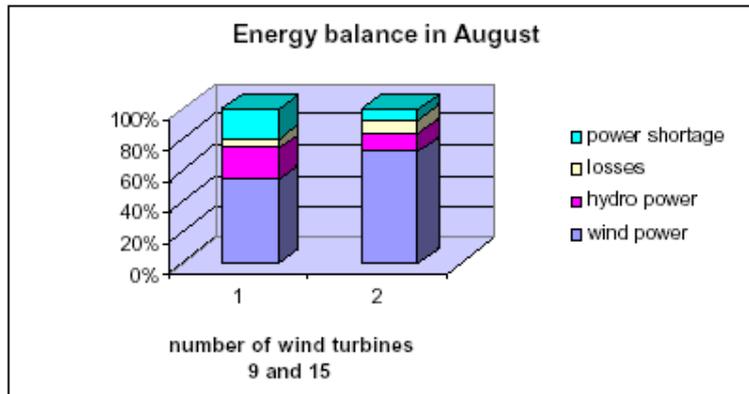
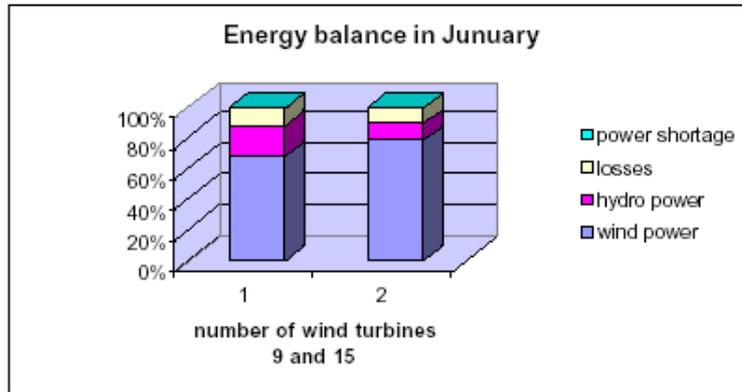


Figure 3.2 Comparaison du nombre des éoliennes [Som 03]

La figure 3.3 présente le manque d'énergie et les pertes totales du système en fonction du nombre d'éoliennes choisies. Le pompage et la génération de la centrale hydraulique sont responsables de la majorité des pertes. On remarque que le manque d'énergie diminue quand le nombre d'éoliennes augmente mais que les pertes augmentent en contrepartie.

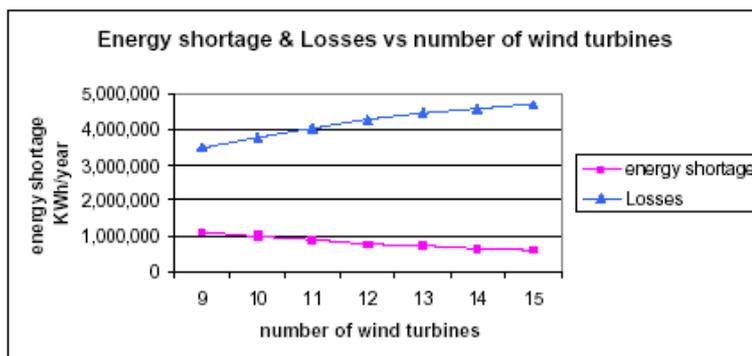


Figure 3.3 Manque d'énergie et pertes en fonction du nombre d'éoliennes [Som 03]

Le système éolien - hydraulique couplé à un groupe diesel, est d'après cette étude un bon moyen de répondre aux besoins énergétiques d'une île isolée d'un point de vue économique et

environnemental. Ce système hybride permettrait alors d'élever le taux de pénétration de l'éolien dans le réseau de puissance.

### **III. 1.3 Conclusion**

Ces études montrent que le couple hydraulique/éolienne permet d'éviter la consommation de l'énergie thermique. Ces articles nous ont permis d'élaborer une synthèse sur la situation actuelle et les perspectives du système multi sources et notamment l'association éolienne et la microcentrale hydroélectrique.

Dans notre étude, nous traitons une microcentrale hydraulique au fil de l'eau couplée à une éolienne à vitesse fixe. La vitesse du vent varie très rapidement alors que le débit d'un cours d'eau varie plus lentement. Ainsi la source hydraulique pourrait compenser le comportement aléatoire de l'éolienne.

### III. 2. Modélisation et simulation du système hybride éolien/hydroélectrique

Nous présentons la modélisation du système hybride éolien/hydroélectrique étudié en nous appuyant sur la REM de la microcentrale hydroélectrique présentée dans le chapitre II.

La structure choisie est représentée par la figure 3.4 et est composée d'une micro centrale hydraulique associée à une éolienne à vitesse fixe.

Notre étude portera sur l'apport de puissance à un réseau puissant ou à un site isolé.

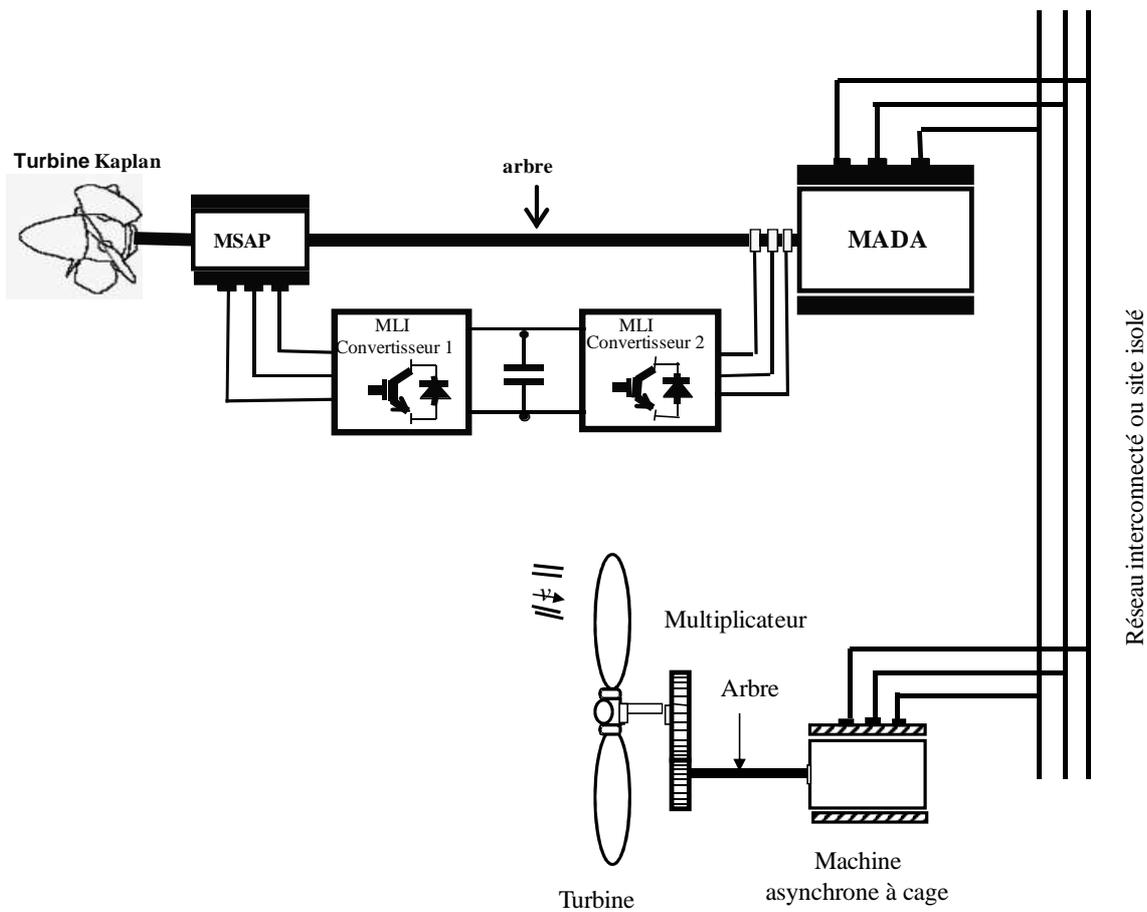


Figure 3.4 Schéma de principe du Système hybride

### III. 2.1. Modélisation du vent

On utilisera des mesures de vitesse du vent effectuées sur le site éolien de Dunkerque. Les courbes présentées de la figure 3.5a à la figure 3.5c représentent la vitesse du vent en fonction du temps. La vitesse moyenne du fichier de vent faible est d'environ 6 m/s, pour le vent moyen on a environ 10 m/s et pour le vent fort, environ 12 m/s.

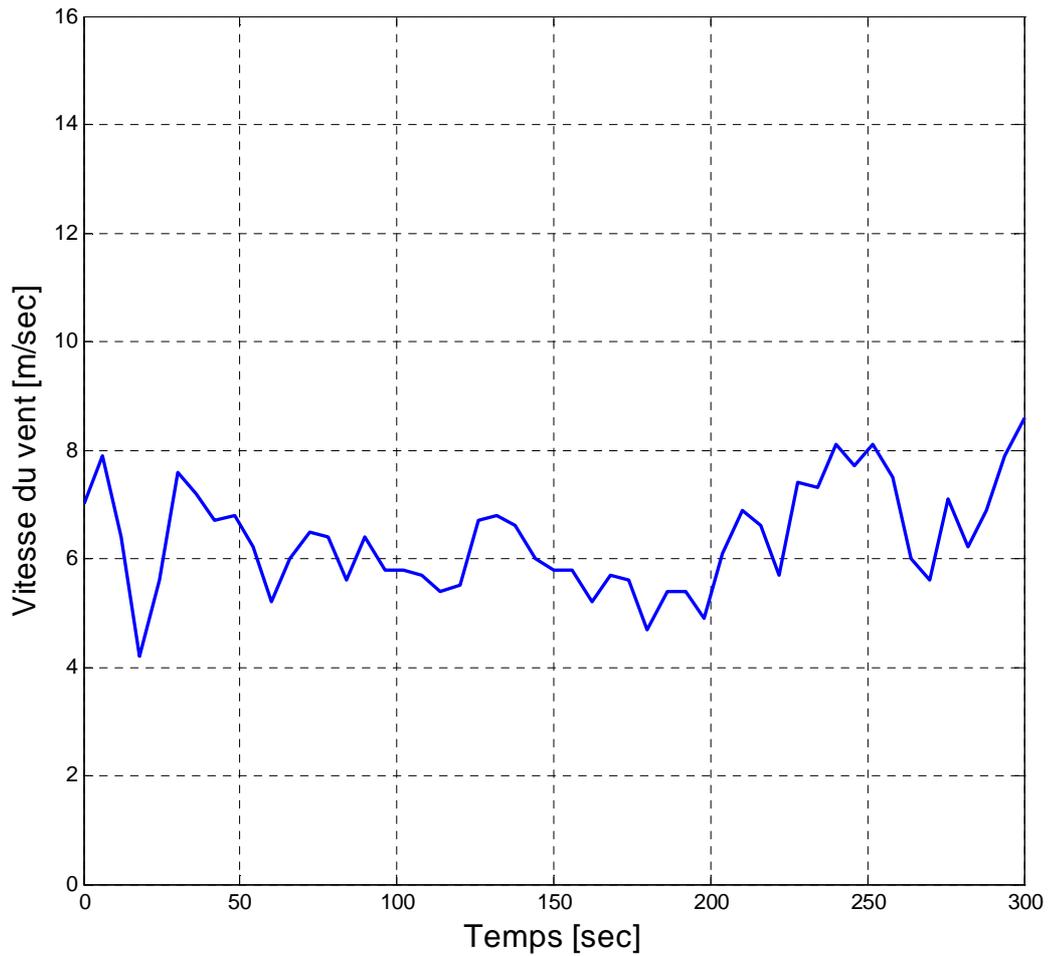


Figure 3.5(a) vent faible

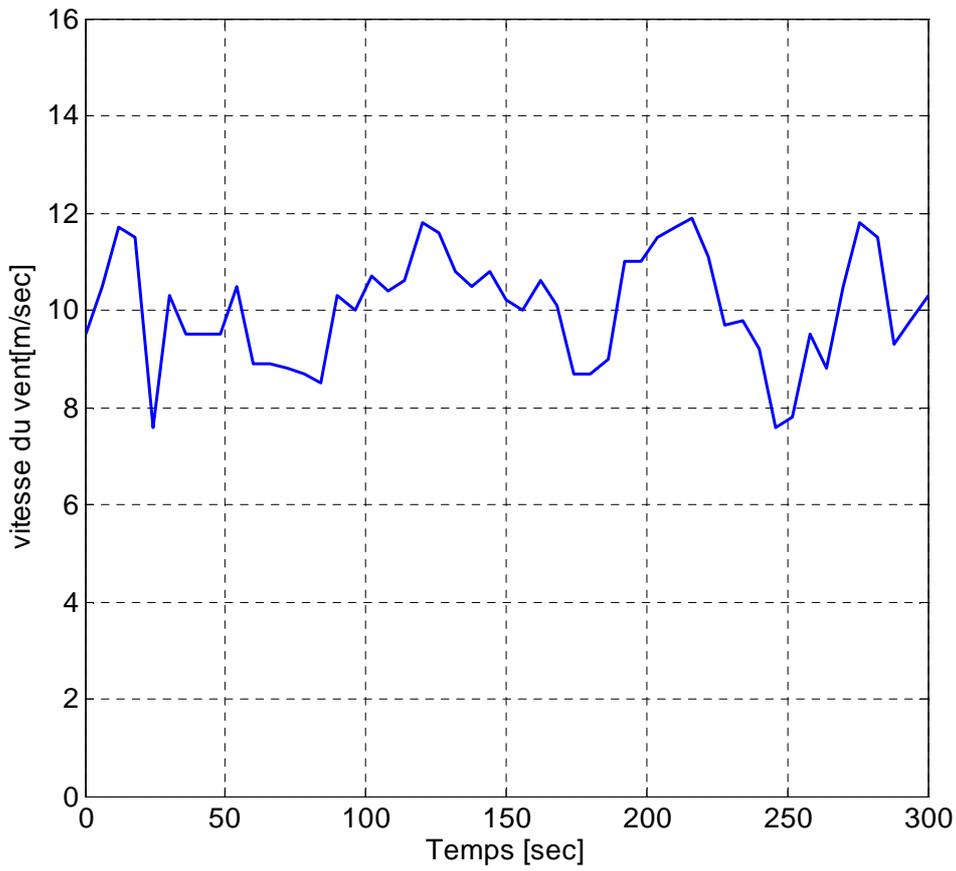


Figure 3.5(b) vent moyen

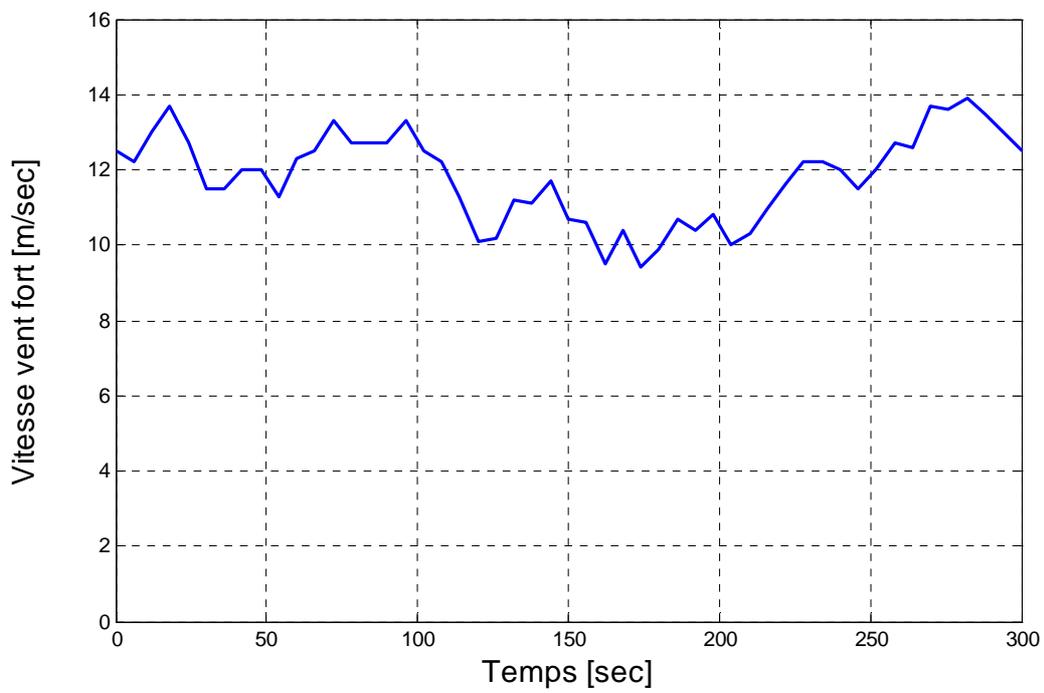


Figure 3.5(c) vent fort

### III. 2.2 Modélisation du débit de l'eau

Le graphe ci-dessous représente les variations du débit en fonction du temps d'un cours d'eau. Il est tiré du site Burande à la Tour – d'Auvergne [DIREN 07]. Sur le graphe précédent (figure 3.6), l'échelle de temps est journalière.

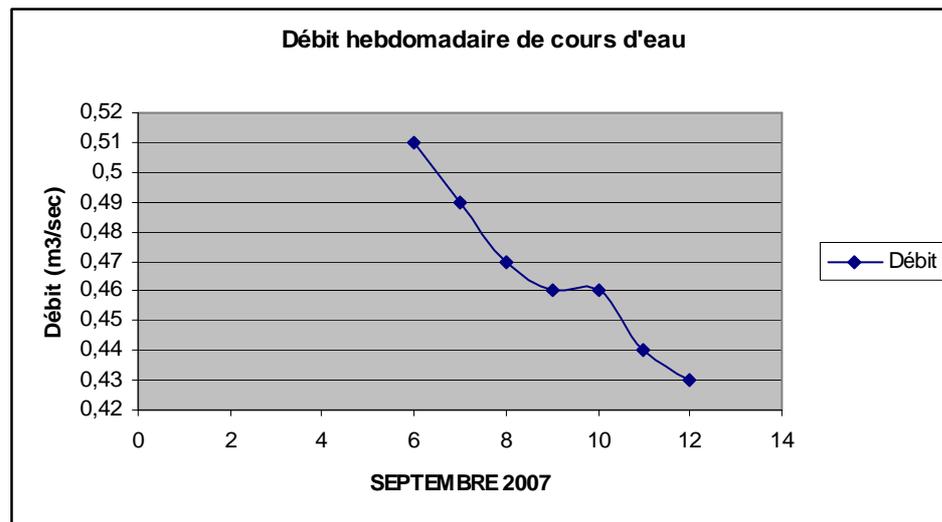


Figure 3.6 Évolution des débits moyens journaliers et mensuels

Cette courbe est étudiée pour déterminer la nécessité ou non de considérer l'aspect dynamique dans le modèle de la turbine. Si l'on fait un parallèle avec l'éolien et la vitesse du vent, les variations du vent sont de l'ordre de la seconde, elles sont brutales et très élevées. Par contre, on remarque que le débit de la rivière évolue très faiblement et très lentement. Pour associer les deux, il faut une échelle de temps commune, qui dans ce cas serait la seconde, il faudrait alors créer un modèle de microcentrale qui s'intéresserait aux variations du débit à la seconde près.

#### Choix de l'évolution du débit pour les simulations:

Ainsi, des courbes modélisant le comportement de la turbine en régime statique peuvent être utilisées et on peut envisager le fonctionnement de la microcentrale avec une évolution du débit sur plusieurs minutes (figure 3.7), car les principales variations de débit hydraulique ont lieu lors des crues ou de sécheresse.

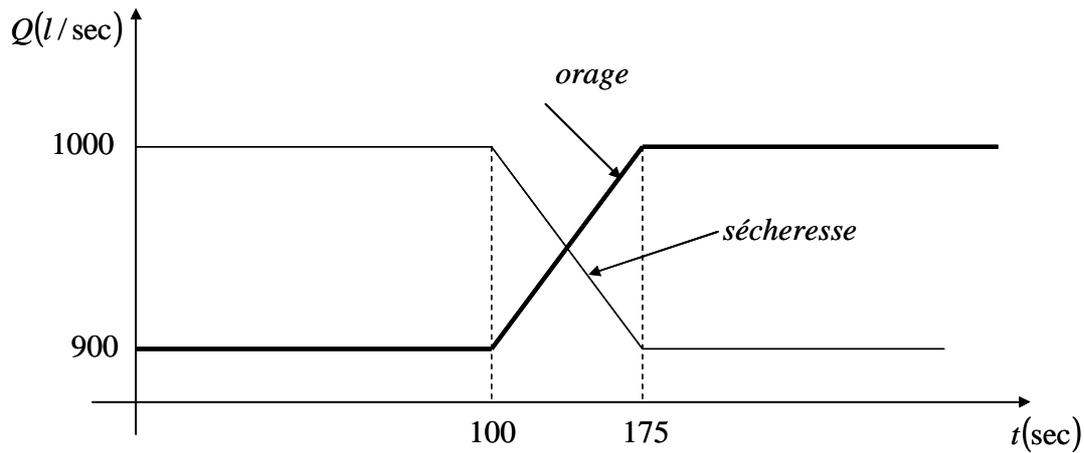


Figure 3.7 Évolution des débits en fonction du temps

### III. 2.3. Modélisation d'une éolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont couplées au réseau via une machine asynchrone à cage (MAS). Le couplage entre l'aéroturbine et le générateur asynchrone à vitesse fixe se fait par le biais d'un multiplicateur de vitesse. La puissance produite par ces générateurs est en général limitée par l'effet stall et le pitch. Ce type de concept est réservé aux installations inférieures à 1 MW des réseaux isolés.

#### La Turbine éolienne

Il existe des modèles de turbine relativement complexes, prenant en compte l'effet de mât, de la pesanteur sur la rotation des pales, de leur élasticité ou encore de la variation de vitesse de vent selon l'altitude.

Pour obtenir un modèle simple et reflétant le comportement dynamique global de la turbine, on peut utiliser une courbe du coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse ( $C_p(\lambda)$ ) du même type que celle représentée à la figure 3.8 [Car 01]. Ce modèle est suffisant pour notre étude.

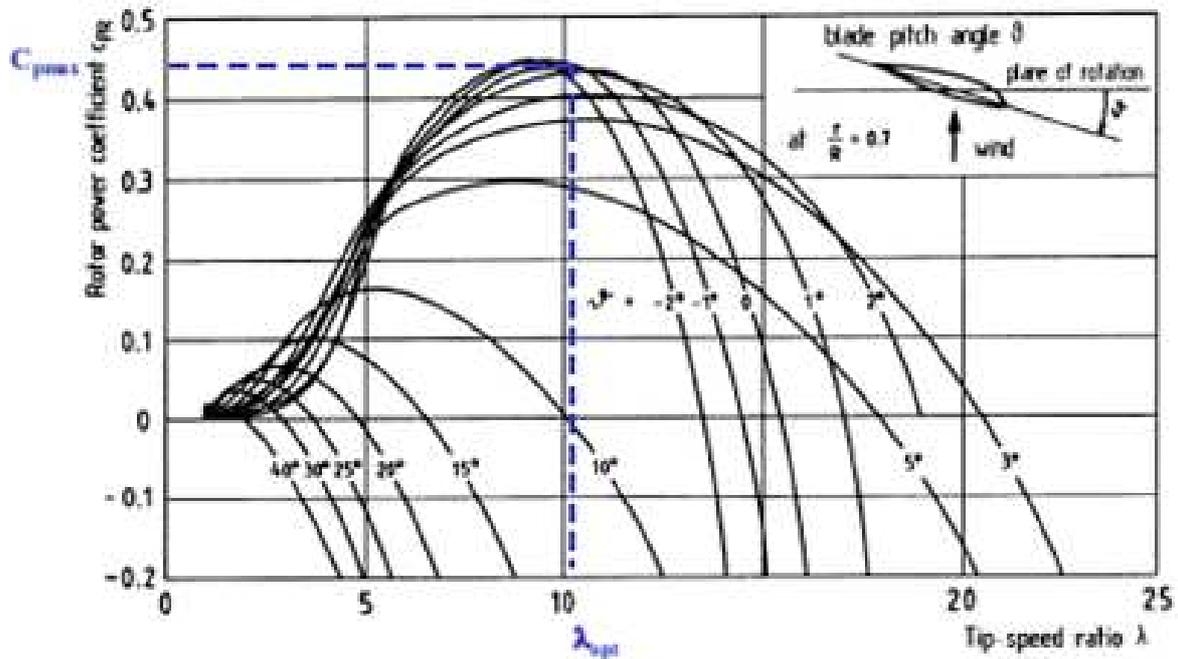


Figure 3.8 Allure du coefficient  $C_p$  en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  pour plusieurs angles de calage  $\beta$

La puissance cinétique extraite du vent s'exprime par la relation suivante :

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S_t v^3 \quad (3.1)$$

Avec :

$P_w$  : Puissance extraite du vent (W)

$\rho$  : Densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )

$S_t$  : Surface balayée par le rotor ( $\text{m}^2$ )

$C_p(\lambda)$  : Coefficient de puissance

$\lambda$  : Vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v}$$

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation de l'arbre de la turbine (rad/sec)

$R_t$  : Rayon de la turbine (m)

$v$  : Vitesse du vent (m/sec)

Le couple de la turbine se déduit directement de (3.1) soit :

$$C_w = \frac{P_w}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S_t v^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (3.2)$$

Pour modéliser une éolienne à couplage direct, il suffit de relier le couple éolien  $C_w$  à une génératrice asynchrone. Cela suppose donc de disposer d'un modèle d'une machine asynchrone à cage (MAS) adaptée, avec des paramètres réalistes.

La figure 3.9 présente la REM d'une éolienne à vitesse fixe en négligeant ces différents phénomènes.

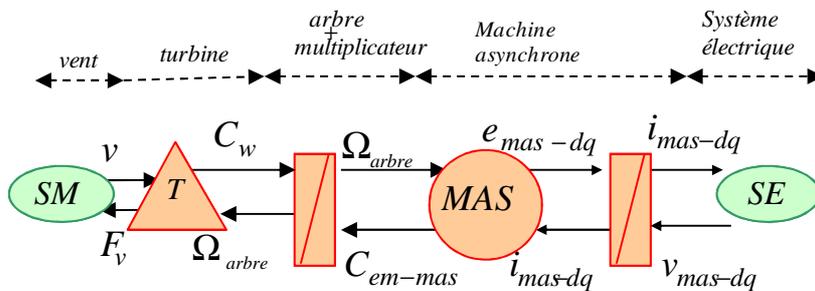


Figure 3.9 REM d'une Éolienne à vitesse fixe

Où :

$v$  : Vitesse du vent

$F_v$  : Effort global de l'éolienne

$C_w$  : Couple mécanique de la turbine éolienne

$\Omega_{arbre}$  : Couple total sur l'arbre

$C_{em-mas}$  : Couple électromagnétique de la machine asynchrone à cage (MAS)

$e_{mas-dq}$  : Composantes de Park des forces électromotrices du stator de la (MAS)

$i_{mas-dq}$  : Composantes de Park des courants du stator de la (MAS)

$v_{mas-dq}$  : Composantes de Park des tensions du stator de la (MAS)

### III. 2.4. Modèle graphique de la source hybride éolien/hydroélectrique

La REM du modèle de la source hybride éolien/hydroélectrique est obtenu en associant la source éolienne à la source hydraulique. Elle donne une macro-représentation des grandeurs échangées entre la source hybride et le réseau interconnecté ou les sites isolés. La figure 3.10 présente la REM du modèle global du système étudié.

La modélisation et la stratégie de commande de la microcentrale hydraulique a été déjà étudiée en détail dans le chapitre II.

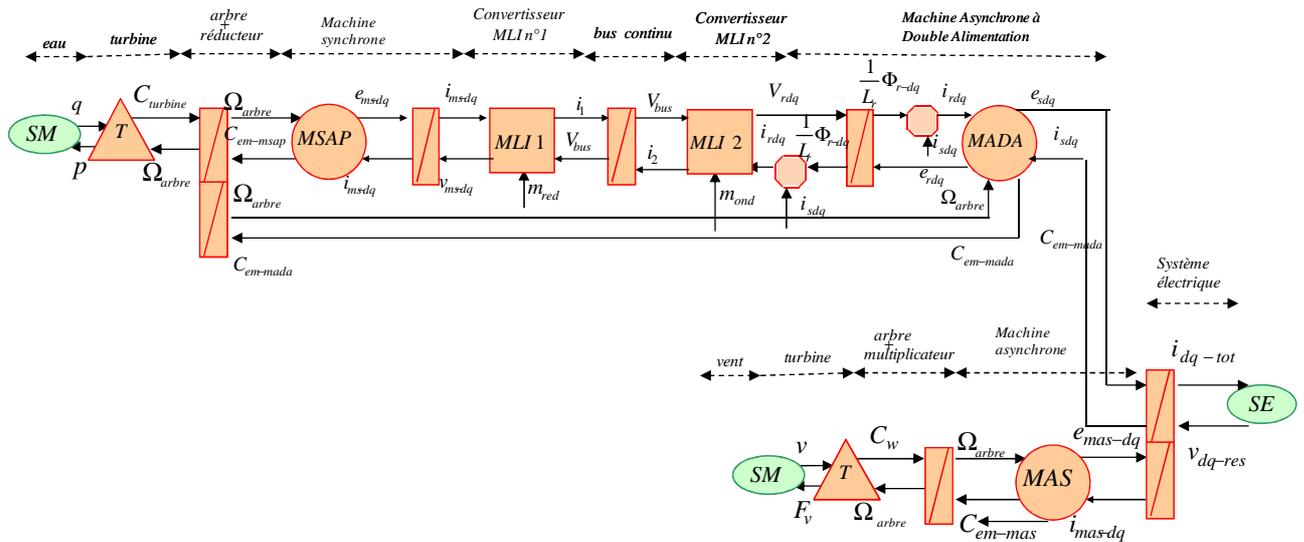


Figure 3.10 REM de la source hybride éolienne/hydroélectrique

### III.2.5. Simulations de la source hybride éolien/hydroélectrique connectée sur site isolé

Des simulations ont été effectuées avec le logiciel Simulink<sup>TM</sup>. On considère un système composé d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable au fil de l'eau de 3 kW soumise à un débit et à une hauteur fixe et d'une éolienne à vitesse fixe de 3 kW, l'ensemble alimentant un site isolé.

Le site isolé est émulé par des charges résistives variables dont la variation peut être traitée seulement point par point et non pas de manière continue. La tension (composée) efficace de référence entre les phases de la charge résistive est de 225 V.

La tension de référence du bus continu est fixée à 200 V afin de s'adapter aux tensions du rotor de la MADA.

Le débit d'eau est considéré constant pendant l'essai, car son échelle de temps de variation est le jour.

Le scénario simulé est le suivant: A  $t = 0$  sec,  $P = -420$  W, à  $t = 100$  sec,  $P = -600$  W, à  $t = 200$  sec,  $P = -710$  W et à  $t = 280$  sec,  $P = -462$  W.

Les courbes présentées de la figure 3.11 à la figure 3.16 correspondent aux résultats de simulation.

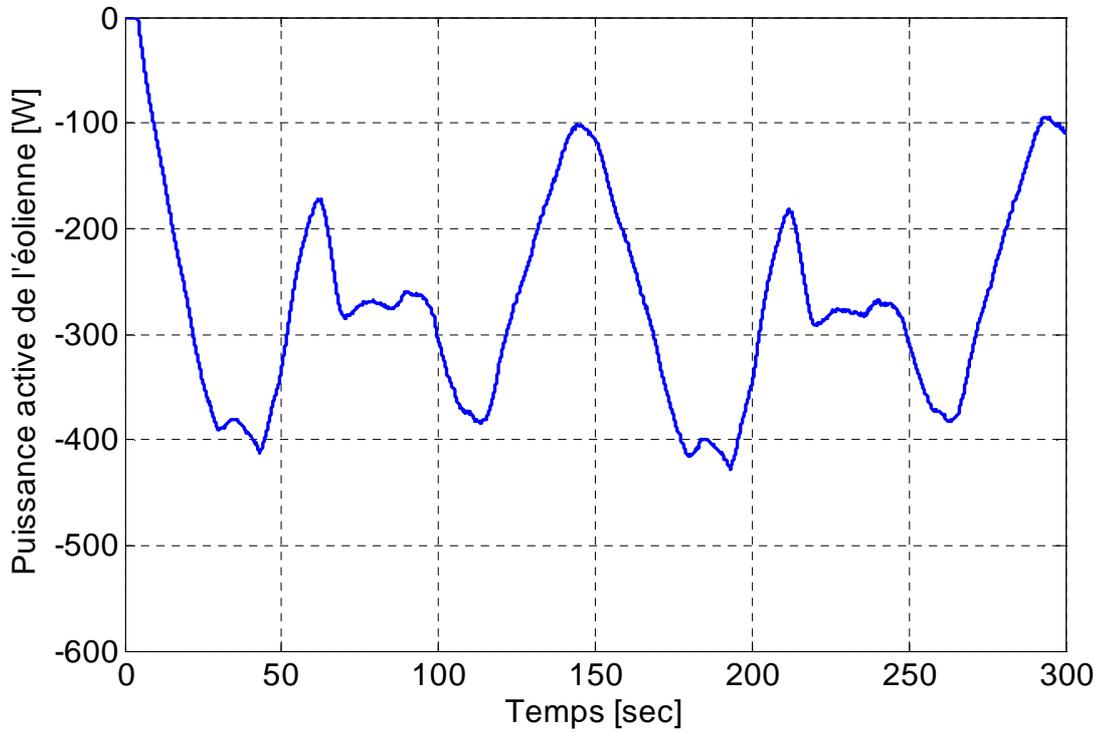


Figure 3.11 Puissance active de l'éolienne

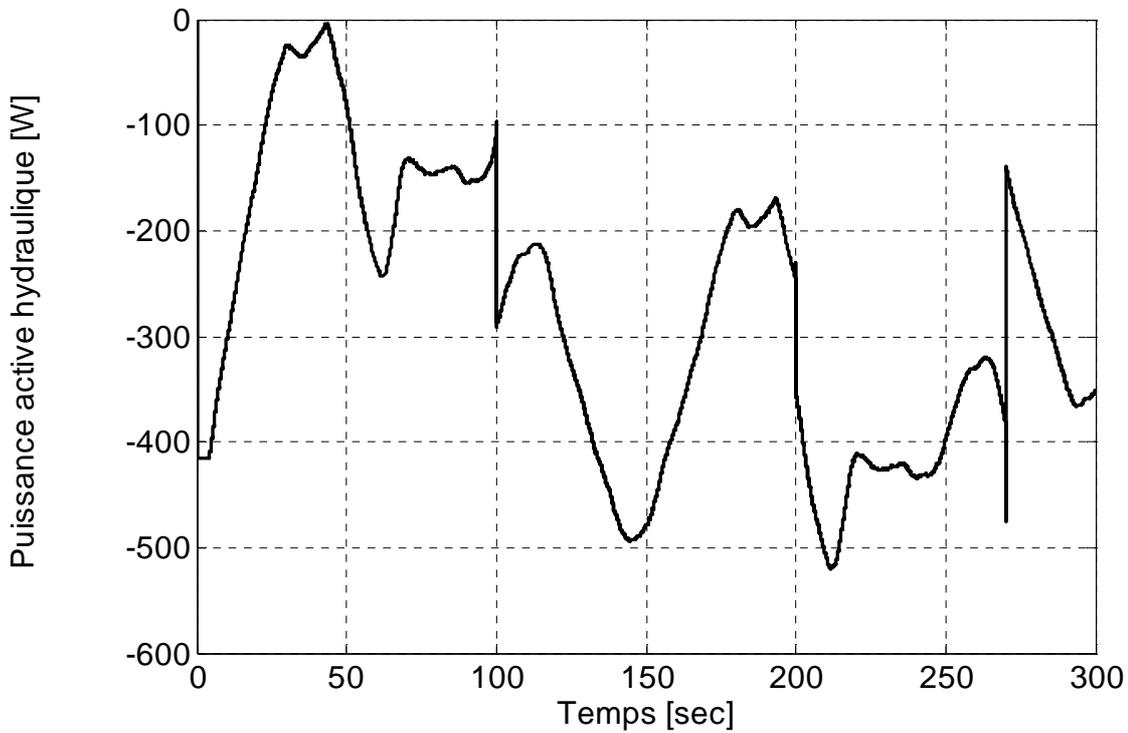


Figure 3.12 Puissance active de la microcentrale hydraulique

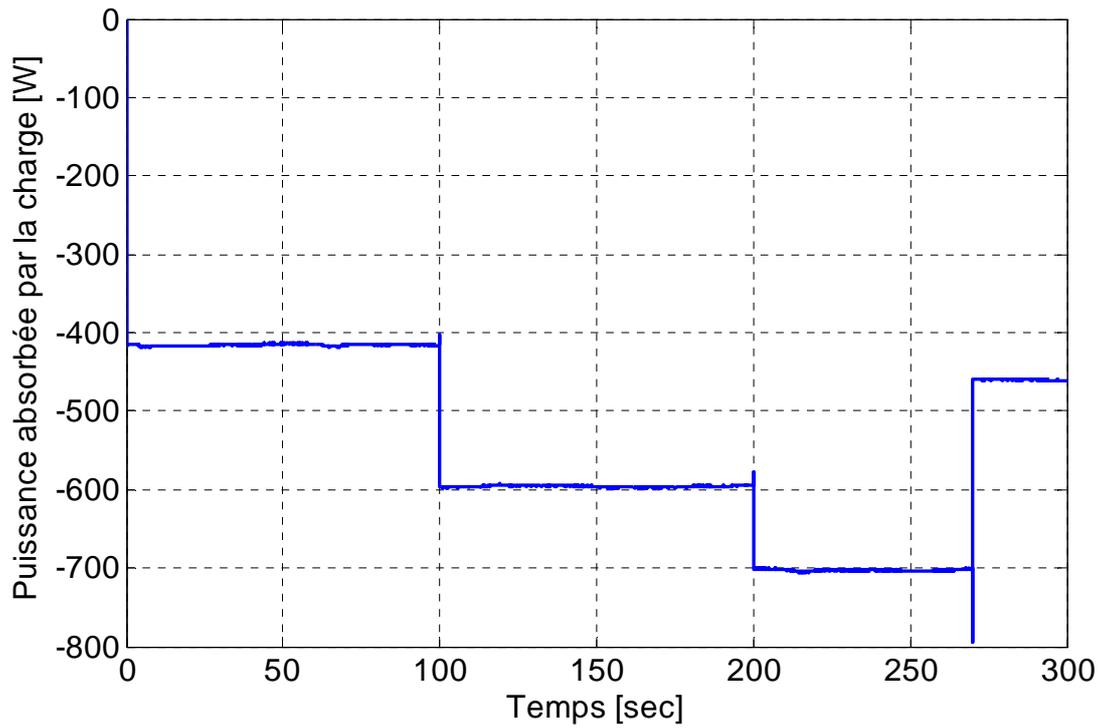


Figure 3.13 Puissance active absorbée par le site isolé

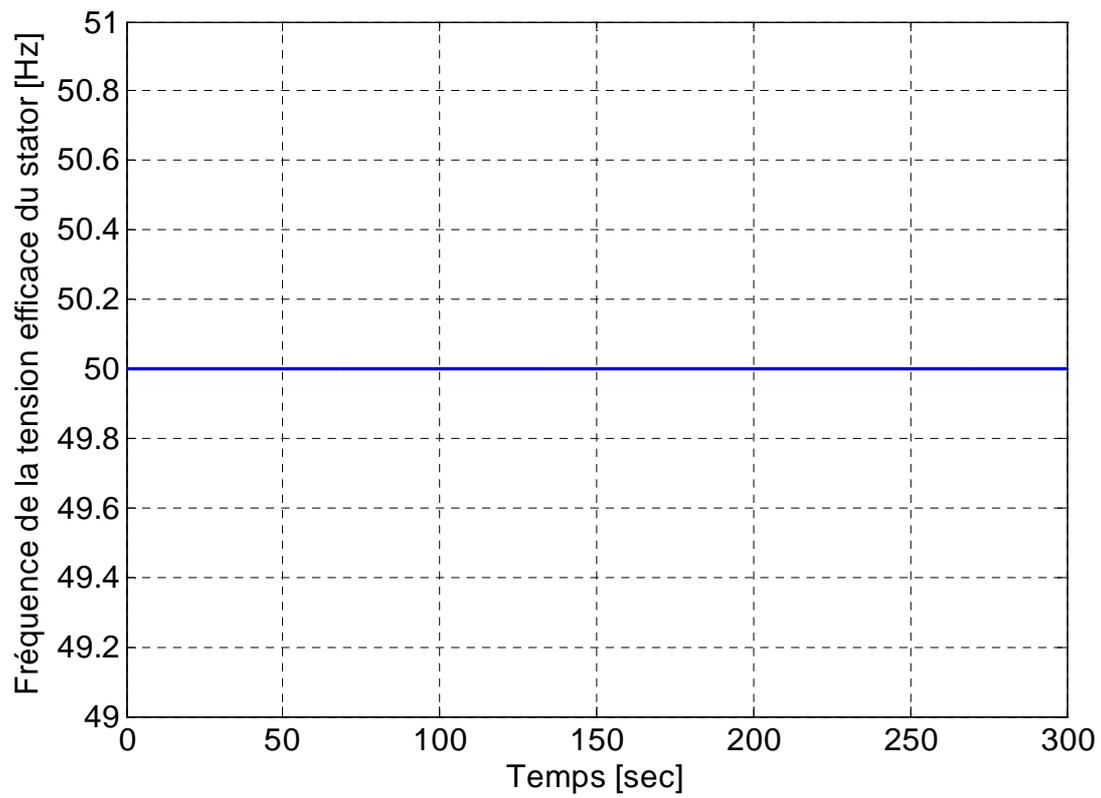


Figure 3.14 Fréquence de la tension efficace du site isolé

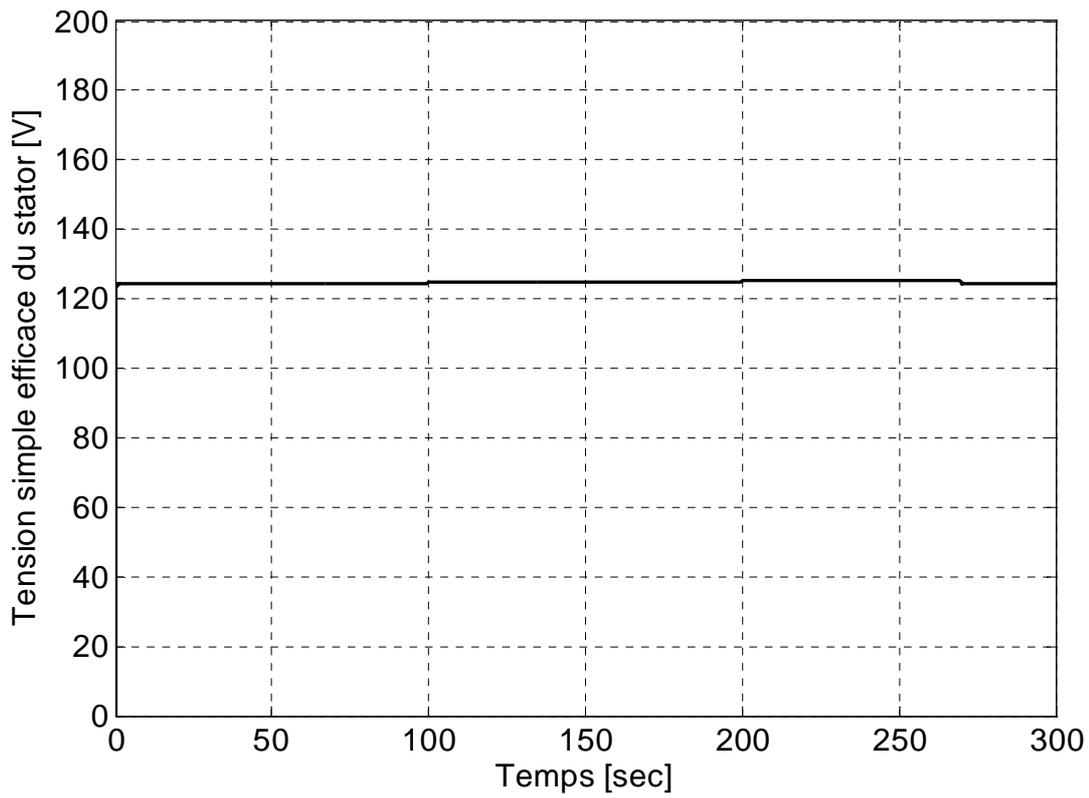


Figure 3.15 Tension simple efficace du site isolé

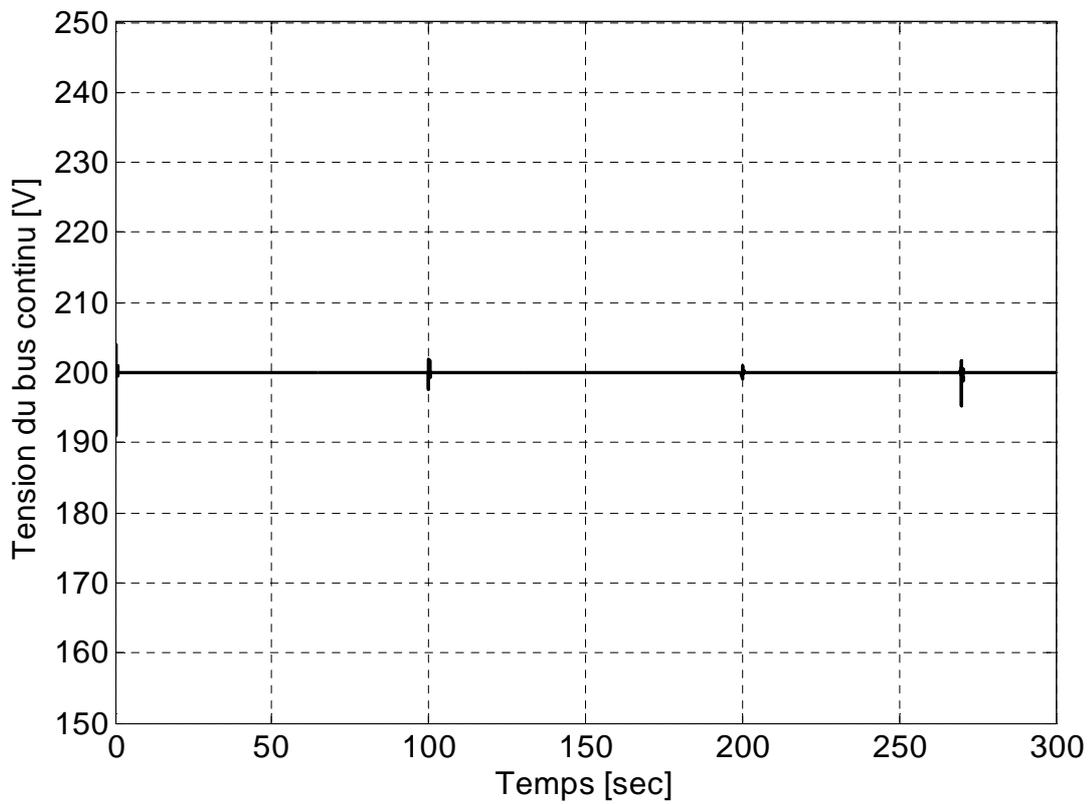


Figure 3.16 Tension du bus continu

### **III. 2.6. Interprétation des résultats**

La figure 3.11 et la figure.3.12 montrent respectivement les puissances actives générées respectivement par la turbine éolienne et la microcentrale hydraulique. La figure 3.13 montre la puissance fournie à la charge isolée, la figure 3.14 montre la fréquence de la tension aux bornes de la charge isolée, la figure 3.15 montre la tension simple efficace de la charge isolée et la Figure3.16 montre la tension du bus continu.

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant la tension et la fréquence de la charge. La figure.3.14 et la figure.3.15 confirment l'efficacité de la stratégie de commande de la centrale hydroélectrique pour réguler la tension efficace et la fréquence, même si la puissance active du vent (figure 3.11) est très fluctuante et la charge est variable (figure 3.13). Un autre avantage de ce système hybride est la capacité de la centrale hydroélectrique à fournir la puissance réactive nécessaire pour magnétiser le générateur asynchrone, et d'éliminer la nécessité d'installer des bancs de condensateurs.

### **III. 2.7. Validation expérimentale [Nas 08]**

Les enroulements du stator et du rotor de la MADA sont en couplage étoile. Le point neutre du rotor est inaccessible, la mesure de deux courants du rotor et du stator est donc nécessaire. En effet, les valeurs des courants du stator sont nécessaires pour évaluer les termes de perturbation de la MADA. Les valeurs des courants du rotor sont aussi bien utiles pour calculer les flux du rotor. La tension instantanée du stator est également mesurée pour calculer les puissances active et réactive transmises par la MADA aux charges isolées, afin de maintenir la valeur efficace de la tension constante et réguler la fréquence. La centrale éolienne est à vitesse fixe, elle est émulée à l'aide d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) contrôlée en couple. La MSAP est soumise à un couple variable, dépendant de la vitesse du vent, et elle entraîne une génératrice asynchrone à cage (MAS). Pour les essais sur charges isolées, la MADA fournit la puissance réactive nécessaire à l'aimantation de la MAS [Annexes 1 et 2].

La photo de la plateforme expérimentale est présentée à la figure 3.17.

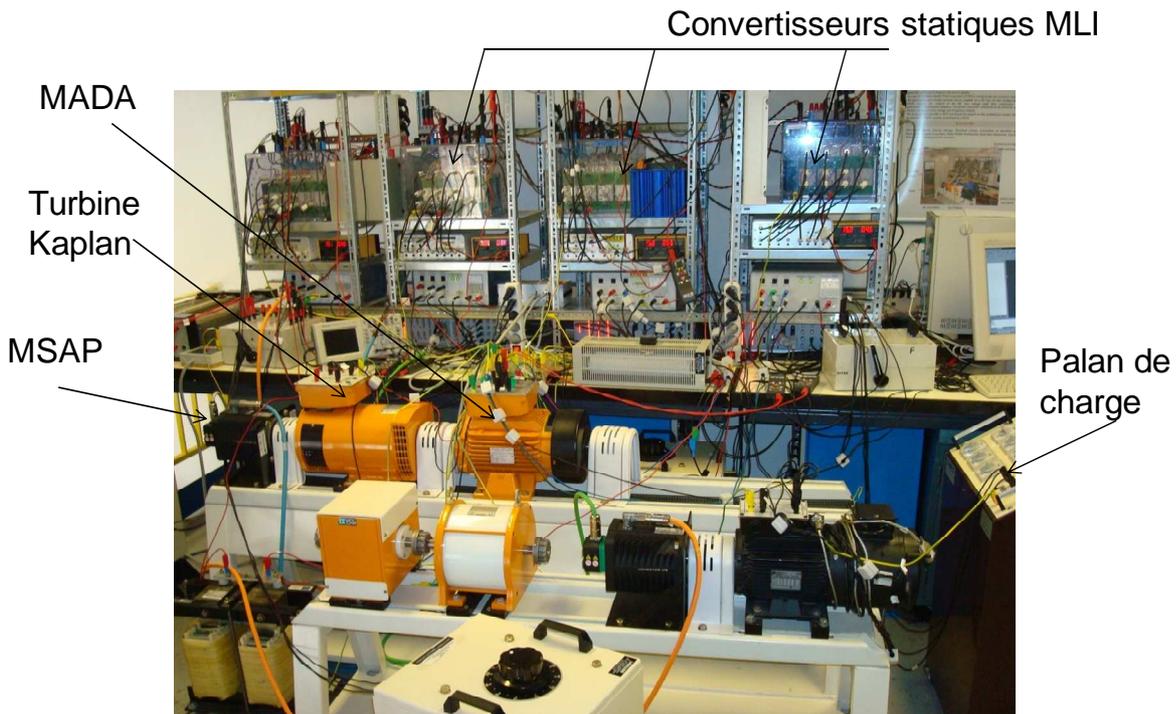


Figure 3.17 Photo de la plateforme expérimentale

La figure 3.18 représente le schéma du banc d'essai adapté à l'étude.

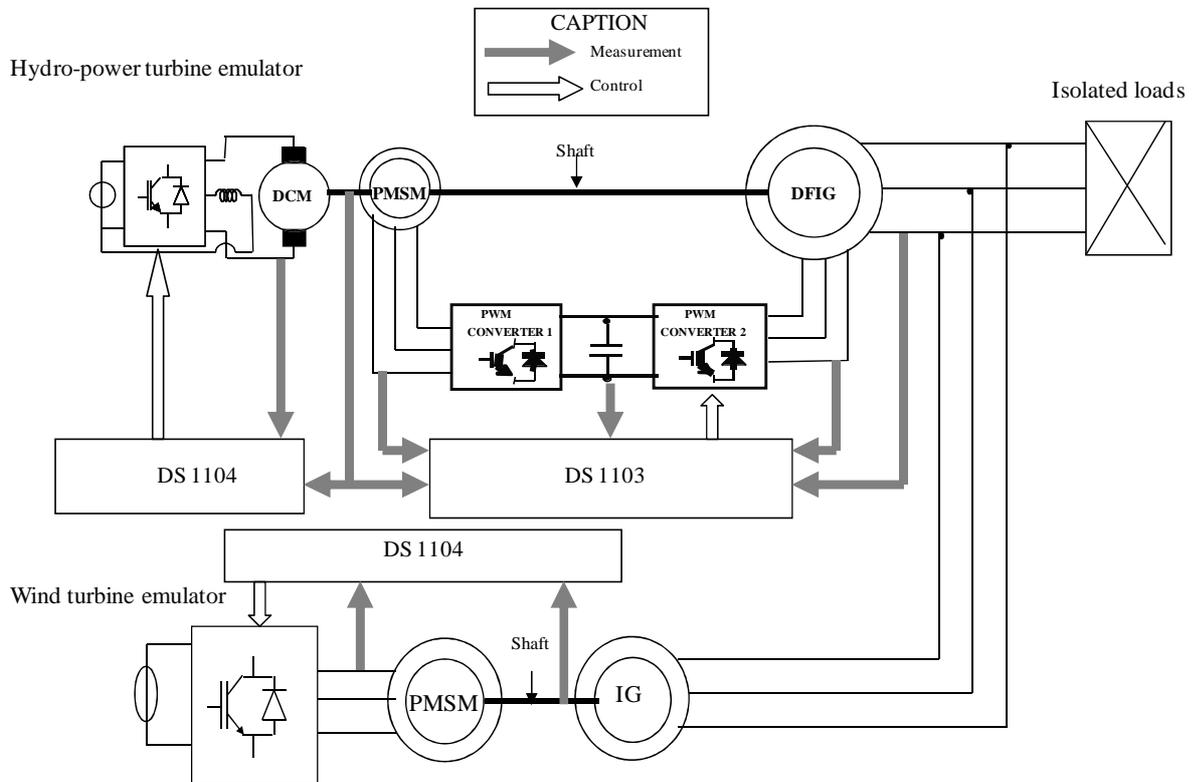


Figure 3.18 Schéma du banc d'essai adapté à l'étude d'une source hybride éolien/hydroélectrique connecté sur site isolé

Les courbes présentées de la figure 3.19 à la figure 3.27 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental.

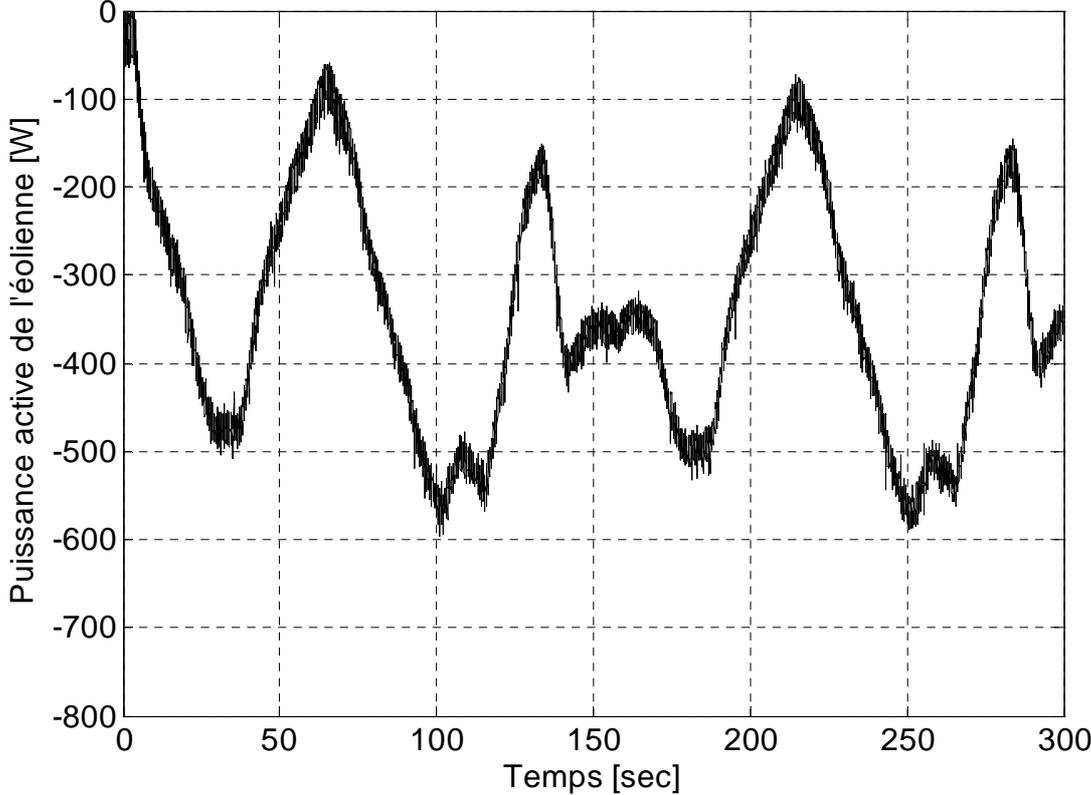


Figure 3.19 Puissance active de l'éolienne

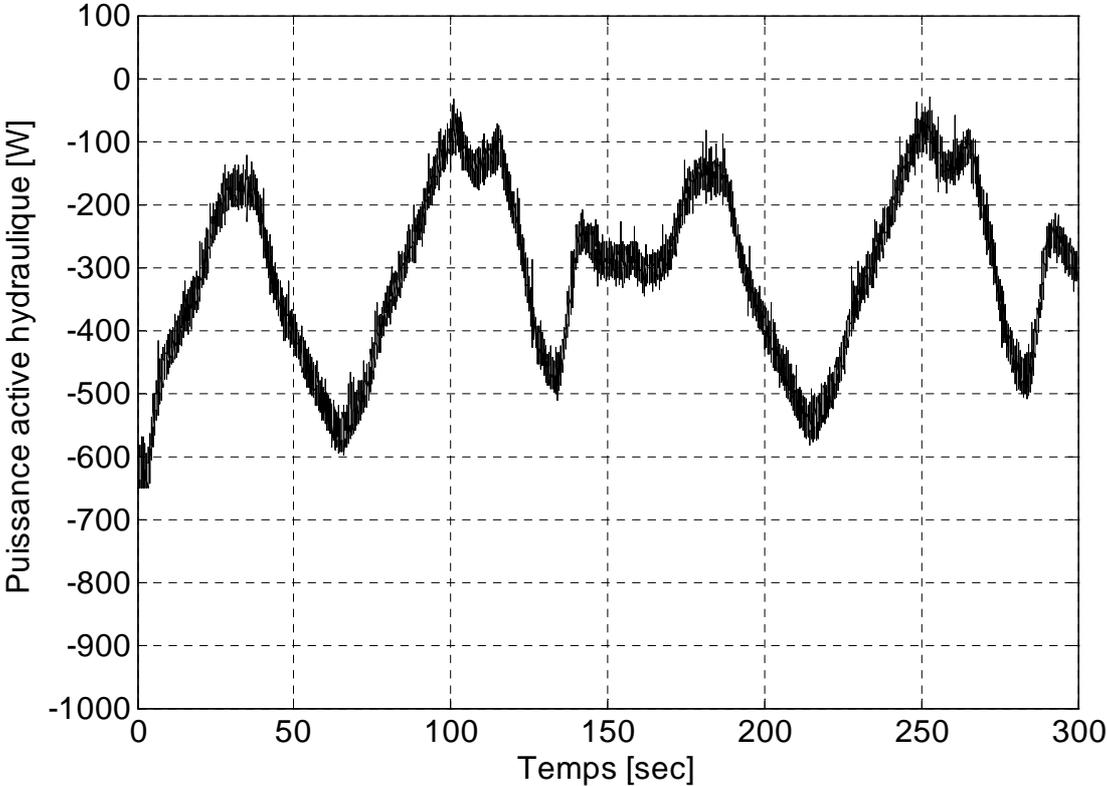


Figure 3.20 Puissance active de la centrale hydraulique

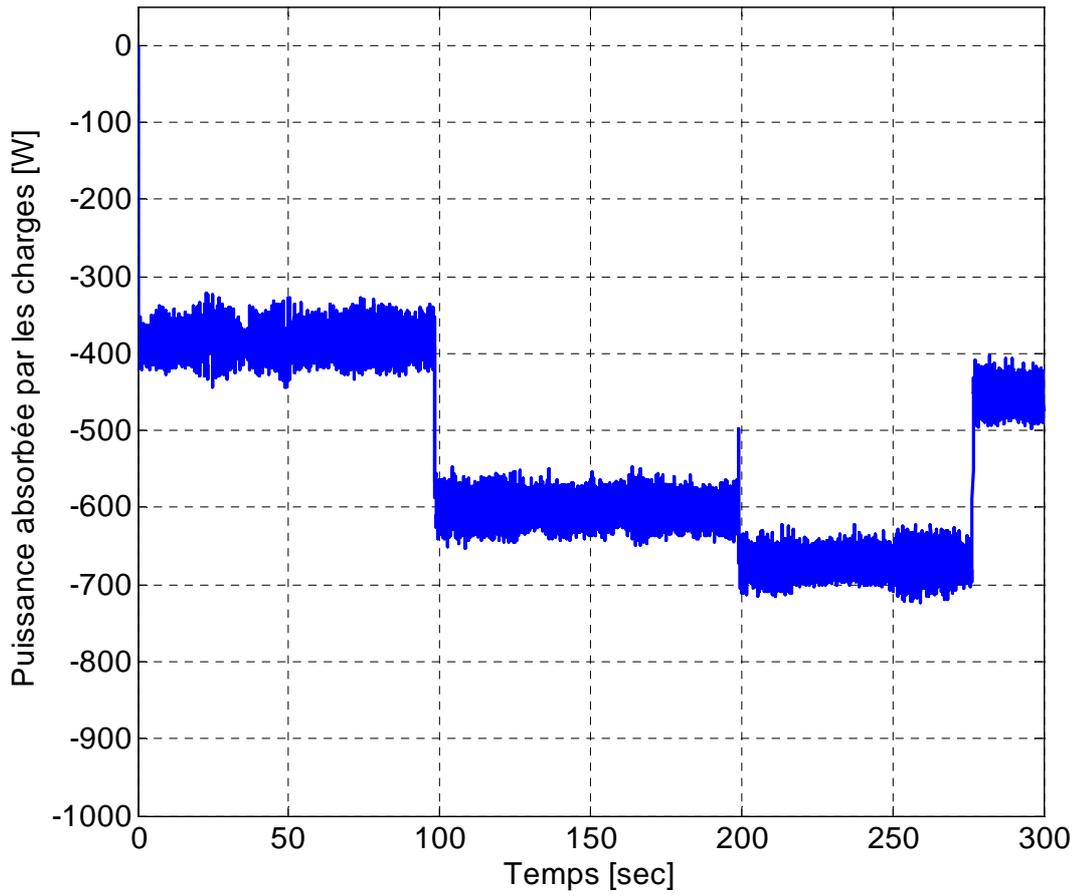


Figure 3.21 Puissance active absorbée par les charges isolées

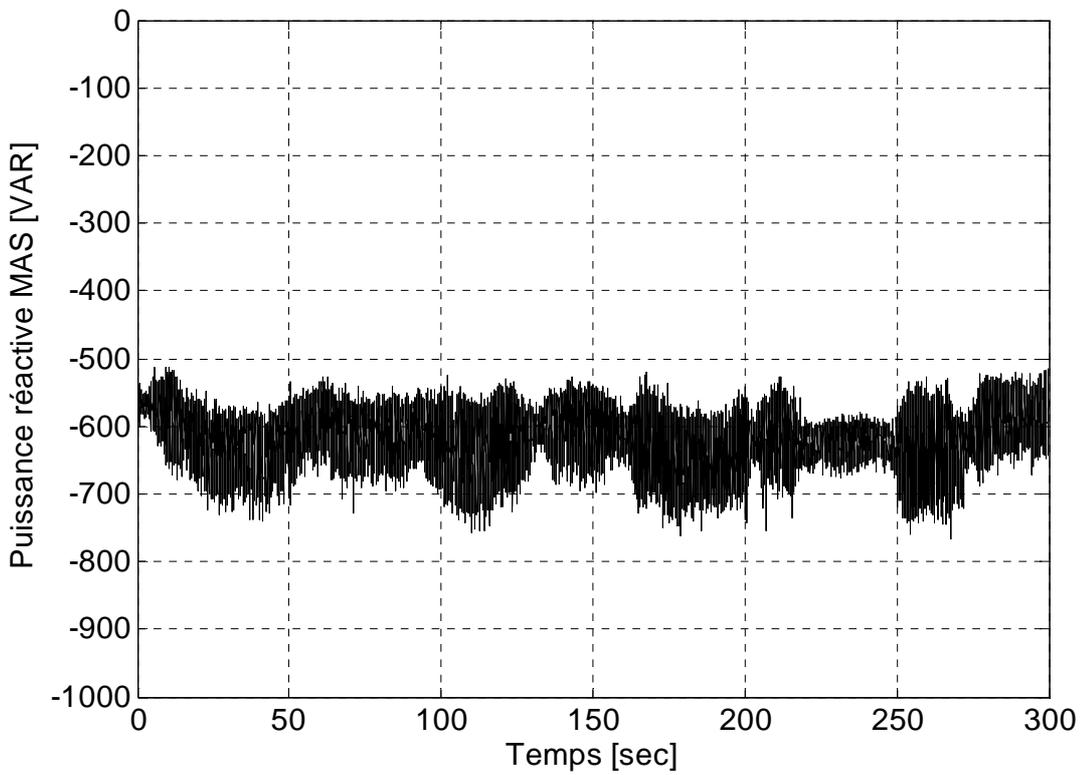


Figure 3.22 Puissance réactive absorbée par le générateur éolien

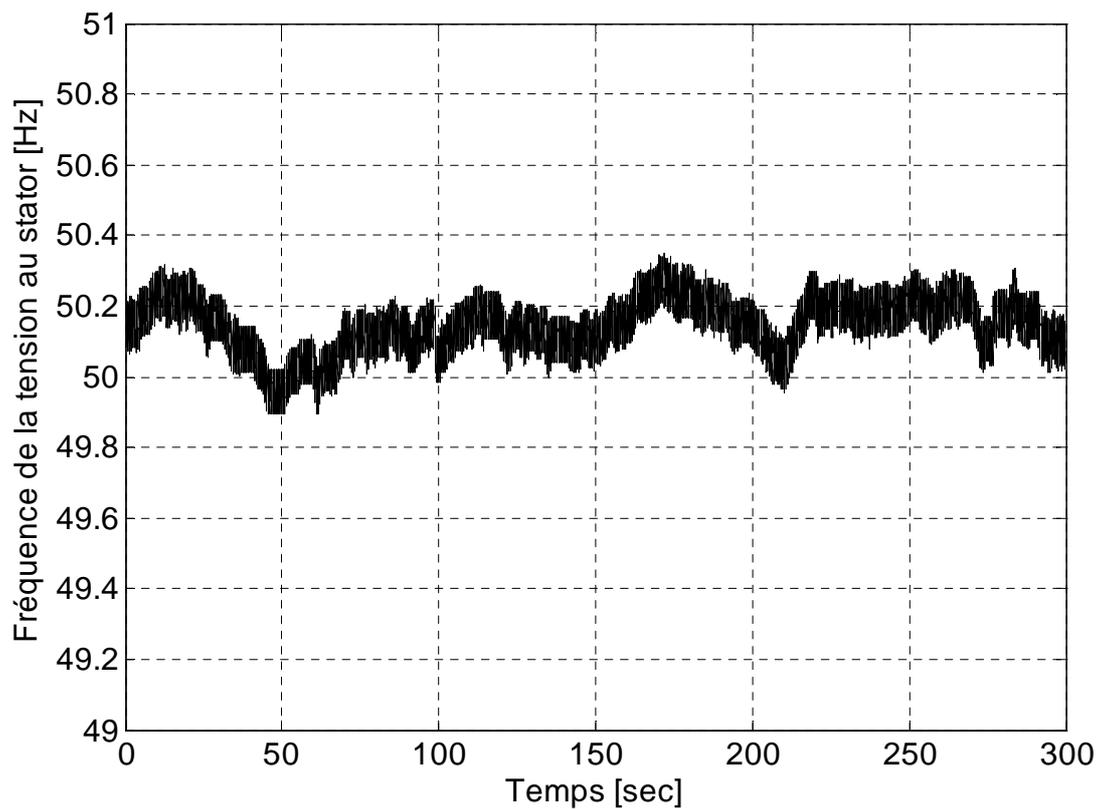


Figure 3.23 Fréquence de la tension efficace des charges isolées

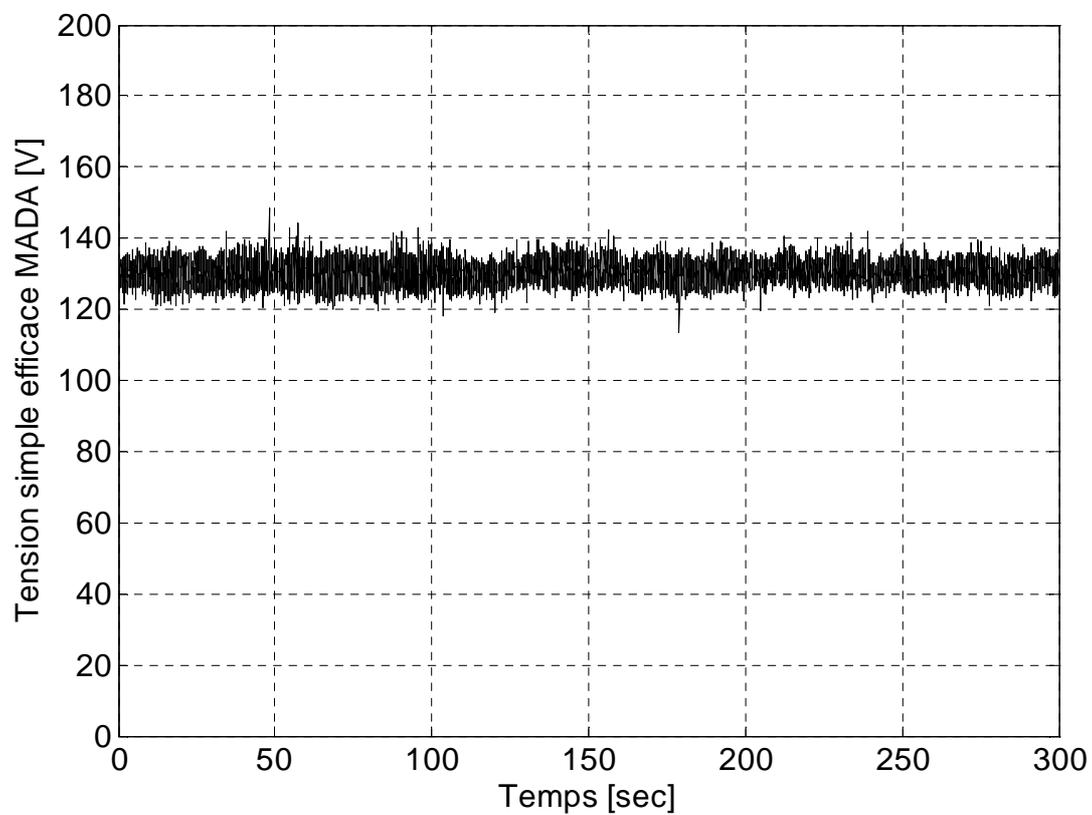


Figure 3.24 Tension efficace des charges isolées

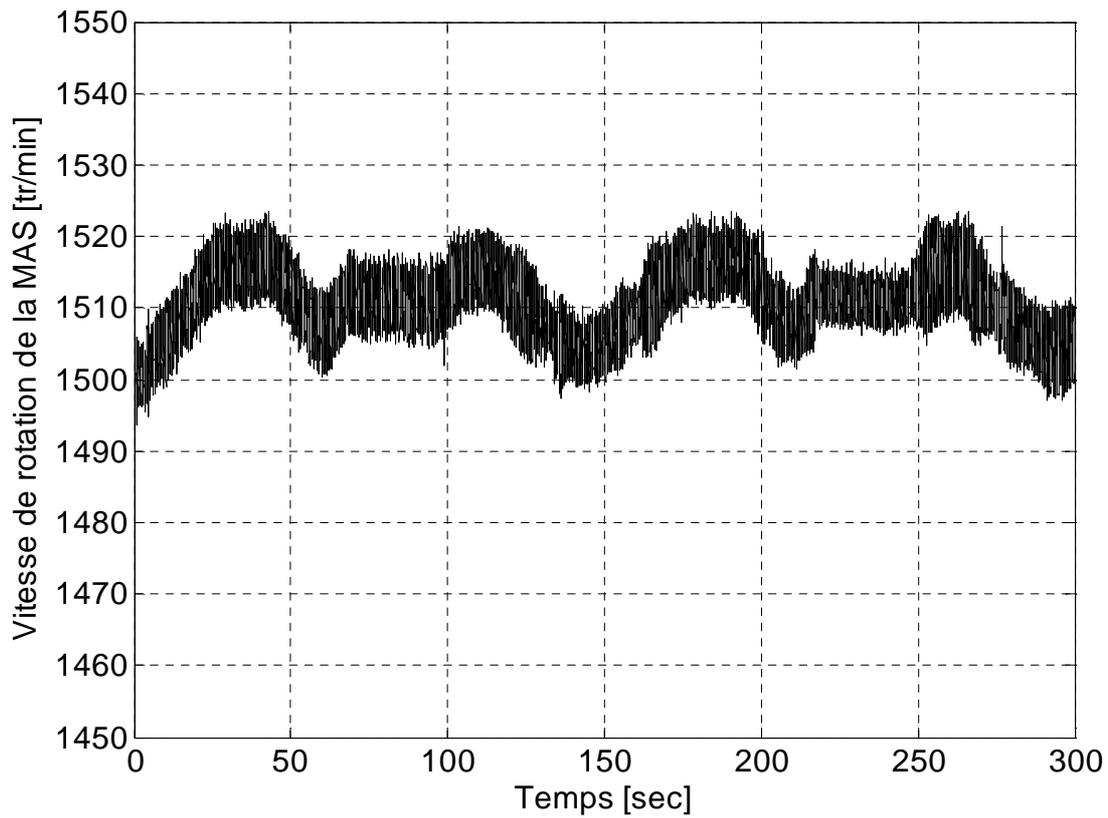


Figure 3.25 Vitesse de rotation du générateur éolien

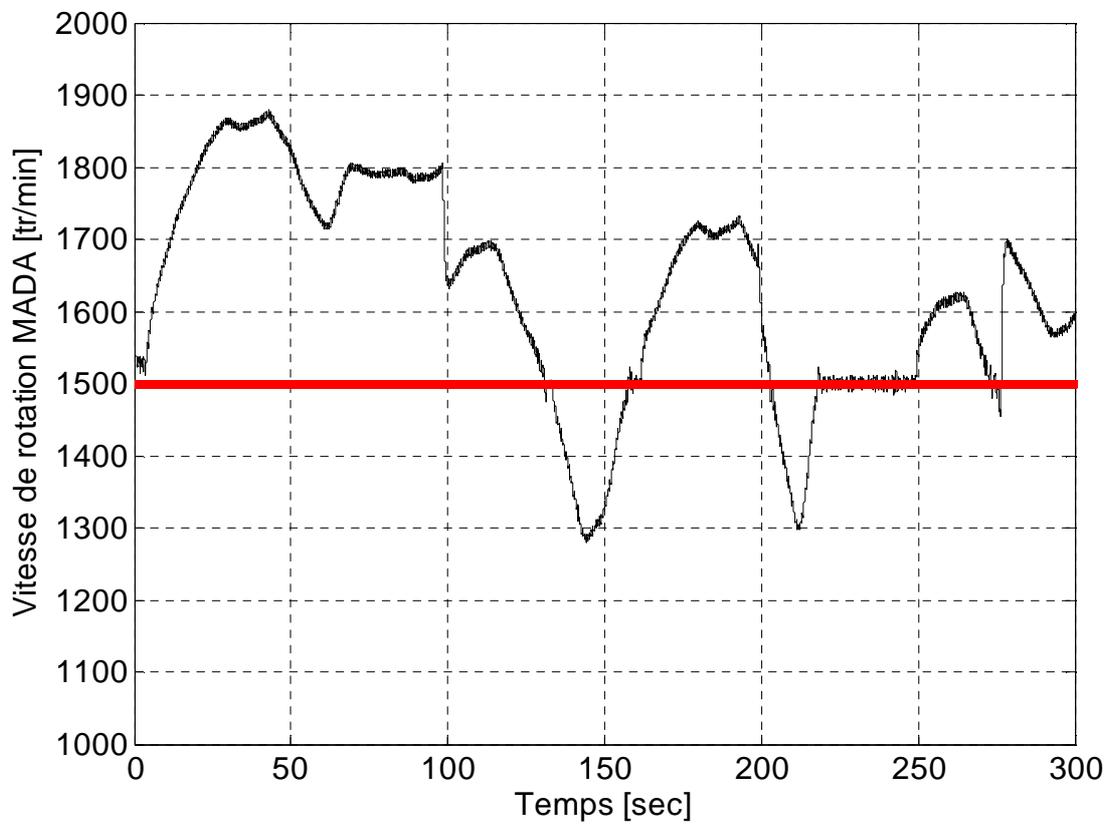


Figure 3.26 Vitesse de rotation de la MADA

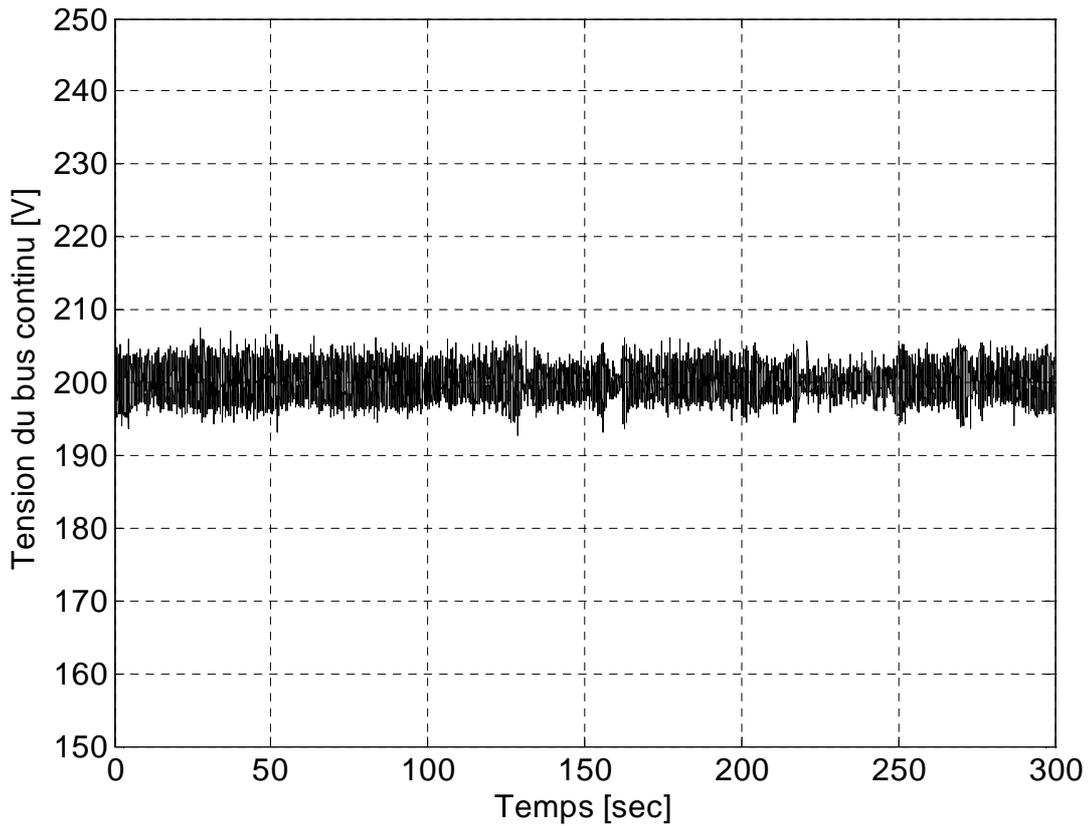


Figure 3.27 Tension du bus continu

### III. 2.8. Interprétation des résultats

Ces figures montrent respectivement les puissances actives générées par l'éolienne et la centrale hydroélectrique (figure 3.19 et figure 3.20) et fournie à la charge isolée (figure 3.21), la puissance réactive absorbée par le générateur éolien représentée par la figure 3.22, la fréquence de la tension aux bornes de la charge isolée est représentée par la figure 3.23, la tension efficace de la charge est représentée par la figure 3.24, la vitesse de rotation de la MADA et le générateur éolien sont représentées respectivement par la figure 3.25 et la figure 3.26, la tension du bus continu est représentée par la figure 3.27.

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant la tension et la fréquence de la charge. La figure 3.26 confirme la possibilité pour la stratégie de commande de faire fonctionner la centrale hydroélectrique en vitesse variable (en dessous et au-dessus de la vitesse de synchronisme). Les figures 3.23 et figure 3.24 confirment l'efficacité de la stratégie de commande de la centrale hydroélectrique pour réguler la fréquence et la tension efficace aux bornes de la charge, même si la puissance active du vent (figure 3.20) est fluctuante et la charge est variable

(figure 3.21). La puissance réactive nécessaire pour magnétiser le générateur asynchrone est fournie par la MADA.

### **III. 2.9. Conclusion**

La structure présentée dans la figure 3.4 a été testée par simulations et sur le banc d'essai. La centrale éolienne se comporte comme un perturbateur pour la microcentrale hydroélectrique. La MADA doit compenser ces perturbations et assurer les paramètres nominaux d'alimentation des charges isolées.

La vitesse variable d'une centrale hydroélectrique permet de compenser et de lisser les fluctuations de l'énergie éolienne lors de l'alimentation des charges isolées. Cela est démontré expérimentalement à l'aide d'un banc d'essai de 3 kW capable d'émuler un système hybride éolien/hydroélectrique. Le banc d'essai est équipé d'un générateur asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable, d'un émulateur d'une petite centrale hydroélectrique associé à un générateur asynchrone à cage (MAS) émulateur d'une éolienne à vitesse fixe. Ce type d'éolienne est souvent utilisé dans les petites ou moyennes puissances des réseaux isolés. Les tests ont montré que la fréquence et la tension efficace sont bien maîtrisées en dépit des variations de la charge.

Dans le chapitre IV nous proposons la supervision de ce système complexe.

### **III. 2.10. Simulations d'une source hybride éolien/hydroélectrique connecté sur réseau de puissance**

Des simulations ont été réalisées. On considère un système composé d'une petite centrale hydro-électrique au fil de l'eau de 3 kilowatts soumise à un débit et à une hauteur fixe et d'une éolienne de 3 kilowatts à vitesse fixe, l'ensemble alimentant une source de puissance.

- La MADA et le générateur éolien sont branchés sur réseau interconnecté.
- Un vent fort a été considéré pour la simulation.

Les courbes présentées de la figure 3.28 à la figure 3.30 correspondent aux résultats de simulation.

Elles montrent respectivement les puissances actives générées (figure 3.28 et figure 3.29) et celle fournie au réseau (figure 3.30).

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant la puissance active et la puissance réactive fournie au réseau.

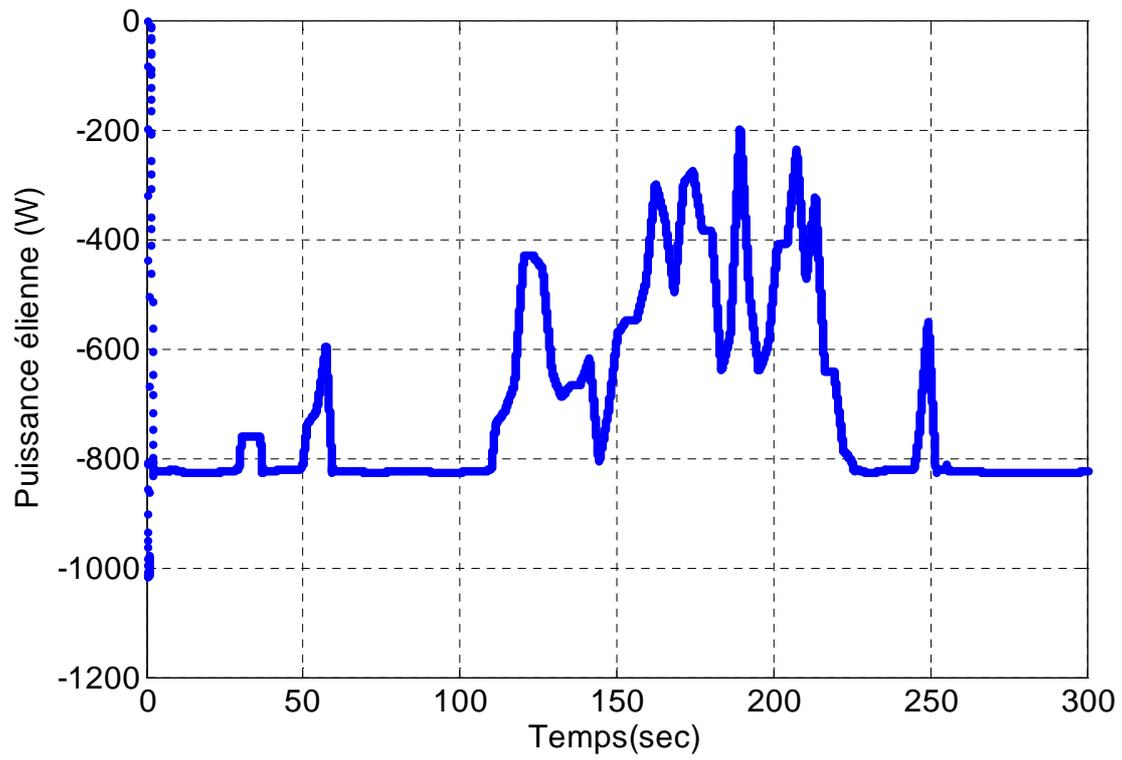


Figure 3.28 Puissance active de l'éolienne

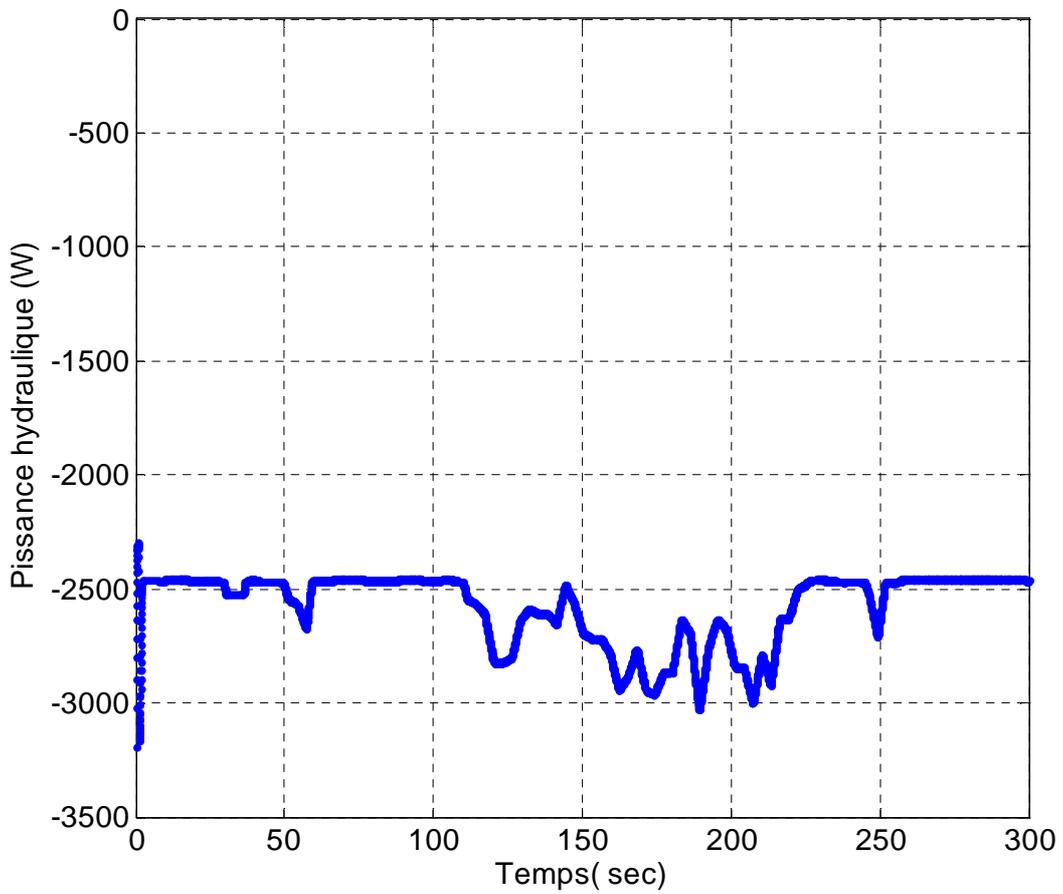


Figure 3.29 Puissance active de la centrale hydraulique

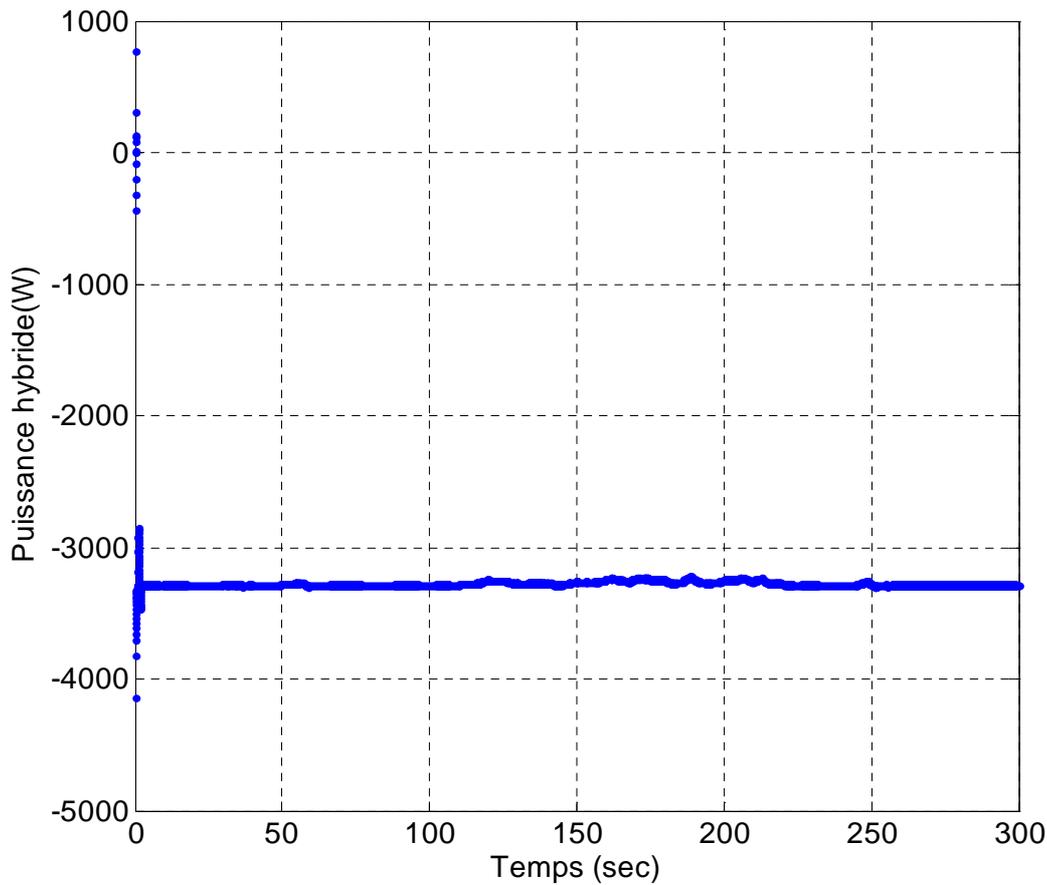


Figure 3.30 Puissance active hybride fournie au réseau

### III. 2.11. Validation expérimentale [Bre 08a], [Bre 08b]

Les tests expérimentaux suivent la même voie que celle décrite dans la section III.3.2.7. La figure 3.18 présente la structure de la plateforme expérimentale [Annexes 1 et 2] utilisée pour les essais. Dans le présent essai le convertisseur MLI n°2 permet de régler le transit des puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau.

Les courbes présentées de la figure 3.31 à la figure 3.36 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental.

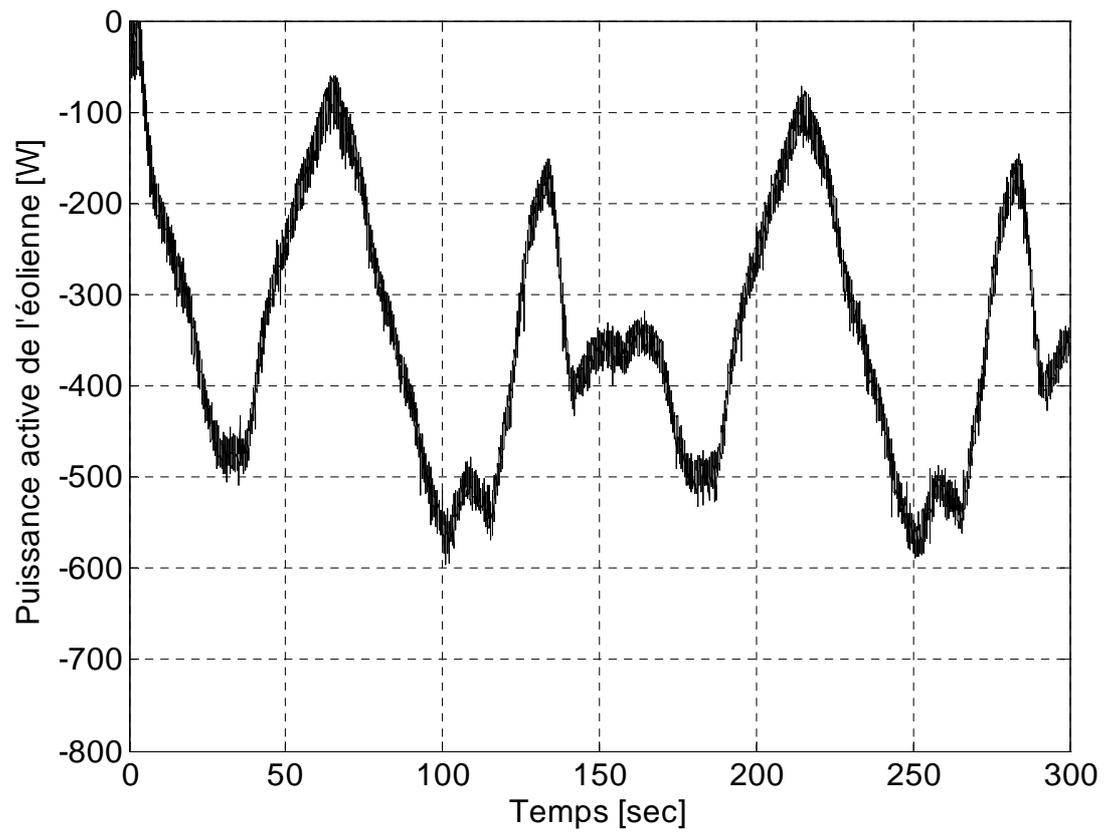


Figure 3.31 Puissance active de l'éolienne

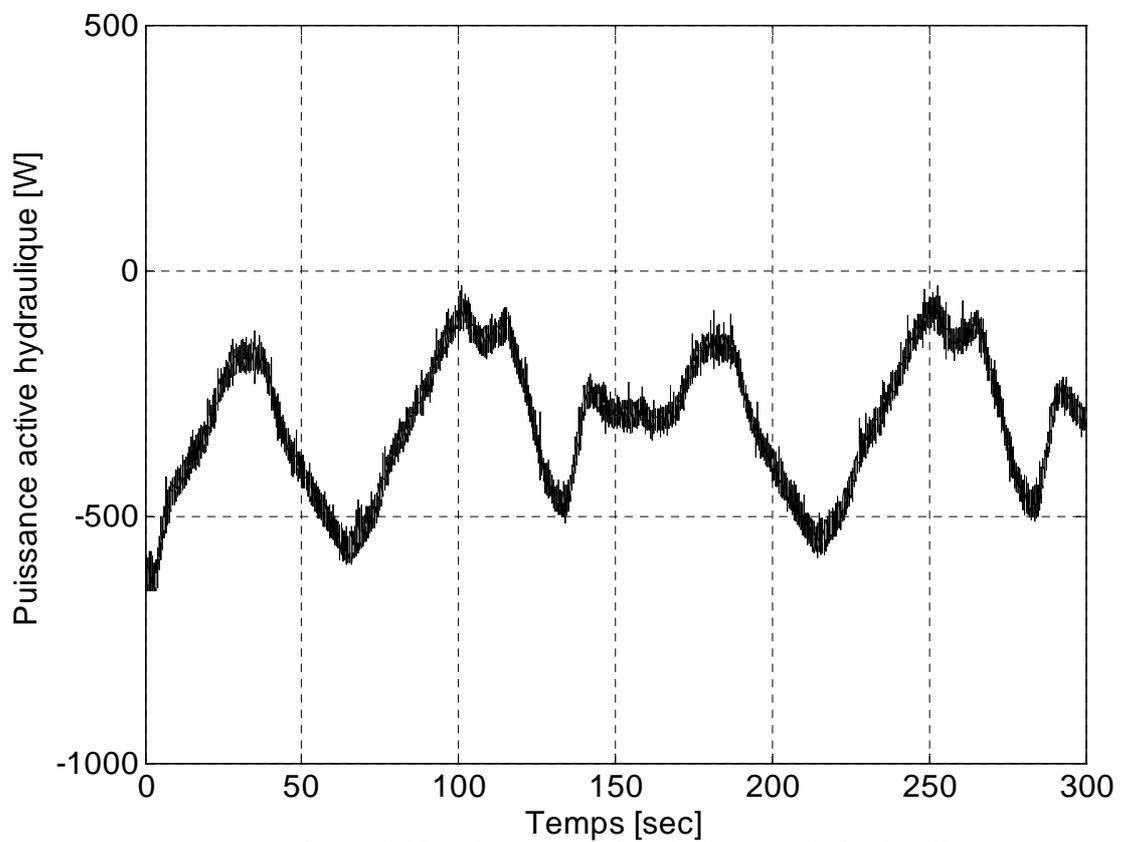


Figure 3.32 Puissance active de la centrale hydraulique

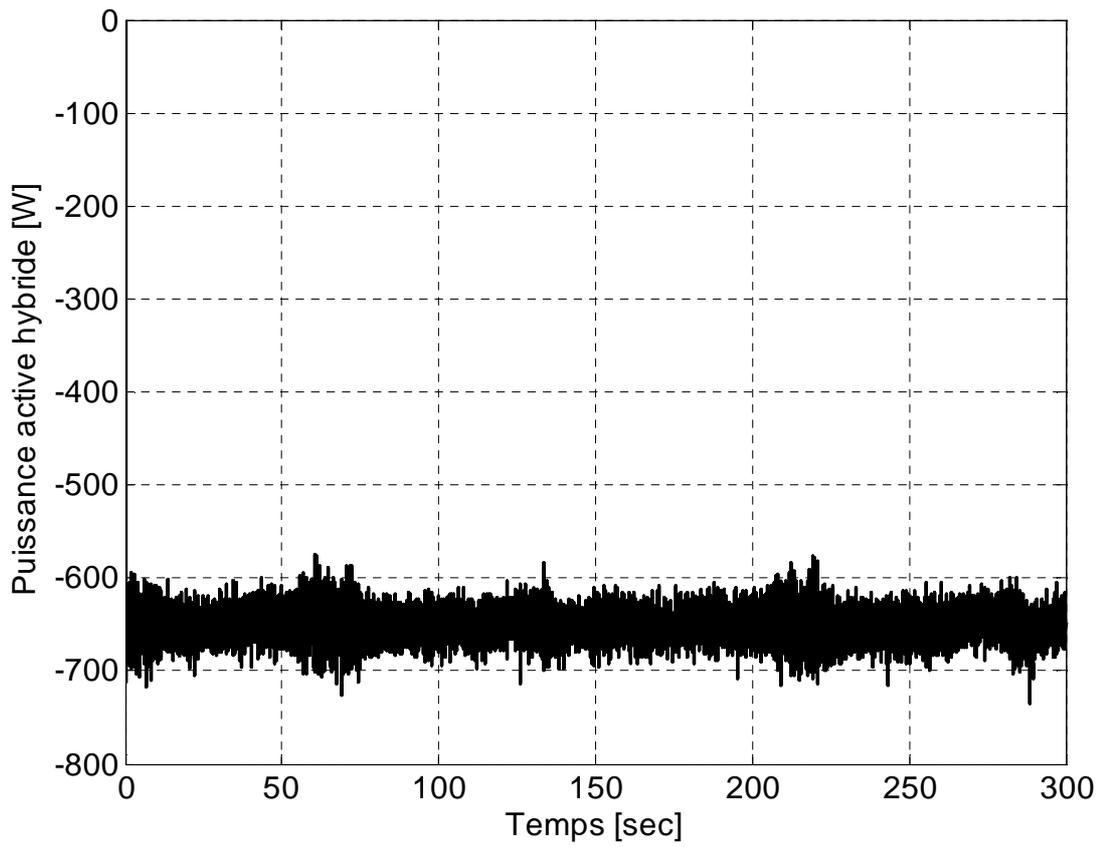


Figure 3.33 Puissance active hybride fournie au réseau

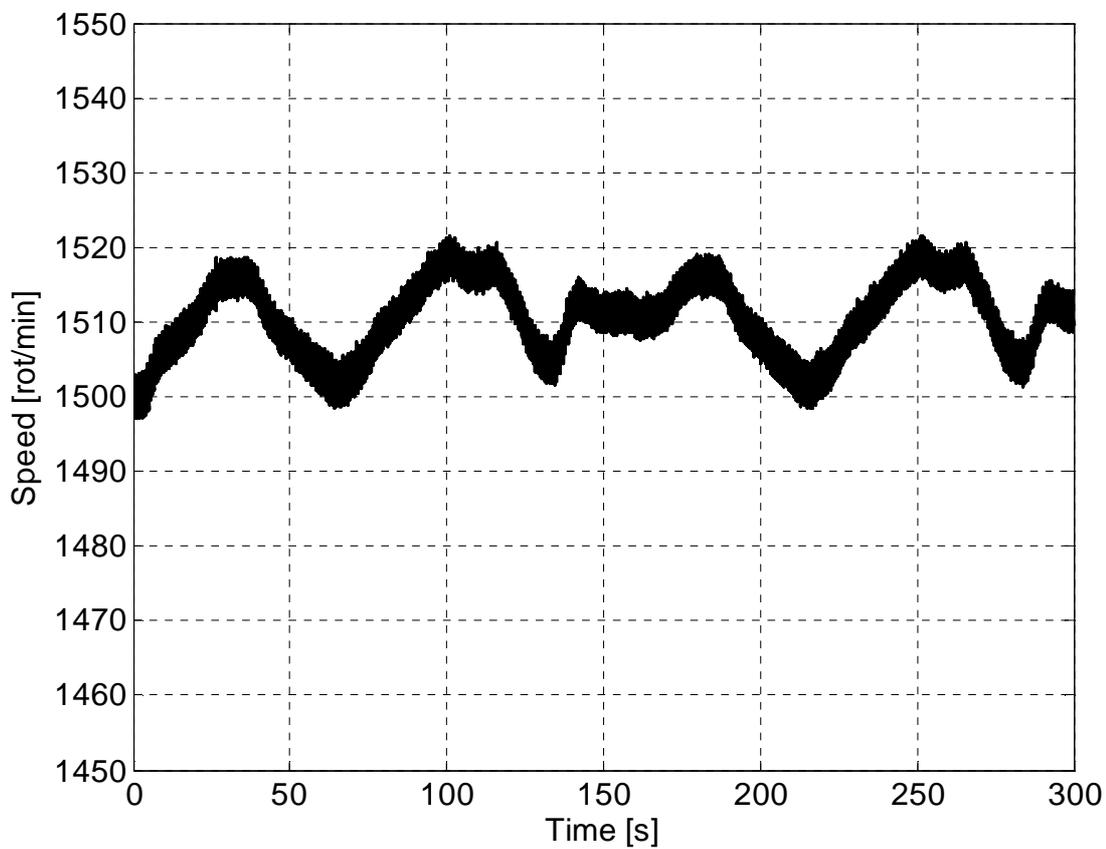


Figure 3.34 Vitesse de rotation du générateur éolien

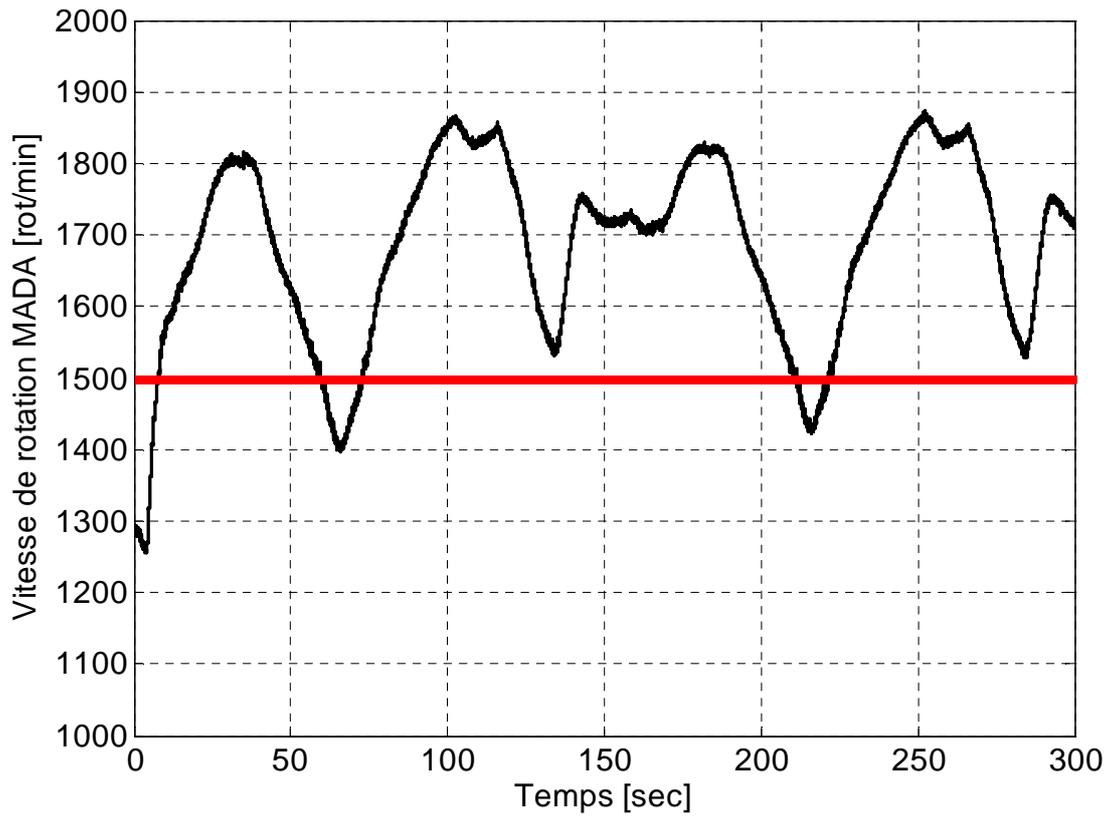


Figure 3.35 Vitesse de rotation de la MADA

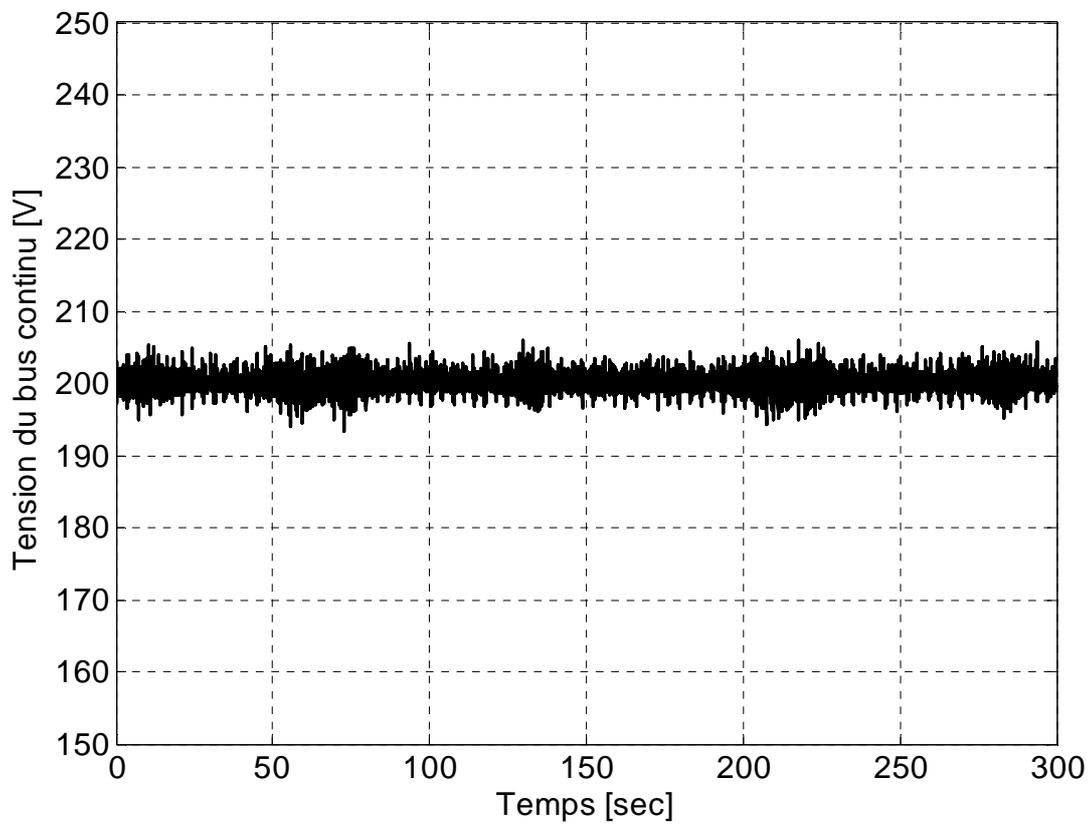


Figure 3.36 Tension du bus continu

### III.2.12. Interprétation de résultats

Ces figures montrent respectivement les puissances actives générées éolienne et hydraulique (figure 3.31 et figure 3.32) et celle fournie au réseau (figure 3.33), la vitesse de rotation du générateur éolien et de la MADA (figure 3.34 et figure 3.35) et la tension du bus continu (figure 3.36).

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant le transit des puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau.

La figure 3.35 confirme la possibilité pour la stratégie de commande de faire fonctionner la centrale hydroélectrique en vitesse variable (en dessous et au-dessus de la vitesse de synchronisme).

### III.2.13. Nécessité d'une gestion multi niveaux

Du point de vue des gestionnaires des réseaux de transport et de distribution, ce type de source hybride reste aléatoire et non prévisible. Comme la problématique de l'éolien se retrouve à tous les niveaux temporels de gestion, il est nécessaire de mettre en place une supervision multi niveaux de la centrale intégrée éolienne/hydraulique. On peut envisager ce type de structure qui a besoin d'une échelle de temps multiple [Cou 08], [Abb 05].

A chaque niveau correspond des objectifs et des moyens à définir pour répondre à ces exigences.

La supervision du système hybride étudié peut être divisée en quatre niveaux selon l'échelle de temps comme le montre le Tableau 3.2. Le tableau montre les problématiques associées l'échelle de temps et les services rendus.

La supervision court-terme (niveau 1) permet de fournir la puissance de référence de chaque élément constituant la centrale multi source de manière à garantir les engagements pris sur la fourniture de puissance et les services système. La supervision temps réel nous oblige à limiter le temps de calcul des algorithmes de supervision et à limiter au maximum le nombre de grandeurs à mesurer.

La supervision moyen-terme (niveau 2) permet de fournir la puissance de référence de la source hybride, tout en maximisant et en diminuant la fluctuation de la puissance fournie au réseau.

La supervision long-terme (niveau 3) permet d'affiner la puissance de référence à partir d'une prévision réactualisée. La planification de la production sera basée sur :

- Prévision de la charge par rapport au prix du marché;
- Prévision météorologique (à 24 h dans le cas de l'éolien);
- Structure du marché;

- Capacité à jouer sur la demande.

La supervision pluriannuelle (niveau 4) prévoit la production de chaque élément de la source hybride en fonction des cycles annuels de demande et des programmes de maintenance.

| <u>Échelle du temps</u>   | <u>Système hydraulique</u>   |
|---|--|
| <b>Niveau 4</b><br>Plan pluriannuel<br>(années)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévission de la charge</li> <li>• Prévission pluviométrique</li> <li>• Prévission des opérations de maintenance</li> <li>• Prévission des recharges de combustible</li> </ul>  |
| <b>Niveau 3</b><br>Long-terme<br>(quelques heures à 1 jour)     | <p><b>Grande hydraulique</b></p> <p><u>Exemples de problématiques associées :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévission de consommation pour le lendemain</li> <li>• Gestion journalière de réserve</li> <li>• Coordination avec les moyens de production externes (centrales thermiques.)</li> <li>• Optimisation économique du système</li> </ul>                        |
| <b>Niveau 2</b><br>Moyen terme<br>(Quelques min à 1 h)          | <p><b>Petite hydraulique</b></p> <p><u>Exemples de problématiques associées :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Participation à l'ajustement du marché</li> <li>• Gestion de réserve secondaire</li> <li>• Gestion de l'îlotage</li> </ul>  |
| <b>Niveau 1</b><br>Temps réel<br>(Quelques secs à quelques min) | <p><b>Petite hydraulique</b></p> <p><u>Exemples de problématiques associées :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lissage de la puissance instantanée</li> <li>• Réglage primaire de fréquence et de tension</li> <li>• Performance du système en cas de défaut</li> <li>• Gestion de l'îlotage : possibilité d'alimenter des charges localement en cas de nécessité</li> </ul> |

Tableau 3.2 Gestion de l'énergie d'un système hybride, sur plusieurs niveaux selon l'échelle de temps

### III.3. Les outils pour la construction d'un superviseur multi niveaux

#### III. 3.1. Différents types de formalisme

Trois familles d'outils émergent de la littérature pour développer la supervision d'une centrale multi sources.

### **III. 3.1.1. Méthodes causales**

[Li 08], [Mor 06], [Bou 00] proposent une approche qui consiste à identifier les flux de puissance dont l'inversion permet de déterminer des puissances de référence. Inconvénients, elle nécessite un modèle mathématique détaillé des sources et des systèmes de stockage ainsi qu'une bonne connaissance en temps réel de ces différents flux et des pertes associées

### **III. 3.1.2. Méthodes implicites**

[Cim 06], [Esk 06], [Bouk 07] et [Lec 03] proposent un outil bien adapté à la gestion de systèmes « complexes » dépendant de grandeurs ou d'états difficilement prévisibles et mal connus en temps réel (vent, ensoleillement, fréquence et état du réseau, variation de la consommation...). Par exemple la logique floue nous permet d'introduire de variables floues pour prendre en compte l'état de certaines parties d'un système (par exemple le niveau de stockage) et les grandeurs d'entrée. La définition des fonctions d'appartenance est basée sur des choix stratégiques ou l'expérience. Cependant, jusqu'à présent, il n'existe pas de méthode systématique pour le développement de ce type de superviseur. A partir de ce constat une méthodologie implicite améliorée et basée sur la logique floue a été développée au sein du laboratoire L2EP [Spr 09].

### **III. 3.1.3. Méthodes explicites**

Des méthodes explicites ont été développées par [Cal 04], [Ver 07]. Cet outil peut assurer le choix optimum permettant de garantir la maximisation, par exemple de l'énergie produite d'origine renouvelable. Inconvénients, elle nécessite de prévoir les données du vent pour établir les paramètres de la fonction objective afin de maximiser la puissance hybride à produire. La minimisation d'une fonction de coût bien formulée est cependant difficile à mettre en œuvre en particulier en temps réel.

Ces trois types de formalisme détaillés seront testés et analysés pour la supervision de la centrale virtuelle dans le chapitre IV.

## **III. 3.2. Méthodologie retenue pour la construction du superviseur multi niveaux**

La centrale multi sources étudiée dans cette thèse est constituée d'une éolienne couplée à une source hydraulique et à des systèmes de stockage. Les objectifs de la supervision seront d'une part de respecter une puissance de consigne de la source hybride demandée tout en maximisant l'utilisation de

la source hydraulique et d'autre part de fournir les puissances de référence de la source hydraulique et des systèmes de stockages.

Pour la résolution de ce type de problème, une supervision à base de logique floue paraît bien adaptée du fait de :

- la complexité du système à contrôler;
- la difficulté de quantifier la réponse du réseau à la variation des productions et des charges qui y sont raccordées.
- La nature aléatoire des sources d'énergie renouvelable.

Nous présentons une méthodologie systématique pour l'élaboration d'un superviseur à base de logique floue. Cette méthode est une extension des méthodes couramment utilisées pour la conception du contrôle de processus industriels ; les réseaux de Petri [Zur 94] et les GRAFCET [Gui 99]. Ces derniers permettent de construire graphiquement et « étape par étape » le contrôle du système, de manière à en faciliter l'analyse et l'implantation. Ils sont particulièrement bien adaptés aux systèmes logiques séquentiels. Cependant, dans le cas d'unité de production hybride incluant des variables aléatoires et des états continus, ce type d'outil atteint ses limites. La méthode proposée est donc une extension de cette approche graphique pour y inclure des grandeurs floues et mal connues.

Cette méthodologie proposée permet :

- d'éviter le recours à des modèles précis et complexes des différentes sources et des systèmes de stockage ;
- de déterminer de manière systématique le superviseur ;
- d'assurer des transitions progressives entre les différents modes de fonctionnement du système hybride ;
- de minimiser le nombre de lois floues et de simplifier son implantation en temps réel.

### **III. 3.3. Présentation d'une méthodologie implicite améliorée et basée sur la logique floue**

La méthodologie de conception du système de supervision retenue est basée sur six étapes:

1. La détermination du cahier des charges du système; les caractéristiques et les objectifs du système doivent être clairement explicités.
2. La structure du superviseur; les entrées et les sorties nécessaires du superviseur sont déterminées.

3. La détermination des « graphes fonctionnels »; une représentation graphique des modes de marche est proposée. Cette représentation est basée sur la connaissance du système.
4. Les fonctions d'appartenance du superviseur flou sont déterminées.
5. La détermination des « graphes opérationnels »; une représentation graphique des modes de fonctionnement flous est proposée.
6. Les règles floues, caractéristiques du superviseur flou sont extraites des « graphes opérationnels ».

Dans le chapitre IV, nous utiliserons la méthodologie implicite à base de logique floue pour concevoir la supervision d'une centrale multi sources à base d'énergie renouvelable intégrant une source éolienne, une source hydraulique sans stockage d'énergie.

### **III.4. Conclusion**

Ce chapitre a développé l'association d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable à une centrale éolienne à vitesse fixe. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé. Les simulations et les résultats expérimentaux du système global ont permis de conclure sur la nécessité d'une gestion multi niveaux de ce système complexe et d'outils pour sa réalisation. La gestion de ce système complexe est divisée en plusieurs niveaux travaillant à des échelles de temps différentes. Le chapitre suivant nous permettra de proposer la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage et connecté à un réseau puissant.

### **III.5. Bibliographies**

- [Abb 05] C. Abbey, G. Joos, « Energy management strategies for optimization of energy storage in wind power hybrid system ». Power Electronics Specialists Conference (PESC2005), June 2005, pp. 2066-2072.
- [Bou 00] A. Bouscayrol, X. Guillaud, Ph. Delarue, "Macro modélisation des conversions électromécaniques. Application à la commande des machines électriques », Revue International de Génie Electrique 3, 2000, n° 2, pp. 257-282.
- [Bouk 07] G. Boukettaya, L. Krichen, A. Ouali, « Fuzzy logic supervisor for power control of an isolated hybrid energy production unit ». International Journal of Electrical and Power Engineering, 2007, p. 279-285.
- [Bre 08a] Breban S. « Étude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable », thèse présentée en décembre 2008, ENSAM.

- [Bre 08b] S. Breban, M. Nasser, A. Vergnol, V. Courtecuisse, B. Robyns, M. Radulescu, « Study of a grid-connected hybrid wind/micro-hydro power system”. Optim’08. May 22-24, 2008, Brasov, Romania.
- [Cal 04] R. Caldon, A. Patria, R., Turri, « Optimal Control of a Distribution System with a Virtual Power Plant », International conference on Bulk Power System Dynamics and Control, 2004, p. 278-284.
- [Cam 03] C. Potter and M. Negnevitsky, Intelligent agent application for hydro-wind electricity generation control, AUPEC, 28 September-1 October 2003, Christchurch, New Zealand.
- [Car 01] R. Cardenas, R. Pena, G. Asher et J. Clare – Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems usings a flywheel driven by a vector-controlled induction machine, vol. 48, issue 3 IEEE Trans. Ind. Electronics, june 2001, pp. 625-635.
- [Cas 04] E.D. Castronuovo, J.A.P. Lopes, “On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant”, Inst. de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Portugal, Power Systems, IEEE Transactions on Aug. 2004, Volume: 19, Issue: 3, pp. 1599–1606.
- [Cim 06] G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, « 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.
- [Cou 08] V. Courtecuisse, B. Robyns, M. Petit, B. Francois and J. Deuse “Performance comparison of different wind generator based hybrid systems”, EPE -PEMC. September 1-3, 2008, Poznan, Poland.
- [Dir 07] Directions Régionales de l'Environnement (DIREN), site Burande à la Tour – d’Auvergne, 2007.
- [Esk 06] M. N. Eskander, T. F. El-Shatter, M. T. El-Hagry, « Energy flow management of a hybrid Wind/PV/Fuel cell generation system », Energy Conversion and Management, vol. n° 47, 2006, pp. 1264-1280.
- [Gra 05] J.Y. Grandidier, « Eolien et Hydraulique des fiançailles réussies », Système Solaires n°165, 2005, pp. 39-42.
- [Gui 99] L. Guillemaud, H. Guegen, “Extending GRAFCET for the specification of control of hybrid systems”. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1999, pp. 171-175.
- [Jar 04] O.A. Jaramillo, M.A. Borja, J.M. Huacuz Using hydropower to complement wind energy: a hybrid system to provide firm power. Mexico Elsevier, Renewable Energy 29, 2004, pp. 1887–1909.

- [Lec 03] L. Leclercq, B. Robyns, 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* n°63, June 2003, pp. 271–280.
- [Li 08] P. Li, B. Francois, P. Degobert, B. Robyns, « Multi-level representation for control design of a super capacitor storage system for a microgrid connected application », *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2008, CD-ROM.
- [Mor 06] J. Morren, W.H. de Haan, J.A. Ferreira, « Primary Power/Frequency control with wind turbine and fuel cells », *IEEE PES General Meeting*, 2006.
- [Nas 08] M. Nasser, S. Breban, V. Courtecuisse, A. Vergnol, B. Robyns, M. Radulescu, “Experimental results of a hybrid wind/hydro power system connected to isolated loads. EPE-PEMC. September 1-3, 2008, Poznan, Poland.
- [Ser 06] I. Serban, C. Marinescu and M. Cirstea “Hybrid Power System based on Micro-Hydro and Wind Turbine Generation”, *Optim* 2006, May 18-19-2006, Brasov, Romanie.
- [Som 03] M. Somaraki, “A Feasibility Study of a Combined Wind - Hydro Power Station in Greece”, A thesis submitted for the degree of Master in Science In (Energy Systems and the Environment), University of trathclyde, Department of Mechanical Engineering, Glasgow, October 2003.
- [Spr 09] J. Sprooten, V. Courtecuisse, B. Robyns, J. Deuse "« Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multi source à base d'énergie renouvelable ». *EJEE* vol. 12, N°5-6, pp.553-583, 12-2009.
- [Ver 07] A. Vergnol, « Supervision d'une centrale de production hybride éolienne / hydraulique », *Rapport de Master présenté en Juillet 2007, USTL.*
- [Zur 94] R. Zurawski “Petri net and industrial application: A tutorial”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. n° 41, 1994, pp 567-583.

# **Chapitre IV : Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage connecté à un réseau puissant**

Le quatrième chapitre présente la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage et connecté à un réseau puissant. Cinq superviseurs ont été testés afin d'optimiser la production de l'énergie hydraulique. D'abord, les superviseurs sont analysés et ensuite, le bilan de chaque superviseur est présenté. Enfin, on propose un tableau comparatif de ces cinq superviseurs suivant trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique. On en déduit la nécessité d'introduire des dispositifs de stockage à court et à moyen terme afin d'optimiser l'énergie de la microcentrale hydraulique.



## Chapitre IV

### Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage connecté à un réseau puissant

#### IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé l'association d'une microcentrale hydraulique et une centrale éolienne. Dans ce chapitre, nous aborderons la supervision d'une centrale hybride éolien/hydraulique sans stockage connecté à un réseau puissant.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et de comparer cinq types de superviseurs (proposés dans des travaux antérieurs [Ver 07]) pour la gestion d'une centrale multi sources, afin d'optimiser la production de l'énergie hydroélectrique.

D'abord, nous présenterons les cinq types de superviseurs:

- Un superviseur simple basé sur le bilan des puissances,
- Trois superviseurs basés sur la méthodologie implicite avec utilisation de logique floue
- Un superviseur basé sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation de l'énergie produite par la source hydraulique.

Ensuite, nous ferons le bilan de chaque type de superviseur en s'appuyant sur des indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique.

Enfin, nous proposerons un tableau comparatif de ces cinq types de superviseurs suivant quatre indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique: puissance moyenne hydraulique extraite, puissance moyenne hybride fournie au réseau, écart type et rendement. Pour calculer ces indicateurs, nous utilisons la commande « Data statistics » du Matlab Simulink.

Le critère de maximisation de l'énergie fournie au réseau est lié au rendement, tandis que la qualité de lissage de la puissance hybride est liée à l'écart type.

La structure globale de la centrale hybride considérée dans les simulations est présentée dans la figure 4.1. La centrale multi sources étudiée est constituée d'une éolienne à vitesse fixe associée à une source hydraulique. Les vitesses du vent, qui ont été utilisées pour l'étude, ont été mesurées sur le site de Dunkerque. La puissance éolienne est fixée par les générateurs éoliens et n'est donc pas contrôlable. Seule la puissance de la micro centrale hydraulique est commandée, ce qui permettra de compenser les fluctuations de la puissance éolienne. Pour l'étude des superviseurs, le débit d'eau est supposé constant.

Les simulations ont été effectuées avec le logiciel Matlab-Simulink™

Le tableau 4.1 donne les conditions de simulations des cinq types de superviseurs.

| Paramètres                           | •Unités                   |
|--------------------------------------|---------------------------|
| •Vitesse nominale du vent            | •12 m/sec                 |
| •Puissance nominale de l'éolienne    | •600 kW                   |
| •Puissance nominale de l'hydraulique | •300 kW                   |
| •Débit de l'eau                      | •1000 m <sup>3</sup> /sec |

Tableau 4.1 Paramètres de simulations des cinq types de superviseurs.

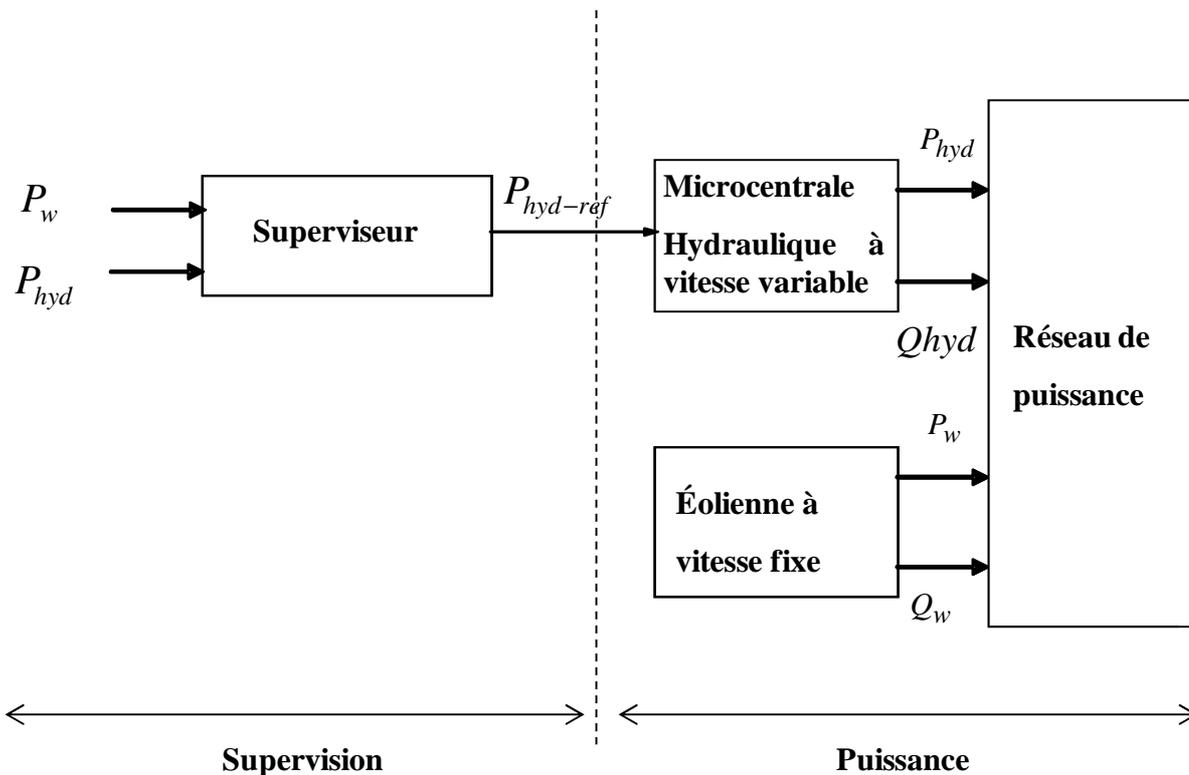


Figure 4.1 Structure globale du système étudié

## IV.2. Supervision basée sur la puissance hydraulique disponible

### IV.2.1 Principe de fonctionnement

Le schéma du principe de fonctionnement est présenté dans la figure 4.2a.

Cette méthode utilise une commande qui s'appuie sur un filtrage (filtre passe-bas) de la puissance éolienne mesurée. Nous rajoutons arbitrairement un pourcentage de la puissance hydraulique disponible à la puissance éolienne filtrée  $P_{hyb} = P_{w-f} + \tau P_{hyd-disp}$ .  $\tau$  est le pourcentage de la puissance hydraulique à produire. L'objectif final étant de réduire la fluctuation  $\Delta P_w = P_{w-f} - P_w$  de la puissance éolienne.

Les écarts  $\Delta P_w$  peuvent être positifs ou négatifs. Pour obliger la microcentrale hydraulique à fonctionner toujours en générateur nous fixons la valeur de  $\tau$  entre 0 et 1.

$\Delta P_w$  est l'écart entre la puissance éolienne disponible  $P_w$  et la puissance éolienne filtrée  $P_{w-f}$ ,  $P_{hyb}$  est la puissance hybride fournie au réseau électrique.

La figure 4.2b montre le principe de cette approche.

Ainsi une réserve de puissance  $(1 - \tau)P_{hyd-disp}$  est obtenue. Plus le pourcentage de  $\tau$  est élevé et plus la réserve de puissance permettant de compenser la fluctuation positive est réduite. Et vice versa.

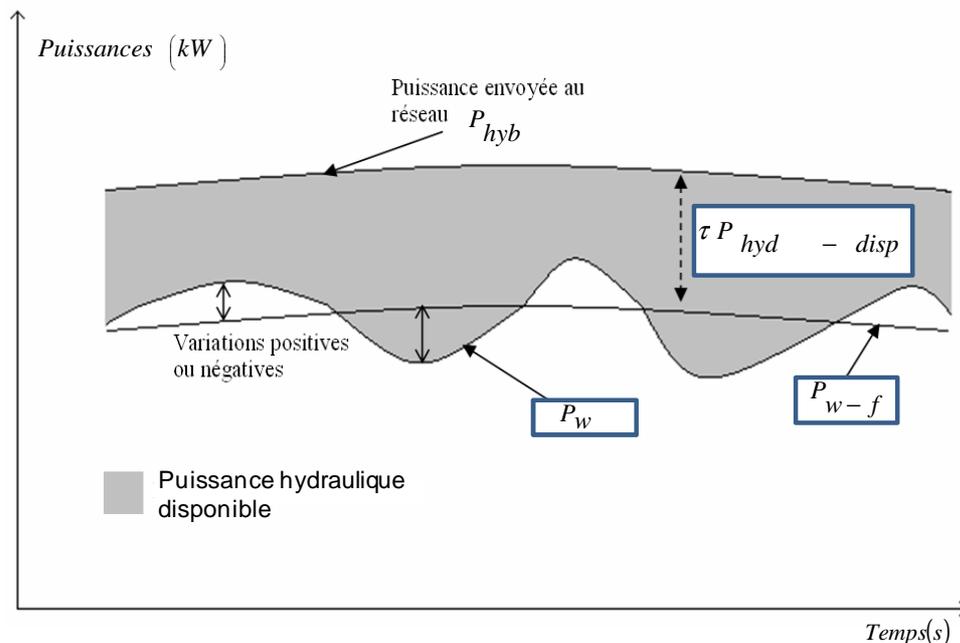


Figure 4.2a Schéma du principe de fonctionnement

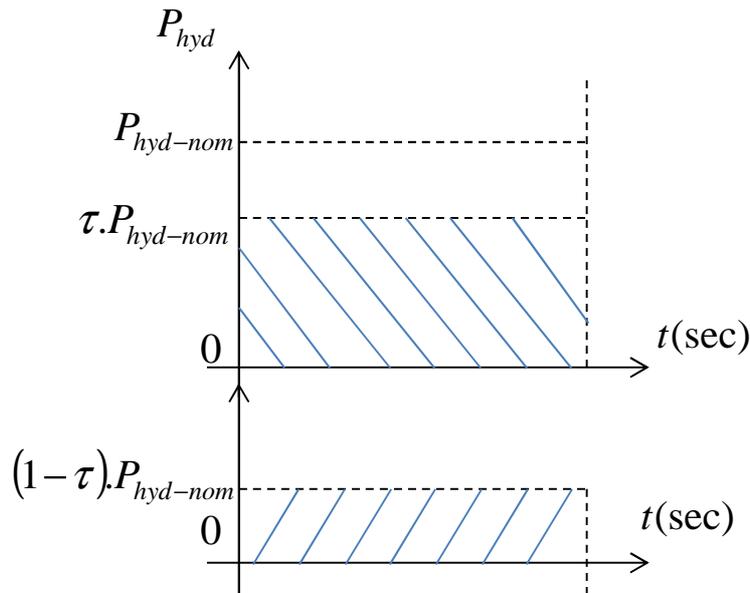


Figure 4.2b Principe de commande de la puissance hydraulique

Dans les trois superviseurs suivants, nous utilisons le même principe. Le superviseur n°1 nous permet de fixer  $\tau$  de façon arbitraire. Le superviseur n°2 est basé sur la logique floue; il nous permet de déterminer  $\tau$  suivant la mesure de la puissance hydraulique afin d'éviter la saturation de la microcentrale hydraulique. Le superviseur n°3 est aussi basé sur la logique floue; il permet de déterminer  $\tau$  suivant l'écart entre la puissance éolienne filtrée et non filtrée, afin d'anticiper les fluctuations.

Le tableau 4.2 présente le cahier des charges de la supervision de la centrale multi sources.

| Objectifs   | Contraintes   | Moyens d'actions  | Outils   |
|---|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li> <li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li> <li>•Les limites de la capacité énergétique de la source hydraulique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•La puissance de référence de la turbine hydraulique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Bilan des puissances</li> <li>•Filtrage et facteur de pondération</li> </ul> |

Tableau 4.2 Cahier des charges de la supervision de la centrale multi sources

## IV.2.2. Le superviseur simple

Pour concevoir la supervision, le bilan des puissances a été utilisé.

### IV.2.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 4.2 présente le cahier des charges du superviseur n° 1.

### IV.2.2.2. Structure du superviseur n°1

La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les objectifs définis au cahier des charges. Cette stratégie est simple, elle consiste à ajouter de façon empirique un pourcentage de la puissance hydraulique disponible à la puissance éolienne filtrée.

La structure du superviseur n°1 est présentée dans la figure 4.3

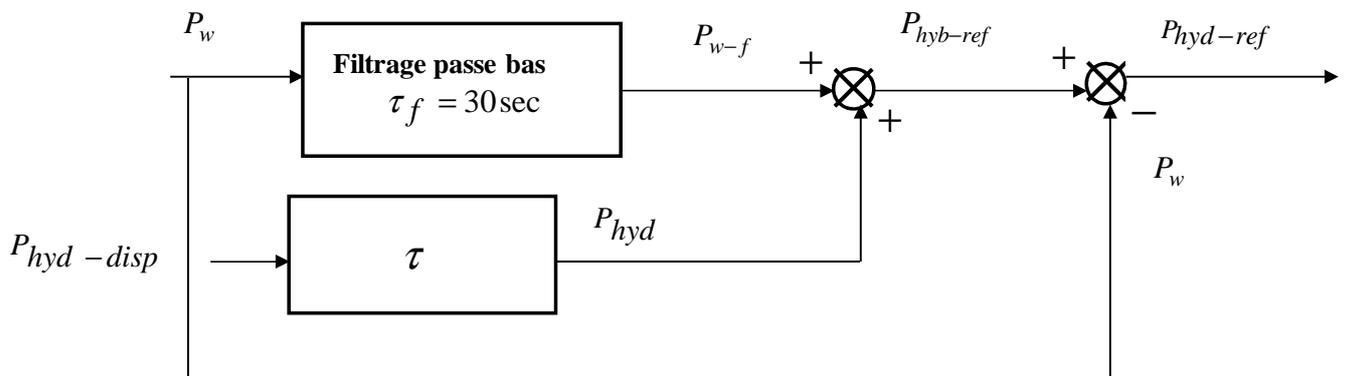


Figure 4.3 Structure du superviseur n° 1

$\tau_f$  est la constante de temps du filtre passe bas.

### IV.2.2.3. Résultat des simulations

Pour les simulations, nous avons choisi deux valeurs de  $\tau$ ,  $\left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right)$ .

$\tau = \frac{1}{3}$  permet de disposer de 200 kW de réserve à la hausse, alors que  $\tau = \frac{2}{3}$  permet de disposer de 200 kW de réserve à la baisse.

La figure 4.4a et la figure 4.4b montrent respectivement les puissances actives produites pour

$$\tau = \frac{1}{3} \text{ et } \tau = \frac{2}{3}$$

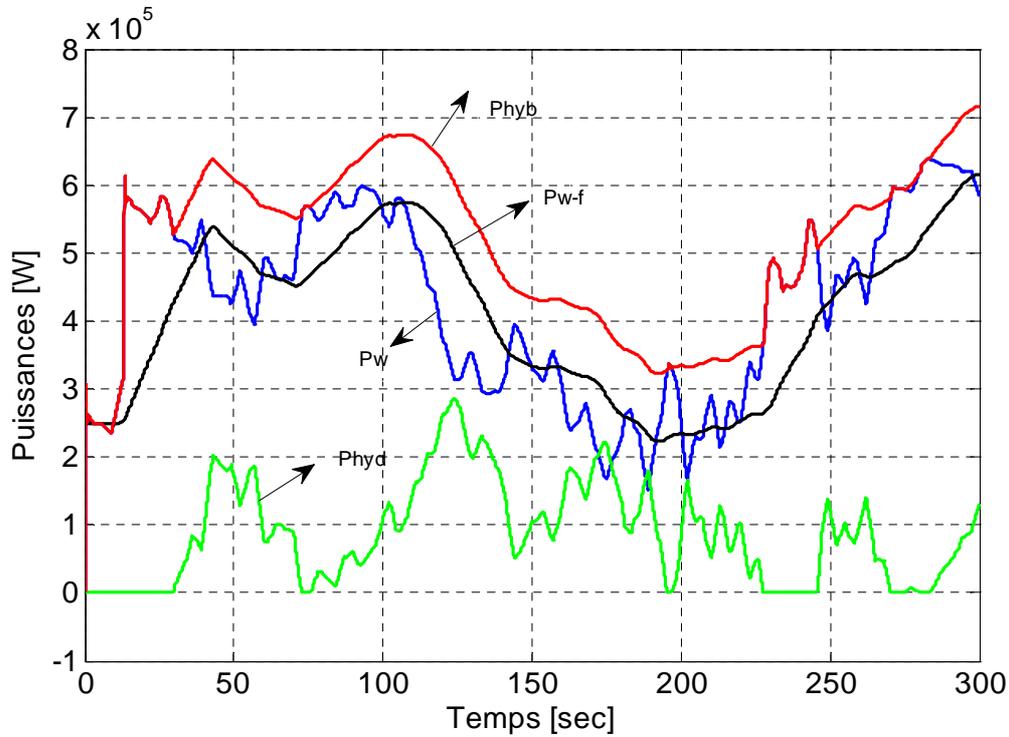


Figure 4.4a Allure des puissances actives de différentes sources pour  $\tau = \frac{1}{3}$

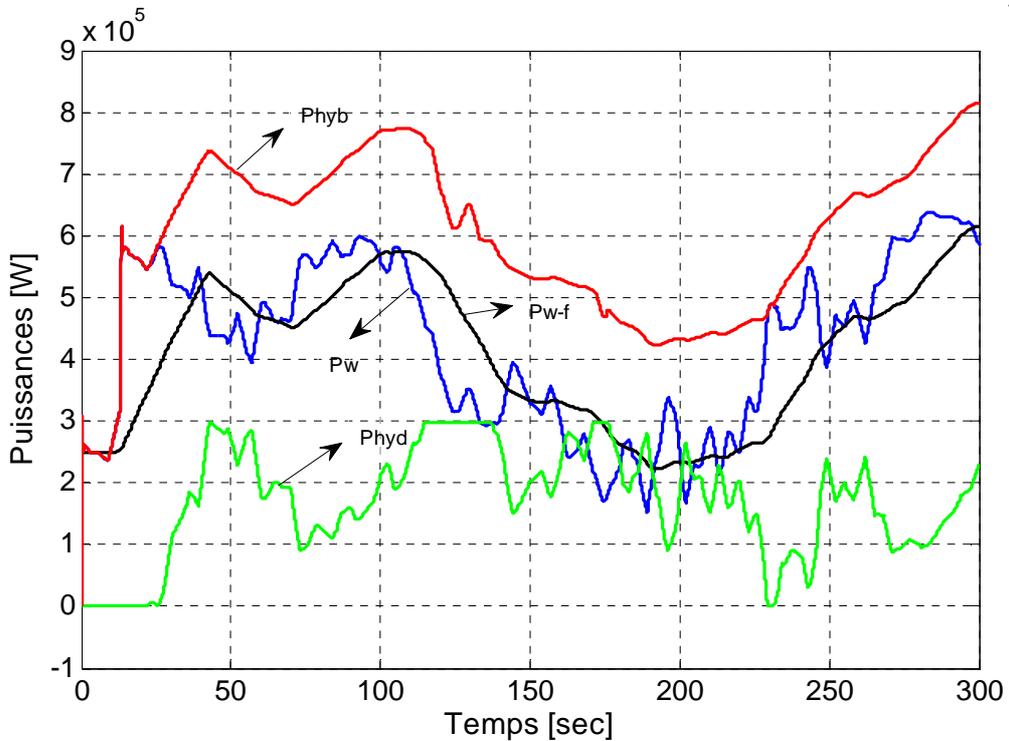


Figure 4.4b Allure des puissances actives de différentes sources pour  $\tau = \frac{2}{3}$

Pour guider et rendre systématique l'interprétation des résultats, nous proposons d'utiliser un tableau d'indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique.

Le tableau 4.3a présente trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur pour  $\tau = \frac{1}{3}$ .

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •425,4 kW         | •Écart type de la source éolienne :<br>136,4 kW   | •100%     |
| •Source hydraulique | • 87,07 kW        | •Écart type de la source hydraulique:<br>73,35 kW | •29%      |
| •Source hybride     | •512,45kW         | •Écart type de la source hybride:<br>122,3kW      | •70,6%    |

Tableau 4.3a Indicateurs pour  $\tau = \frac{1}{3}$

Le tableau 4.3b présente trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur pour  $\tau = \frac{2}{3}$ .

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •425,4 kW         | •Écart type de la source éolienne :<br>136,4 kW   | •100%     |
| •Source hydraulique | • 171,5 kW        | •Écart type de la source hydraulique:<br>86,94 kW | •57,16%   |
| •Source hybride     | •596,9kW          | •Écart type de la source hybride:<br>131,9kW      | •82,28%   |

Tableau 4.3b Indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique pour  $\tau = \frac{2}{3}$

#### IV.2.2.4. Interprétation des résultats :

A partir des résultats du tableau 4.3a et du tableau 4.3b, nous remarquons que la stratégie avec un facteur  $\tau = \frac{2}{3}$  permet d'extraire plus de puissance hydraulique (171,5 kW au lieu de 87,07 kW) et donc plus de puissance hybride envoyée au réseau, en revanche on obtient un meilleur lissage de la puissance hybride avec un facteur  $\tau = \frac{1}{3}$ .

A partir des résultats de la figure 4.4a et la figure 4.4b, nous remarquons la saturation de la microcentrale hydraulique.

#### IV.2.2.5. Conclusion

Cette stratégie nécessite de prévoir les données du profil de vent pour établir le choix de la valeur de  $\tau$ . Cette méthode manque de souplesse. Des données statistiques (fin de ce chapitre) ont permis une comparaison de cette stratégie avec les quatre stratégies suivantes.

Pour éviter la production de l'énergie hydroélectrique de façon aléatoire et la saturation de la microcentrale hydraulique, nous utiliserons dans la suite soit une méthodologie implicite qui s'appuie sur des connaissances empiriques traduites sous formes de règles à l'aide du formalisme des ensembles flous, soit une méthodologie explicite avec une fonction d'optimisation.

### IV.2.3. Supervision basée sur la méthodologie implicite avec utilisation de logique floue

#### IV.2.3.1. Introduction

L'objectif de cette stratégie de supervision est de pouvoir maximiser l'énergie hydraulique extraite. On utilise la logique floue pour commander la puissance hydraulique à extraire. Nous proposons d'utiliser la méthodologie implicite améliorée à base de logique floue en employant une supervision conçue pour un système éolien /hydraulique [Spr 09], [Cou 10], [Bor 98].

Le superviseur flou a une entrée (la puissance hydraulique disponible) et une sortie (le facteur  $\tau$  ). En conclusion, nous donnerons les interprétations des résultats des simulations.

#### IV.2.3.1. Méthodologie pour la construction du superviseur n°2

La méthodologie implicite de conception du système de supervision est basée sur six étapes.

##### 1. Détermination du cahier de charge

Pour présenter le cahier des charges de la supervision, nous nous appuyons sur le tableau 4.4.

| Objectifs  | Contraintes  | Moyens d'actions  | Outils  |
|--|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li><li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li><li>•Les limites de la capacité énergétique de la source hydraulique.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•La puissance de référence de la turbine hydraulique.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•La logique floue</li></ul> |

Tableau 4.4 Cahier des charges du superviseur n° 2

## 2. Structure du superviseur n°2

Une bonne gestion de la source de production hydraulique grâce à la vitesse variable de son générateur, va permettre d'accroître la productivité totale de la source hybride et d'éviter sa saturation. L'objectif du superviseur est de déterminer le facteur  $\tau$  pour définir la puissance de référence hybride

$$P_{hyb-ref}$$

La structure du superviseur n°2 est présentée dans la figure. 4.5

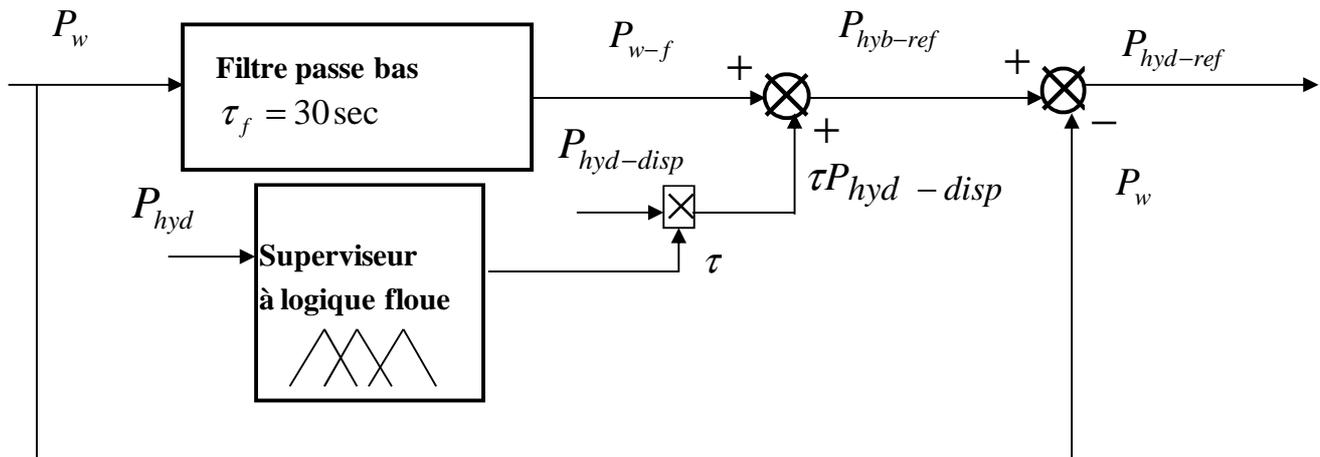


Figure 4.5 Structure du superviseur n°2

## 3. Détermination des « graphes fonctionnels »

La stratégie du superviseur flou du système multi sources peut être définie graphiquement. Cette définition graphique présente les avantages suivants :

- Une expression littérale des objectifs et sous objectifs à atteindre, des contraintes et des moyens d'action permettant d'établir les lois floues pertinentes à chaque mode de fonctionnement et donc de limiter la complexité du superviseur.
- Offrir un cadre d'échanges entre champs disciplinaires divers. Par exemple, les choix des sources énergétiques et leurs rôles clé dans l'économie.
- Une transition entre les modes déterminés par l'état de certaines parties du système, état qui peut être décrit par des variables floues qui sont des entrées du superviseur, permettant ainsi des transitions lissées entre les modes de fonctionnement et la possibilité pour le système de fonctionner dans plusieurs modes simultanément.

Dans la mesure où la logique floue intègre la logique booléenne, elle permet de retrouver des approches plus classiques de type réseaux de Pétri ou GRAFCET.

Le graphe fonctionnel du superviseur étudié est présenté à la figure 4.6.

Les modes de marche sont représentés par des rectangles aux bords arrondis et les états du système par des transitions entre ces modes.

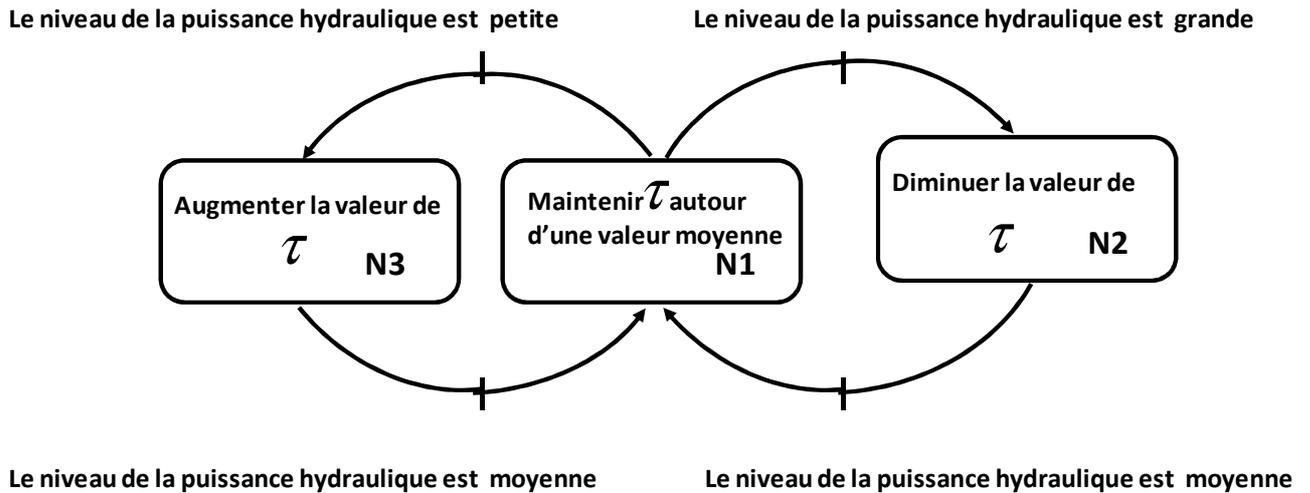


Figure 4.6 Graphe fonctionnel du superviseur à base de logique floue

Comme illustré à la figure 4.6, l'objectif est de lisser la puissance envoyée à la source. Les transitions d'un mode à un autre sont définies par l'état de la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  mesurée.

N1, N2, N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires alors que les transitions (niveau de la puissance hydraulique) peuvent être vues comme de contraintes appliquées au système.

Chaque mode de marche (N1, N2, N3) sera donc lié à un jeu de lois floues.

Les transitions entre les différents modes de marche seront gérées par un autre jeu de lois floues. Les transitions entre les différents modes de marche seront donc continues ce qui rend possible l'appartenance simultanée à différents modes et de ce fait de tendre à atteindre simultanément des objectifs différents. Lorsque les trois conditions sont satisfaites, trois lois floues agissent sur la même sortie. La valeur finale de cette sortie sera le centre de gravité d'une fonction déterminée par la logique floue [Büh 94]. Cette approche permet des transitions douces d'un mode de marche à un autre.

N1: Si la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  est moyenne, alors le superviseur contrôle la puissance de référence tout en maximisant la puissance venant de la centrale hydraulique.

N2: Si la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  est élevée, alors le superviseur réduit la valeur de  $\tau$

N3: Si la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  est faible, alors le superviseur augmente la valeur de  $\tau$

#### 4. Détermination des fonctions d'appartenance

L'étape suivante de la méthodologie proposée est la détermination des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur à logique floue. Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche.

La figure 4.7 représente la fonction d'appartenance de la grandeur d'entrée  $P_{hyd}$ .

Le nombre d'états flous (Petit, Moyen et Grand) a été choisi afin de faciliter les réglages du superviseur, ce qui permet de traiter très simplement des fonctions linéaires par morceaux en entrée.

Les ensembles notés « P » et « G » représentent respectivement les états « Petit » et « Grand », ils assurent la réserve d'énergie nécessaire pour la contribution de la centrale hydraulique. L'ensemble noté « M », représente l'état « Moyen », il est utilisé dans le scénario proposé pour compenser les écarts entre la puissance filtrée et non filtrée de l'éolienne.

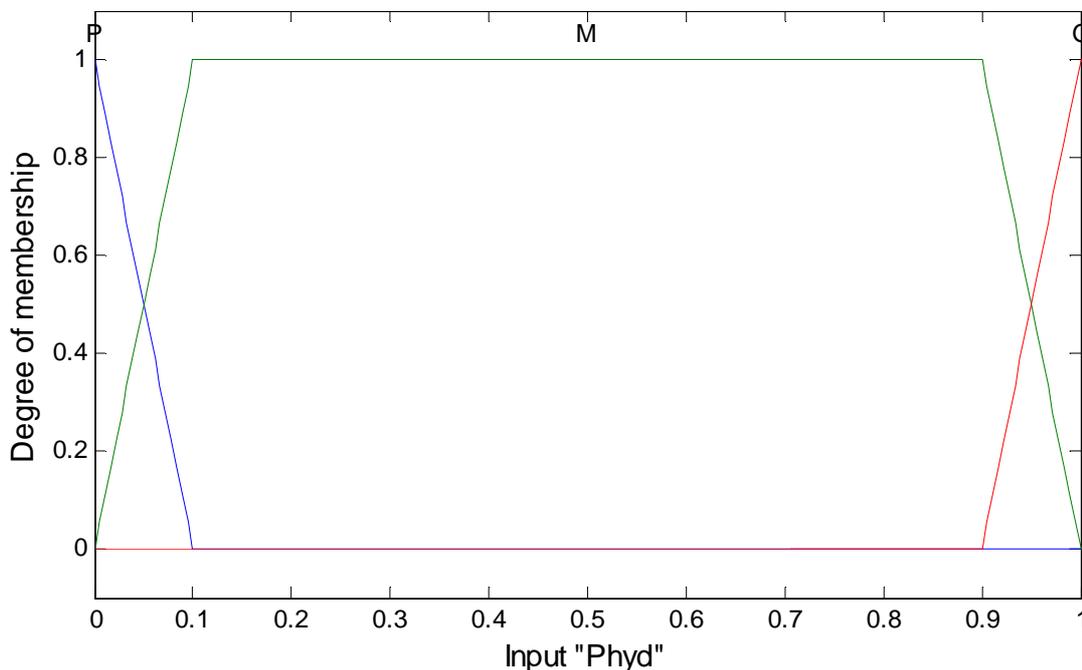


Figure 4.7 Fonction d'appartenance de grandeur d'entrée  $P_{hyd}$

La figure 4.8 représente la fonction d'appartenance de grandeur de sortie  $\tau$

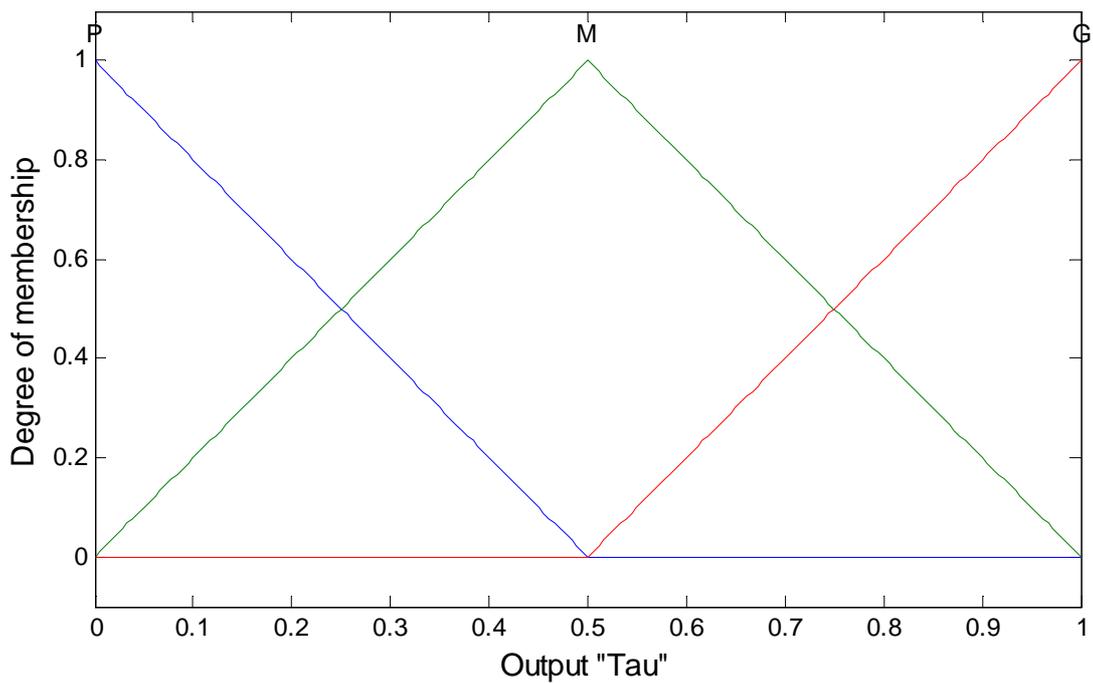


Figure 4.8 Fonction d'appartenance de  $\tau$

### 5. Détermination des « graphes opérationnels »

Il est nécessaire de traduire les « graphes fonctionnels » en « graphes opérationnels » dans lesquels interviennent les fonctions d'appartenance définies précédemment. Les transitions entre les modes opérationnels seront décrites par les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrées et les actions des modes opérationnels par les fonctions d'appartenance des grandeurs de sortie. Cette démarche mène au graphe opérationnel de la figure 4.9.

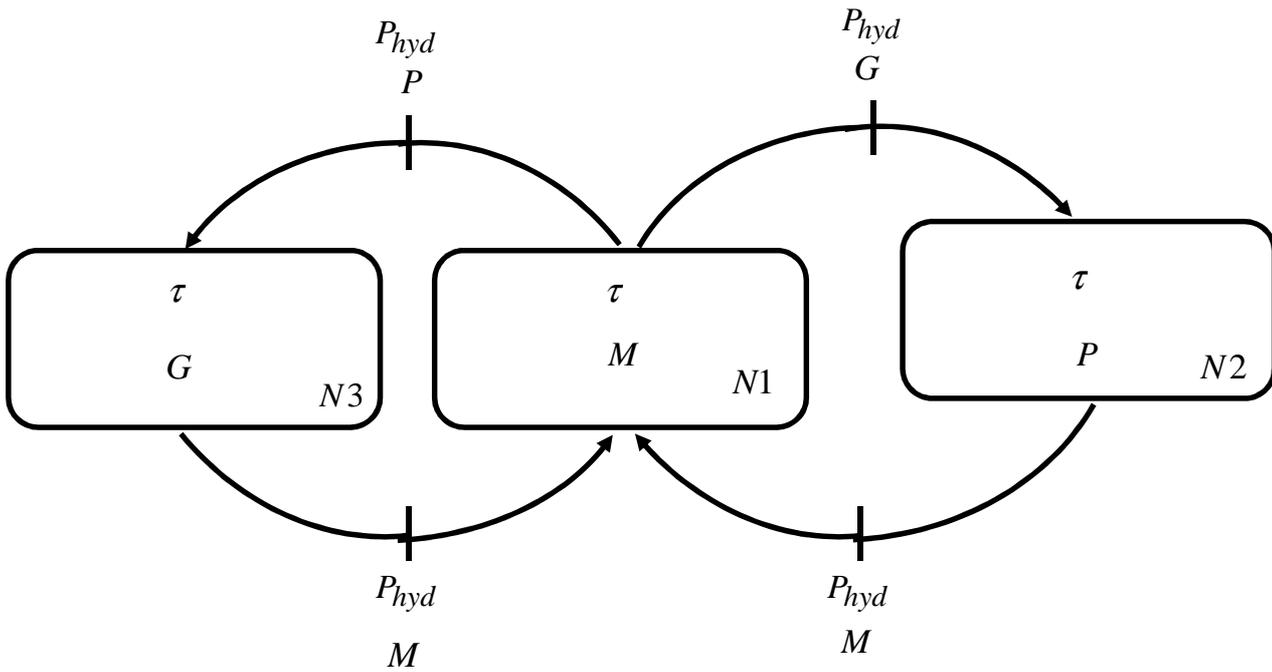


Figure 4.9 Graphe opérationnel du superviseur à base de logique floue

## 6. Extraction des lois floues

A partir du diagramme de la figure 4.9, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Si  $P_{hyd}$  est P alors  $\tau$  est G

Si  $P_{hyd}$  est M alors  $\tau$  est M

Si  $P_{hyd}$  est G alors  $\tau$  est P

### IV.2.3.2. Résultat des simulations

Les paramètres utilisés pour cette simulation sont précisés dans le tableau 4.1

L'allure des puissances actives des différentes sources est présentée dans la figure 4.10

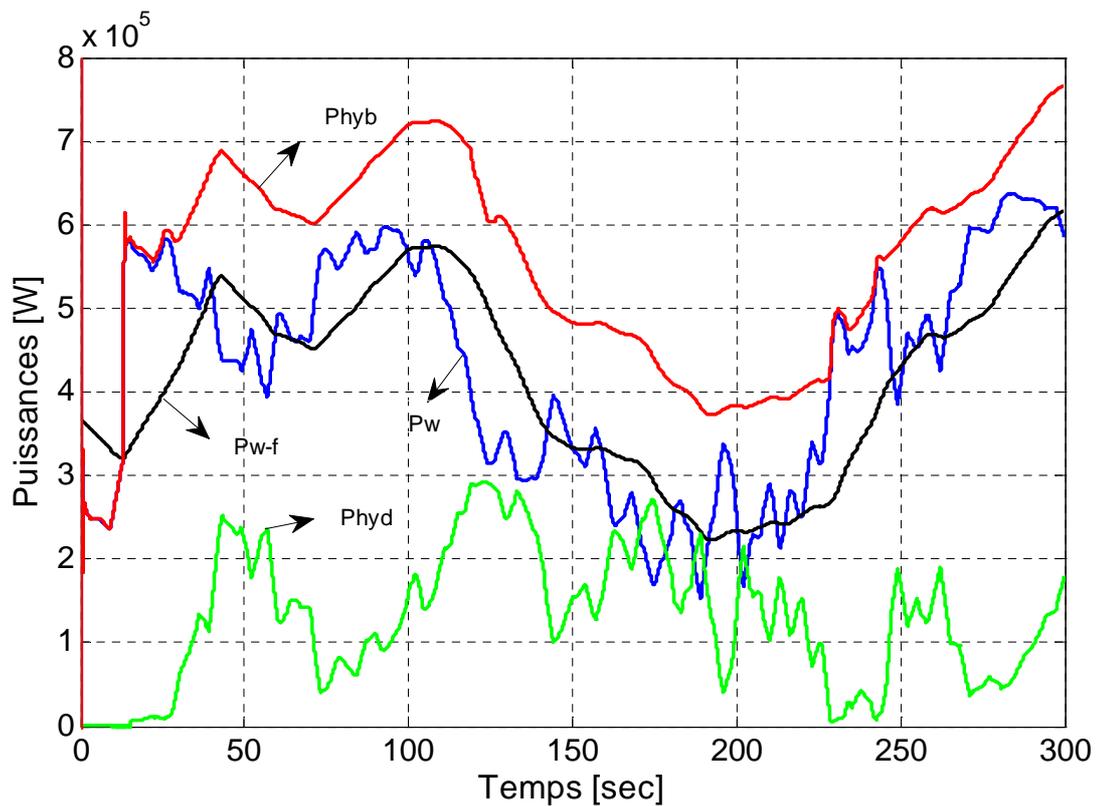


Figure 4.10 Allure des puissances actives de différentes sources

#### IV.2.3.3. Interprétation

Le tableau 4.5 présente trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°2.

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •425,4 kW         | •Écart type de la source éolienne:<br>136,4 kW    | •100%     |
| •Source hydraulique | • 129,8 kW        | •Écart type de la source hydraulique:<br>79,79 kW | •43,26%   |
| •Source hybride     | •555,2kW          | •Écart type de la source hybride:<br>127,3kW      | •76,53%   |

Tableau 4.5 Indicateurs du superviseur n°2

A partir des résultats de la figure 4.10, et le tableau 4.5 nous remarquons que la stratégie de commande de la puissance hydraulique à l'aide de superviseur flou permet d'éviter la saturation de la microcentrale hydraulique.

#### **IV.2.3.4. Conclusion**

La stratégie de commande de la puissance hydraulique à l'aide de superviseur flou permet d'éviter la saturation. Une légère amélioration du lissage de la puissance hybride se traduit par une légère baisse de production de celle-ci. Pour trouver un compromis entre la maximisation de production de l'énergie hydroélectrique et la qualité de lissage de puissance hybride nous utiliserons dans la suite une stratégie de commande qui s'appuie sur l'écart entre la puissance éolienne filtrée et non filtrée.

### IV.3. Supervision basée sur l'écart entre la puissance filtrée et non filtrée de l'éolienne

#### IV.3.1. Introduction

Cette commande s'appuie sur le filtrage de la puissance éolienne comme dans la supervision simple (§ IV.2). Le facteur  $\tau$  sera calculé par le superviseur flou qui aura comme grandeur d'entrée  $\Delta P = P_{w-f} - P_w$ , la différence de puissance filtrée et non filtrée de l'éolienne.

Cela permettra de contrôler le niveau de puissance envoyée par la centrale hydraulique pour éviter des saturations qui empêchent le lissage de la puissance envoyée au réseau.

#### IV.3.2. Méthodologie pour la construction du superviseur n°3

Nous utilisons la méthodologie implicite pour la construction du superviseur n°3.

##### IV.3.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 4.6 présente le cahier des charges du superviseur n°3.

| Objectifs  | Contraintes  | Moyens d'actions  | Outils  |
|--|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li><li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li><li>•Les limites de la capacité énergétique de la source hydraulique.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•La puissance de référence de la turbine hydraulique.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•La logique floue</li></ul> |

Tableau 4.6 Cahier des charges du superviseur n°3

### IV.3.2.2. Structure du superviseur n°3

La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les objectifs définis au cahier des charges.

On a comme entrée, l'écart entre la puissance filtrée et non filtrée de éolienne. Comme sortie, on a la valeur de  $\tau$  souhaitée.

L'objectif du superviseur est de déterminer le facteur  $\tau$  pour définir la puissance de référence hybride  $P_{hyb-ref}$ .

La Structure du superviseur étudié est présentée dans la figure. 4.11.

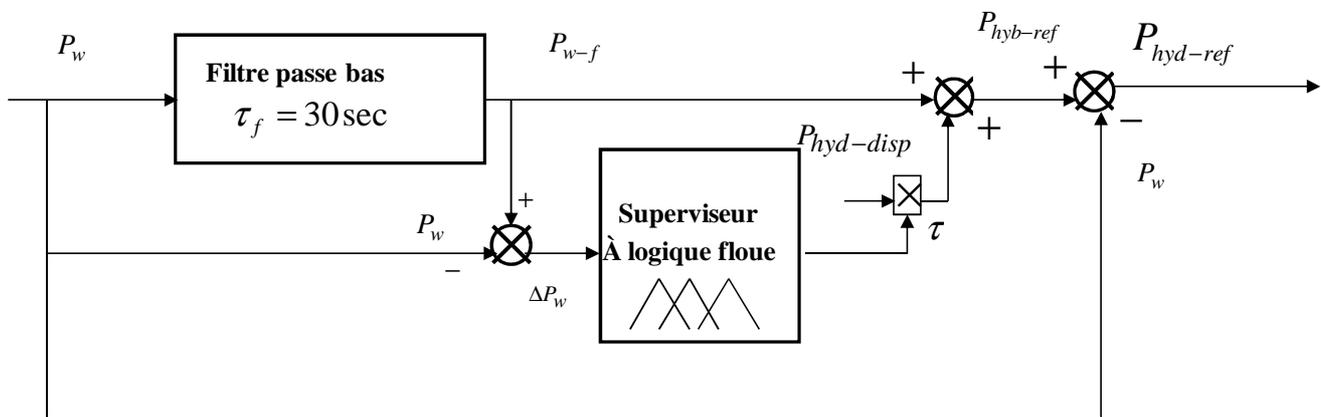


Figure 4.11 Structure du superviseur étudié

### IV.3.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels »

La stratégie du superviseur flou du système multi sources peut être définie graphiquement.

Le graphe fonctionnel du superviseur étudié est présenté à la figure 4.12.

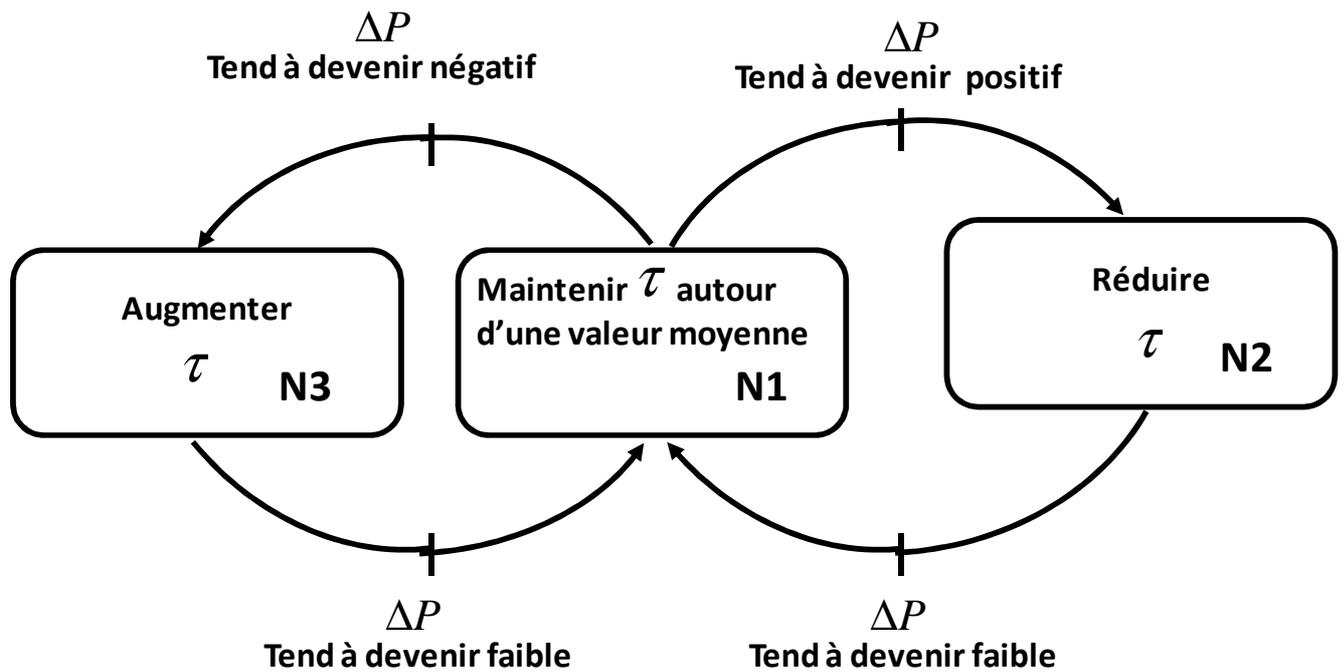


Figure 4.12 Graphe fonctionnel du superviseur à base de logique floue

N1, N2, N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires alors que les transitions (Ecart des puissances) peuvent être vues comme des contraintes appliquées au système.

N1: Si l'écart des puissances  $\Delta P = P_{w-f} - P_w$  est faible, la centrale multi sources doit contrôler la puissance de référence tout en maximisant la puissance venant de la centrale hydraulique.

N2: Si l'écart des puissances  $\Delta P = P_{w-f} - P_w$  est positif, le superviseur réduit  $\tau$  afin de disposer de réserve à la hausse plus élevée.

N3: Si l'écart des puissances  $\Delta P = P_{w-f} - P_w$  est négatif, le superviseur augmente  $\tau$  afin de disposer de réserve à la baisse, donc, d'augmenter la production hydraulique.

#### IV.3.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance

L'étape suivante de la méthodologie proposée est la détermination des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur à logique floue. Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche.

La figure 4.13 représente la fonction d'appartenance de la grandeur d'entrée  $\Delta P$ .

Les ensembles notés « P<sup>+</sup> » et « N<sup>-</sup> » représentent respectivement les états « Positif » et « Négatif », ils assurent la réserve d'énergie nécessaire pour la contribution de la centrale hydraulique. L'ensemble noté « Z », représente l'état « Zéro », il est utilisé dans le scénario proposé pour maximiser la contribution de l'hydraulique.

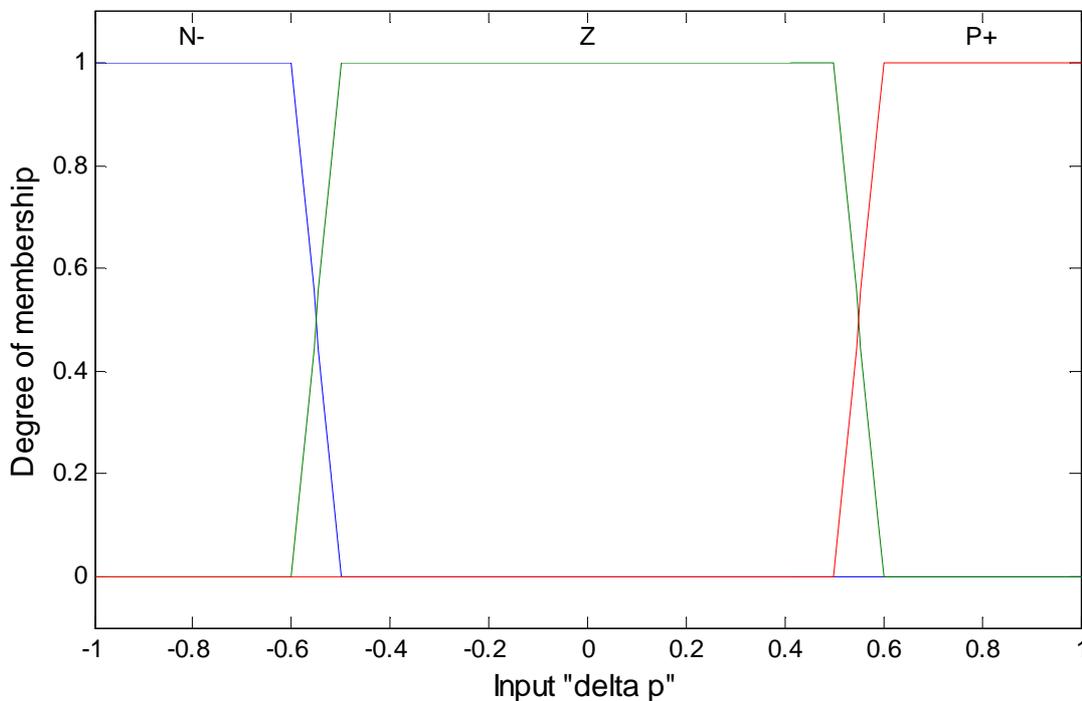


Figure 4.13 Fonction d'appartenance de  $\Delta P$

La figure 4.14 représente la fonction d'appartenance de grandeur de sortie  $\tau$

Les ensembles notés « P » et « G » représentent respectivement les états « Petit » et « Grand ». L'ensemble noté « M », représente l'état « Moyen ».

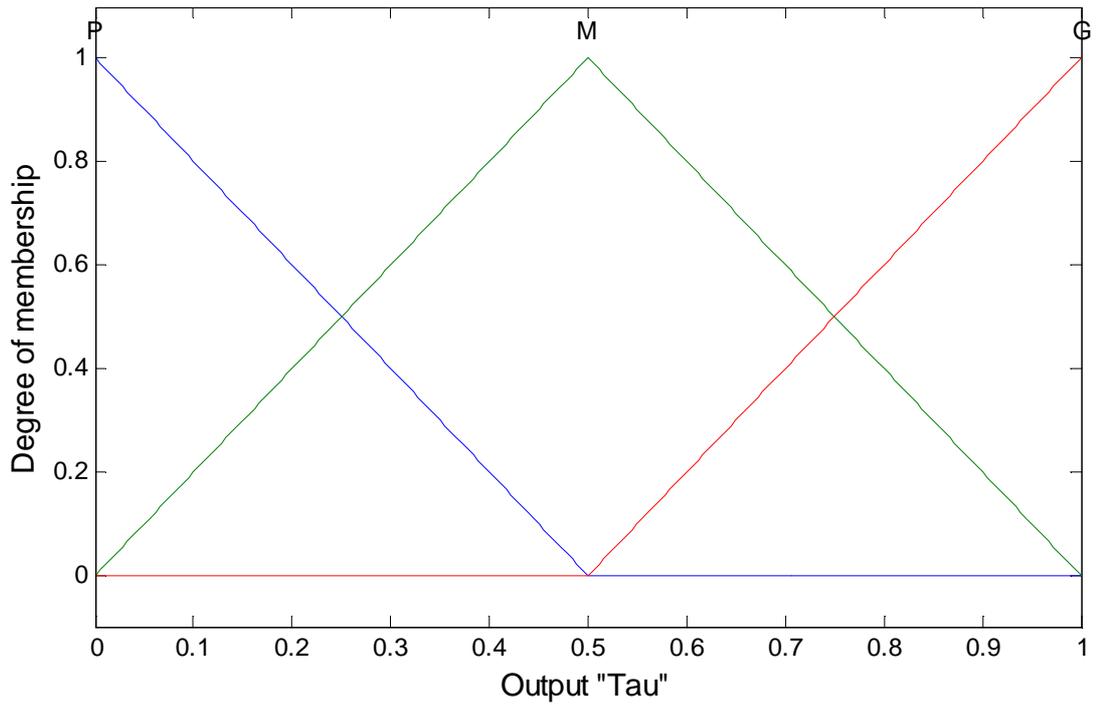


Figure 4.14 Fonction d'appartenance de  $\tau$

#### IV.3.2.5. Détermination des « graphes opérationnels »

Cette démarche mène au graphe opérationnel de la figure 4.15.

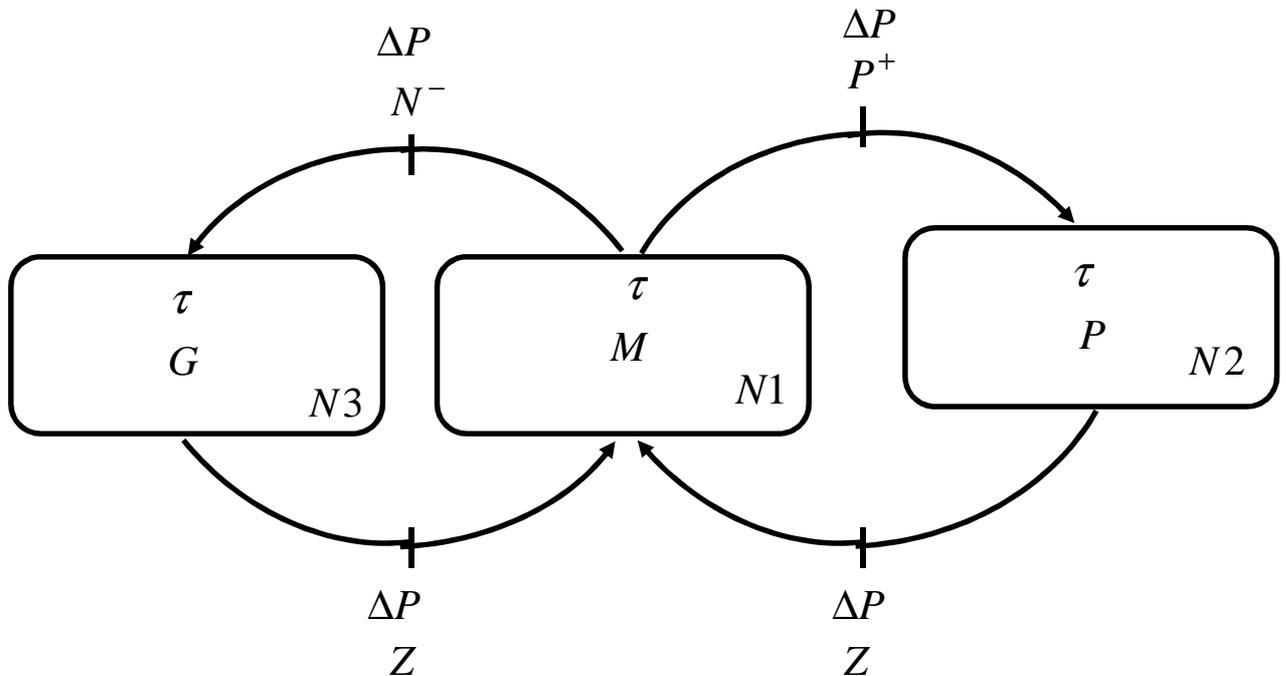


Figure 4.15 Graphe opérationnel du superviseur à base de logique floue

### IV.3.2.6. Extraction des lois floues

A partir du diagramme de la figure 4.15, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Si  $\Delta P$  est N<sup>-</sup> alors  $\tau$  est G

Si  $\Delta P$  est Z alors  $\tau$  est M

Si  $\Delta P$  est P<sup>+</sup> alors  $\tau$  est P

### IV.3.3. Résultat des simulations

L'allure des puissances actives de différentes sources est présentée dans la figure 4.16.

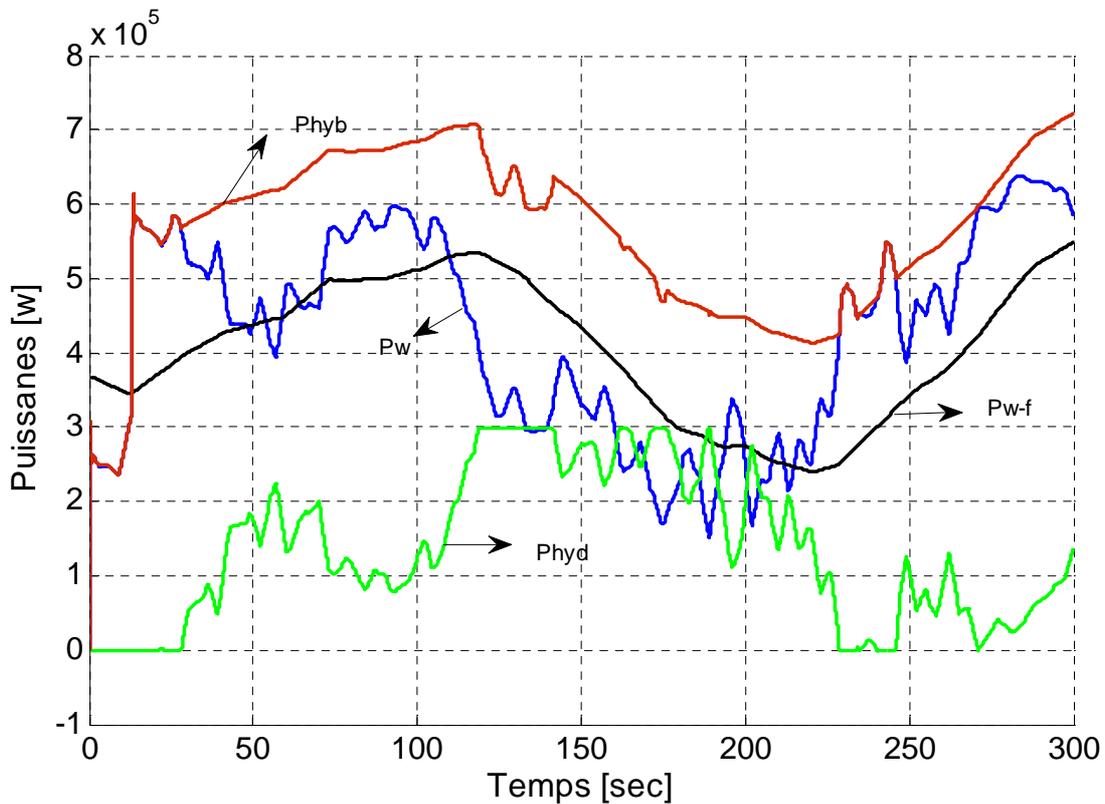


Figure 4.16 Allure des puissances actives de différentes sources

### IV.3.2. Interprétation

Le tableau 4.7 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°3.

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •425,4 kW         | •Écart type de la source éolienne:<br>136,4 kW    | •100%     |
| •Source hydraulique | • 138,2 kW        | •Écart type de la source hydraulique:<br>79,79 kW | •46,6%    |
| •Source hybride     | •563,6kW          | •Écart type de la source hybride:<br>109,5kW      | •77,69%   |

Tableau 4.7 Indicateurs du superviseur n°3

A partir des résultats du tableau 4.7 et de la figure 4.16, nous remarquons la saturation de la puissance hydraulique produite pendant plusieurs intervalles de temps, cependant son rendement passe de 43,26% à 46,6%. Également, nous constatons une amélioration de la qualité d'énergie envoyée au réseau, puisque l'écart type de la puissance hybride passe de 122,3 kW à 109,5 kW.

### IV.3.2. Conclusion

Nous constatons une augmentation de la puissance hydraulique extraite, sa saturation pendant plusieurs intervalles de temps et une augmentation de la puissance hybride délivrée au réseau avec une diminution de la fluctuation de la puissance multi sources.

Pour améliorer davantage le superviseur n°3 nous utiliserons dans la suite une stratégie de commande qui s'appuie sur la puissance hybride. La constante  $\tau$  ne sera plus utilisée, cependant le superviseur suivant aura deux entrées.

## IV.4. Supervision basée sur la puissance hybride

### IV.4.1. Introduction

On détermine la puissance de référence hybride  $P_{hyb - ref}$  à partir de la puissance éolienne filtrée

$P_{w - f}$  et de la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  grâce à l'utilisation du superviseur flou.

Cela permettra de contrôler le niveau de puissance envoyée par la centrale hydraulique pour éviter des saturations qui empêchent le lissage de la puissance envoyée au réseau.

### IV.4.2. Méthodologie pour la construction du superviseur

Nous utilisons la méthodologie implicite pour la construction de notre superviseur

#### IV.4.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 4.8 présente le cahier des charges du superviseur n°4.

| Objectifs  | Contraintes  | Moyens d'actions  | Outils  |
|--|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li><li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li><li>•Les limites de la capacité énergétique de la source hydraulique.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•La puissance de référence de la turbine hydraulique.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•La logique floue</li></ul> |

Tableau 4.8 Cahier des charges du superviseur n°4

#### IV.4.2.2. Structure du superviseur n°4

La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les objectifs définis au cahier des charges.

On a comme entrée, la puissance éolienne filtrée et la puissance hydraulique. Comme sortie, on a la puissance de référence hydraulique  $P_{hyb-ref}$

La Structure du superviseur étudié est présentée dans la figure. 4.17.

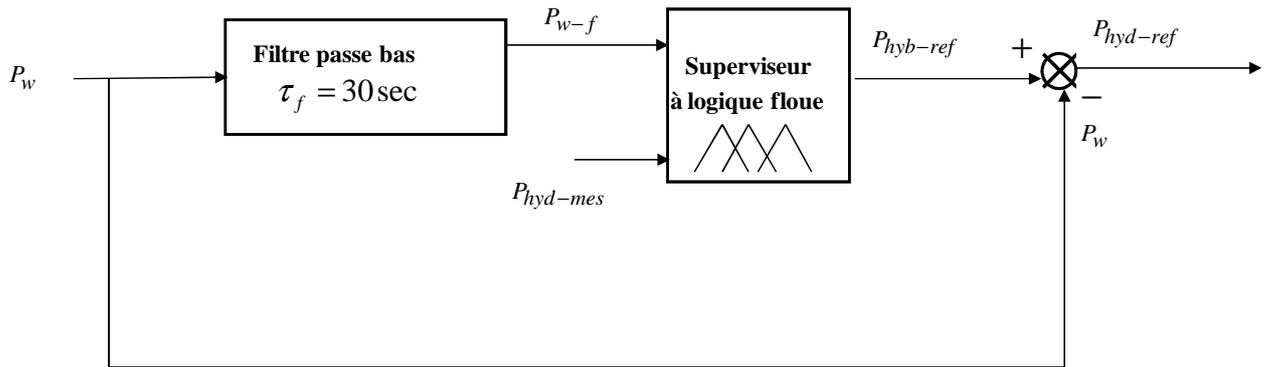


Figure 4.17 Structure du superviseur n°4

#### IV.4.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels »

La stratégie du superviseur flou du système multi sources peut être définie graphiquement.

Le graphe fonctionnel du superviseur étudié est présenté à la figure 4.18

N1, N2, N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires alors que les transitions (niveau de la puissance hydraulique) peut être vue comme des contraintes appliquées au système.

N1: Si la puissance hydraulique  $P_{hyd-mes}$  est moyenne, alors le superviseur contrôle la puissance hybride de référence tout en maximisant la puissance venant de la centrale hydraulique.

N2: Si la puissance hydraulique  $P_{hyd-mes}$  est élevée, alors le superviseur réduit la consigne de  $P_{hyb-ref}$

N3: Si la puissance hydraulique  $P_{hyd-mes}$  faible, alors le superviseur augmente la consigne de  $P_{hyb-ref}$

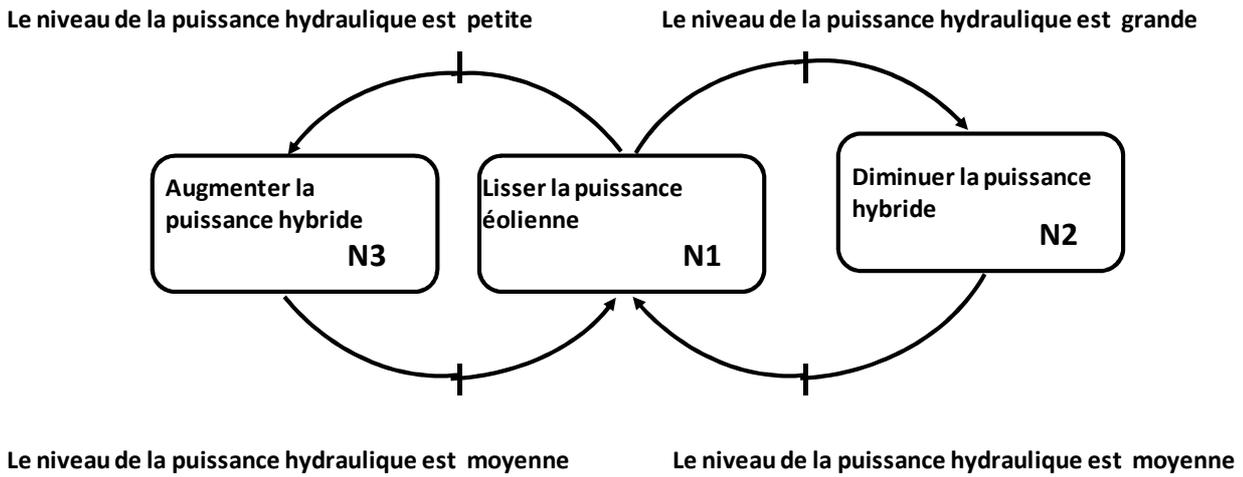


Figure 4.18 Le graphe fonctionnel du superviseur étudié

Les sous graphes fonctionnels du superviseur étudié sont présentés aux figure 4.18a, figure 4.18b et figure 4.18c.

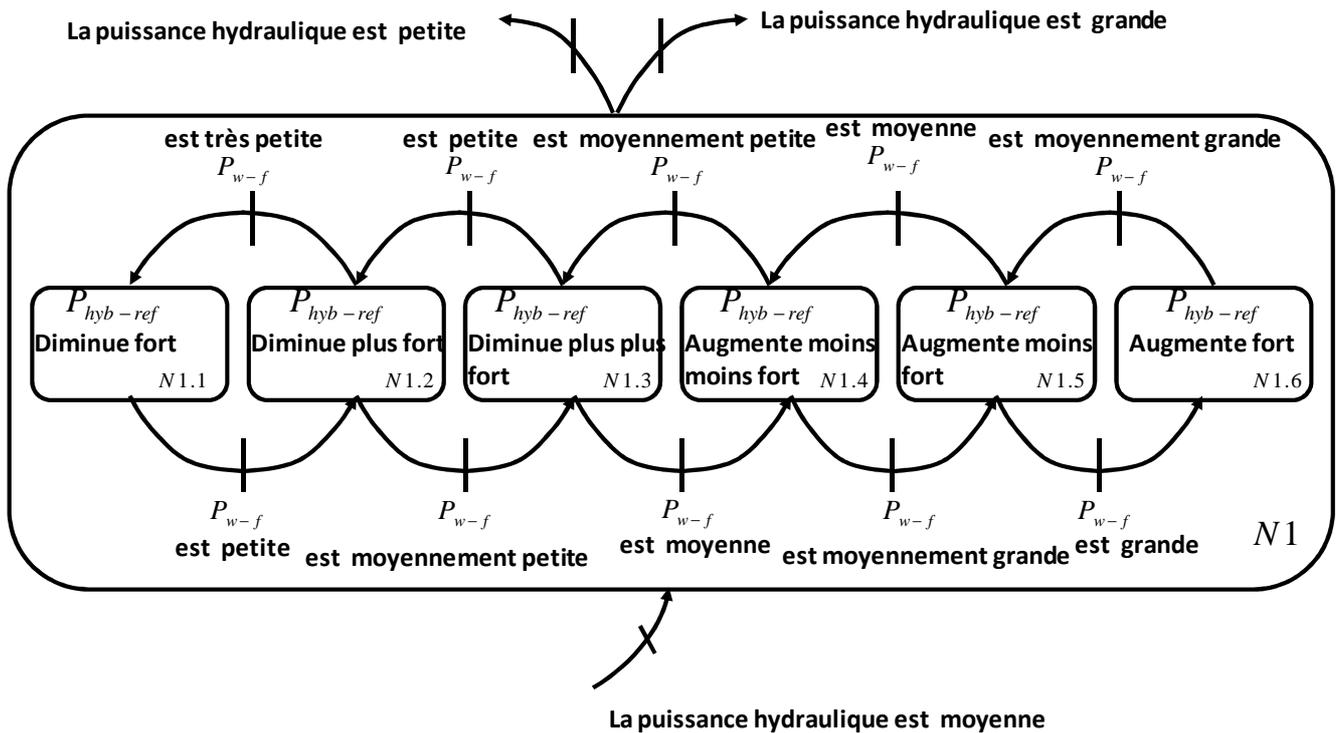


Figure 4.18a Le sous graphe fonctionnel N1

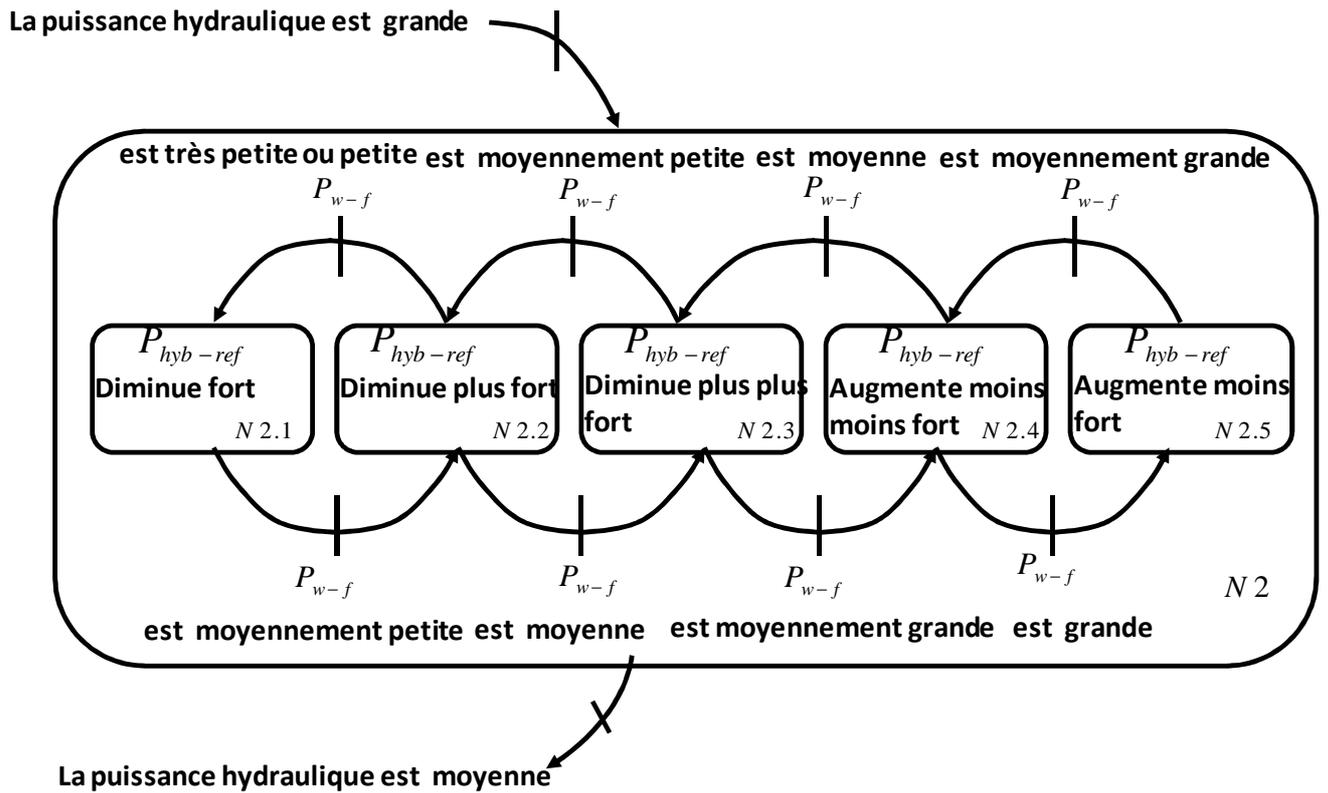


Figure 4.18b Le sous graphe fonctionnel N2

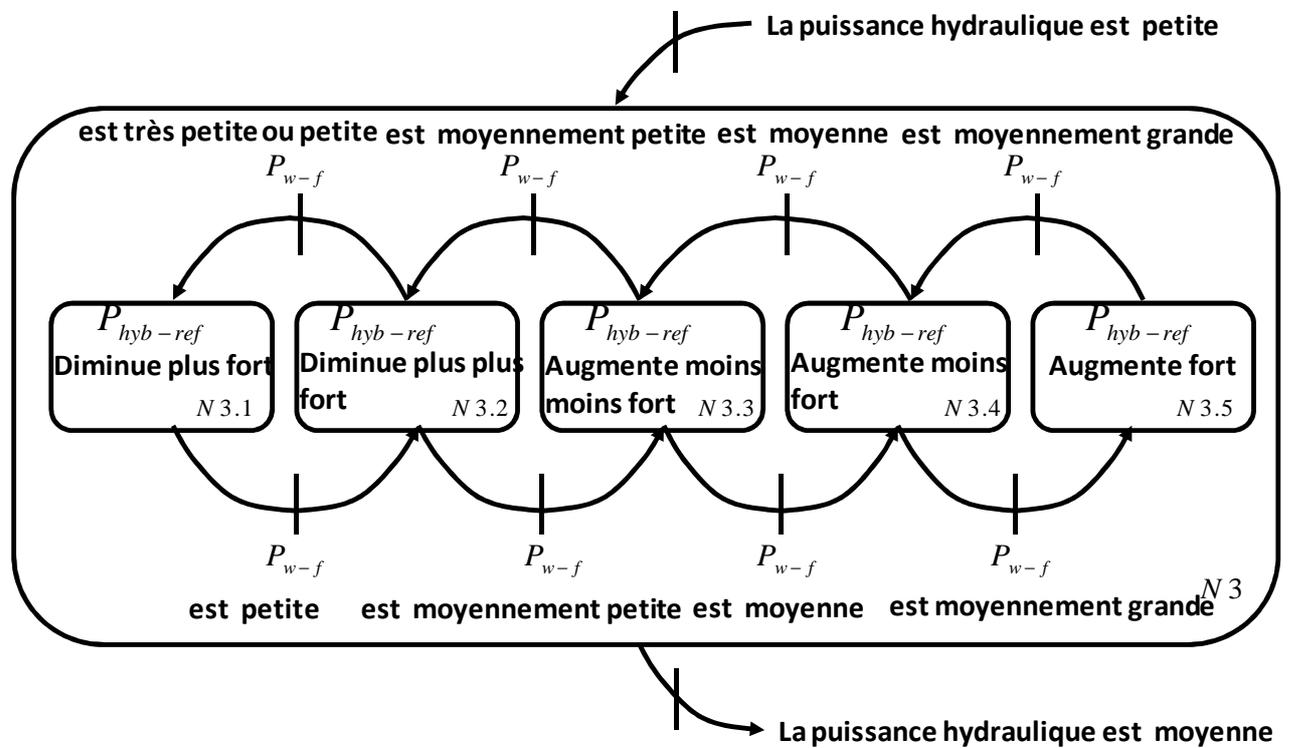


Figure 4.18c Le sous graphe fonctionnel N3

#### IV.4.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance

L'étape suivante de la méthodologie proposée est la détermination des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur à logique floue. Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche.

La figure 4.19 représente la fonction d'appartenance des grandeurs d'entrée  $P_w - f$  et  $P_{hyd}$ .

Où on considère, G : Grand; M: Moyen; P: Petit, TP : très petit, MP: Moyen petit, MG: Moyen grand.

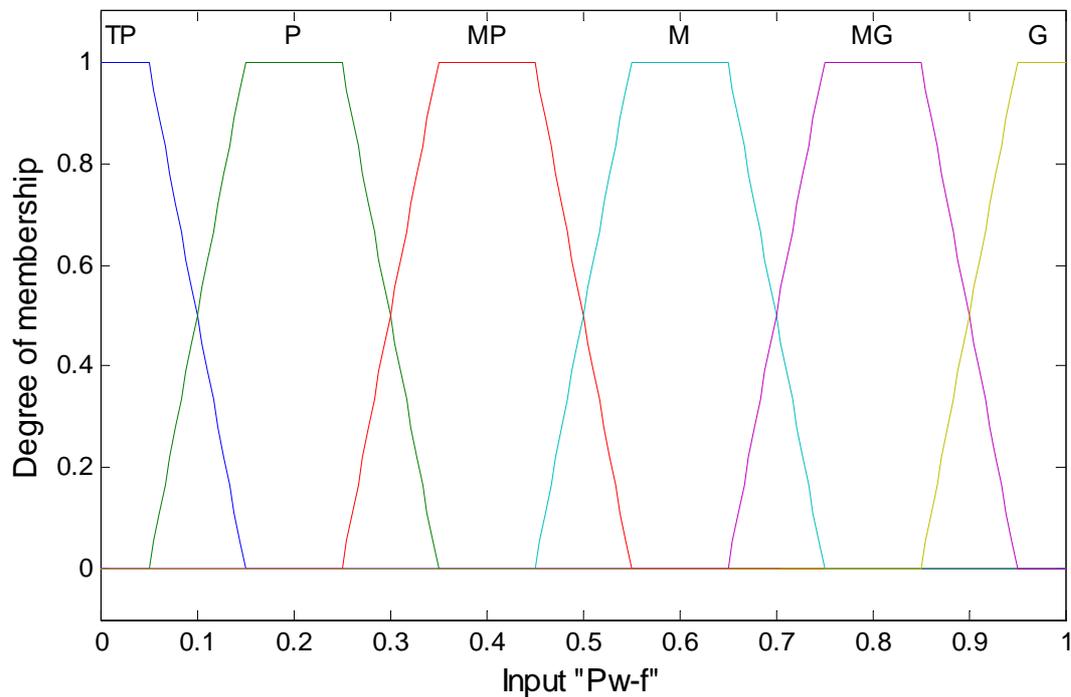


Figure 4.19a Fonction d'appartenance de  $P_w - f$

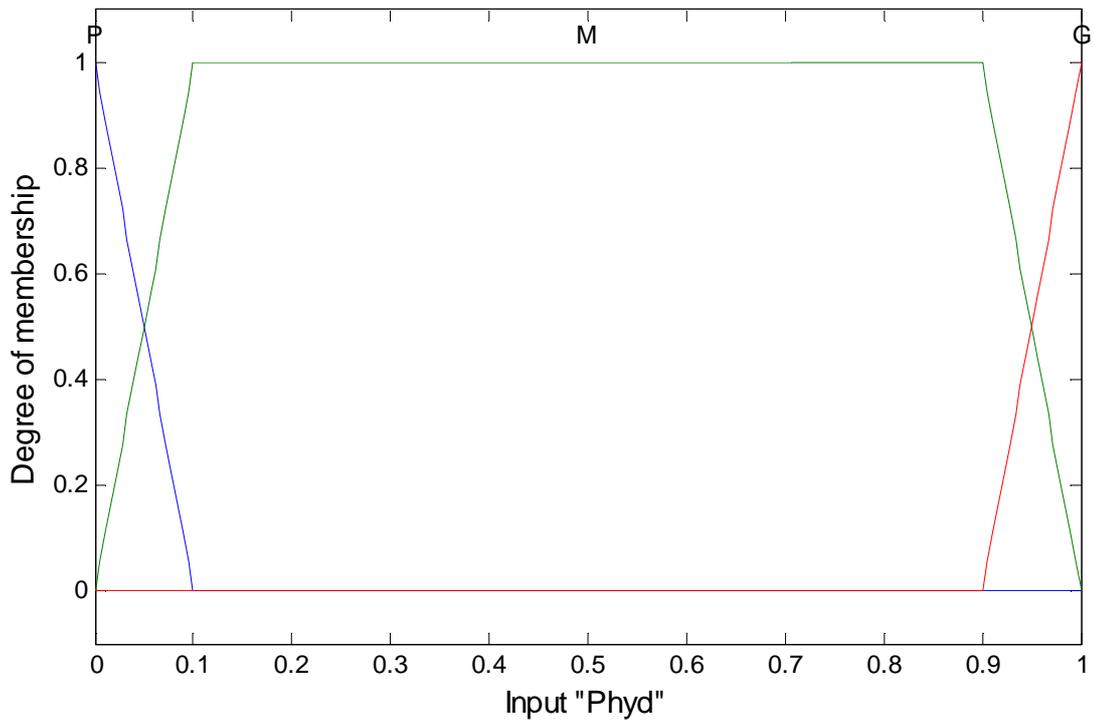


Figure 4.19b Fonction d'appartenance de  $P_{hyd}$

La figure 4.20 représente la fonction d'appartenance de grandeur de sortie  $P_{hyb - ref}$

Où on considère, G : Grand; M: Moyen; P: Petit, TP : Très petit, MP: Moyen petit, MG: Moyen grand, MMP Moyen moyen petit, MMG: Moyen moyen grand.

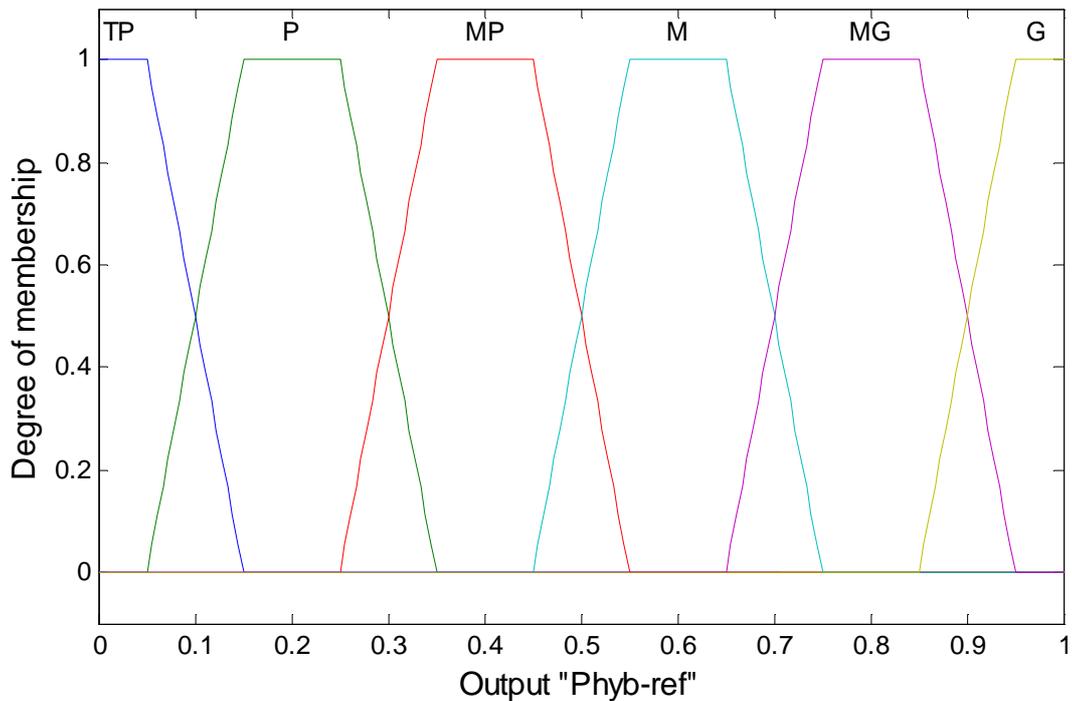
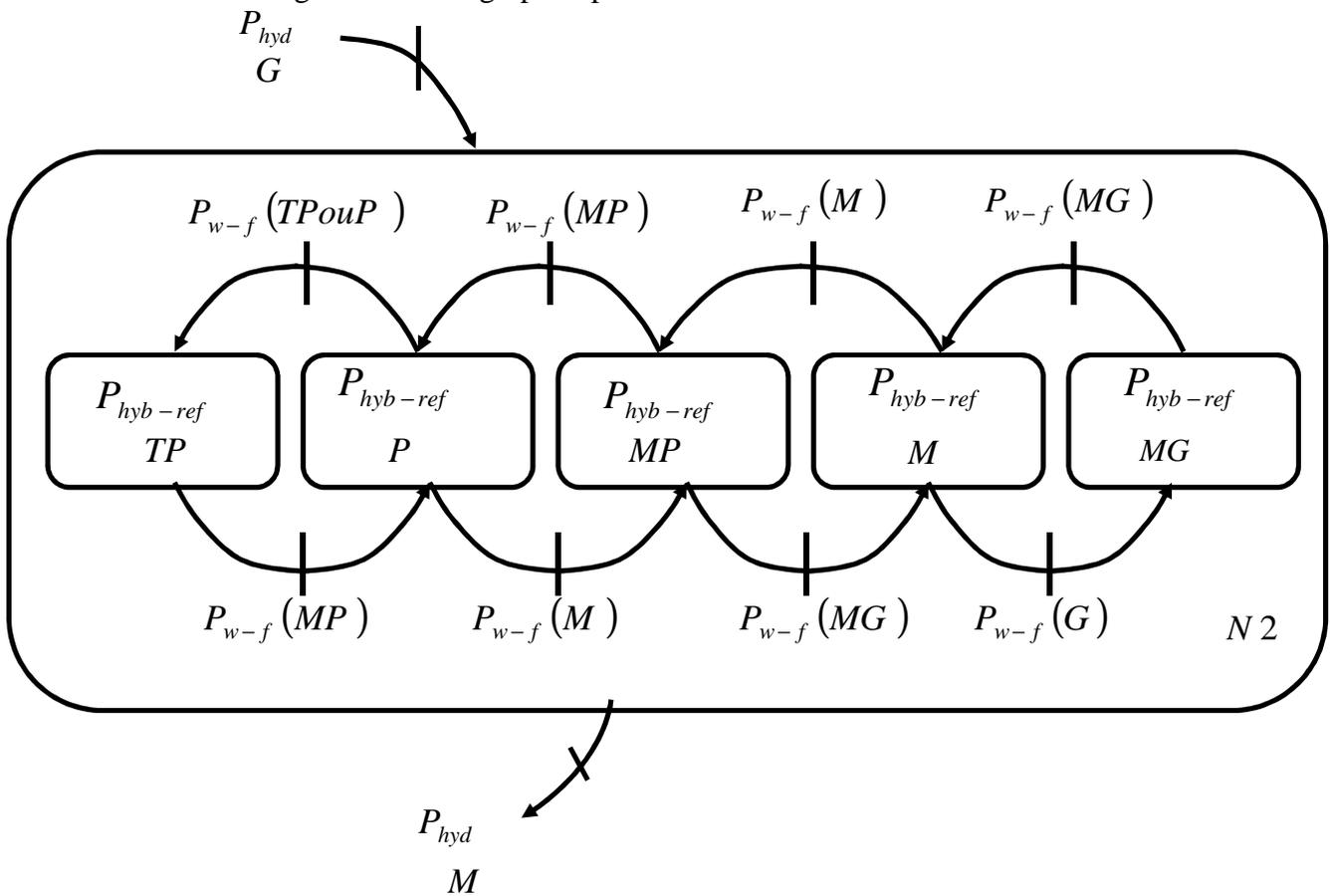
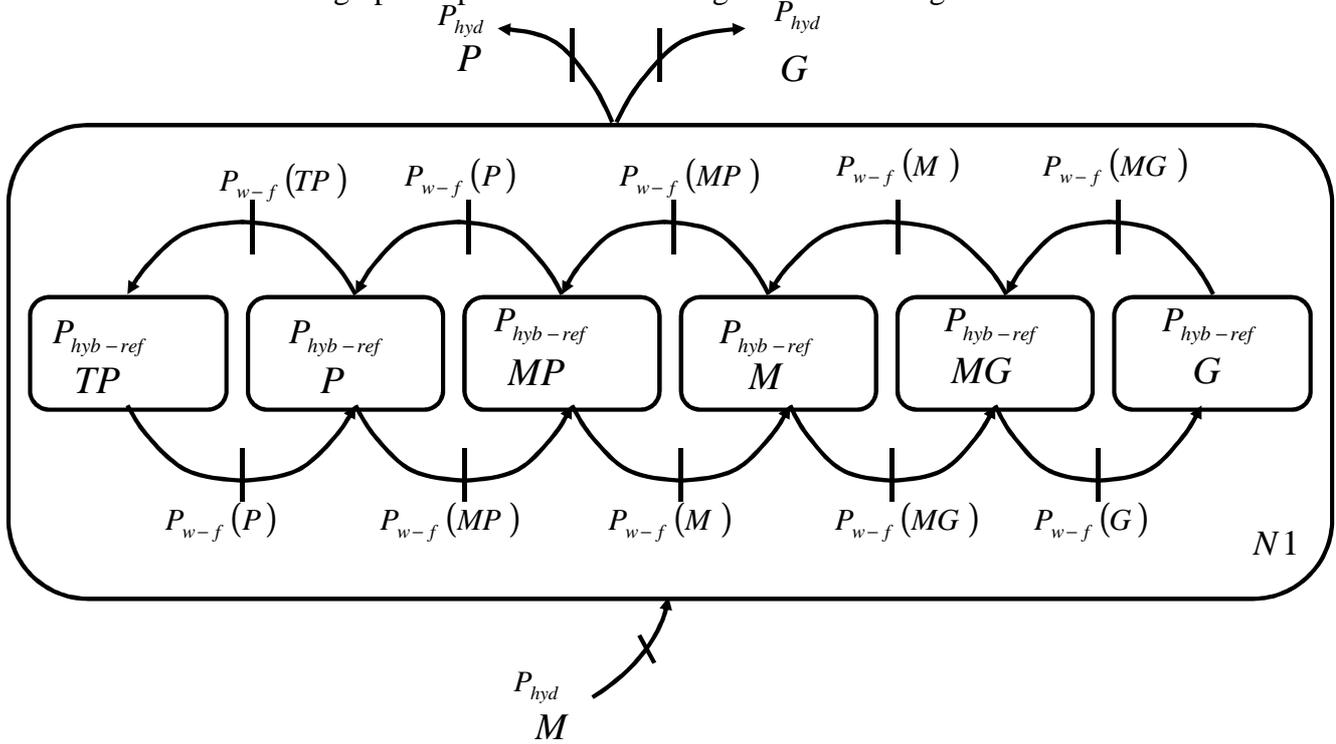


Figure 4.20 Fonction d'appartenance de grandeur de sortie  $P_{hyb - ref}$

#### IV.4.2.5. Détermination des « graphes opérationnels »

Cette démarche mène aux graphes opérationnels de la figure 4.21a à la figure 4.21c



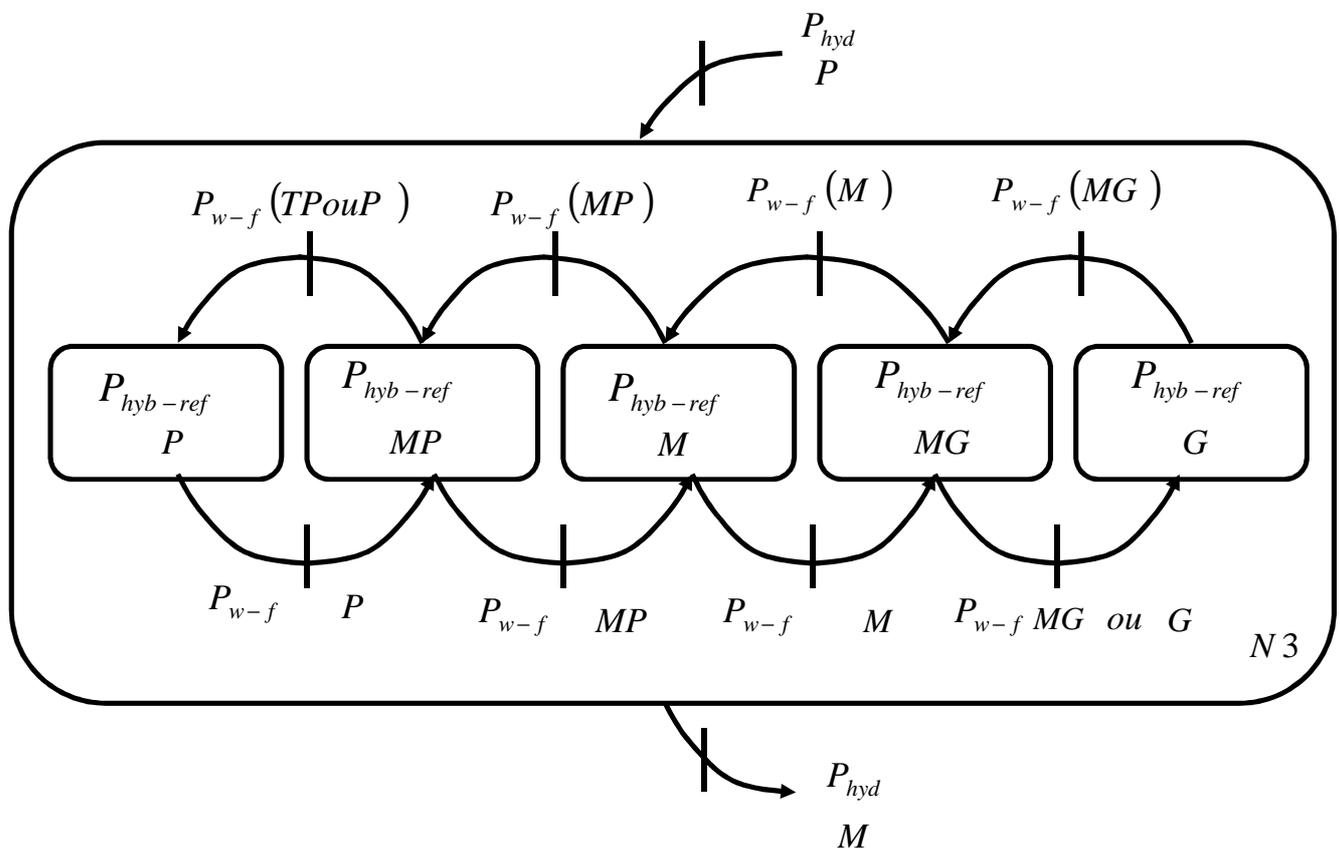


Figure 4.21c Le graphe opérationnel de mode de marche N3

#### IV.4.2.6. Extraction des lois floues

A partir du diagramme de la figure 4.21, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Le Tableau 4.9 présente les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement du superviseur

| $P_{hyb-ref}$ |    | $P_{hyd}$ |    |    |
|---------------|----|-----------|----|----|
|               |    | P         | M  | G  |
| $P_{w-f}$     | TP | P         | TP | TP |
|               | P  | MP        | P  | TP |
|               | MP | M         | MP | P  |
|               | M  | MG        | M  | MP |
|               | MG | G         | MG | M  |
|               | G  | G         | G  | MG |

Tableau 4.9 Les lois floues des 3 modes de fonctionnement du superviseur

### IV.4.3. Résultat des simulations

L'allure des puissances actives de différentes sources est présentée dans la figure 4.22

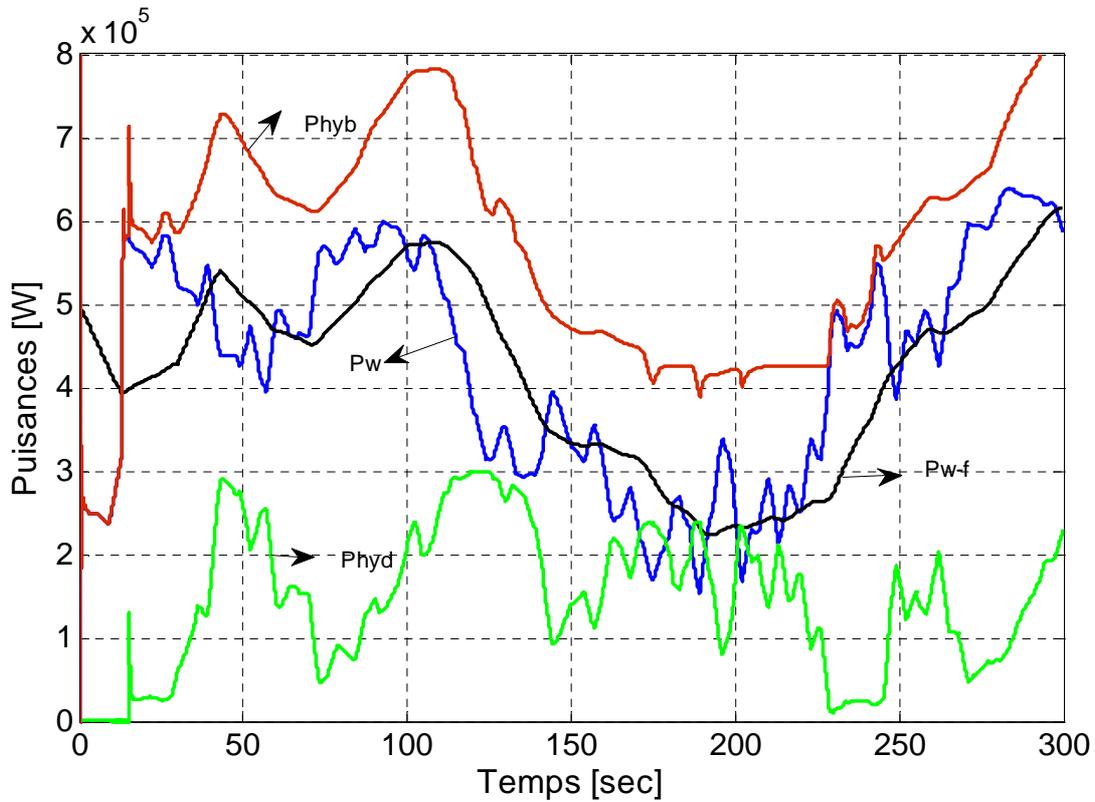


Figure 4.22 Allure des puissances actives de différentes sources

### IV.4.4. Interprétation

Le tableau 4.10 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°4.

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •425,4 kW         | •Écart type de la source éolienne:<br>136,4 kW    | •100%     |
| •Source hydraulique | •146,4 kW         | •Écart type de la source hydraulique:<br>83,54 kW | •48,8%    |
| •Source hybride     | •571,8 kW         | •Écart type de la source hybride:<br>137,4 kW     | •78,82%   |

Tableau 4.10 Indicateurs du superviseur n°4.

A partir des résultats du tableau 4.10 et de la figure 4.22, nous remarquons une augmentation de la puissance hydraulique produite, néanmoins, nous constatons une baisse de la qualité d'énergie envoyée au réseau, puisque l'écart type de la puissance hybride augmente.

#### **IV.4.5. Conclusion**

Cette stratégie de supervision nous permet d'obtenir un juste milieu entre la puissance hybride maximale productible et un meilleur lissage grâce à la forme trapézoïdale des ensembles flous. La forme trapézoïdale des ensembles flous permettent d'effectuer des paliers pour réduire la variation brusque de  $P_{hyb} - ref$ .

Au final, nous avons une augmentation de la puissance hydraulique extraite, et donc une augmentation de la puissance hybride délivrée au réseau mais une augmentation de la fluctuation de puissance multi sources.

Pour explorer un autre outil de conception de superviseur, nous utiliserons dans la suite une stratégie de commande qui s'appuie sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation.

## IV.5 Supervision basée sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation de l'énergie produite par la source hydraulique [Cal, 04], [Ver, 07]

### IV.5.1. Introduction

L'objectif de ce superviseur est d'optimiser la puissance fournie par la source hybride à l'aide du critère énergétique et de l'écart type. Pour cela, une fonction d'optimisation a été construite [Cul 94].

La méthodologie explicite nécessite la prévision des données du vent pour établir les paramètres de la fonction d'optimisation afin de maximiser la puissance hybride à produire.

### IV.5.2. Fonction d'optimisation

Dans notre étude, le problème d'optimisation peut être posé de la manière suivante. Il consiste à trouver le jeu de paramètres permettant au système hybride de maximiser la puissance produite par la microcentrale hydraulique et de diminuer la fluctuation de la puissance hybride. Pour tenir compte de ces contraintes, nous proposons d'utiliser les expressions (4.1) et (4.2)

L'équation (4.1) donne l'énergie produite par la centrale hybride :

$$E_n = (M (P_{hybi})).t \quad (4.1)$$

L'équation (4.2) donne l'écart type de la puissance hybride:

$$E_c = \sqrt{M ((P_{hybi}))^2 - (M ((P_{hybi})))^2} \quad (4.2)$$

Avec :

$P_{hybi}$  : Puissance hybride mesurée de 1 à i

$$P_{hybi} = P_{hydi} + P_{wi}$$

$P_{hydi}$  : Puissance hydraulique mesurée de 1 à i

$P_{wi}$  : Puissance éolienne mesurée de 1 à i

- $t$  : Temps de simulation  
 $M$  : Moyenne de la puissance hybride

Nous avons associé, au critère énergétique et à l'écart type, deux paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  pour aboutir à l'expression de la fonction d'optimisation (4.3)

L'équation (4.3) donne la fonction d'optimisation:

$$F(\overline{P}_{hydre\grave{f}i}) = \alpha(1 - E_n) + \beta \sqrt{\left( M \left[ (P_{wi} + P_{hydi-1}) \right]^2 \right) + \left( M \left[ (P_{wi} + P_{hydi-1}) \right]^2 \right)}$$

(4.3)

Avec :

$\overline{P}_{hydre\grave{f}i}$  : Puissance hydraulique de référence à l'instant  $i$

$P_{hydi-1}$  : Puissance hydraulique mesurée de 1 à  $i-1$

$\alpha$  : Paramètre permettant de maximiser la puissance hydraulique à produire

$\beta$  : Paramètre de lissage de la puissance hybride

Pour trouver le minimum de la fonction d'optimisation, nous utilisons la commande « fminbnd » de Matlab.

#### IV.5.3. Structure du superviseur d'optimisation

La structure du superviseur d'optimisation est présentée dans la figure. 4.22. On a comme entrée, la puissance éolienne fixée par les générateurs éoliens et la puissance hydraulique disponible. Comme sortie, on a la puissance de référence hydraulique  $P_{hyd-ref}$

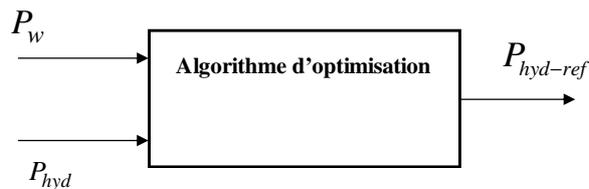


Figure 4.23 Structure du superviseur n°2

Le tableau 4.11 présente le cahier des charges du superviseur n°5

| Objectifs   | Contraintes   | Moyens d'actions  | Outils   |
|---|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li> <li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li> <li>•Les limites de la capacité énergétique de la source hydraulique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•La puissance de référence de la turbine hydraulique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Une fonction d'optimisation</li> </ul> |

Tableau 4.11 Cahier des charges du superviseur n°5

### IV.5.3. Résultat des simulations

a) Choix de ( $\alpha \gg \beta$ ) pour maximiser la puissance produite par la microcentrale hydraulique

La figure 4.24a et la figure 4.24b montrent respectivement les puissances actives produites par la microcentrale hydroélectrique et la centrale multi sources en considérant  $\alpha = 15 \beta$ .

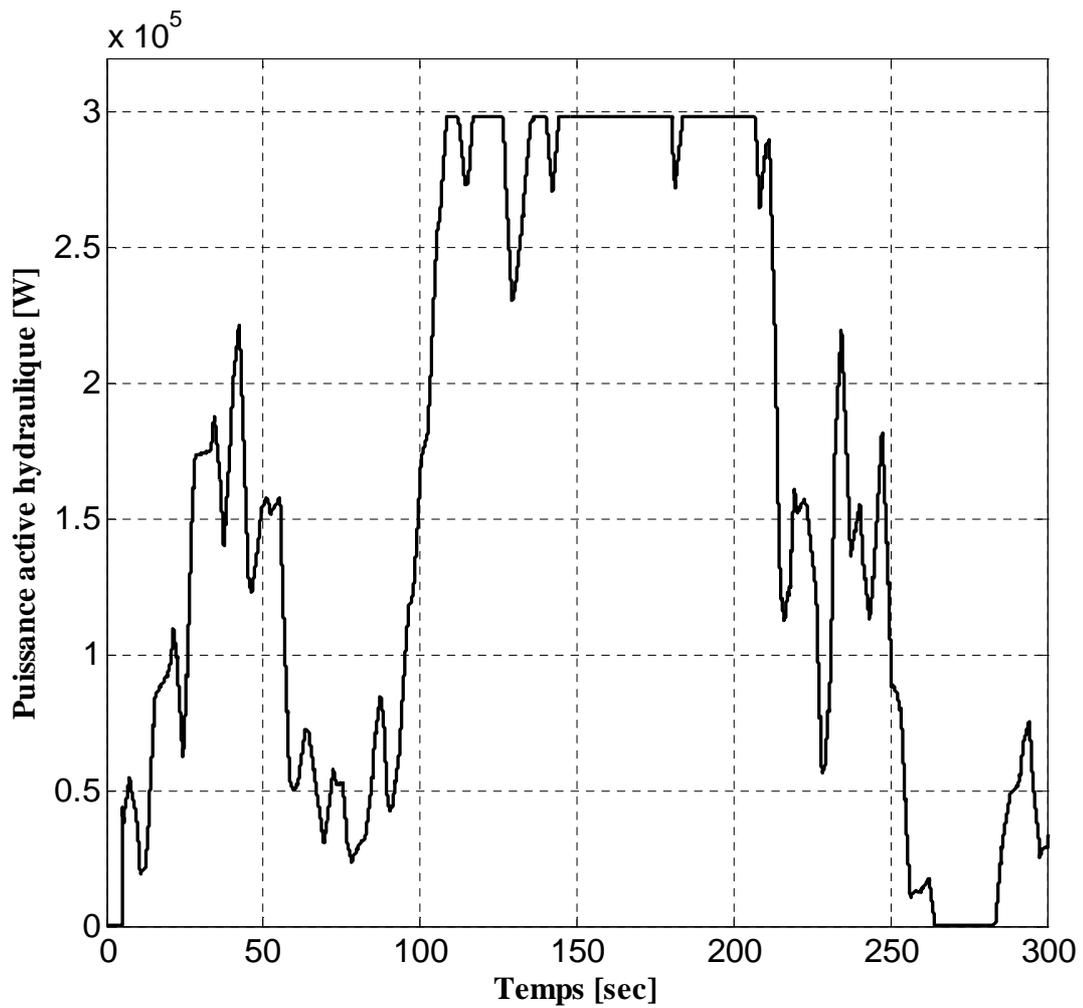


Figure 4.24a Allure de la puissance active hydraulique

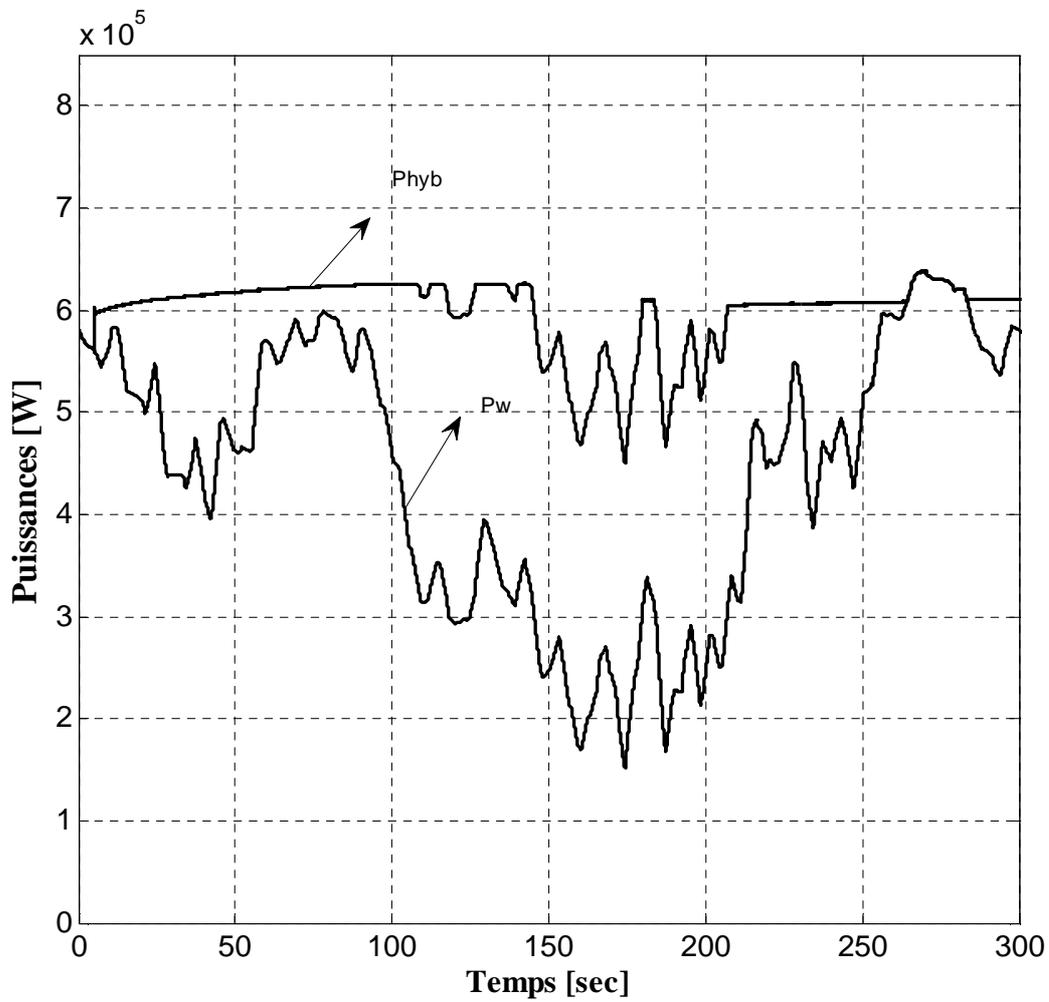


Figure 4.24b Allure des puissances actives

b) Choix de  $(\beta \gg \alpha)$  pour diminuer la fluctuation de la puissance hybride

La figure 4.25a et la figure 4.25b montrent respectivement les puissances actives produites par la microcentrale hydroélectrique et la centrale multi sources en considérant  $\beta = 15 \alpha$ .

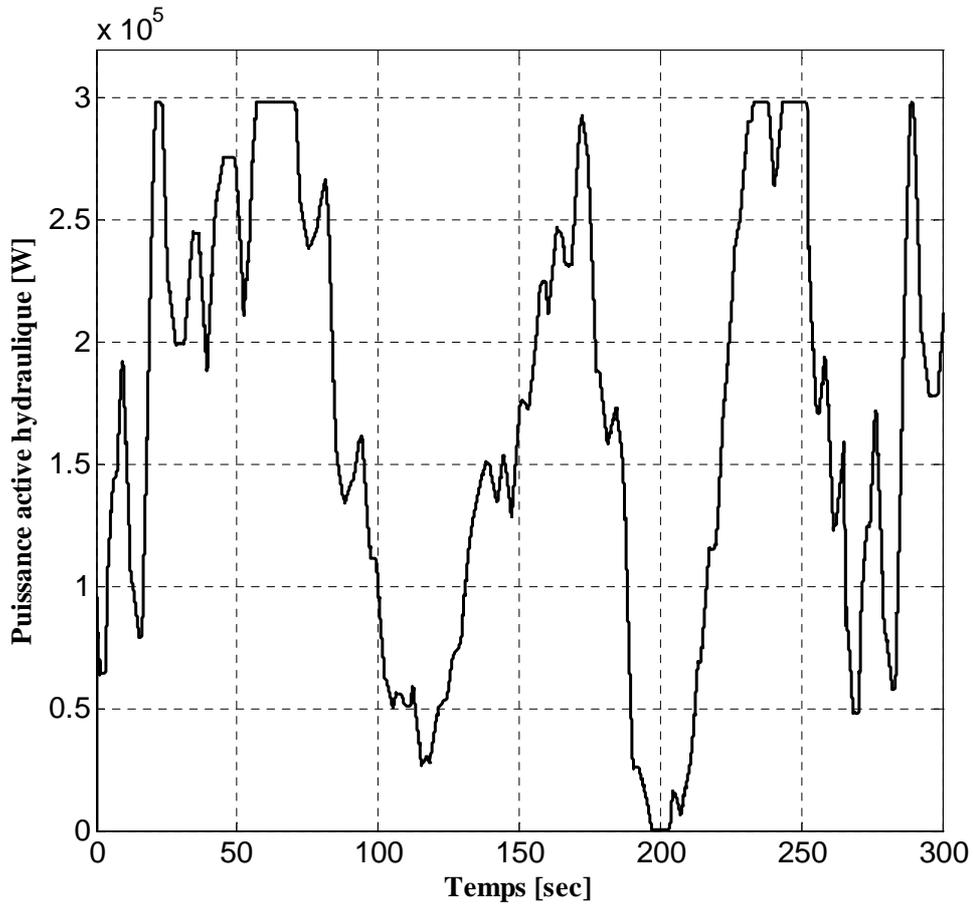


Figure 4.25a Allure de la puissance active hydraulique

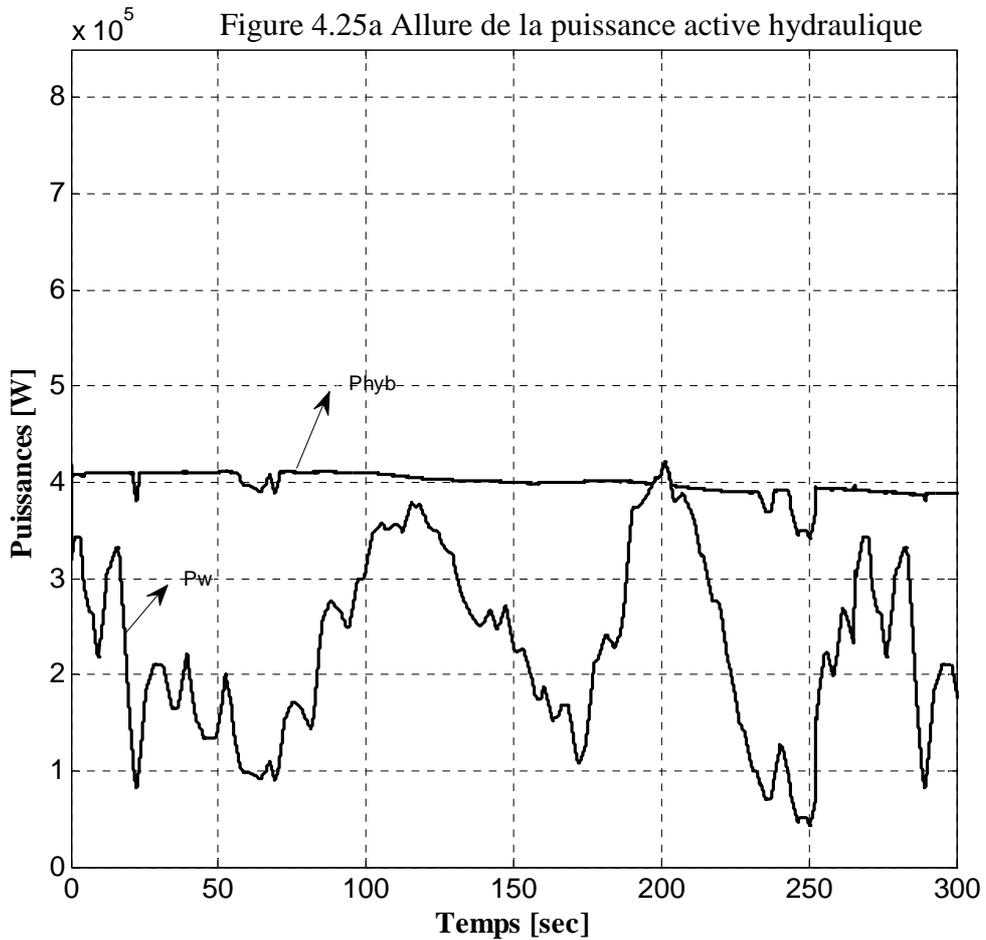


Figure 4.25b Allure des puissances actives

Le tableau 4.12 présente la comparaison de deux stratégies d'optimisation.

| Type de source<br>$\alpha = 15 \beta$ | Puissance<br>moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
|---------------------------------------|----------------------|---|-----------|
| •Source éolienne                      | •444,9kW             | •Écart type de la source éolienne:<br>133,4 kW    | •100%     |
| •Source hydraulique                   | • 154,3 kW           | •Écart type de la source hydraulique:<br>111,3 kW | •52,4%    |
| •Source hybride                       | •599,2kW             | •Écart type de la source hybride: 35,4<br>kW      | •99,44%   |
| Type de source<br>$\beta = 15 \alpha$ | Puissance<br>moyenne | Qualité de lissage                                | Rendement |
| •Source éolienne                      | •442,8kW             | •Écart type de la source éolienne:<br>133,6 kW    | •100%     |
| •Source hydraulique                   | • 142,7 kW           | •Écart type de la source hydraulique:<br>112,9 kW | •47,5%    |
| •Source hybride                       | •585,4kW             | •Écart type de la source hybride:<br>30,49kW      | •97,58%   |

Tableau 4.12 Comparaison de deux stratégies d'optimisation

#### IV.5.4. Interprétation des résultats

D'après les courbes présentées de la figure 4.24a à la figure 4.25b et les données du tableau 4.12, nous constatons que la puissance hydraulique produite est maximale quand  $(\alpha \gg \beta)$  et que la fluctuation de la puissance hybride est minimale quand  $\beta \gg \alpha$ .

#### IV.5.5. Conclusion

Les simulations ont permis de déterminer une stratégie de commande du système hybride, qui conduit à minimiser l'écart type (critère de lissage) et à maximiser le critère énergétique (rendement).

#### IV.6. Comparaison de cinq stratégies de supervision sans l'apport de stockage

Le tableau comparatif des cinq superviseurs sans l'apport de stockage est basé sur trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique: puissance moyenne hybride fournie au réseau, écart type et rendement de la puissance hybride.

##### 1. Tableau de comparaison de cinq stratégies de supervision

Le tableau 4.13 présente la comparaison de cinq stratégies de supervision

| Indicateurs d'efficacité énergétique    | Superviseur 1        |                      | Superviseur 2 | Superviseur 3 | Superviseur 4 | Superviseur 5 |              |
|---|----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|   | $\tau = \frac{1}{3}$ | $\tau = \frac{2}{3}$ |               |               |               | $\alpha = 15$ | $\beta = 15$ |
| Puissance moyenne hydraulique (kW)      | 87,07                | 171,5                | 129,80        | 138,20        | 146,40        | 154,30        | 142,70       |
| Puissance moyenne hybride (kW)          | 512,45               | 596,9                | 555,20        | 563,60        | 571,80        | 599,20        | 585,40       |
| Écart type de la puissance hybride (kW) | 122,30               | 131,9                | 127,30        | 109,50        | 83,54         | 35,40         | 30,49        |
| Rendement de l'hydraulique (%)          | 29,00                | 57,16                | 43,26         | 46,60         | 48,80         | 52,40         | 47,50        |
| Rendement de la source hybride (%)      | 70,6                 | 82,28                | 76,53         | 77,69         | 78,82         | 99            | 97           |

Tableau 4.13 Comparaison de cinq stratégies de supervision

Le tableau 4.13 permet de comparer les cinq stratégies de supervision développées précédemment.

Ces cinq superviseurs seront classés selon deux critères :

- L'indicateur de lissage de puissance (écart type)
- L'indicateur d'efficacité énergétique (rendement).

Le superviseur n° 5 obtient de bien meilleurs résultats en lissage et en rendement grâce à la fonction objectif, suivi du superviseur n°4, puis du superviseur n°3 et enfin le superviseur n°2. Le superviseur n°1 est un cas particulier, celui-ci nécessite une bonne connaissance du profil du vent.

## IV.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage connecté à un réseau puissant. Cinq types de superviseurs ont été considérés:

- Un superviseur simple basé sur le bilan des puissances,
- Trois superviseurs basés sur la méthodologie implicite avec utilisation de la logique floue,
- Un superviseur basé sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation de l'énergie hydraulique produite par la microcentrale hydraulique.

Le superviseur n°1 est simple, il est basé sur le bilan des puissances et il manque de souplesse et nécessite une bonne connaissance du profil du vent.

Le superviseur n°2 est basé sur la commande de la puissance hydraulique, il permet de faire varier la valeur de  $\tau$  en fonction du profil du vent.

Le superviseur n°3 est basé sur l'écart entre la puissance éolienne filtrée et non filtrée, il permet d'augmenter la production hydraulique en comparaison avec les superviseurs 1 et 2.

Le superviseur n°4 est basé sur la commande de la puissance hybride, il permet d'obtenir un meilleur lissage et un rendement élevé.

Le superviseur n°5 basé sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation permet d'extraire environ 50% de l'énergie hydraulique, cependant, il nécessite la connaissance des données du vent (difficile à prévoir) avant de déterminer les valeurs des paramètres  $\alpha ; \beta$ . De plus, l'application de cette méthodologie en temps réel demande un temps considérable.

La méthodologie de construction du superviseur multi sources à base de logique floue a été développée et appliquée à trois superviseurs, ceci a permis de mettre en avant le caractère systématique de la méthode de création du superviseur.

Enfin, les cinq superviseurs testés donnent un rendement de production hydraulique d'environ 50%, d'où la nécessité d'introduire un dispositif de stockage à court terme (Chapitre V) qui permettra d'augmenter l'extraction d'énergie de la source hydraulique, lisser les variations de puissance éolienne et de participer à la gestion intégrée et optimisée de l'énergie.

## IV.8. Bibliographie

- [Bor 98] P. Borne, J. Rozinoer, J-Y. Dieulot, L. Dubois, « Introduction à la commande floue », Editions TECHNIP, collection sciences et technologies, 1998.
- [Büh 94] H. Bühler, Réglage par logique floue, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.
- [Cal 04] R. Caldon, A. R. Patria, R. Turri, « Optimal Control of a Distribution System with a Virtual Power Plant », International conference on Bulk Power System Dynamics and Control, 2004, pp. 278-284.
- [Cou 10] V. Courtecuisse, Jonathan Sprooten, B. Robyns, M. Petit, B. François, J. Deuse., "Methodology to design fuzzy logic based supervision of hybrid renewable energy systems", Mathematics and computers in simulation, vol. 81, issues 2, pp 208-224, October 2010.
- [Cul 94] J-C. Culioli, « Introduction à l'optimisation », Ellipses, 1994.
- [Spr 09] J. Sprooten, V. Courtecuisse, B. Robyns, J. Deuse "« Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multi source à base d'énergie renouvelable », EJEE vol. 12, N°5-6, pp.553-583, 12-2009.
- [Ver 07] A. Vergnol, « Supervision d'une centrale de production hybride éolienne / hydraulique », Rapport de Master présenté en juillet 2007, USTL.



# **Chapitre V : Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court terme**

Le chapitre cinq développe la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court terme.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et de développer quatre superviseurs pour la gestion d'une centrale multi sources. Un tableau permettra de comparer les quatre superviseurs suivant trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique. Un bilan global de ces superviseurs et leurs limites seront présentées.



## Chapitre V

### Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court terme

#### V.1. Introduction

Les cinq superviseurs testés dans le chapitre 4 donnent un rendement de production hydraulique d'environ 50%, d'où la nécessité d'introduire un dispositif de stockage à court terme afin d'augmenter le taux de participation hydraulique.

Le concept de système multi sources, avec une gestion intégrée et optimisée de l'énergie, auquel différents systèmes de stockage sont associés est envisagé pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques [Ang 09], [Gar 08].

Deux topologies sont possibles pour associer le stockage à la centrale hybride.

- Architecture avec dispositif de stockage à court terme connecté sur le bus continu [Bre 08].
- Architecture avec dispositif de stockage à moyen et à court terme connecté sur le bus alternatif (Chapitre V et Chapitre VI).

Dans ce chapitre, une version optimisée de la supervision des sources de productions éoliennes/hydrauliques associées à un système de stockage à court terme connecté sur le bus alternatif est présentée en détail.

- Le superviseur n°1 est basé sur la commande de la puissance de référence de stockage. On suppose que la puissance hydraulique est fixée à 300 kW, le système de stockage compense l'écart entre la puissance éolienne filtrée et non filtrée. Le superviseur flou possède une entrée et une sortie.
- Le superviseur n°2 est basé sur la commande de la puissance de référence de stockage. On suppose que la puissance hydraulique est fixée à 300 kW. L'unité de stockage à court terme compense la fluctuation de la puissance éolienne non filtrée. Le superviseur flou possède deux entrées et une sortie.
- Le superviseur n°3 est basé sur la commande de la puissance de référence de stockage et de la micro centrale hydraulique. Le superviseur flou possède deux entrées et deux sorties. La puissance de référence hybride est déterminée à partir d'un bilan des puissances.

- Le superviseur n°4 est basé sur la commande de la puissance de référence de stockage et de la micro centrale hydraulique. La puissance de référence hybride est déterminée à partir d'un superviseur flou. Cette stratégie présente deux superviseurs flous.

Le tableau 5.1a donne les conditions de simulations des trois types de superviseurs.

Les simulations ont été effectuées avec le logiciel Matlab-Simulink™

| Paramètres                           | •Unités                   |
|--------------------------------------|---------------------------|
| •Vitesse nominale du vent            | •12 m/sec                 |
| •Puissance nominale de l'éolienne    | •600 kW                   |
| •Puissance nominale de l'hydraulique | •300 kW                   |
| •Débit de l'eau                      | •1000 m <sup>3</sup> /sec |

Tableau 5.1a Conditions de simulations des trois de superviseurs.

Le tableau 5.1b présente les paramètres du système de stockage à court terme [Cou, 10].

#### Système de stockage court terme

$$\begin{aligned}
 P_{chmax-sht} &= 300kW \\
 P_{dchmax-sht} &= -300kW \\
 \tau_{ch-sht} &= 0.5s \\
 \tau_{dch-sht} &= 0.5s \\
 W_{max-sht} &= 150 \times 10^3 kJ
 \end{aligned}$$

Tableau 5.1b Paramètres du système de stockage court terme

$P_{ref-stor}$  est la puissance de référence du système de stockage,  $W_{stor}$  est l'énergie stockée et  $P_{stor}$  est la puissance du système de stockage. Le système de stockage n'a pas a priori de technologie définie. Il est caractérisé par :  $P_{ch\ max}$  la puissance maximale de charge,  $P_{dch\ max}$  la puissance maximale de décharge  
 $W_{max}$  : énergie maximale stockée,  
 $\eta$  : Rendement du système (énergie déchargée/énergie stockée) [Cou, 07].

Dans les quatre cas étudiés, la puissance éolienne fixée par les générateurs éoliens n'est pas contrôlable. De plus, les pertes du système de stockage sont considérées négligeables.

Nous proposons un tableau comparatif de ces quatre types de superviseurs suivant trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique: puissance moyenne hydraulique extraite, puissance moyenne hybride fournie au réseau, écart type et rendement. Le critère de l'efficacité énergétique est lié à l'énergie fournie au réseau, tandis que la qualité de lissage de la puissance hybride est liée à l'écart type. Pour calculer ces indicateurs, nous utilisons la commande « Data statistics » du Matlab Simulink.

## V.2. Structure global du système

Le schéma de la structure de la centrale hybride est présenté dans la figure 5.1.

La centrale multi sources étudiée est constituée d'une éolienne de 600 kW non contrôlable, d'une micro centrale hydraulique à vitesse variable et d'un dispositif de stockage à court terme connecté sur le bus alternatif.

Les vitesses du vent, qui ont été utilisées pour l'étude, ont été mesurées sur le site de Dunkerque.

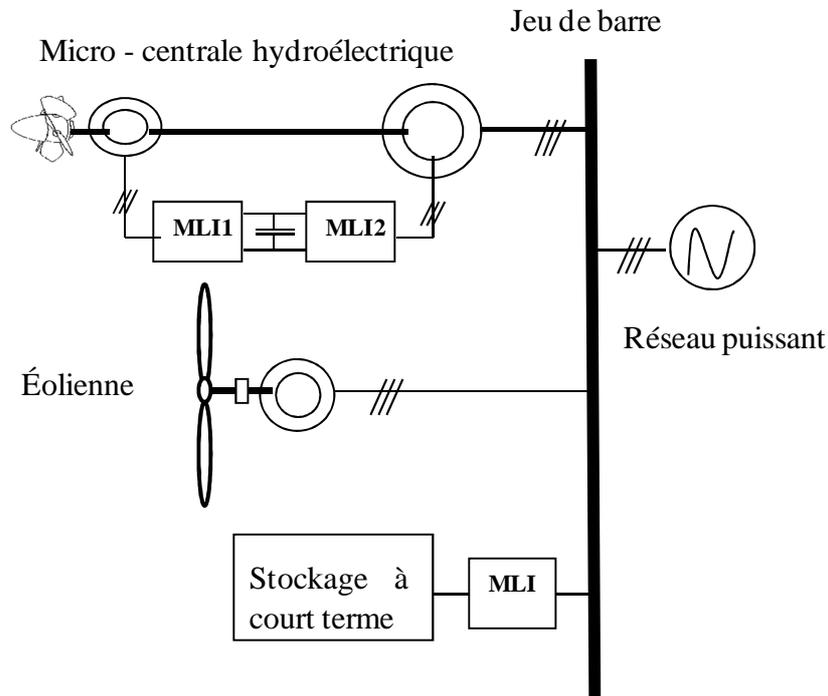


Figure 5.1 Structure globale du système

Dans ce chapitre, avant de détailler les stratégies de supervision, il me semble opportun de décrire et de présenter un modèle mathématique simplifié et générique du système de stockage, celui-ci a été choisi afin de faire abstraction de la technologie choisie.

### V.3. Modèle dynamique du système de stockage et sa stratégie de commande [Abo 05]

La figure 5.2 présente le modèle du système de stockage, avec  $P_{ref-stor}$  la puissance de référence du système de stockage,  $W_{stor}$  l'énergie stockée et  $P_{stor}$  la puissance du système de stockage. Le système de stockage n'a pas a priori de technologie définie. Il est caractérisé par :  $P_{ch\max}$  la puissance maximale de charge,  $P_{dch\max}$  la puissance maximale de décharge  $W_{\max}$  : énergie maximale stockée,  $\eta$  le rendement du système (énergie déchargée/énergie stockée) [Cou, 07].

Le but de la stratégie de commande de ce système de stockage est de réguler les variations rapides de la puissance éolienne  $P_w$ , et de fournir au réseau une puissance lissée  $P_{hyb-ref}$ . Pour lisser les fluctuations de la puissance éolienne, le système de stockage doit se recharger quand la puissance

fournie par l'éolienne  $P_w$  est supérieure à  $P_{hyb-ref}$  et doit se décharger sur le réseau lorsque  $P_w$  est inférieure à  $P_{hyb-ref}$ . Les limites étant d'une part la fourniture de l'énergie quand le système de stockage est vide, et d'autre part, l'absorption d'énergie quand le système de stockage est plein, les constantes de temps de charge et de décharge sont considérées identiques ( $\tau_{ch}$  et  $\tau_{dch}$ ),

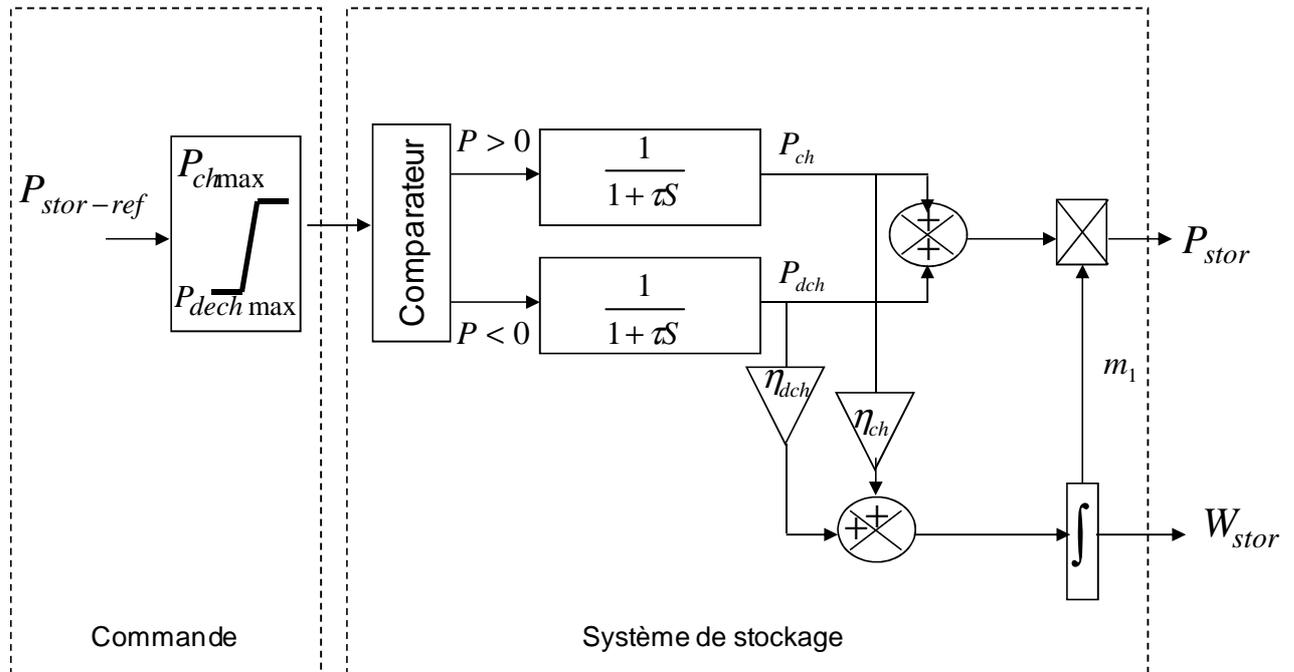


Figure 5.2 Modèle du système de stockage

## V.4. Superviseur n° 1

### V.4.1. Introduction

Le superviseur a pour objectif la détermination de la puissance de référence de l'unité du système de stockage, afin de tenir des engagements en termes de qualité et de quantité de la puissance hybride délivrée. Le superviseur flou possède une entrée et une sortie.

Pour guider et rendre systématique la modélisation et la conception de la supervision de chaque élément de la source hybride, nous proposons d'utiliser la méthodologie implicite améliorée à base de logique floue en utilisant une supervision multi-niveaux conçue pour un système éolien – hydraulique – stockage [Spr 09], [Cou, 07], [Cou, 10].

En conclusion, nous donnerons les interprétations des résultats des simulations.

## V.4.2. Méthodologie pour la construction du superviseur

### V.4.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 5.2 présente le cahier des charges du superviseur n° 1.

| Objectifs   | Contraintes   | Moyens d'actions   | Outils   |
|---|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li> <li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li> <li>•Les limites de la capacité du système de stockage.</li> <li>•Les limites de la capacité de la microcentrale hydraulique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•La puissance de référence de stockage</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Logique floue</li> </ul> |

Tableau 5.2 Cahier des charges du superviseur n° 1

### V.4.2.2. Structure du superviseur n°1

La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les objectifs définis au cahier des charges. On a comme entrée, le niveau de stockage court terme  $L_{ev-stor}$ . En sortie, nous avons la puissance de compensation du stockage  $\Delta P_{st}$ , celle-ci doit permettre d'éviter la saturation du stockage ainsi elle permettra la compensation de l'éolienne.

L'objectif du superviseur est de déterminer la puissance de référence de stockage  $P_{stor-ref}$  pour compenser l'écart entre la puissance éolienne filtrée et non filtrée.

L'équation (5.1) et l'équation (5.2) donnent respectivement la puissance de référence du stockage et la puissance de référence hybride:

$$P_{stor-ref} = P_{w-f} - P_w + \Delta P_{st} \quad (5.1)$$

$$P_{hyb-ref} = P_{hyd} + P_{w-f} + P_{stor-ref} \quad (5.2)$$

La structure du superviseur étudié est présentée dans la figure. 5.3.

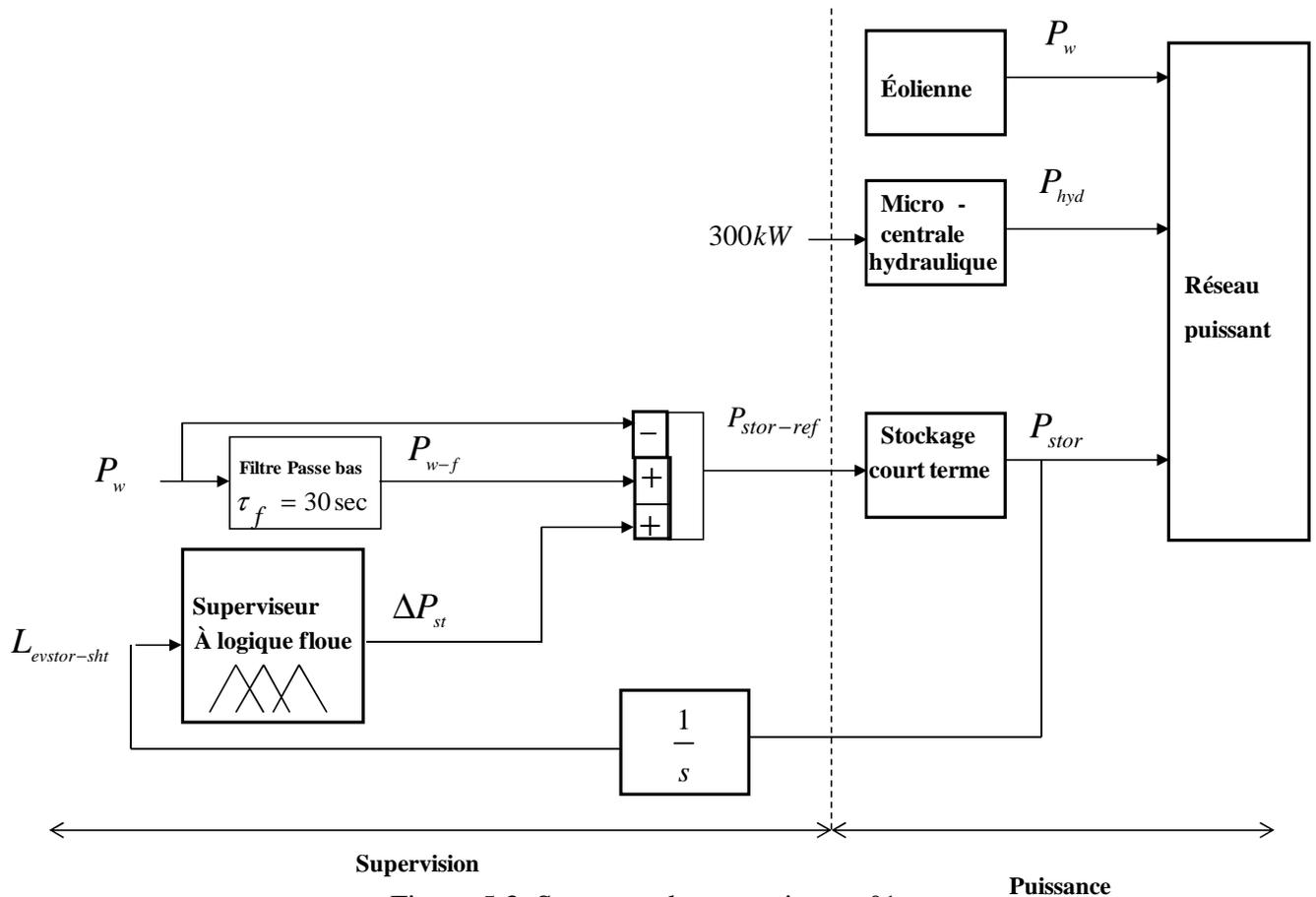


Figure 5.3. Structure du superviseur n°1

#### V.4.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels »

La stratégie du superviseur flou du système multi sources peut être définie graphiquement. Le graphe fonctionnel du superviseur étudié est présenté à la figure 5.4.

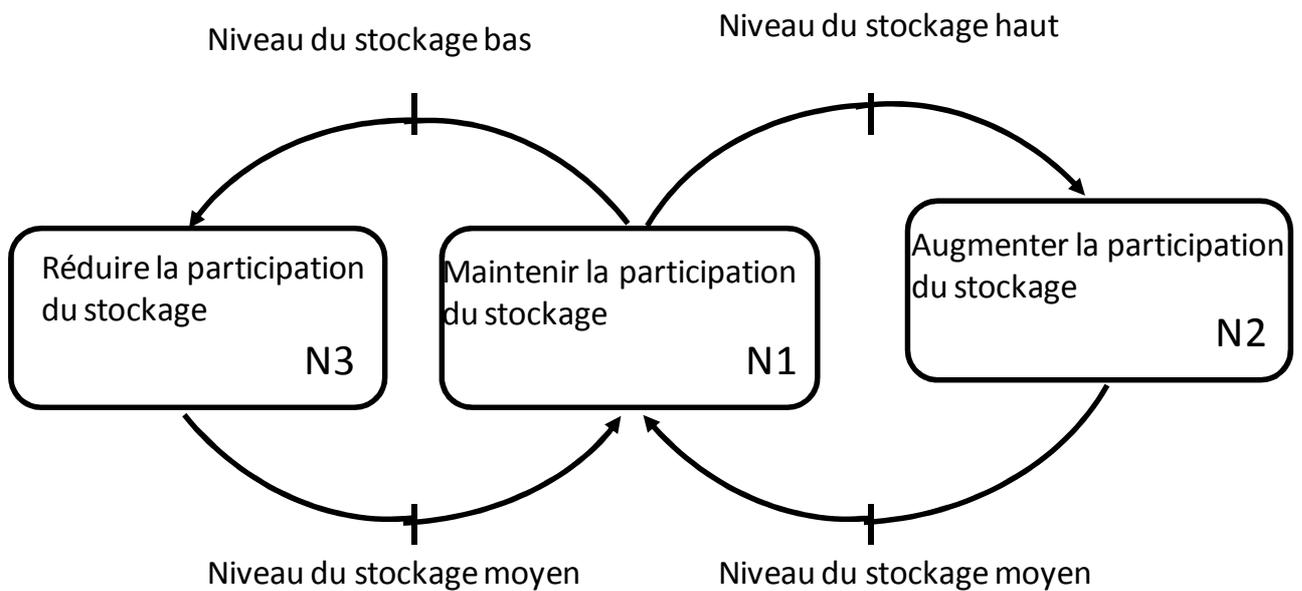


Figure 5.4 Graphe fonctionnel du superviseur étudié

N1, N2, N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires alors que les transitions (Niveau stockage) peuvent être vues comme des contraintes appliquées au système.

- N1: Si le niveau de stockage est moyen, alors le superviseur maintient la participation du système du stockage.
- N2: Si le niveau de stockage est haut, alors le superviseur augmente la participation du système du stockage.
- N3: Si le niveau de stockage est bas, alors le superviseur diminue la participation du système du stockage.

#### V.4.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance

L'étape suivante de la méthodologie proposée est la détermination des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur à logique floue. Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche.

La figure 5.5a représente la fonction d'appartenance de grandeur d'entrée  $L_{ev - stor}$ .

Les ensembles notés « P » et « G » représentent respectivement les états « Petit » et « Grand », ils permettent de déterminer si le stockage va saturer.

L'ensemble noté « M », représente l'état « Moyen », il constitue le fonctionnement normal.

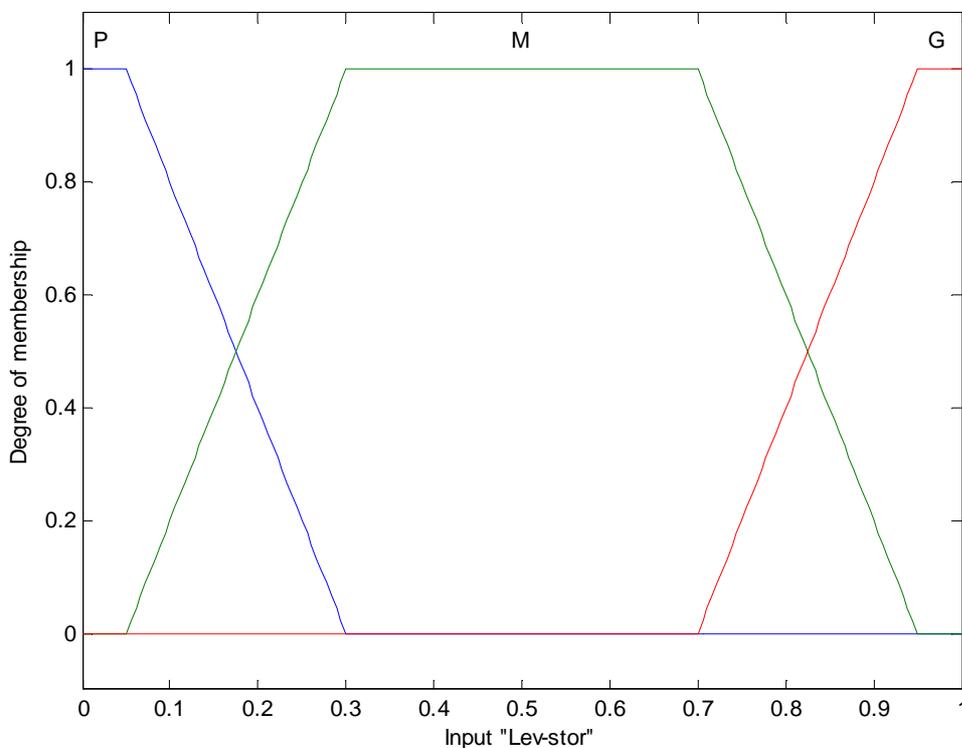


Figure 5.5a Fonction d'appartenance de  $L_{ev - stor}$

La figure 5.5b représente la fonction d'appartenance de grandeur de sortie  $\Delta P_{st}$ .

Les ensembles notés « P<sup>+</sup> » et « N<sup>-</sup> » représentent respectivement les états « Positif » et « Négatif », ils permettent de réduire ou d'augmenter la contribution du système de stockage. L'ensemble noté « Z », représente l'état « Zéro », il est utilisé dans le scénario proposé pour compenser les écarts entre la puissance filtrée et non filtrée de l'éolienne.

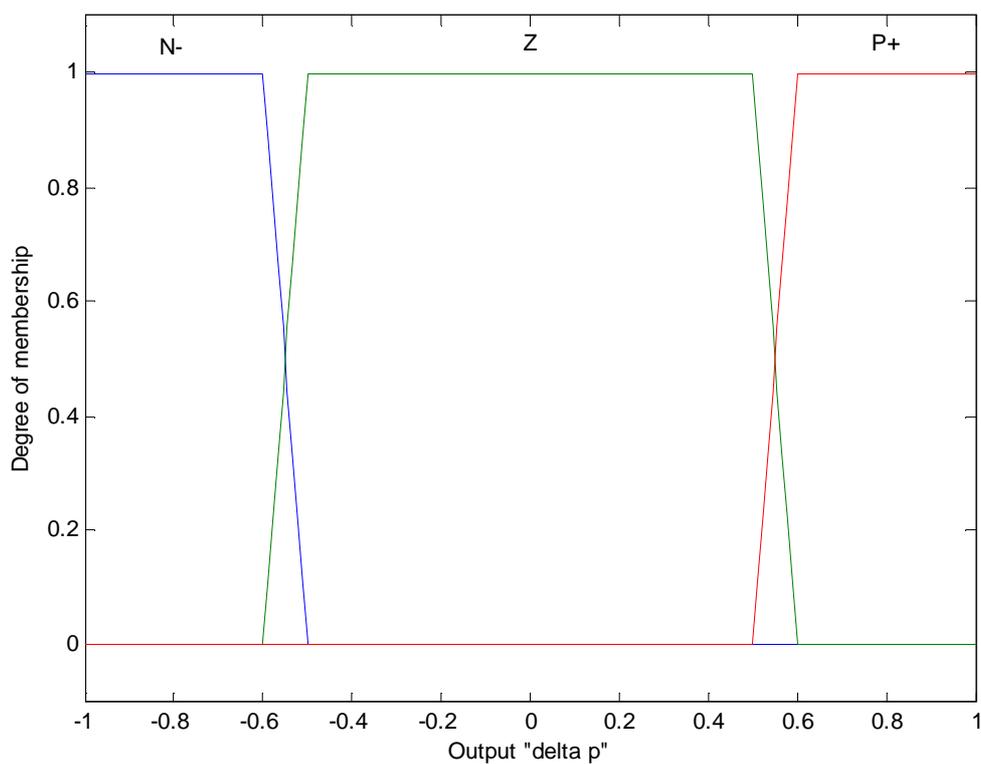


Figure 5.5b Fonction d'appartenance de  $\Delta P_{st}$

### V.4.2.5. Détermination des « graphes opérationnels »

Cette démarche mène au graphe opérationnel de la figure 5.6.

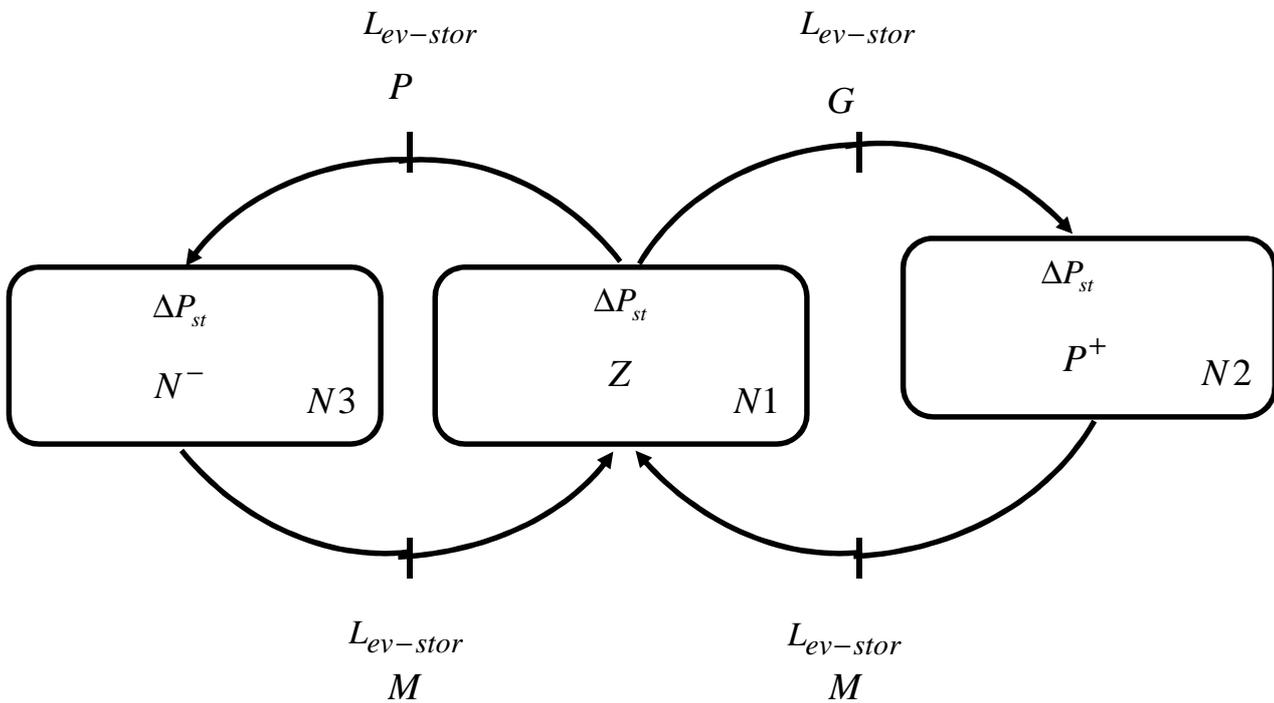


Figure 5.6 Graphe opérationnel du superviseur étudié

### V.4.2.6. Extraction des lois floues

A partir du diagramme de la figure 5.6, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Si  $L_{ev-stor}$  est P alors  $\Delta P_{st}$  est  $N^-$

Si  $L_{ev-stor}$  est M alors  $\Delta P_{st}$  est Z

Si  $L_{ev-stor}$  est G alors  $\Delta P_{st}$  est  $P^+$

### V.4.3. Résultat des simulations

Le réseau simulé est celui présenté à la figure 5.1 et les conditions des simulations sont présentées par le tableau (5.1).

Les courbes présentées de la figure 5.7a à la figure 5.7d correspondent aux résultats de simulation

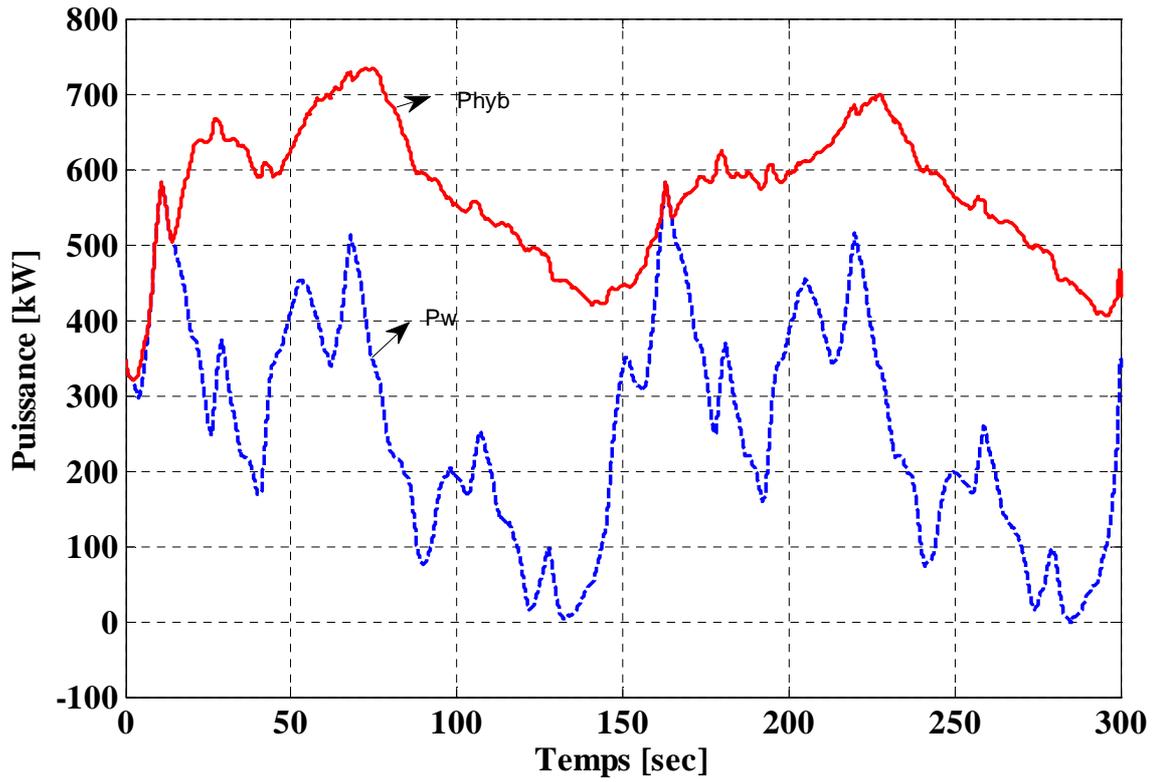


Figure 5.7a Puissance hybride et puissance éolienne

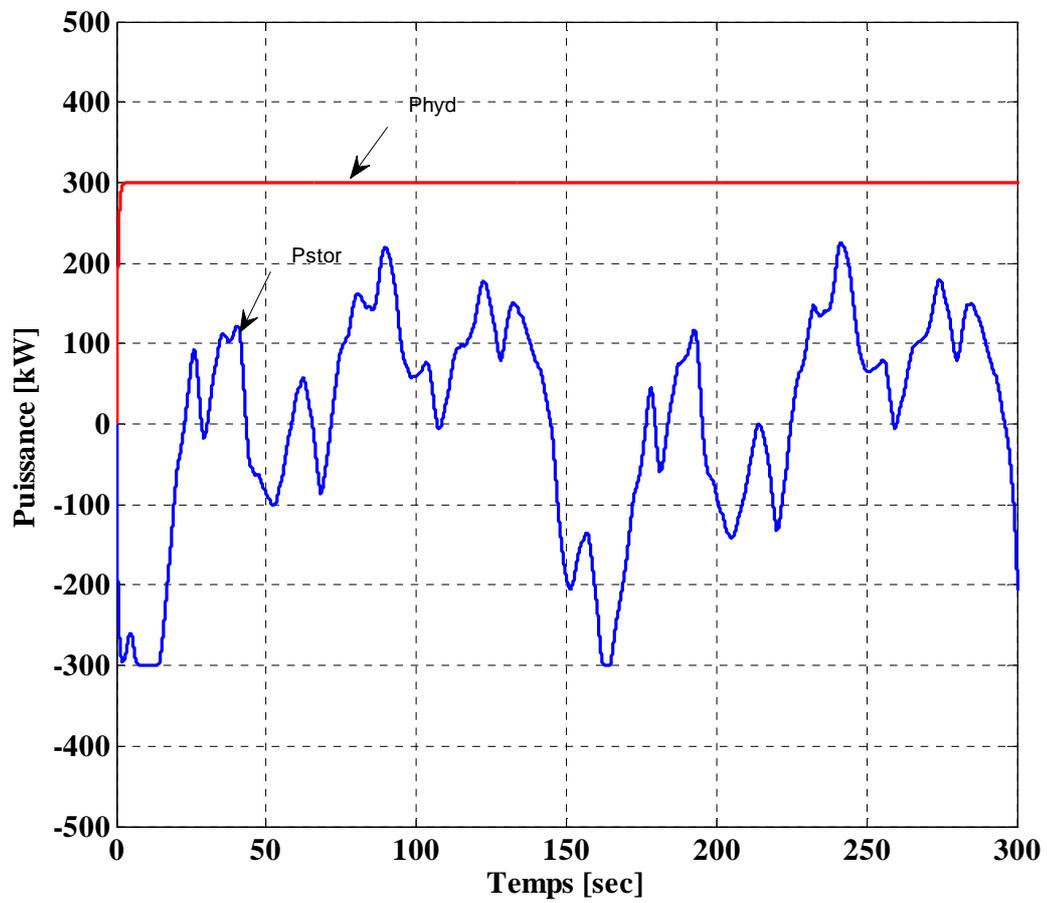


Figure 5.7b Puissance hydraulique et puissance de stockage

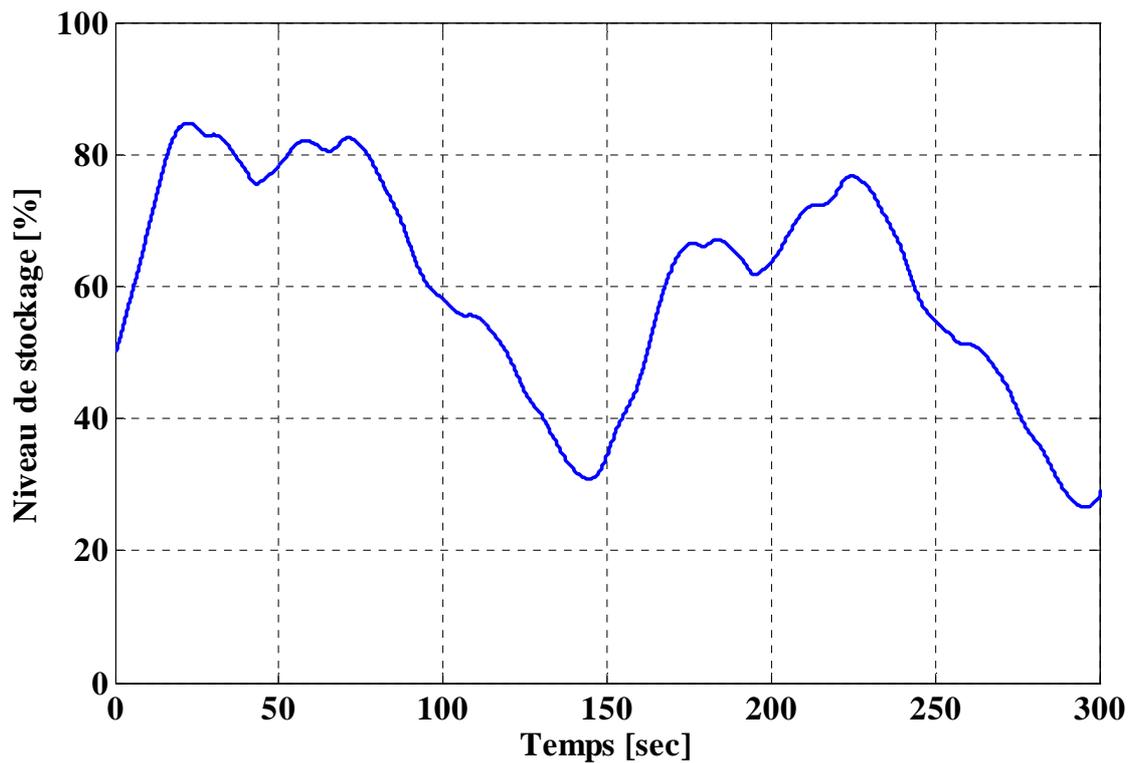


Figure 5.7c Niveau de stockage en %

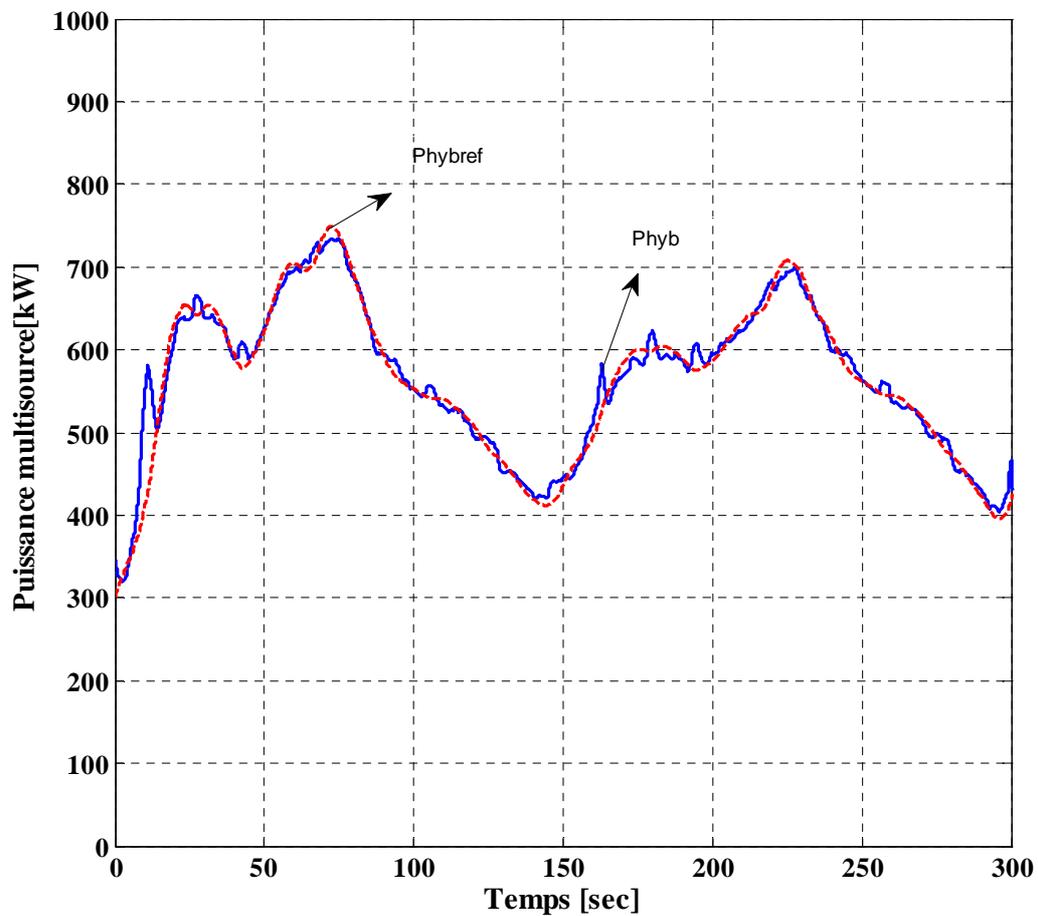


Figure 5.7d Puissance hybride disponible et puissance hybride de référence

La figure 5.7a montre la puissance éolienne et la puissance hybride générée. La figure 5.7b montre la puissance éolienne et la puissance stockée. La figure 5.7c montre le niveau du stockage en %. La figure 5.7d montre la puissance hybride générée et la puissance hybride de référence.

Le tableau 5.3 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°1.

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                              | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •255 kW           | •Écart type de l'éolienne 147,5 kW              | •100%     |
| •Source hydraulique | •299,7            | •Écart type de l'hydraulique : 6,24 kW          | •100%     |
| •Unité de stockage  | •5,7 kW           | •Écart type de l'unité de stockage:<br>128,4 kW |           |
| •Source hybride     | •560,5kW          | •Écart type de la source hybride:<br>82,53kW    | •99,96%   |

Tableau 5.3 Indicateurs du superviseur n°1

#### V.4.4. Interprétation des résultats

A partir des résultats de simulations, la figure 5.7b montre la saturation de l'unité de stockage (en termes de puissance) pendant 5 sec (de  $t = 8$  sec à  $t = 14$  sec), ensuite à  $t = 164$  sec. Nous constatons (figure 5.7c) que la puissance de stockage est stockée quand la puissance de l'éolienne est supérieure à la puissance hybride de référence et elle est fournie au bus continu lorsque la puissance éolienne est inférieure à la puissance hybride de référence.

La figure 5.7d montre que la puissance hybride fournie au réseau est bien régulée par rapport à la puissance hybride de référence (5.2), malgré la fluctuation du vent. De plus le stockage ne sature pas (en termes d'énergie).

Le tableau 5.3 nous montre que la stratégie de commande de la puissance de stockage à l'aide de superviseur flou permet d'obtenir un rendement de 99,96% et un écart type de 82,53 kW de la puissance hybride.

## V.4.5. Conclusion

Dans cette stratégie, la supervision fournit la puissance de référence au dispositif de stockage afin de lisser la puissance électrique de la source hybride. Cependant, nous constatons la saturation en puissance du système de stockage.

Pour éliminer ce défaut de saturation de l'unité de stockage, nous utiliserons dans la suite une stratégie qui s'appuie sur la puissance éolienne non filtrée. Cette nouvelle stratégie permettra de s'affranchir de la fonction de filtrage de la puissance éolienne.

## V.5 Superviseur n° 2

### V.5.1. Introduction

L'objectif du superviseur n°2 est le même que celui de superviseur n° 1 (tableau 5.2) à l'exception de la stratégie de commande utilisée (puissance éolienne non filtrée) et le nombre de grandeurs d'entrée du superviseur. Le superviseur flou a deux entrées et une sortie.

### V.5.2. Méthodologie pour la construction du superviseur

#### V.5.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 5.2 présente le cahier des charges du superviseur n° 2 et du superviseur n° 1.

#### V.5.2.2. Structure du superviseur étudié

La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les objectifs définis au cahier des charges.

On a comme entrée, le niveau de stockage court terme  $L_{ev-stor}$  et la puissance de l'éolienne  $P_w$ .

En sortie, nous avons la puissance de référence du système de stockage  $P_{stor-ref}$ .

La structure du superviseur étudié est présentée dans la figure. 5.8.

L'équation (5.4) donne la puissance de référence hybride.

$$P_{hyb-ref} = P_{hyd} + P_w + P_{stor-ref} \quad (5.4)$$

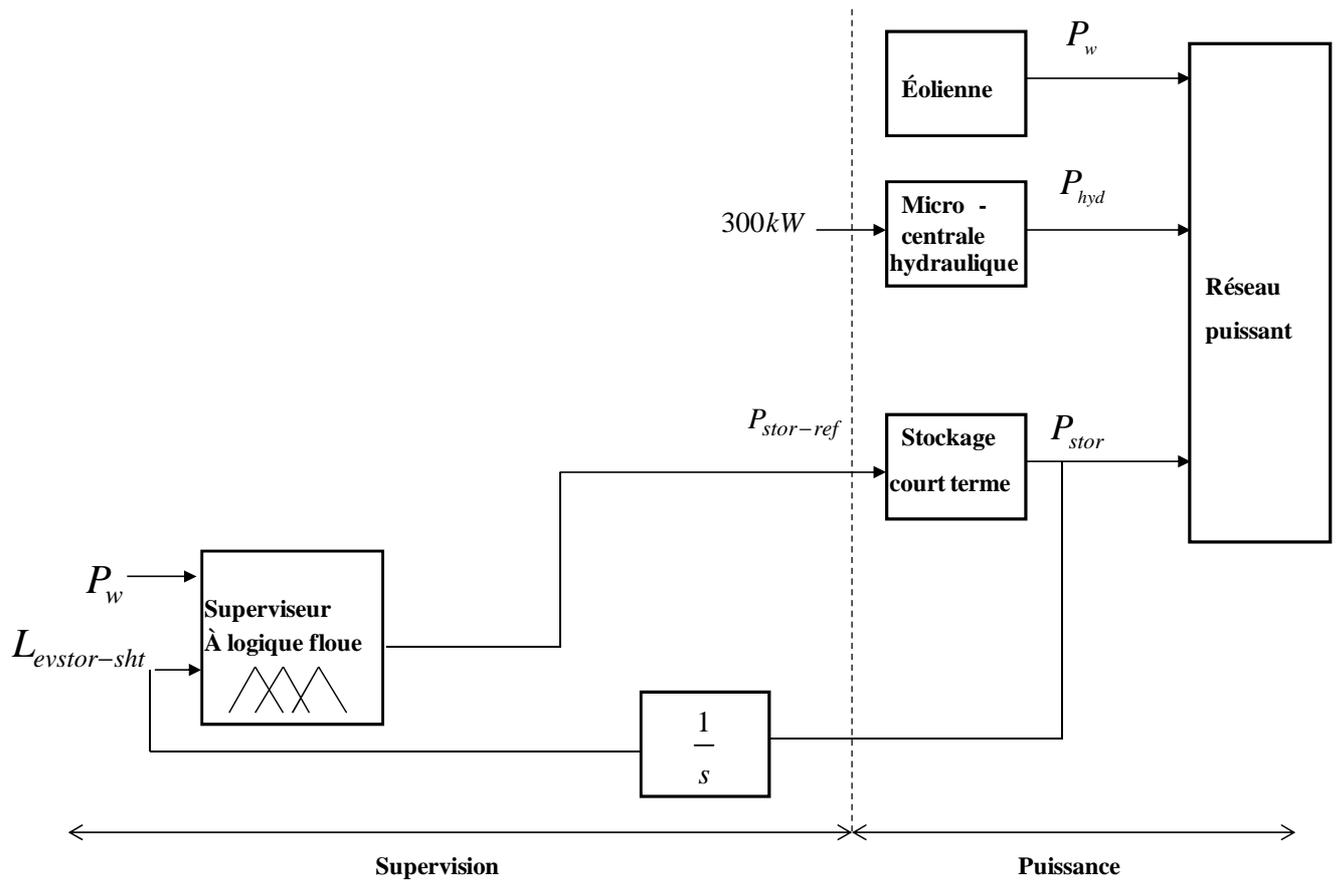


Figure 5.8. Structure du superviseur étudié

### V.5.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels »

La stratégie du superviseur flou du système multi sources peut être définie graphiquement. Le graphe et le sous graphe fonctionnel du superviseur étudié sont présentés aux figure 5.9a et figure 5.9b.

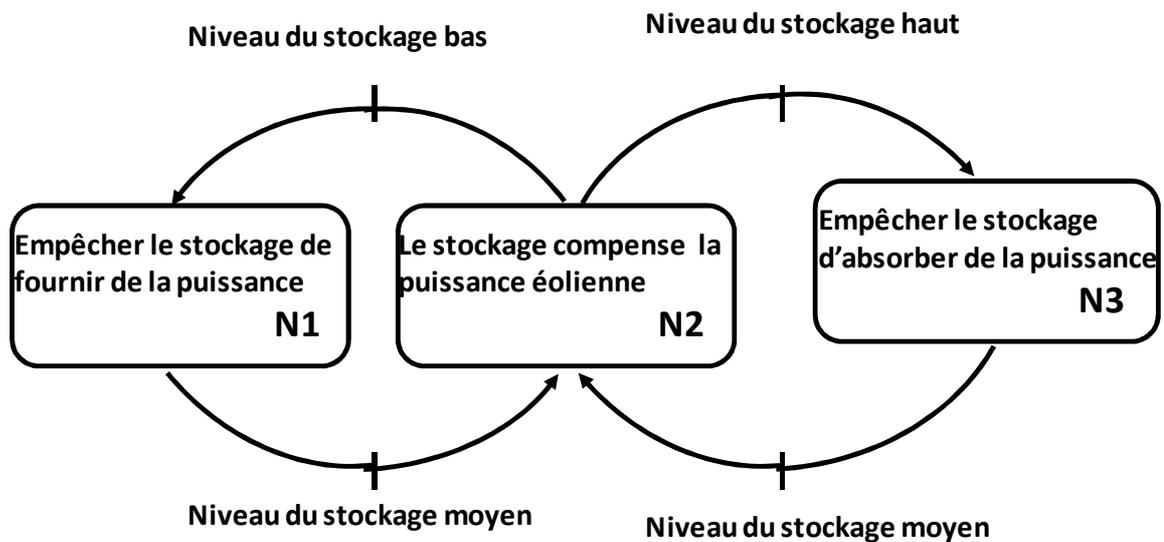


Figure 5.9a Graphe fonctionnel du superviseur étudié

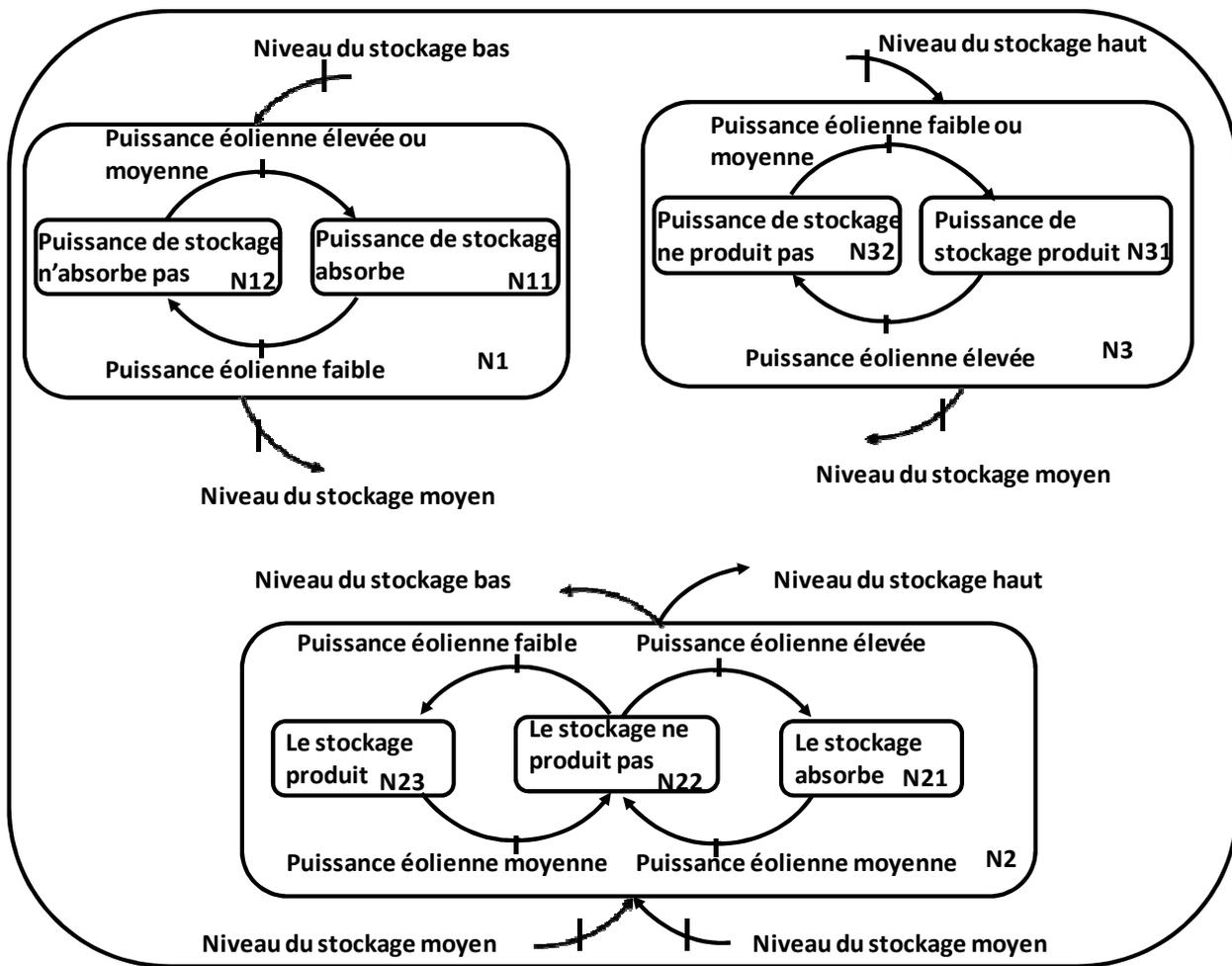


Figure 5.9b Sous graphe fonctionnel du superviseur étudié

N, N2, N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires alors que les transitions (Niveau stockage) peuvent être vues comme des contraintes appliquées au système.

- N1: Si le niveau de stockage est moyen, alors le superviseur permet au système de stockage de compenser la fluctuation de l'éolienne.
- N2: Si le niveau de stockage est haut, alors le superviseur empêche le stockage d'absorber de la puissance.
- N3: Si le niveau de stockage est bas, alors le superviseur empêche le stockage de fournir de la puissance.
- N11 : Si le niveau de stockage est bas et la puissance éolienne est élevée ou moyenne, alors le système de stockage absorbe.
- N12 : Si le niveau de stockage est bas et la puissance éolienne est faible, alors le système de stockage n'absorbe pas.

- N21 : Si la puissance éolienne est élevée, alors le système de stockage absorbe.
- N23 : Si la puissance éolienne est faible, alors le système de stockage produit.
- N22 : Si la puissance éolienne est moyenne, alors le système de stockage ne produit pas.
- N31 : Si le niveau de stockage est haut et la puissance éolienne est faible, alors le système de stockage produit.
- N32 : Si le niveau de stockage est haut et la puissance éolienne est élevée, alors le système de stockage ne produit pas.

#### V.5.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance

L'étape suivante de la méthodologie proposée est la détermination des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur à logique floue. Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche. La figure 5.10 représente la fonction d'appartenance de grandeur d'entrée  $L_{ev-stor}$ , elle est identique à la figure 5.4.

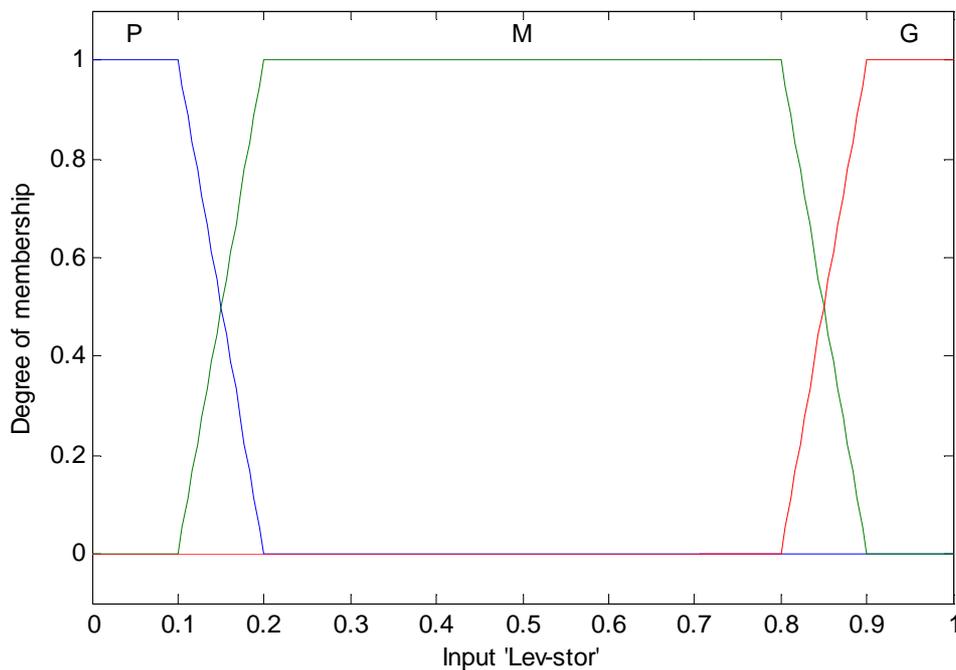


Figure 5.10 Fonction d'appartenance de  $L_{ev-stor}$

La figure 11 représente la fonction d'appartenance de grandeur d'entrée  $P_w$

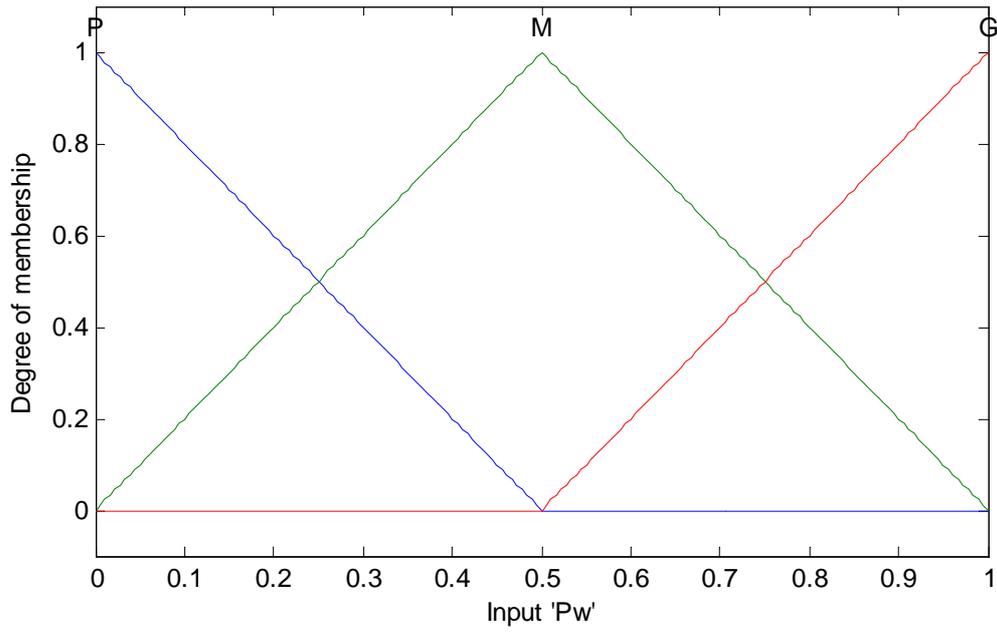


Figure 5.11 Fonction d'appartenance de  $P_w$

La figure 5.12 représente la fonction d'appartenance de grandeur de sortie  $P_{stor} - ref$

Les ensembles notés «  $P^+$  » et «  $N^-$  » représentent respectivement les états « Positif » et « Négatif », ils assurent l'absorption et la restitution de l'énergie de stockage. L'ensemble noté «  $Z$  », représente l'état « Zéro », il permet au système de stockage de ne pas produire.

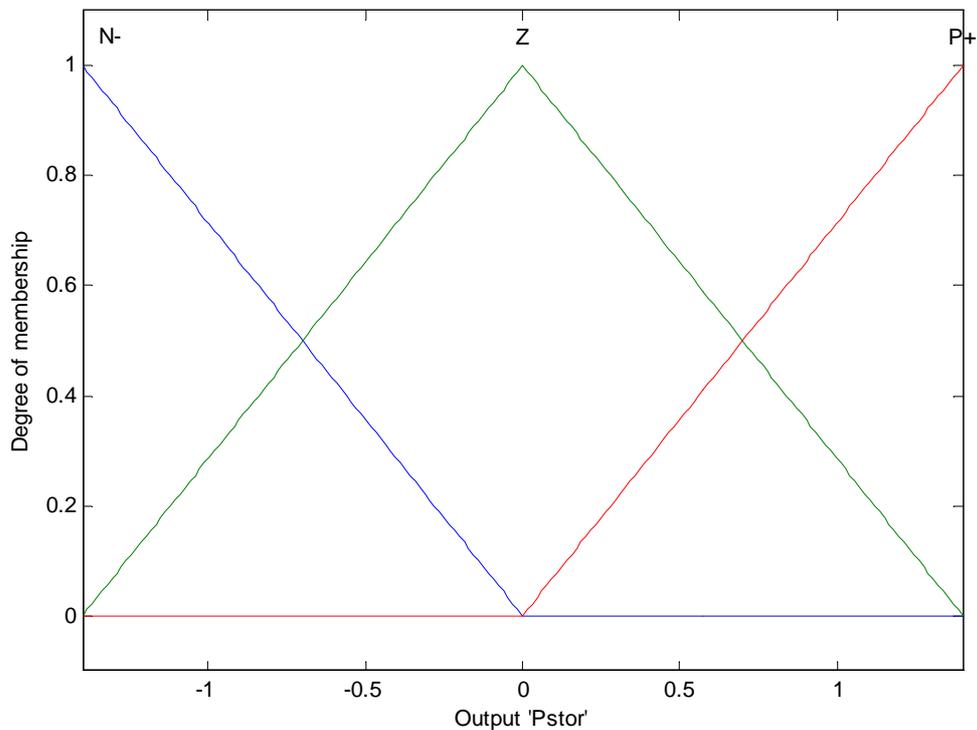


Figure 5.12 Fonction d'appartenance de  $P_{stor} - ref$

### V.5.2.5. Détermination des « graphes opérationnels »

Cette démarche mène au graphe opérationnel de la figure 5.13.

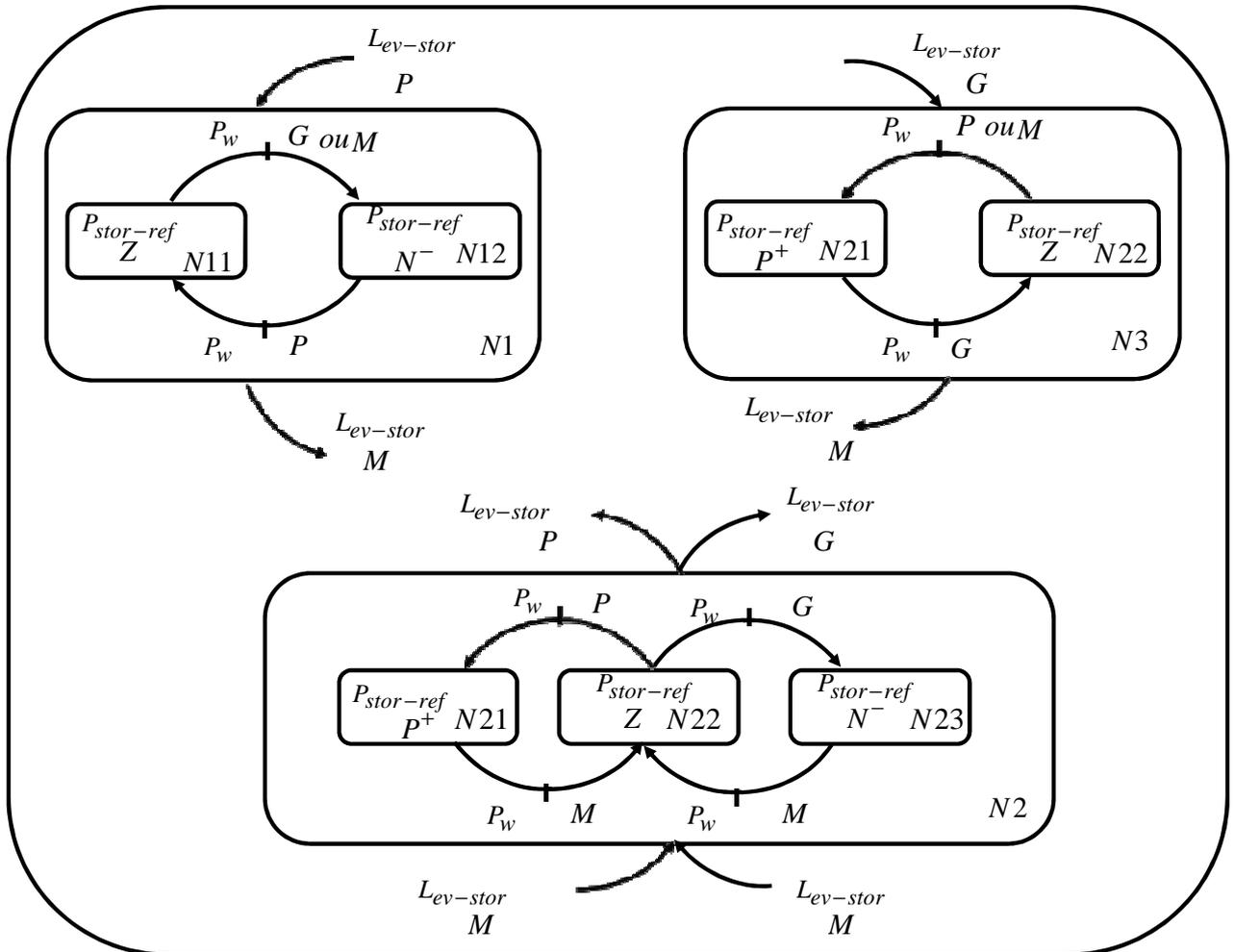


Figure 5.13 Graphe opérationnel du superviseur étudié

### V.5.2.6. Extraction des lois floues

A partir du diagramme de la figure 5.13, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Le Tableau 5.4 présente les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement du superviseur.

|                |   |                |                |                |
|----------------|---|----------------|----------------|----------------|
| $P_{stor-ref}$ |   | $L_{ev-stor}$  |                |                |
|                |   | P              | M              | G              |
| $P_w$          | P | Z              | P <sup>+</sup> | P <sup>+</sup> |
|                | M | N <sup>-</sup> | Z              | P <sup>+</sup> |
|                | G | N <sup>-</sup> | N <sup>-</sup> | Z              |

Tableau 5.4 Les lois floues des 3 modes de fonctionnement du superviseur

### V.5.3. Résultat des simulations

Le réseau simulé est celui présenté à la figure 5.1 et les conditions des simulations sont présentées dans le tableau (5.1).

Les courbes présentées de la figure 5.14a à la figure 5.14d correspondent aux résultats de simulation.

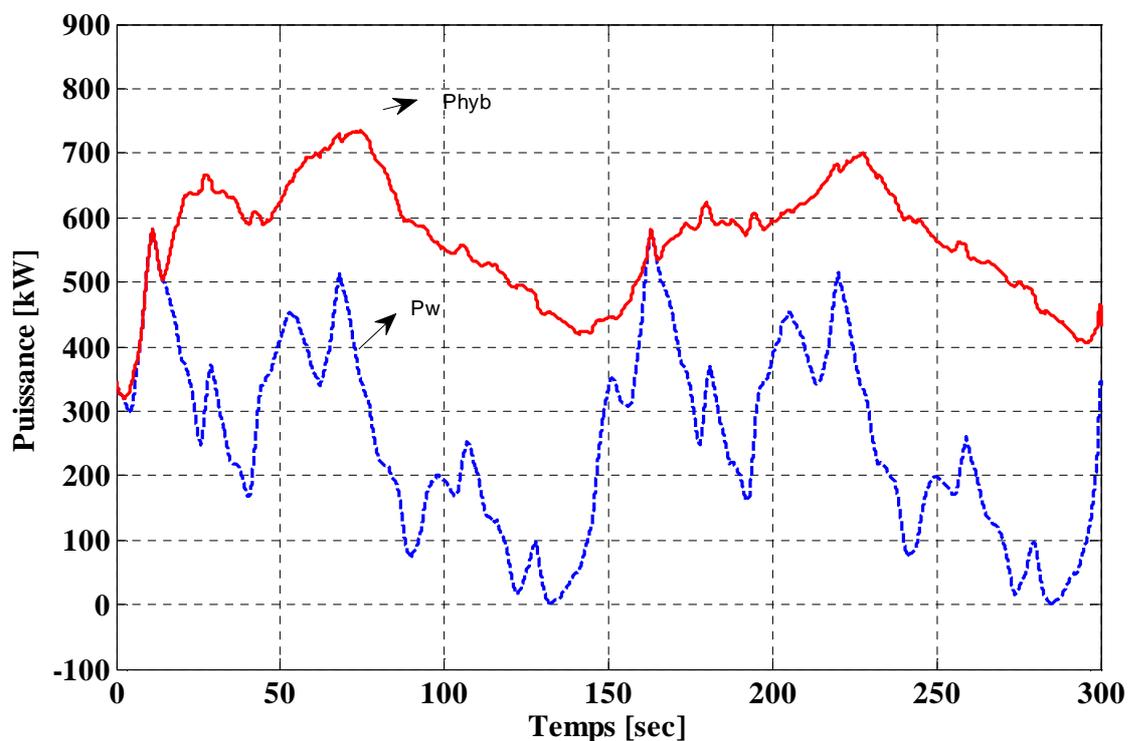


Figure 5.14a. Puissance hybride et puissance éolienne

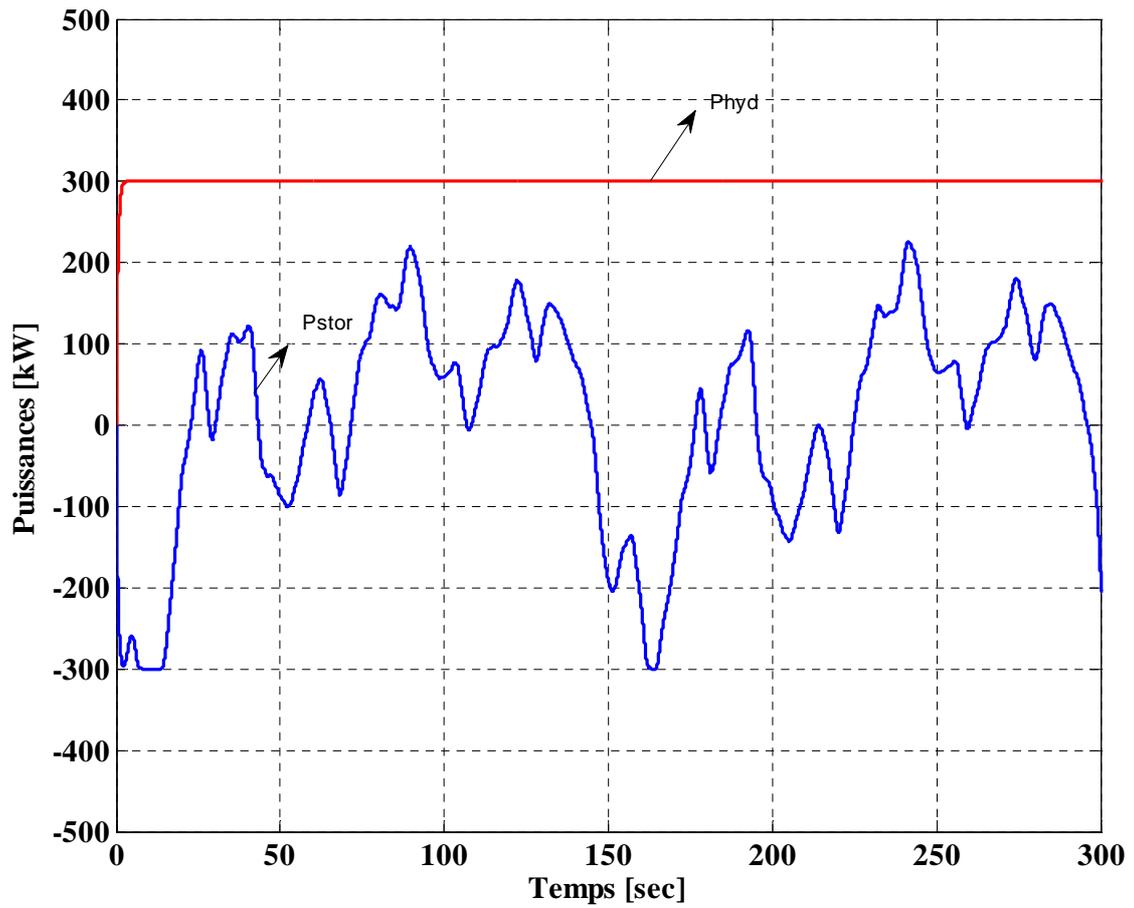


Figure 5.14b. Puissance hydraulique et puissance de stockage

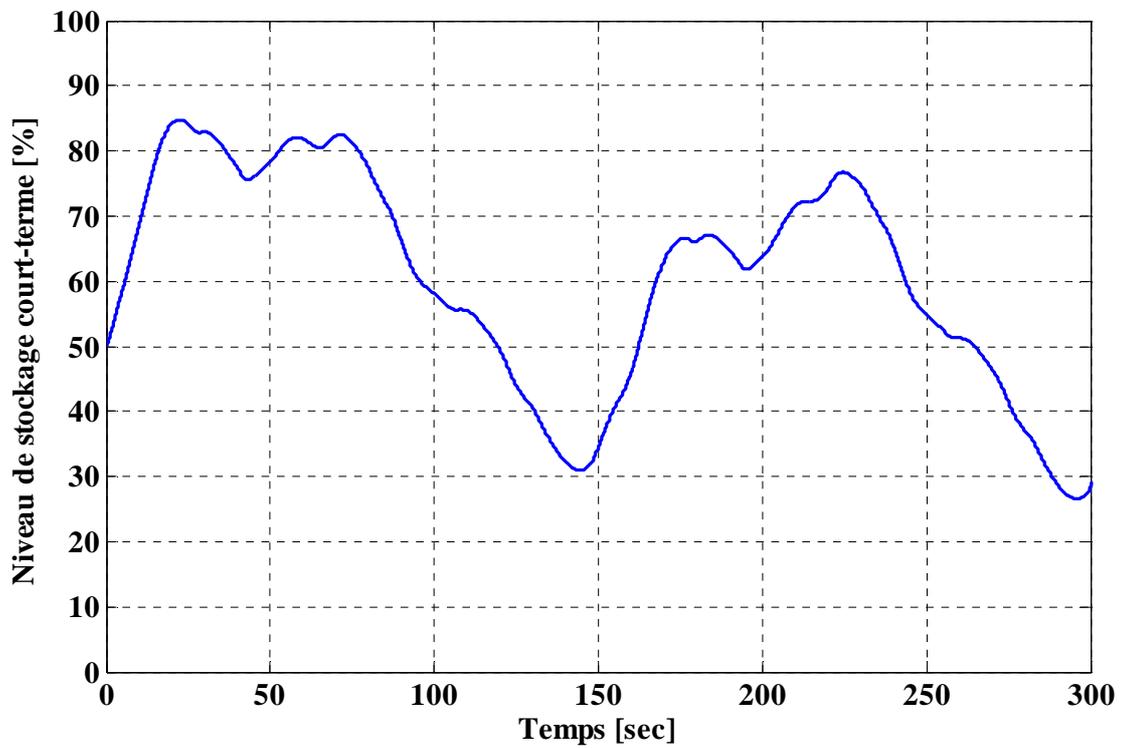


Figure 5.14c. Niveau de stockage en %

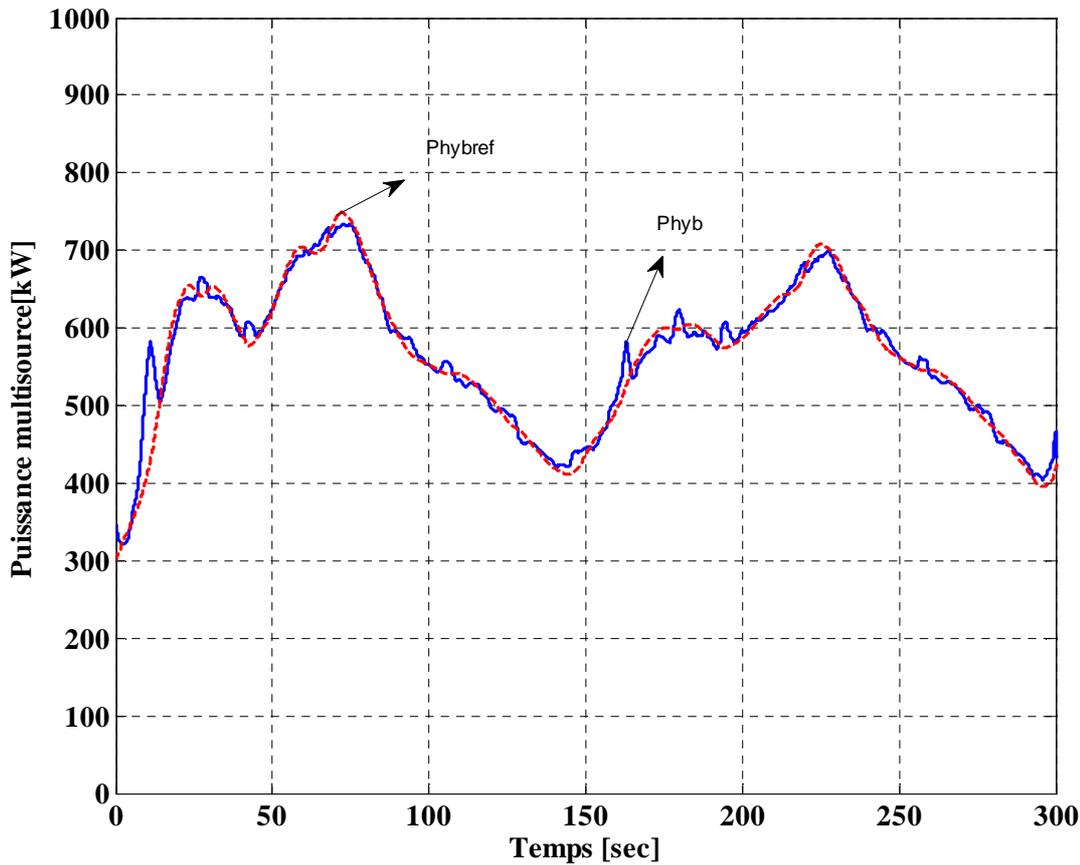


Figure 5.14d. Puissance hybride disponible et puissance hybride de référence

La figure 5.14a montre la puissance éolienne et la puissance hybride générée. La figure 5.14b montre la puissance éolienne et la puissance stockée. La figure 5.14c montre le niveau du stockage en%. La figure 5.14d montre la puissance hybride générée et la puissance hybride de référence.

Le tableau 5.5 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°2

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                             | Rendement |
|---------------------|-------------------|--|-----------|
| •Source éolienne    | •255 kW           | Écart type de l'éolienne : 147,5 kW            | •100%     |
| •Source hydraulique | •299,7 kW         | •Écart type de l'hydraulique : 6,24 kW         | •100%     |
| •Unité de stockage  | •21,79 kW         | •Écart type de l'unité de stockage:<br>71,4 kW |           |
| •Source hybride     | •576,5kW          | •Écart type de la source hybride:<br>102,6kW   | •99,94%   |

Tableau 5.5 Indicateurs du superviseur n°2.

#### **V.5.4. Interprétation des résultats**

A partir des résultats de simulations, la figure 5.14b montre que l'unité de stockage ne sature plus, et que la puissance de stockage est symétrique par rapport à zéro. Par contre, en absence de filtrage de la puissance éolienne nous constatons (figure 5.14a) que la puissance hybride est moins lissée (fluctuation rapide). La figure 5.7d montre que la puissance hybride fournie au réseau (malgré sa fluctuation) est bien régulée par rapport à la puissance hybride de référence (5.4).

Le tableau 5.5 nous montre que la stratégie de commande de la puissance de stockage à l'aide de superviseur flou sans filtrage de la puissance éolienne permet d'obtenir un rendement de 99,94% et un écart type de 102,6 kW de la puissance hybride.

#### **V.5.5. Conclusion**

Dans cette stratégie, la supervision fournit la puissance de référence au dispositif de stockage. Nous constatons dans le même temps une baisse de l'écart type et une augmentation de variations rapides de la puissance hybride, ceci est dû à l'absence du filtrage de la puissance éolienne.

Pour éliminer ce dernier défaut nous utiliserons dans la suite une stratégie qui s'appuie sur l'utilisation d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable.

### **V.6. Superviseur n° 3**

#### **V.6.1. Introduction**

- L'objectif du superviseur n°3 est le même que celui des deux superviseurs précédents à l'exception de la stratégie de commande utilisée (puissance éolienne filtrée et utilisation d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable). La puissance de référence hybride est déterminée à partir d'un bilan des puissances. Le superviseur flou possède deux entrées et deux sorties.

## V.6.2. Méthodologie pour la construction du superviseur

### V.6.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 5.6 présente le cahier des charges du superviseur n° 3 à l'exception des moyens d'action. Dans cette étude, nous pouvons contrôler la microcentrale hydraulique à vitesse variable et l'unité de stockage.

| Objectifs   | Contraintes  | Moyens d'actions  | Outils   |
|---|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>•Maximiser l'énergie envoyée au réseau</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fluctuation de la puissance éolienne.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•La puissance de référence de stockage</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Logique floue</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>•Lisser la puissance électrique de la source hybride.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Les limites de la capacité du système de stockage.</li> <li>•Les limites de la capacité du système hydraulique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•La puissance de référence de l'hydraulique</li> <li>•La puissance hybride de référence</li> </ul> |  |

Tableau 5.6. Cahier des charges du superviseur n° 3

### V.6.2.2. Structure du superviseur étudié

La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les objectifs définis au cahier des charges.

On a comme entrée, le niveau de stockage court terme  $L_{ev-stor}$  et l'écart des puissances de consigne et mesurée de la puissance hybride  $\Delta P_{hyb}$ . En sortie, nous avons la puissance de référence de stockage  $P_{stor-ref}$  et la puissance de référence de la centrale hydraulique  $P_{hyd-ref}$ .

La structure du superviseur étudié est présentée dans la figure. 5.15.

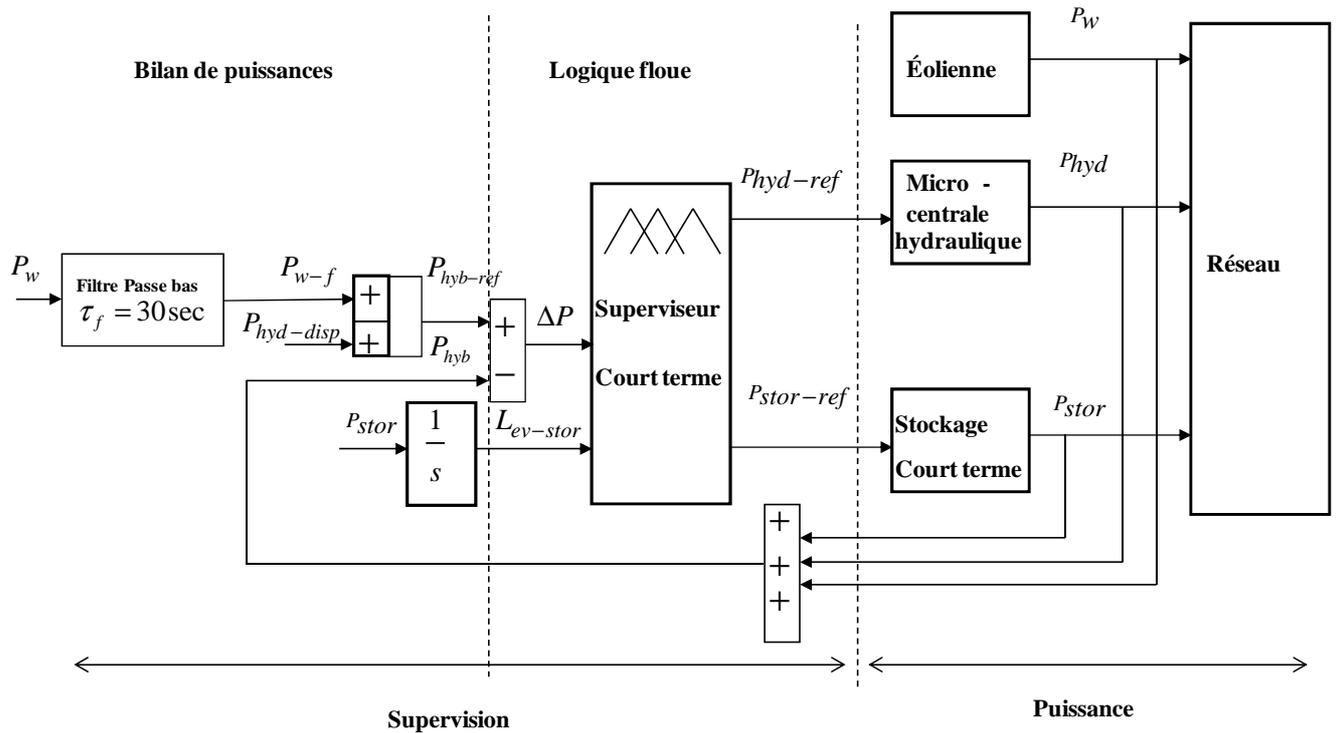


Figure 5.15. Structure du superviseur étudié

### V.6.2.3. Détermination des « graphes fonctionnels »

La stratégie du superviseur flou du système multi sources peut être définie graphiquement. Le graphe fonctionnel du superviseur étudié est présenté à la figure 5.16

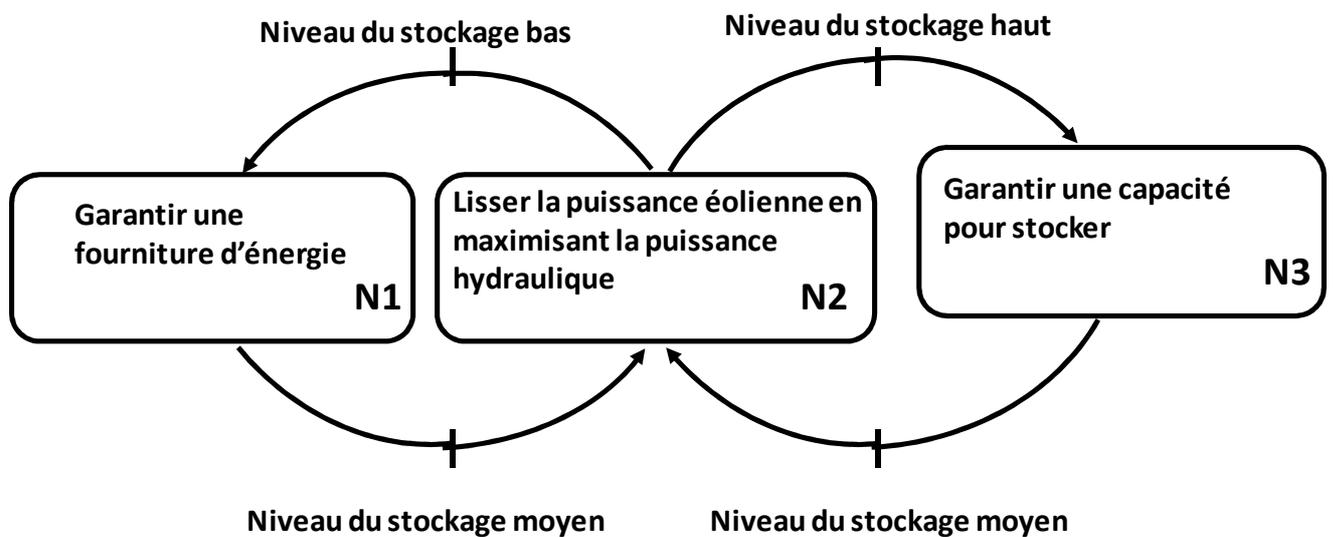


Figure 5.16 Graphe fonctionnel du superviseur étudié

N1, N2, N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires alors que les transitions (Niveau stockage) peuvent être vues comme des contraintes appliquées au système.

- N1: Si le niveau de stockage est bas, alors le superviseur garantit la fourniture de l'énergie.
- N2: Si le niveau de stockage est moyen, alors le superviseur lisse la puissance éolienne et maximisent la participation hydraulique.
- N3: Si le niveau de stockage est haut, alors le superviseur garantit une capacité pour stocker.

Dans tous les cas, la source éolienne fournit sa puissance disponible.

Le graphe fonctionnel du superviseur concernant le système de stockage est présenté à la figure 5.17

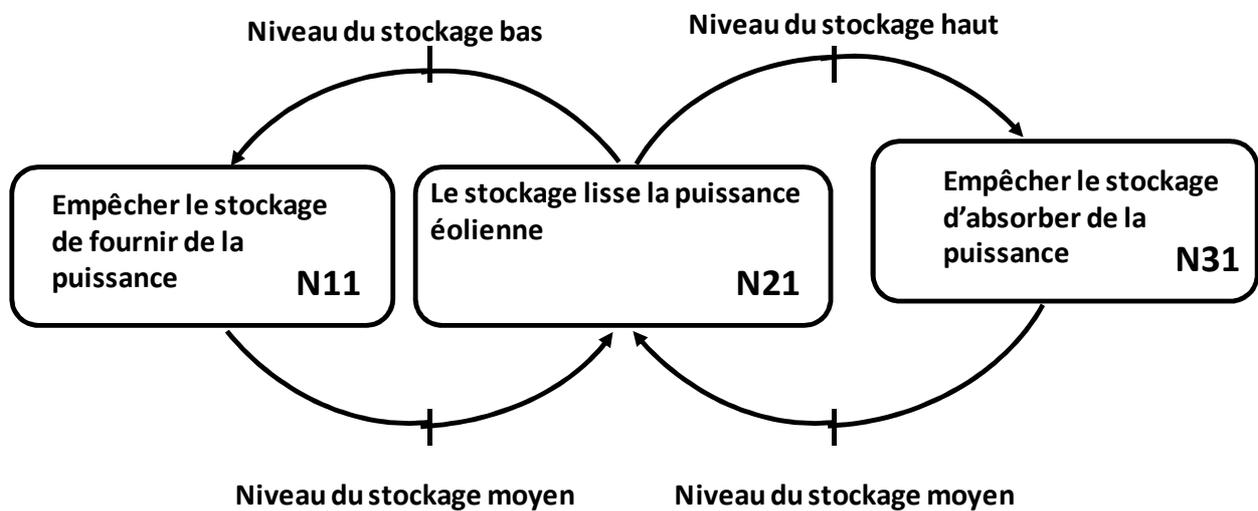


Figure 5.17 Graphe fonctionnel du système de stockage

Le graphe fonctionnel du superviseur concernant la source hydraulique est présenté à la figure 5.18

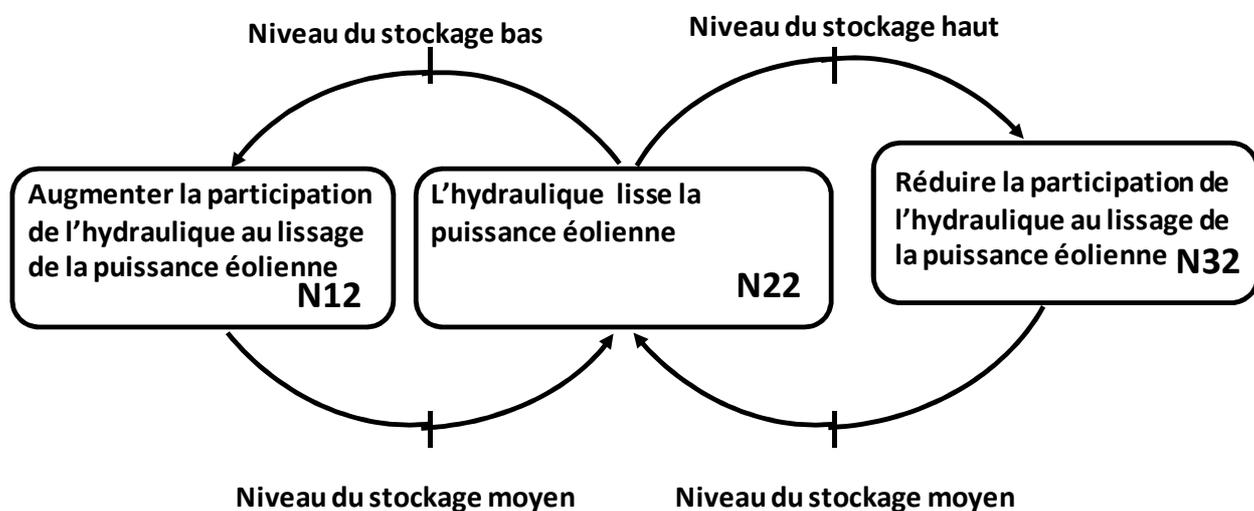


Figure 5.18 Graphe fonctionnel du système de la source hydraulique

#### V.6.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance

L'étape suivante de la méthodologie proposée est la détermination des fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée et de sortie du superviseur à logique floue. Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche. La figure 5.19 représente la fonction d'appartenance de grandeur d'entrée  $L_{ev-stor}$ . Elle est identique à la figure 5.4.

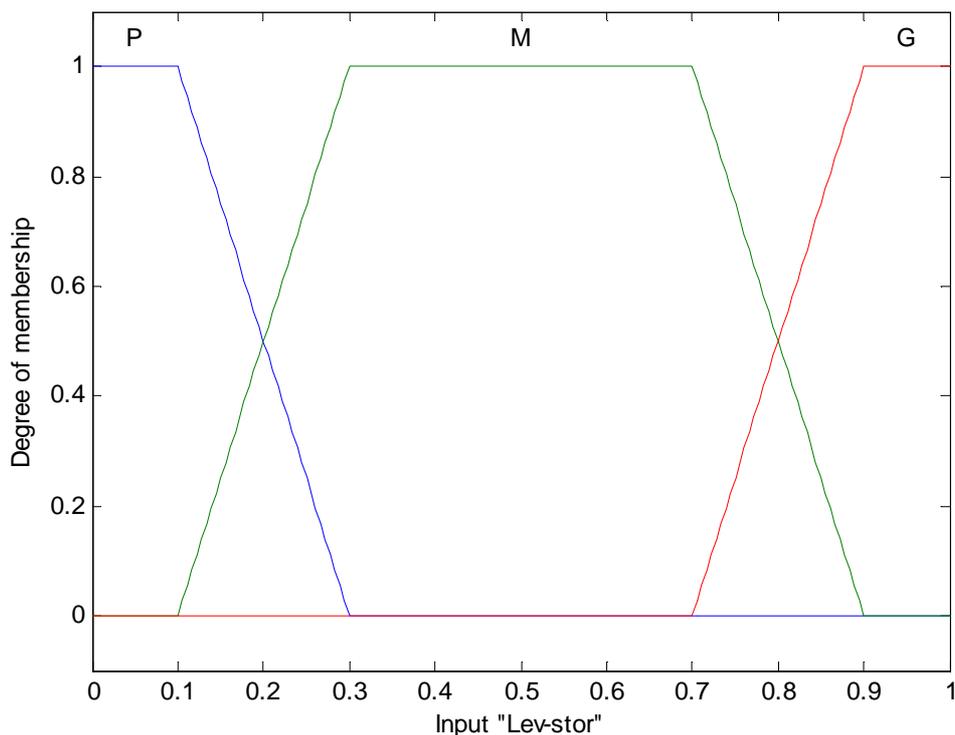


Figure 5.19 Fonction d'appartenance de  $L_{ev-stor}$

La figure 5.20 représente la fonction d'appartenance de la grandeur d'entrée  $\Delta P$ . Les ensembles notés « P<sup>+</sup>M » et « P<sup>+</sup>G » représentent respectivement les états « Positif moyen » et « Positif grand ». Les ensembles notés « N<sup>-</sup>M » et « N<sup>-</sup>G » représentent respectivement les états « Négatif moyen » et « Négatif grand ». L'ensemble noté « Z », représente l'état « Zéro ».

Le nombre d'états flous (5) a été choisi en fonction de variations possibles de la puissance éolienne. La sélection des sous-ensembles flous au moyen de degrés d'appartenance nous ont conduits alors, par cette méthode, à la définition d'une grandeur de commande optimisée.

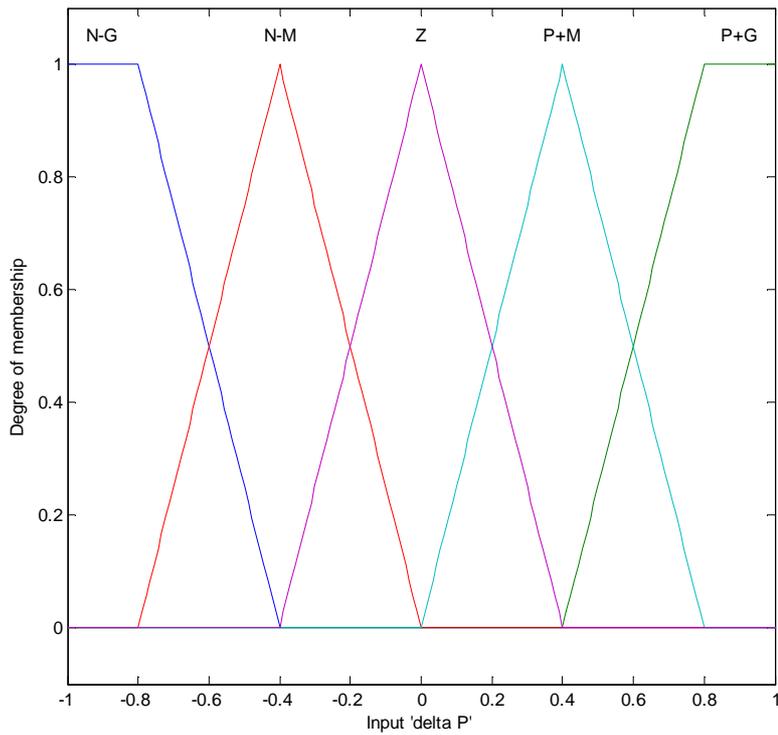


Figure 5.20 Fonction d'appartenance de  $\Delta P$

La figure 5.21 et la figure 5.22 représentent la fonction d'appartenance des grandeurs de sortie

$P_{stor - ref}$  et  $P_{hyd - ref}$ .

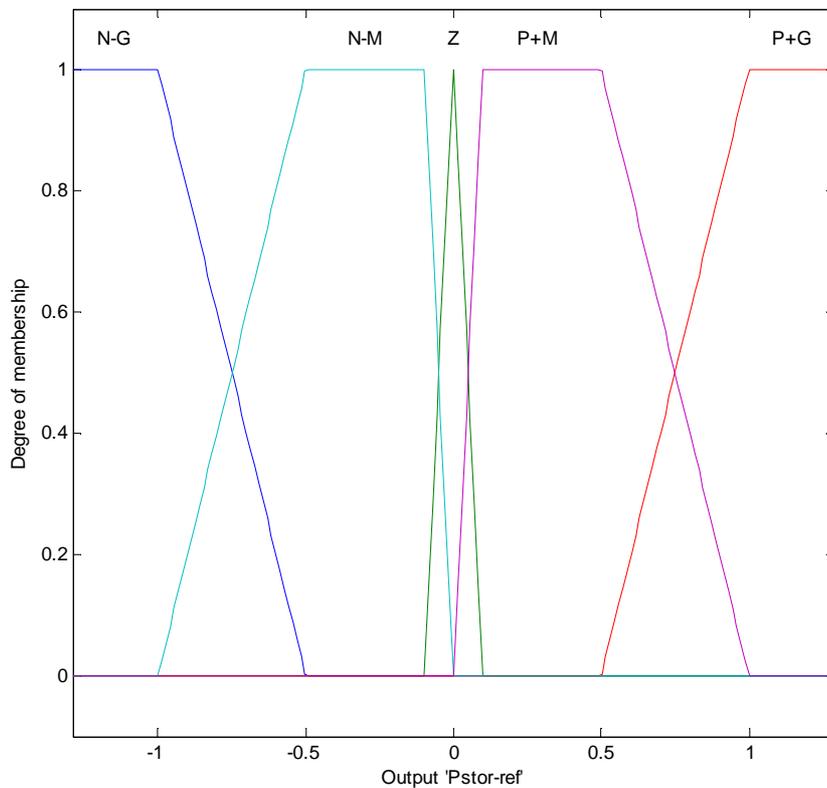


Figure 5.21 Fonction d'appartenance de  $P_{stor - ref}$

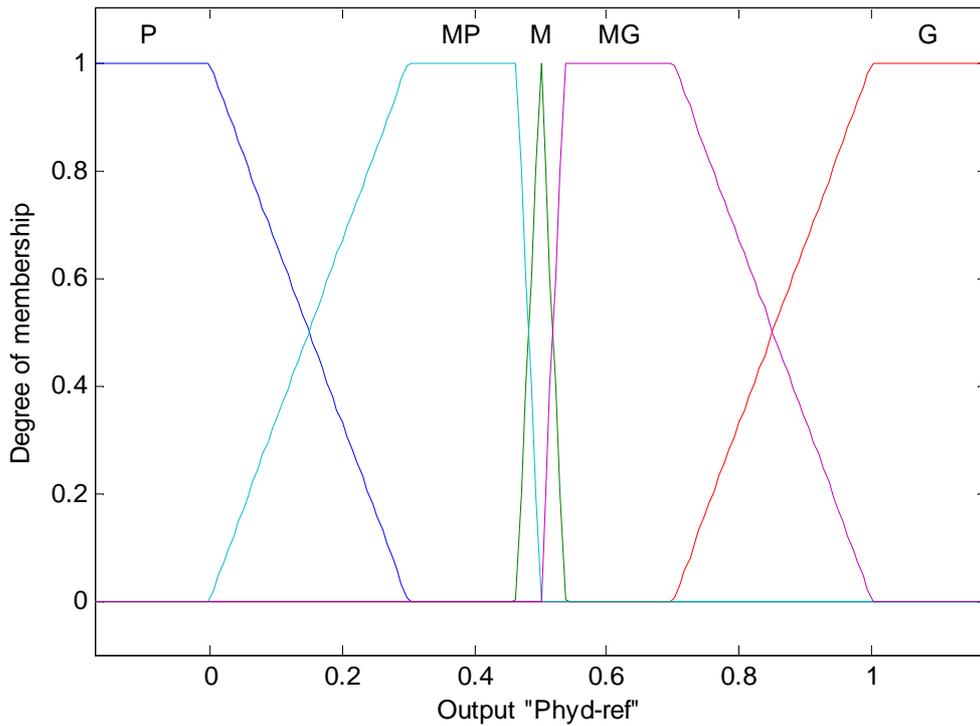


Figure 5.22 Fonction d'appartenance de  $P_{hyd} - ref$

#### V.6.2.5. Détermination des « graphes opérationnels »

Cette démarche mène aux graphes opérationnels associés au système du stockage et au système hydraulique.

Les figures 5.23 (a, b, c) présentent les graphes opérationnels associés au système de stockage.

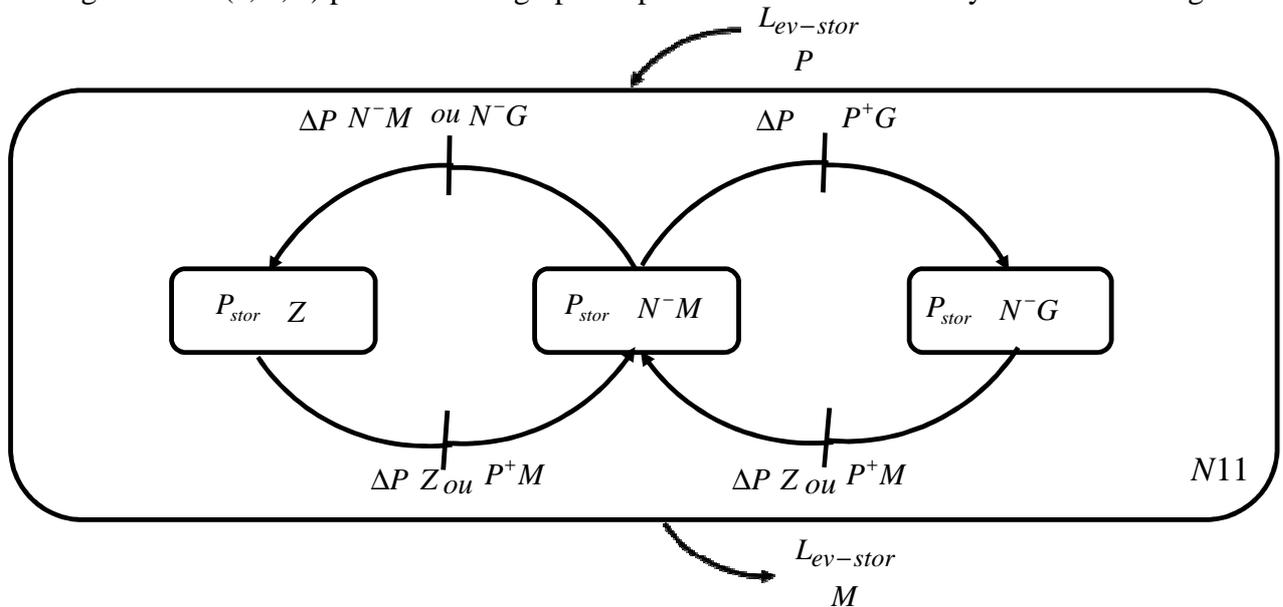


Figure 5.23 a

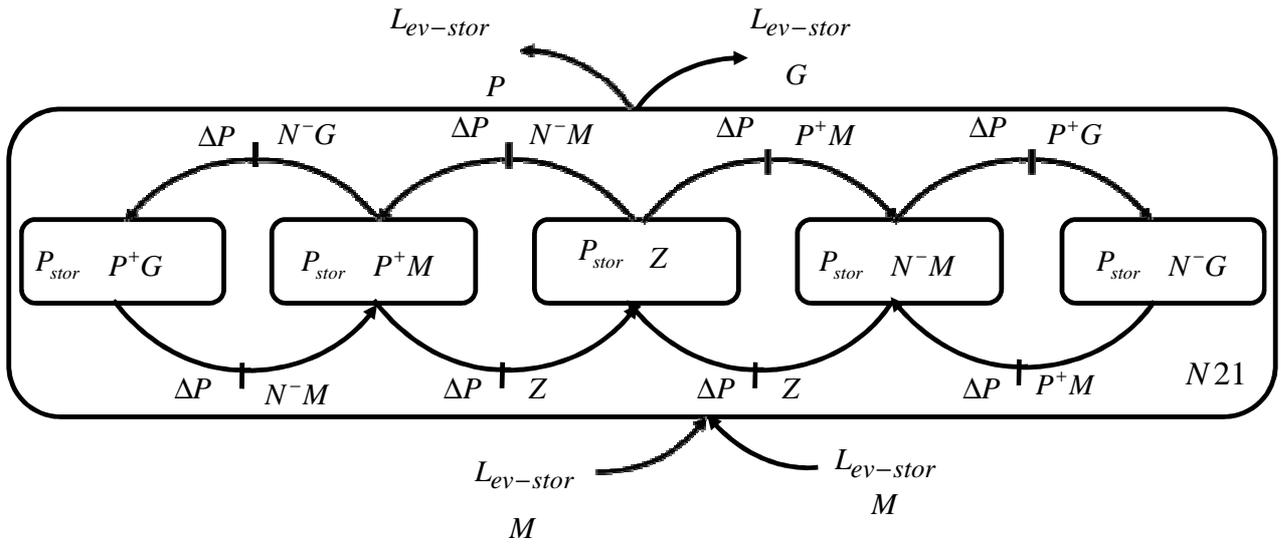


Figure 5.23 b

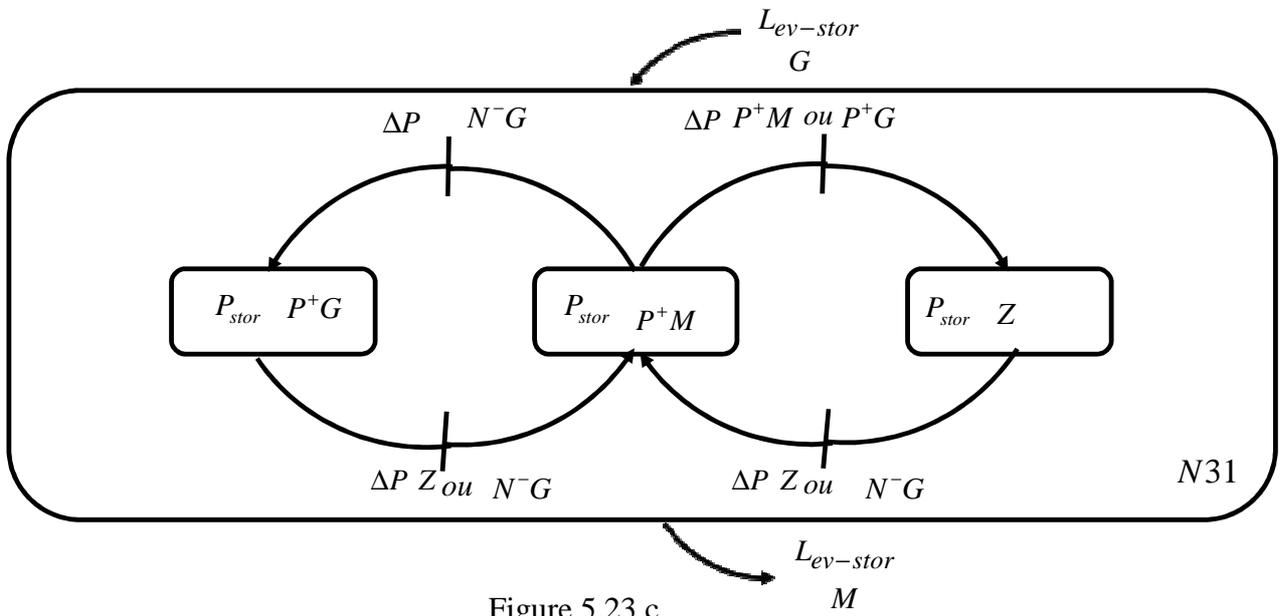
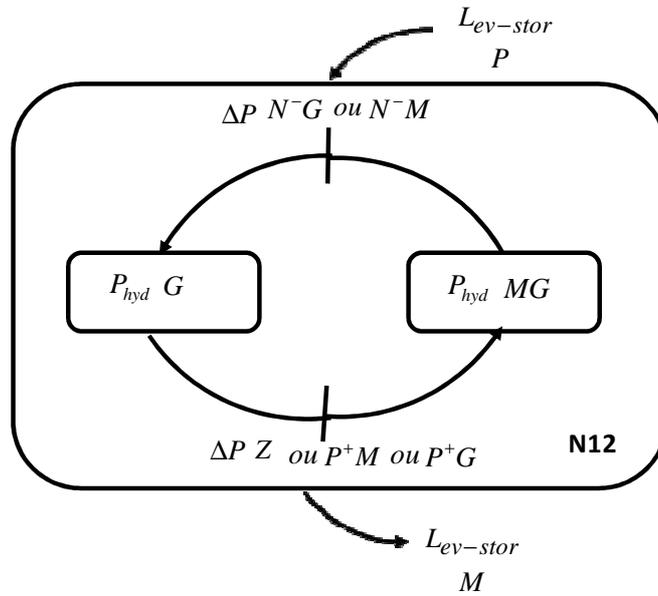
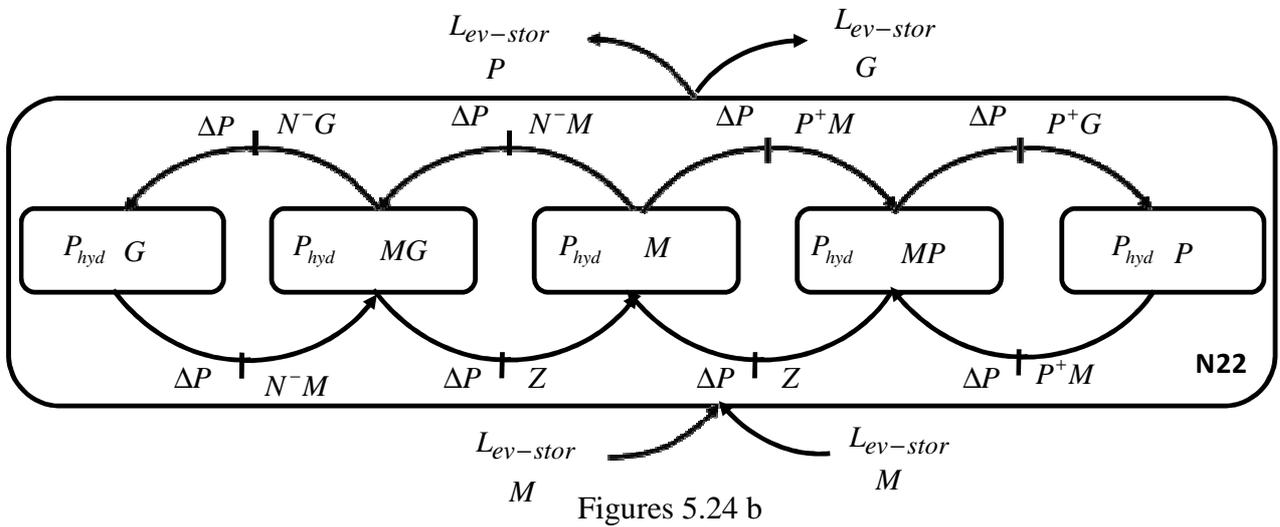


Figure 5.23 c

Figure 5.23 Graphes opérationnels associés au système de stockage

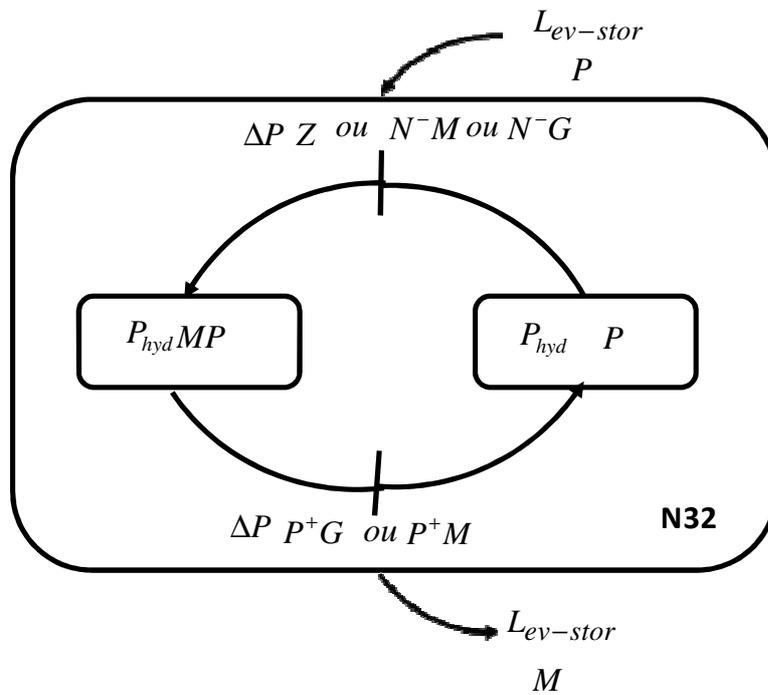


Figures 5.24 a



Figures 5.24 b

Les figures 5.24 (a, b, c) présentent les graphes opérationnels associés au système hydraulique



Figures 5.24 c

Figure 5.24 Sous graphes opérationnels de la source hydraulique

### V.6.2.6. Extraction des lois floues

A partir des diagrammes des figure 5.23 et figure 5.24, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Le tableau 5.7 et le tableau 5.8 présentent les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement du système de stockage et de la source hydraulique.

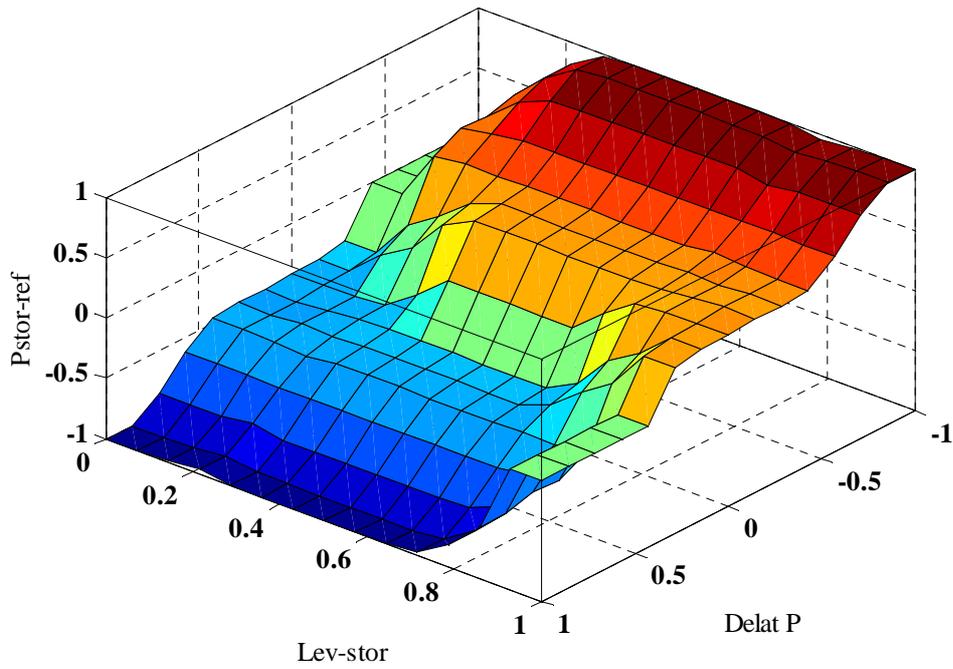
| $P_{stor-ref}$ |                  | $L_{ev-stor}$    |                  |                  |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                |                  | P                | M                | G                |
| $\Delta P$     | N <sup>-</sup> G | Z                | P <sup>+</sup> G | P <sup>+</sup> G |
|                | N <sup>-</sup> M | Z                | P <sup>+</sup> M | P <sup>+</sup> M |
|                | Z                | N <sup>-</sup> M | Z                | P <sup>+</sup> M |
|                | P <sup>+</sup> M | N <sup>-</sup> M | N <sup>-</sup> M | Z                |
|                | P <sup>+</sup> G | N <sup>-</sup> G | N <sup>-</sup> G | Z                |

Tableau 5.7 Les lois floues des 3 modes de fonctionnement du système de stockage

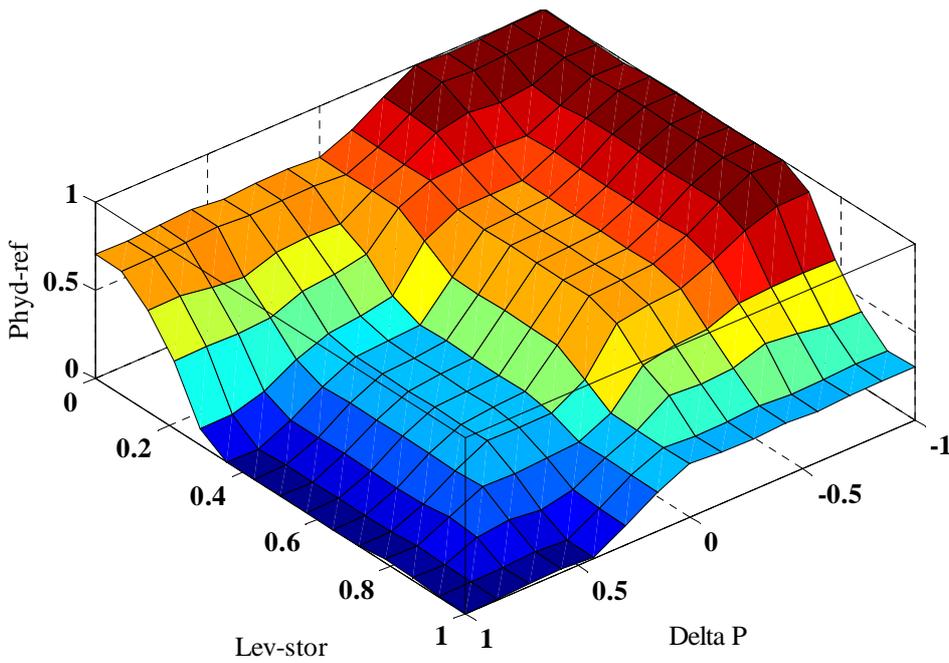
| $P_{hyd-ref}$ |                  | $L_{ev-stor}$ |    |    |
|---------------|------------------|---------------|----|----|
|               |                  | P             | M  | G  |
| $\Delta P$    | N <sup>-</sup> G | G             | G  | MP |
|               | N <sup>-</sup> M | G             | MG | MP |
|               | Z                | MG            | M  | MP |
|               | P <sup>+</sup> M | MG            | MP | P  |
|               | P <sup>+</sup> G | MG            | P  | P  |

Tableau 5.8 Les lois floues des 3 modes de fonctionnement de la source hydraulique

La figure 5.25a et la figure 5.25b présentent les surfaces obtenues à l'aide du superviseur à logique floue. Les deux surfaces permettent d'exprimer la structure d'un superviseur avec deux entrées et deux sorties.



(a)



(b)

Figure 5.25 Évolution de la puissance de stockage  $P_{stor}$  , respectivement de la puissance hydraulique  $P_{hyd - ref}$  en fonction du niveau de stockage  $L_{ev - stor}$  et l'erreur de la puissance  $\Delta P$  .

### V.6.3. Résultat des simulations

Le réseau simulé est celui présenté à la figure 5.1 et les conditions des simulations sont présentées par le tableau (5.1a).

Les courbes présentées de la figure 5.26a à la figure 5.26d correspondent aux résultats de simulation.

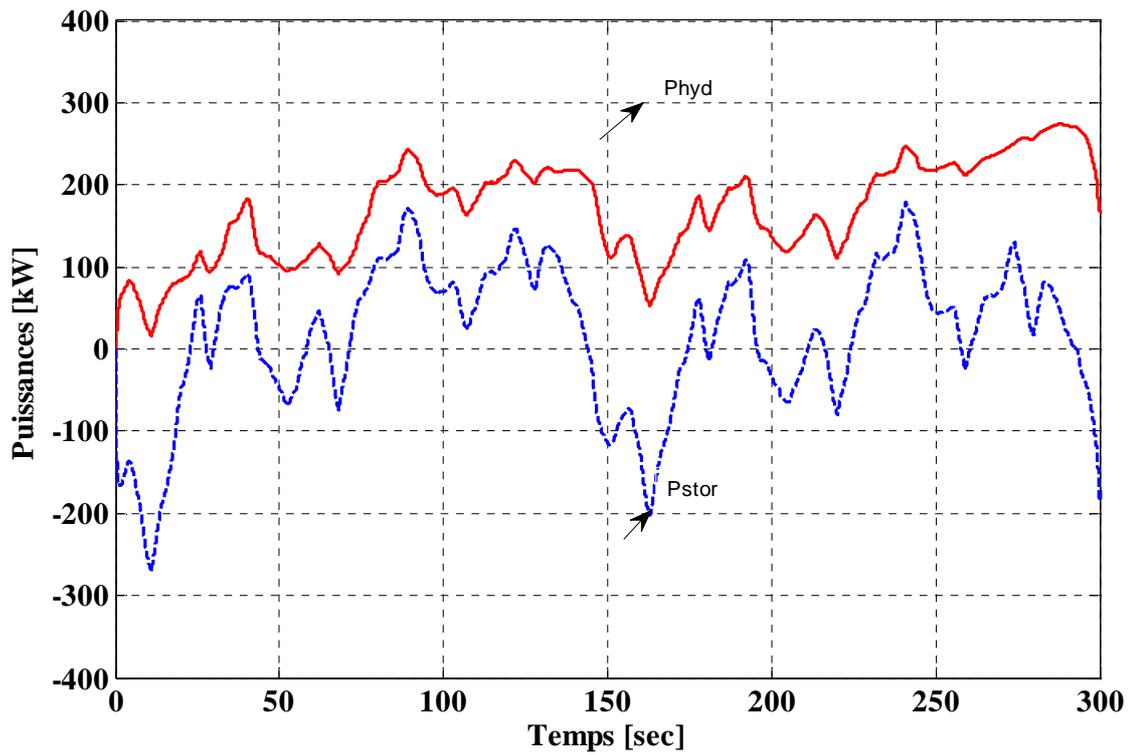


Figure 5.26a. Puissance hydraulique et puissance de l'unité de stockage

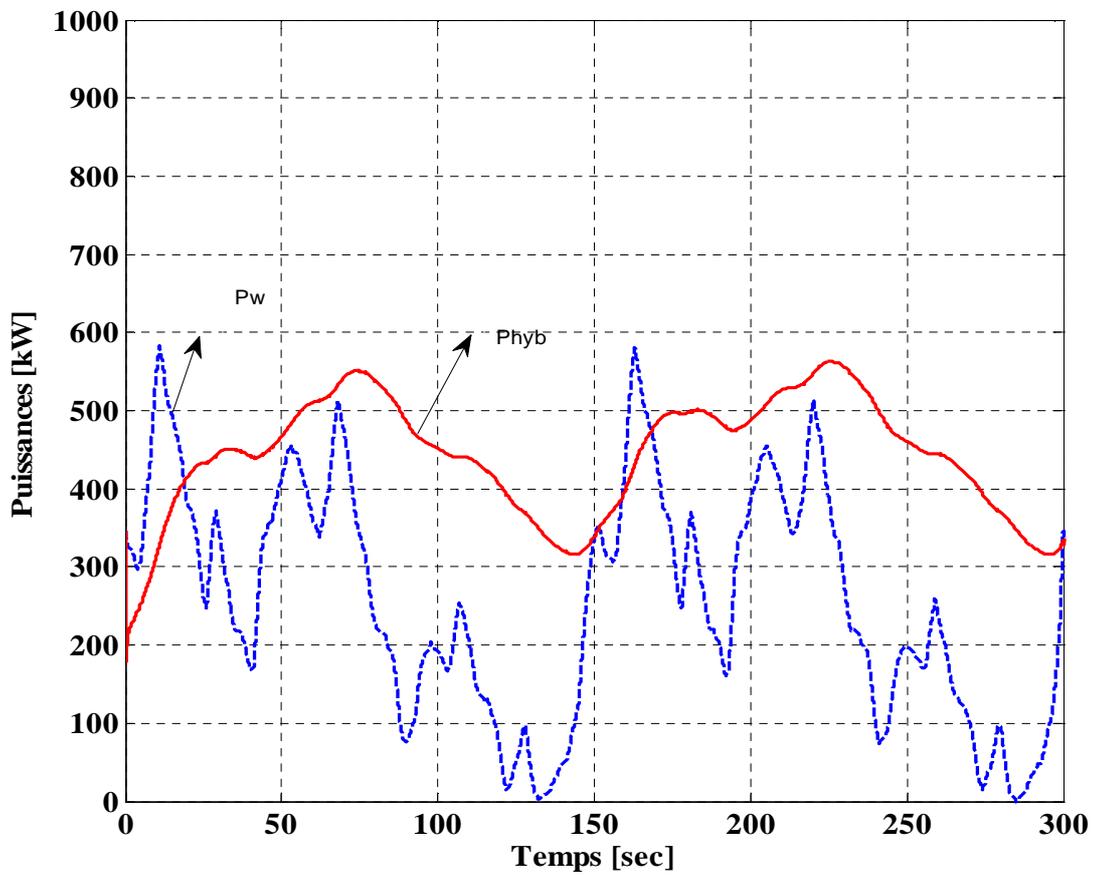


Figure 5.26b. Puissance hybride et puissance éolienne

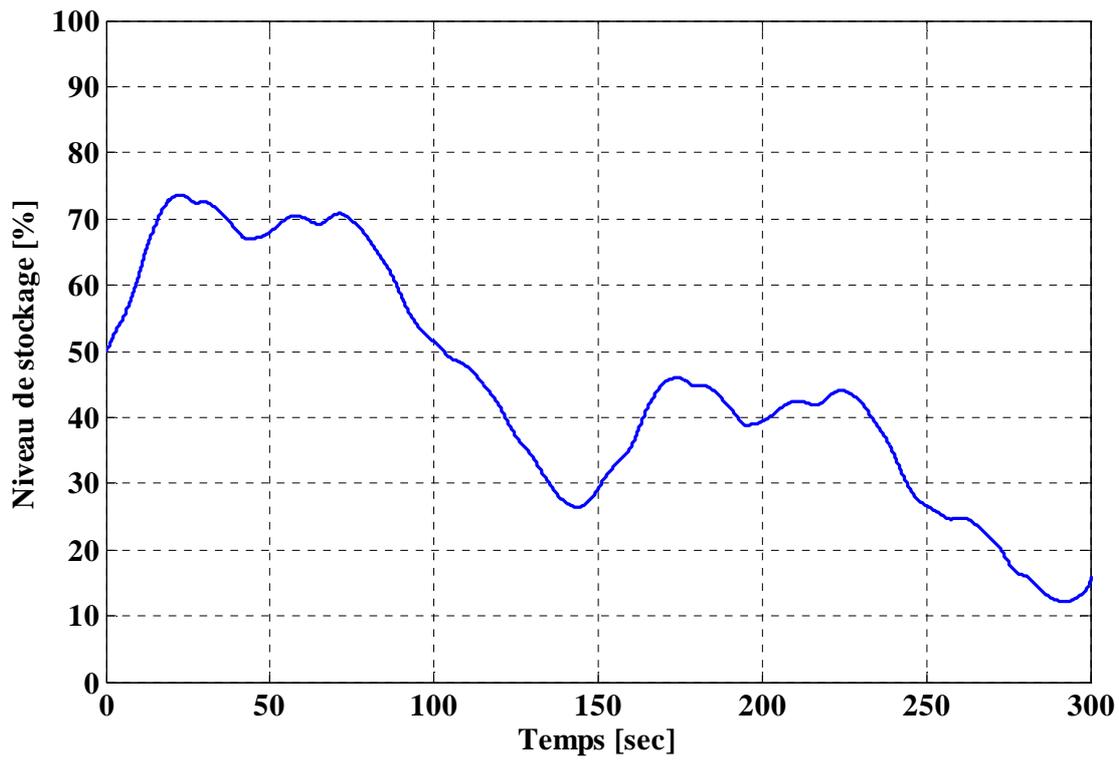


Figure 5.26b. Niveau de stockage en%

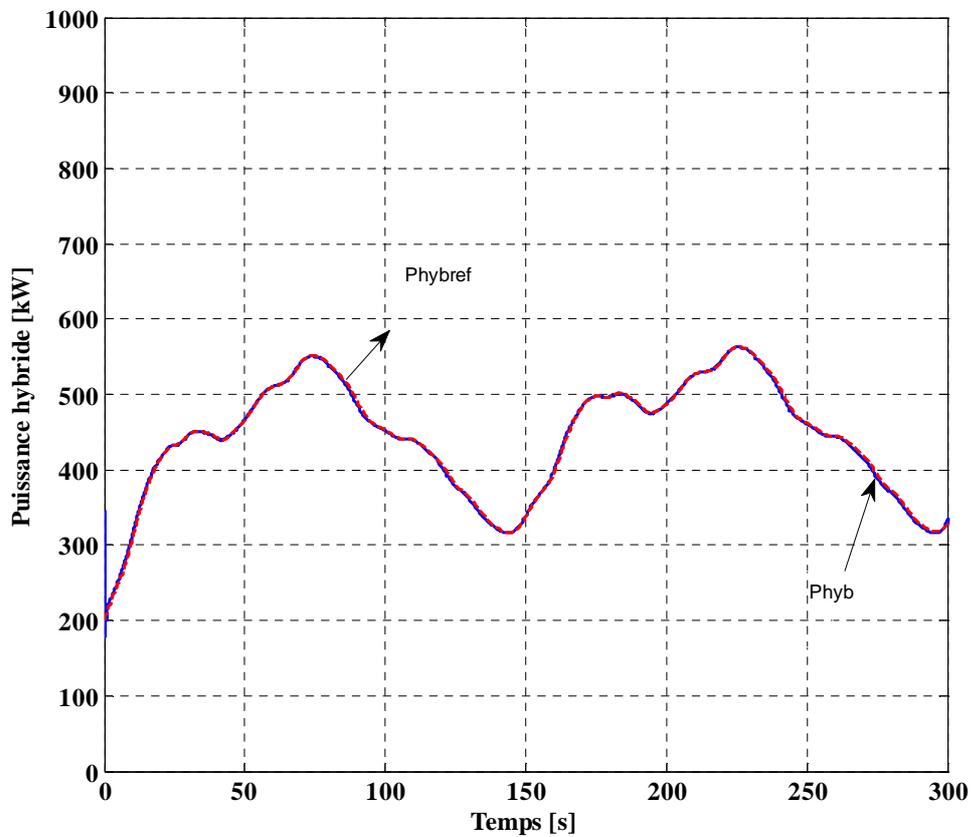


Figure 5.26d. Puissance hybride disponible et puissance hybride de référence

La figure 5.26a montre la puissance hydraulique et la puissance de stockage. La figure 5.26b montre la puissance éolienne et la puissance hybride générée. La figure 5.26c montre le niveau du stockage en %. La figure 5.26d montre la puissance hybride générée et la puissance hybride de référence.

Le tableau 5.9 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°3

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                             | Rendement |
|---------------------|-------------------|--|-----------|
| •Source éolienne    | •255 kW           | Écart type de l'éolienne : 147,5 kW            | •100%     |
| •Unité de stockage  | •21,79 kW         | •Écart type de l'unité de stockage:<br>71,4 kW |           |
| •Source hydraulique | •183,8 kW         | •Écart type de l'hydraulique:<br>58,13 kW      | •61,21%   |
| •Source hybride     | •447,8 kW         | •Écart type de la source hybride:<br>73,68 kW  | •77,63%   |

Tableau 5.9 Indicateurs du superviseur n°3

#### V.6.4. Interprétation des résultats

A partir des résultats de la figure 5.26b, nous remarquons que la microcentrale hydraulique adapte sa puissance fournie aux exigences du superviseur flou et que la puissance de stockage est symétrique par rapport à zéro. La figure 5.26d montre une amélioration de lissage de la puissance hybride fournie au réseau, cependant on note une baisse de son rendement du fait de l'utilisation de l'hydraulique pour aider l'unité de stockage à lisser la puissance éolienne.

#### V.6.5. Conclusion

Cette stratégie de supervision permet de contrôler directement la puissance du système de stockage et la puissance de la source hydraulique et, donc, de contrôler la puissance hybride envoyée au réseau. On remarque une amélioration de qualité de lissage de la puissance hybride, cependant, on note une baisse de la puissance produite.

Pour améliorer le rendement de la centrale hybride, le superviseur n°4 utilisera la logique floue pour déterminer la puissance hybride de référence.

## V.7. Superviseur n° 4

### V7.1. Introduction

Dans le cadre du superviseur n°4, la référence de la puissance hybride sera déterminée par un superviseur flou « moyen terme ». Néanmoins, la détermination des puissances de références des éléments constituant la centrale hybride est effectuée par un superviseur « court terme » identique à celui développé par le superviseur n°3. La structure de la supervision est séparée en deux étages. La figure 5.27 présente la structure de la supervision du système multi – source étudié. [Nas,09]

### V.7.2. Méthodologie pour la construction du superviseur [Abb, 06], [Cou, 10], [Spr, 09]

#### V.7.2.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 5.10 présente le cahier des charges du superviseur n° 4

| Niveau de supervision                                | Objectifs   | Contraintes   | Moyens d'actions   | Outils         |
|--|---|---|--|----------------|
| •Moyen terme (quelques heures à une demi-heure).     | •Maximiser l'énergie envoyée au réseau.               | •Fluctuation de la puissance éolienne.<br>•Capacité de la source hydraulique. | •La puissance de référence de hybride.   | •Logique floue |
| •Court terme (quelques secondes à quelques minutes). | •Lisser la puissance électrique de la source hybride. | • Capacité de l'unité de stockage à court terme.                              | •La puissance de référence de hydraulique.<br>•La puissance de référence de stockage à court et à moyen terme. | •Logique floue |

Tableau 5.10 présente le cahier des charges du superviseur n° 4

#### V.7.2.2. Structure du superviseur étudié

Une bonne gestion de la source de production hydraulique grâce à la vitesse variable de son générateur, va permettre d'accroître la productivité totale de la source hybride, mais aussi de fournir la puissance de référence de la centrale multi sources.

Les entrées au superviseur moyen terme pour atteindre les deux objectifs peuvent être définies :

- Afin de satisfaire la puissance de référence  $P_{hyb-ref}$  une entrée du superviseur est la somme de la puissance éolienne filtrée disponible et la puissance maximale hydraulique
- Pour pouvoir optimiser l'énergie de la source hydraulique une deuxième entrée du superviseur est le ratio des puissances hydraulique mesurée et la puissance hydraulique maximale.

La sortie du superviseur flou est la consigne imposée à la centrale multi source  $P_{hyb-ref}$ .

La structure de la supervision est séparée en deux superviseurs.

1. Le superviseur niveau Moyen terme fournit la puissance de référence de la source hybride, tout en maximisant l'extraction de la puissance hydraulique, malgré la puissance fluctuante de l'éolienne.
2. Le superviseur niveau court terme est le même que celui du superviseur n°3, il fournit la puissance de référence de la turbine hydro électrique et celle de l'unité de système de stockage court terme. Ainsi, les lois floues sont identiques à celle de paragraphe V.6.2.6.

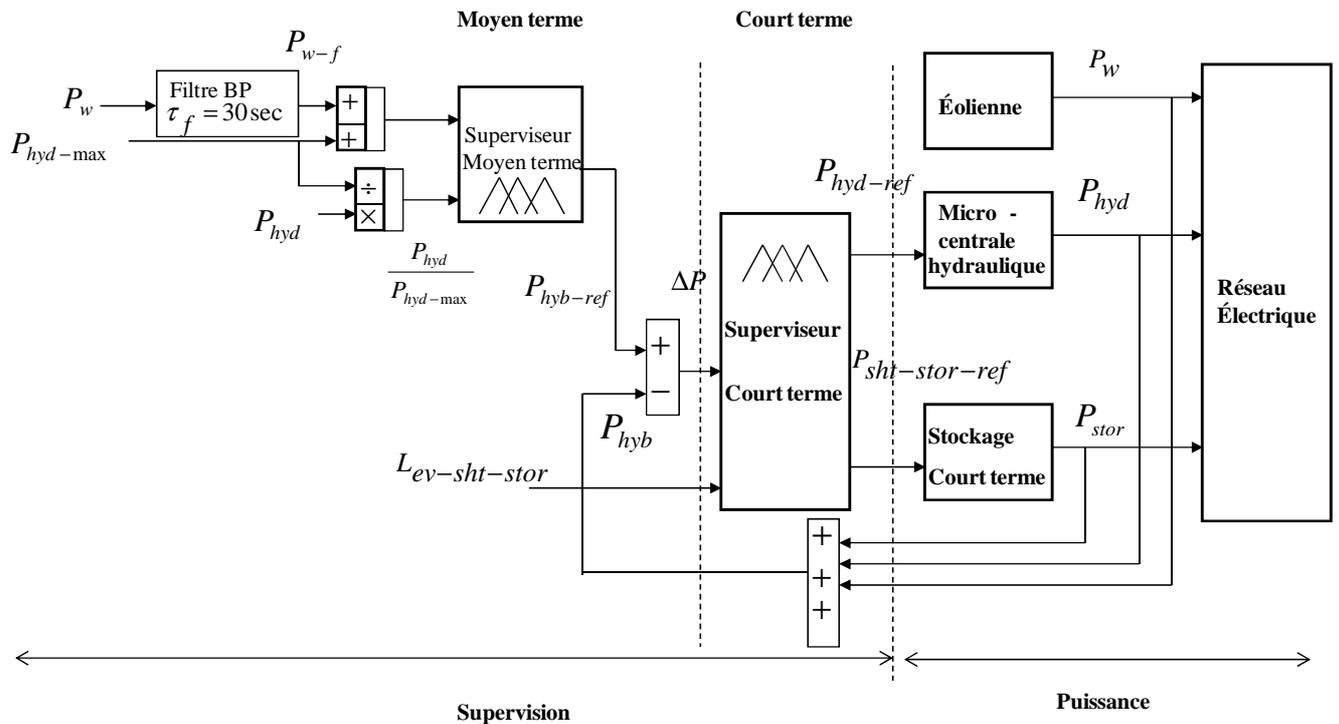


Figure 5.27 Structure de supervision du système étudié

Notations :

$P_{hyd}$  : Puissance produite de la source hydroélectrique

$L_{ev-sht-stor}$  : Niveau de stockage à court terme

$P_w$  : Puissance produite de l'éolienne

$P_{st-stor}$  : Puissance de référence de stockage à court terme

$P_{hyd-ref}$  : Puissance de référence de la source hydroélectrique

$P_{hyb}$  : Puissance produite de la multi source

$P_{hyb-ref}$  : Puissance de référence de la multi source

$\Delta P$  : Erreur sur les puissances de la source hybride

$\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$  : Ratio de puissances de la source hydraulique

$P_{hyd-max}$  : Puissance maximale de la source hydroélectrique

$P_{w-f}$  : Puissance filtrée de l'éolienne

### V.7.2.3. Détermination des graphes fonctionnels du superviseur niveau moyen terme

Le graphe fonctionnel du superviseur étudié est présenté à la figure 5.28.

Les modes de marche sont représentés par des rectangles aux bords arrondis et les états du système par des transitions entre ces modes.

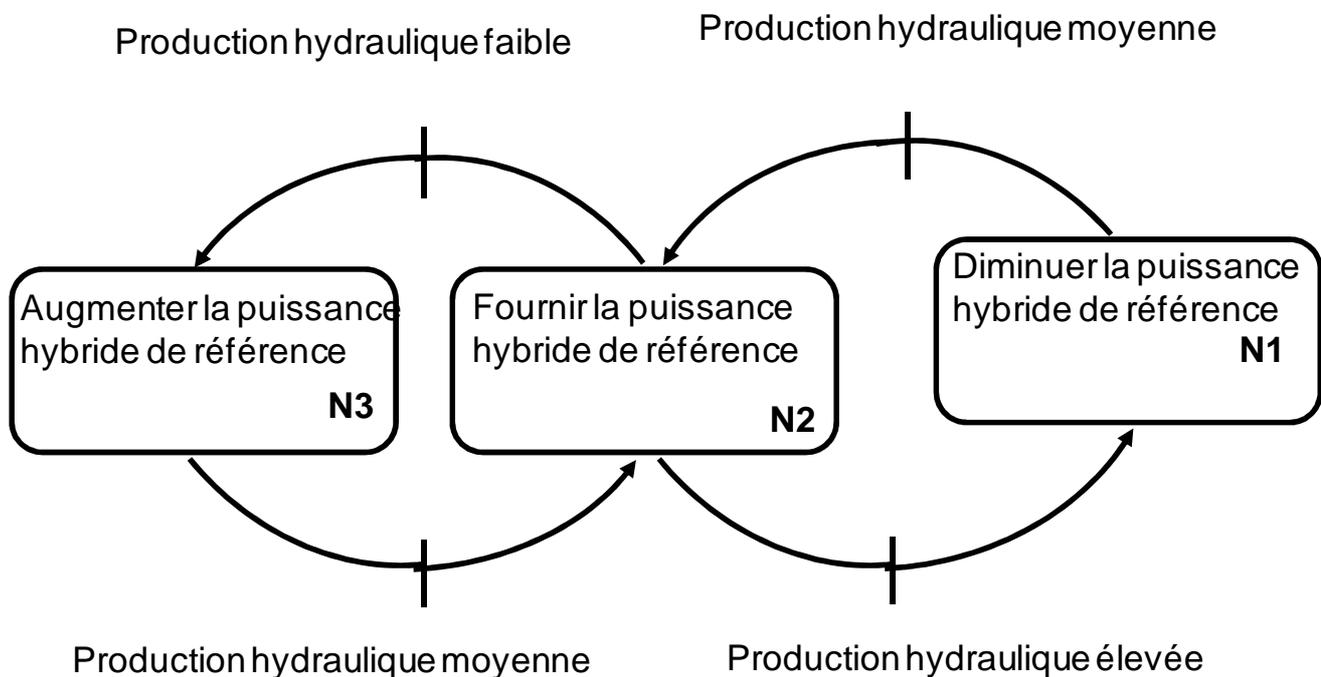


Figure. 5.28 Graphe fonctionnel du superviseur niveau moyen terme

N1, N2 et N3 sont les modes de marches du superviseur et sont liés à des objectifs prioritaires, tandis que les transitions peuvent être vues comme des contraintes appliquées au système.

- N1 : Si le rapport de puissances  $\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$  est grand (G), la puissance de référence de la centrale multi sources diminuera afin d'éviter la saturation de la source hydraulique.
- N2 : Si le rapport de puissances  $\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$  est moyen (M), la puissance de référence de la centrale multi sources sera égale à une valeur moyenne.
- N3 : Si le rapport de puissances  $\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$  est petit (P), la puissance de référence de la centrale multi sources augmentera afin d'éviter la saturation de la source hydraulique.

#### **V.7.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance du superviseur niveau moyen terme**

Les fonctions d'appartenance des grandeurs d'entrée assureront les transitions entre les différents modes de marche ou le contrôle de grandeur de consigne. Le nombre maximal de lois floues étant directement fonction du nombre d'ensembles flous considérés pour chaque entrée, il faut veiller à minimiser le nombre de ces ensembles. Toujours pour des raisons de simplicité, il est conseillé de considérer, sauf exception, des ensembles symétriques. La fonction d'appartenance liée au ratio de puissances de la source hydraulique est illustrée à la figure 5.29 et celle de la somme de la puissance éolienne filtrée disponible et la puissance maximale hydraulique est montrée à la figure 5.30. Elles sont constituées de trois niveaux en cohérence avec les trois modes de marche (N1, N2 et N3) de la représentation graphique précédente.

Les ensembles notés «P» et «G» représentent respectivement les états «Petit» et «Grand», ils assurent la réserve d'énergie hydraulique. L'ensemble noté «M», représente l'état «Moyen», il est utilisé dans le scénario proposé pour compenser les écarts entre la puissance filtrée et non filtrée de l'éolienne. Les ensembles notés «MP» et «MG» représentent respectivement les états «Moyen petit» et «Moyen grand».

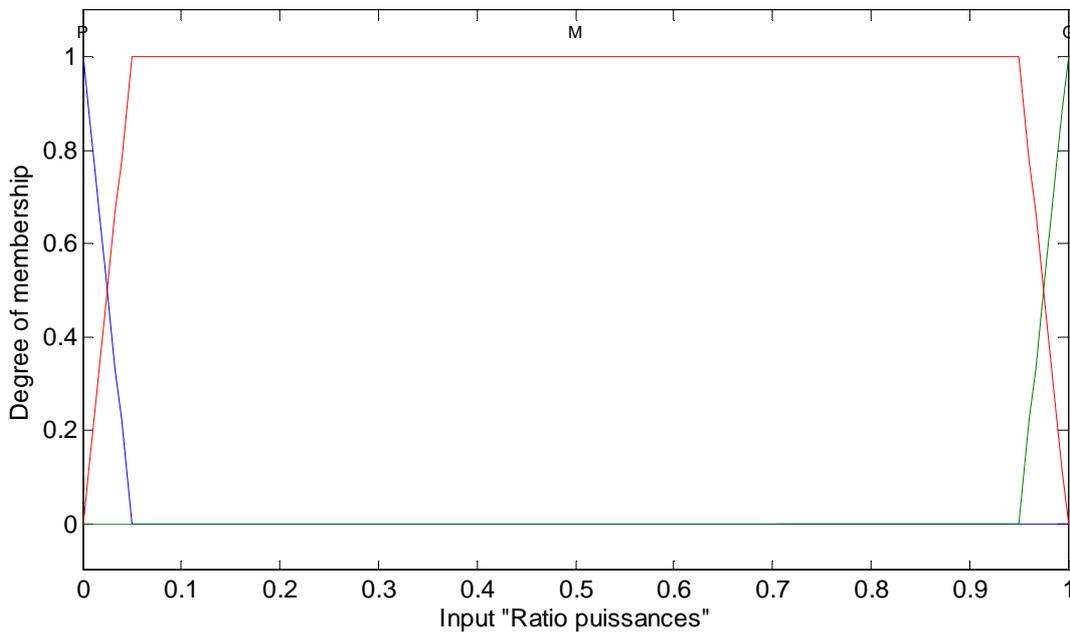


Figure 5.29 Fonctions d'appartenance de la grandeur d'entrée  $\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$

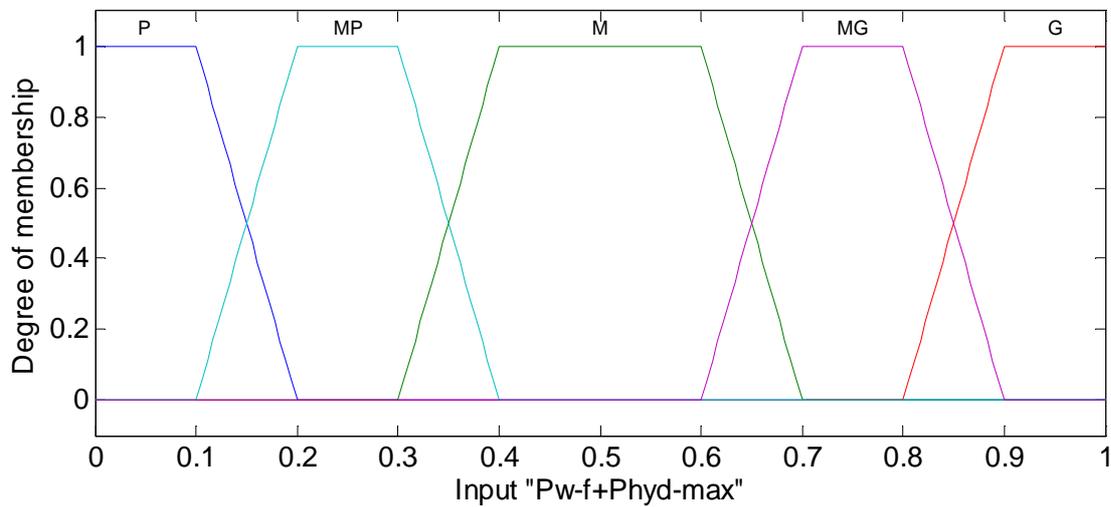


Figure 5.30 Fonctions d'appartenance de la grandeur d'entrée  $P_{w-f} + P_{hyd-max}$  (b)

Les fonctions d'appartenance des grandeurs de sortie du superviseur niveau moyen terme est illustré à la figure 5.31.

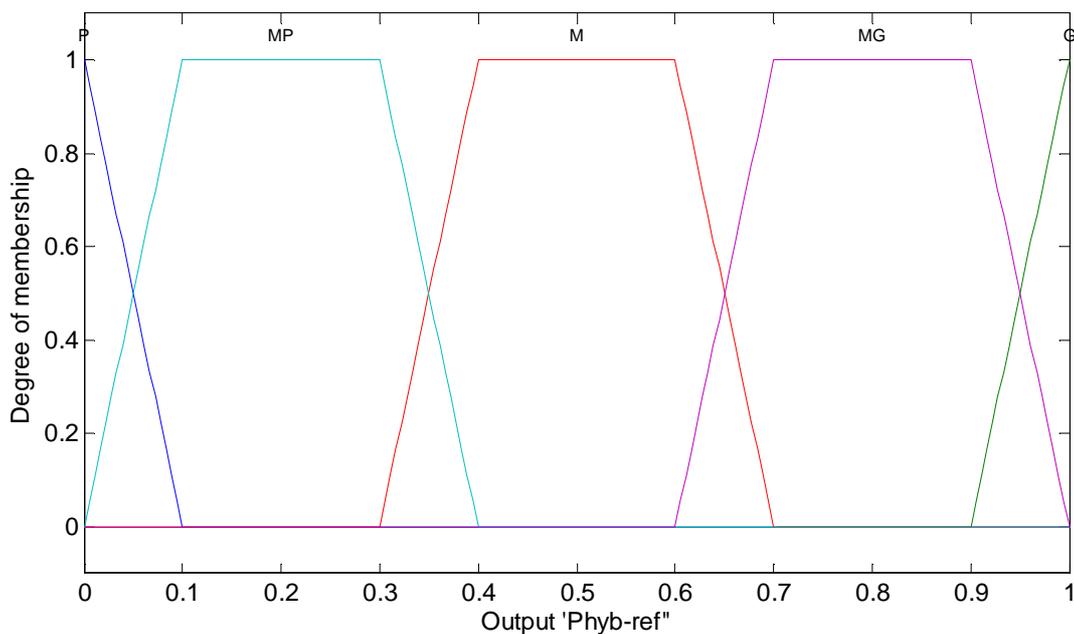


Figure 5.31 Fonctions d'appartenance de la grandeur de sortie  $P_{hyb-ref}$

### V.7.2.5. Détermination des graphes opérationnels du superviseur niveau moyen terme

Les graphes présentés de la figure 5.32a à la figure 5.32c correspondent aux graphes fonctionnels du superviseur moyen terme.

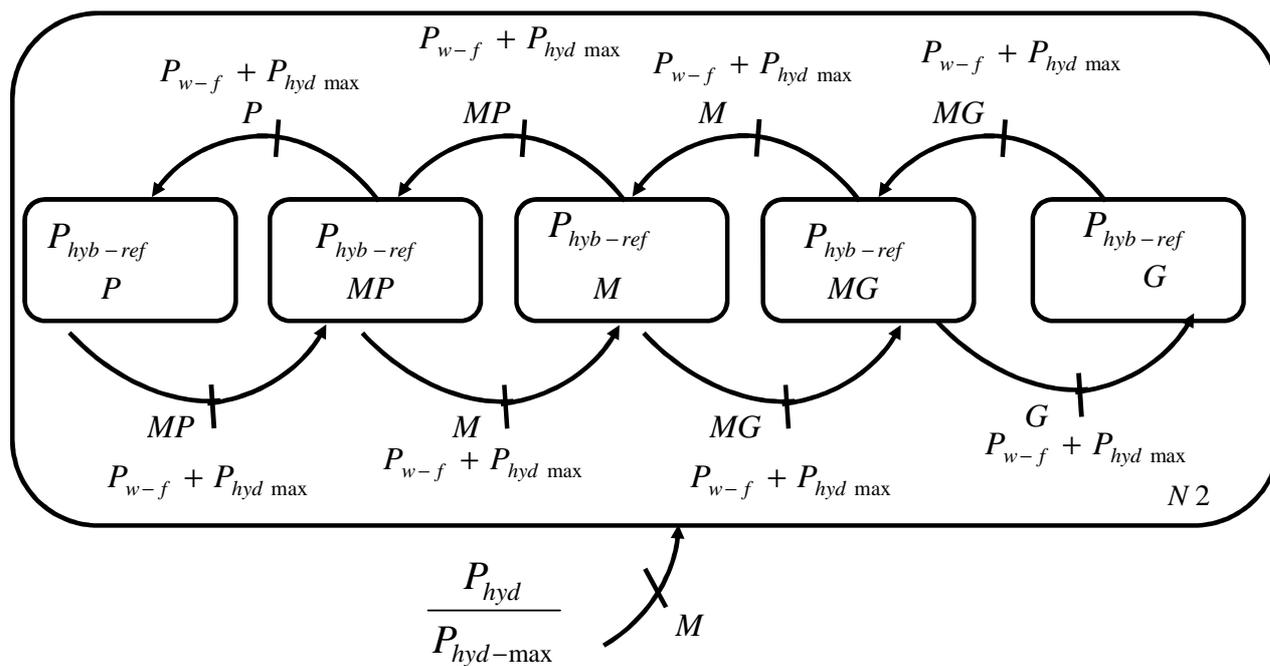


Figure. 5.32a Graphe opérationnel du superviseur moyen terme

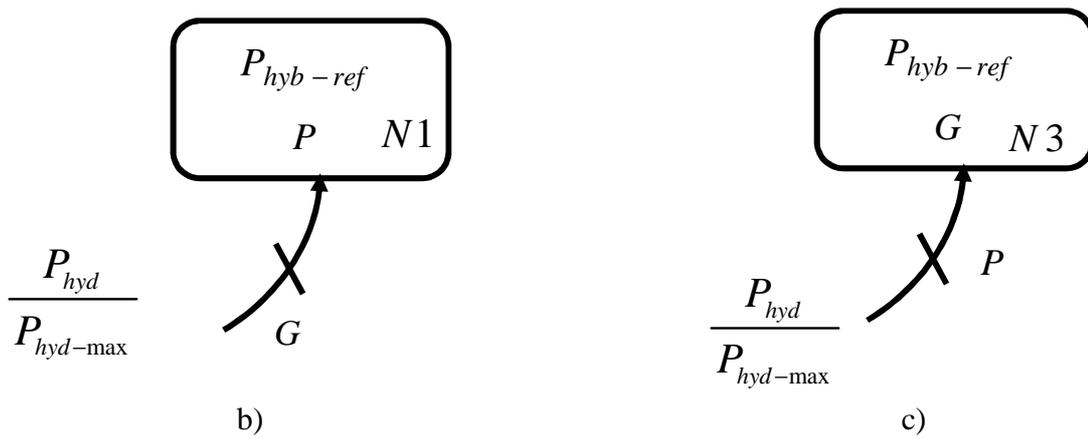


Figure. 5.32 Graphe opérationnel du superviseur moyen terme

### V.7.2.6. Extraction des lois floues

A partir du diagramme de la figure 5.32, il est très simple d'extraire les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement.

Le tableau 5.11 présente les lois floues pour les 3 modes de fonctionnement du superviseur moyen terme.

| $P_{hyb-ref}$                |    | $\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$ |    |   |
|------------------------------|----|-------------------------------|----|---|
|                              |    | P                             | M  | G |
| $P_{w-f}^+$<br>$P_{hyd-max}$ | P  | G                             | P  | P |
|                              | MP | G                             | MP | P |
|                              | M  | G                             | M  | P |
|                              | MG | G                             | MG | P |
|                              | G  | G                             | G  | P |

Tableau 5.11 Lois floues du superviseur niveau moyen terme

La figure 5.33 présente les surfaces obtenues à l'aide du superviseur moyen terme. Elles permettent d'exprimer la structure du superviseur avec deux entrées et une sortie.

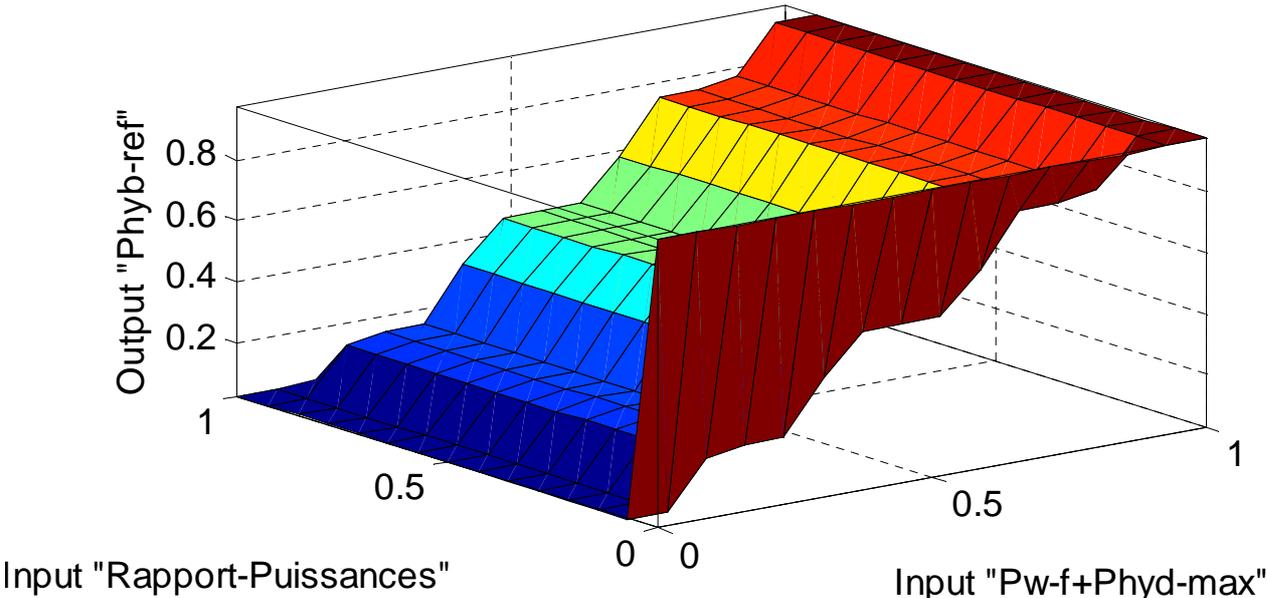


Figure 5.33 Évolution de la puissance  $P_{hyb-ref}$ , en fonction de  $P_{w-f} + P_{hyd-max}$  et  $\frac{P_{hyd}}{P_{hyd-max}}$

### V.7.3. Résultat des simulations

Le réseau simulé est celui présenté à la figure 5.27 et les conditions des simulations sont présentées par le tableau (5.1a).

Les courbes présentées de la figure 5.34a à la figure 5.34h correspondent aux résultats de simulation.

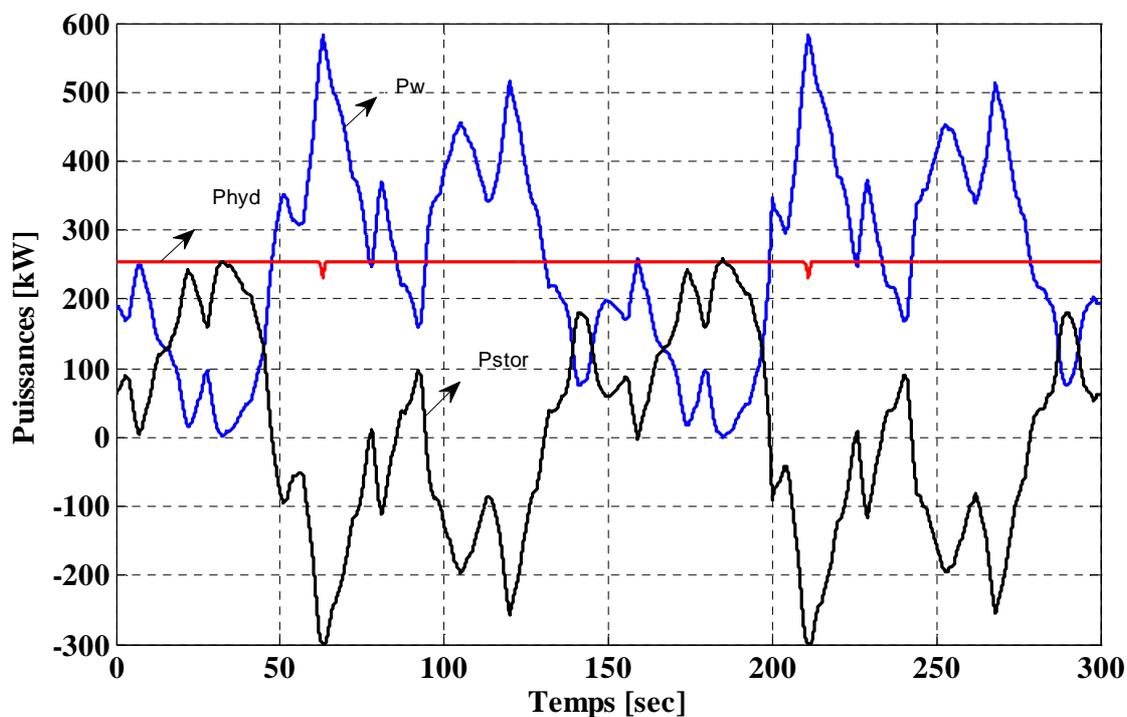


Figure 5.34a. Allure des puissances de la centrale multi sources

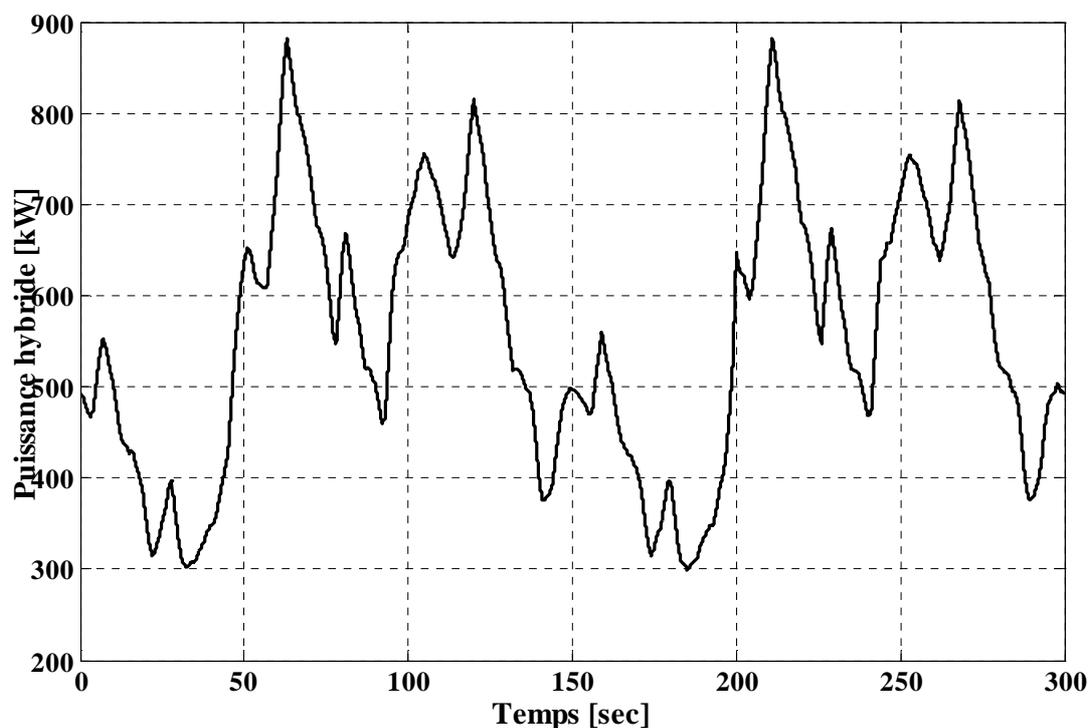


Figure 5.34b. Allure de la puissance hybride sans contrôle

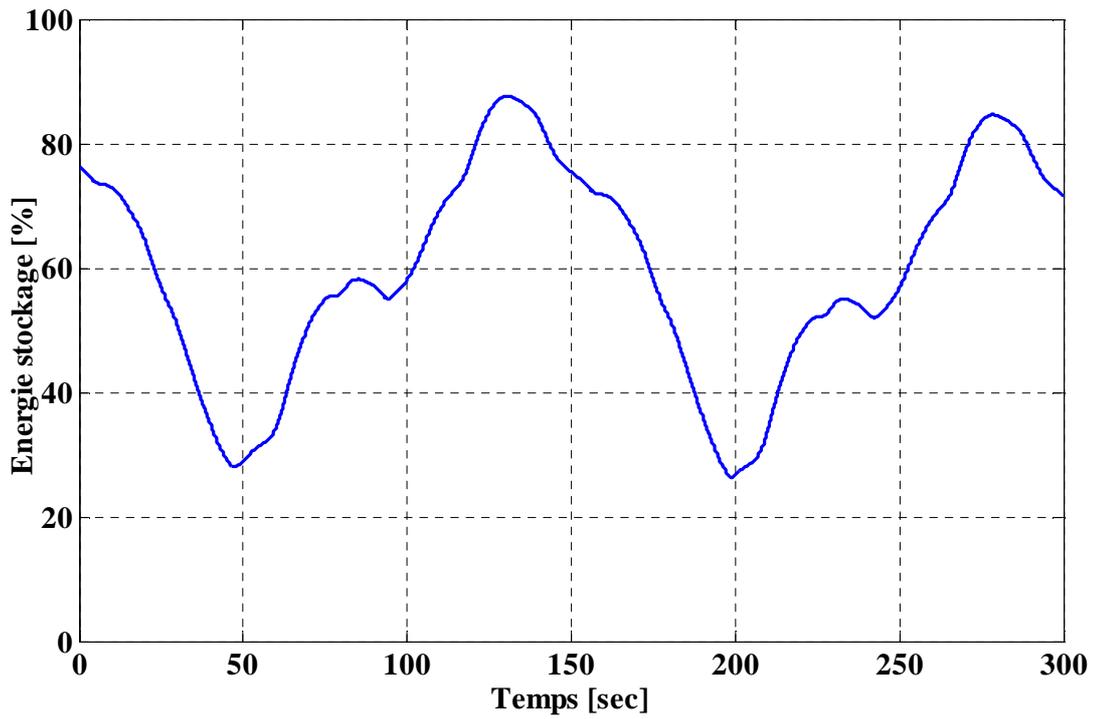


Figure 5.34c. Énergie de l'unité de stockage

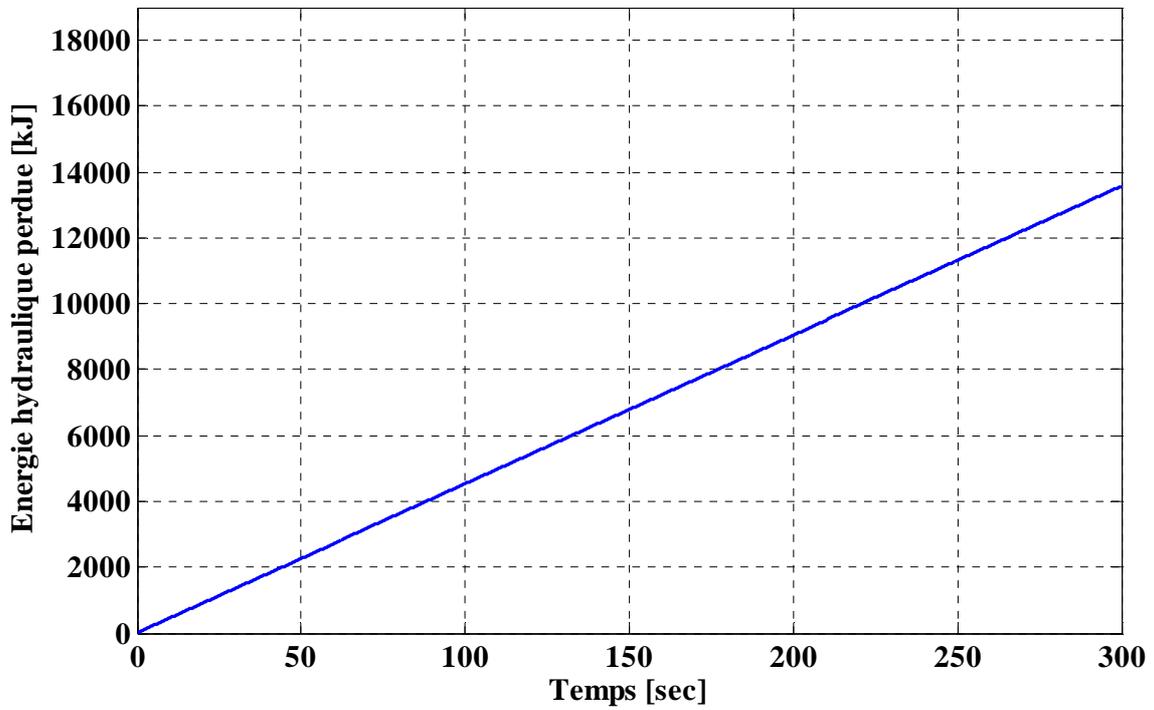


Figure 5.34d. Énergie hydraulique perdue

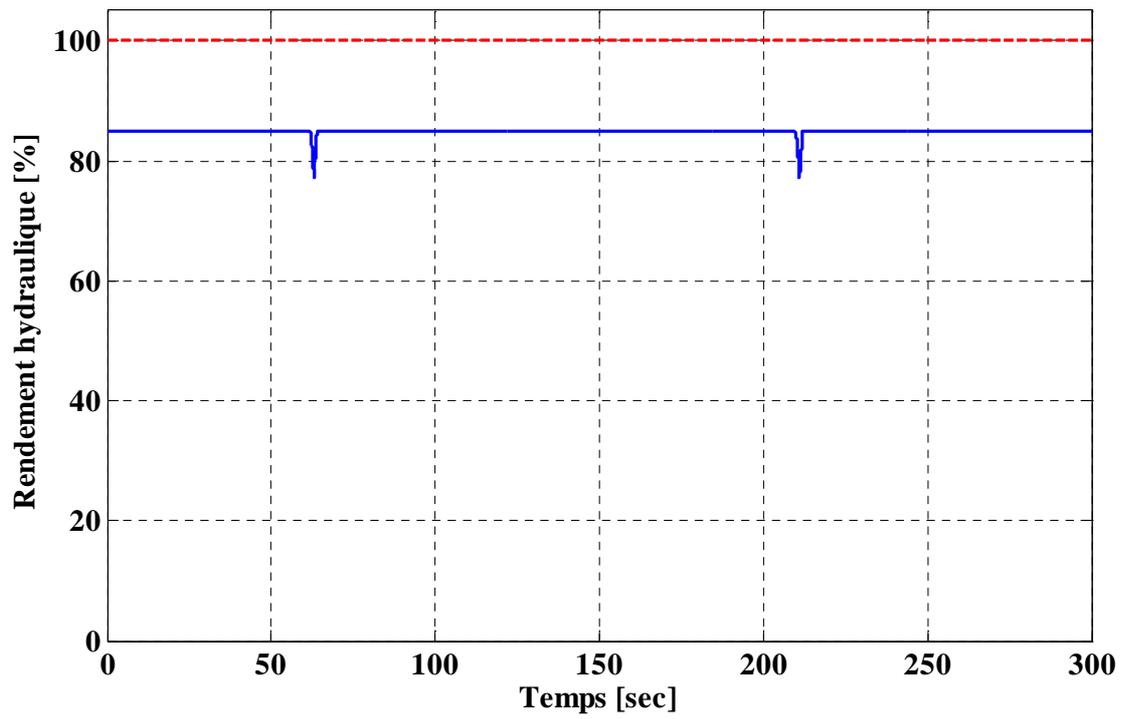


Figure 5.34e. Rendement de la microcentrale hydraulique

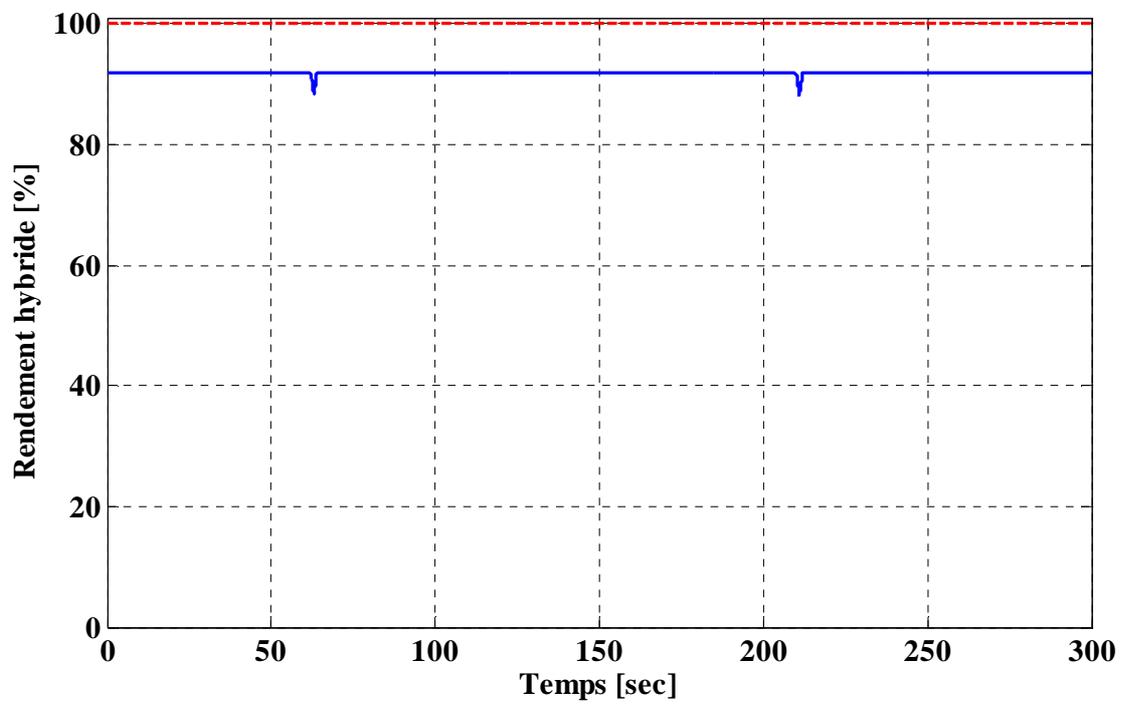


Figure 5.34f. Rendement de la centrale multi sources

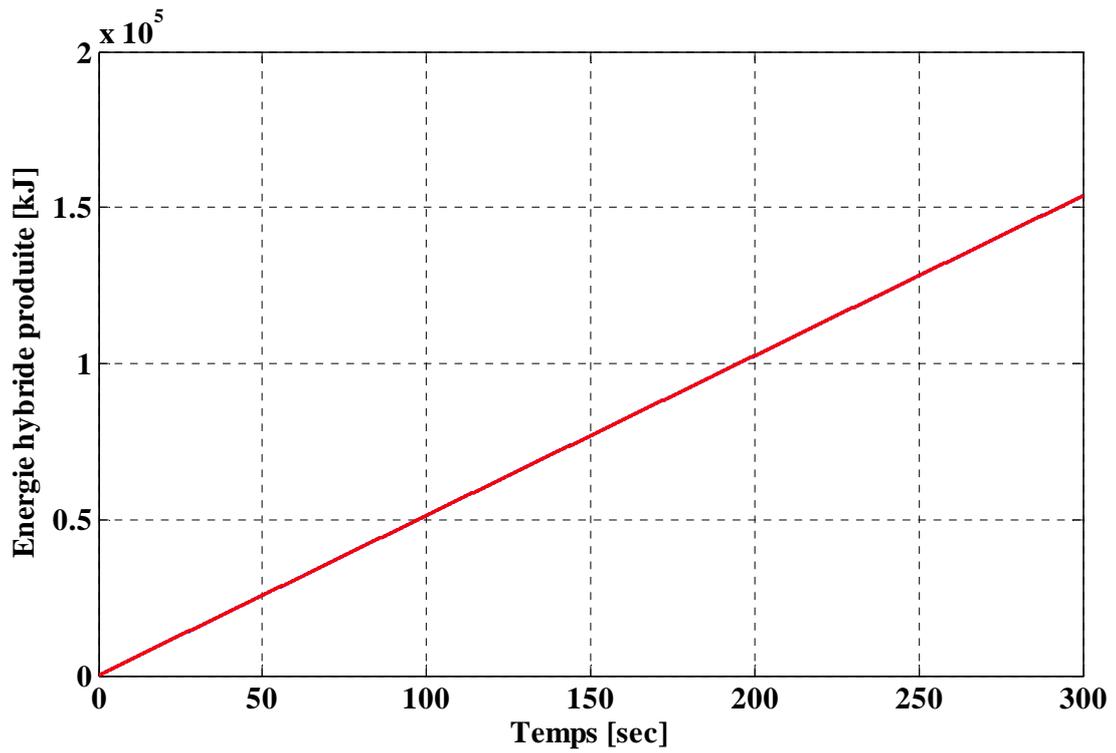


Figure 5.34g. Énergie hybride produite

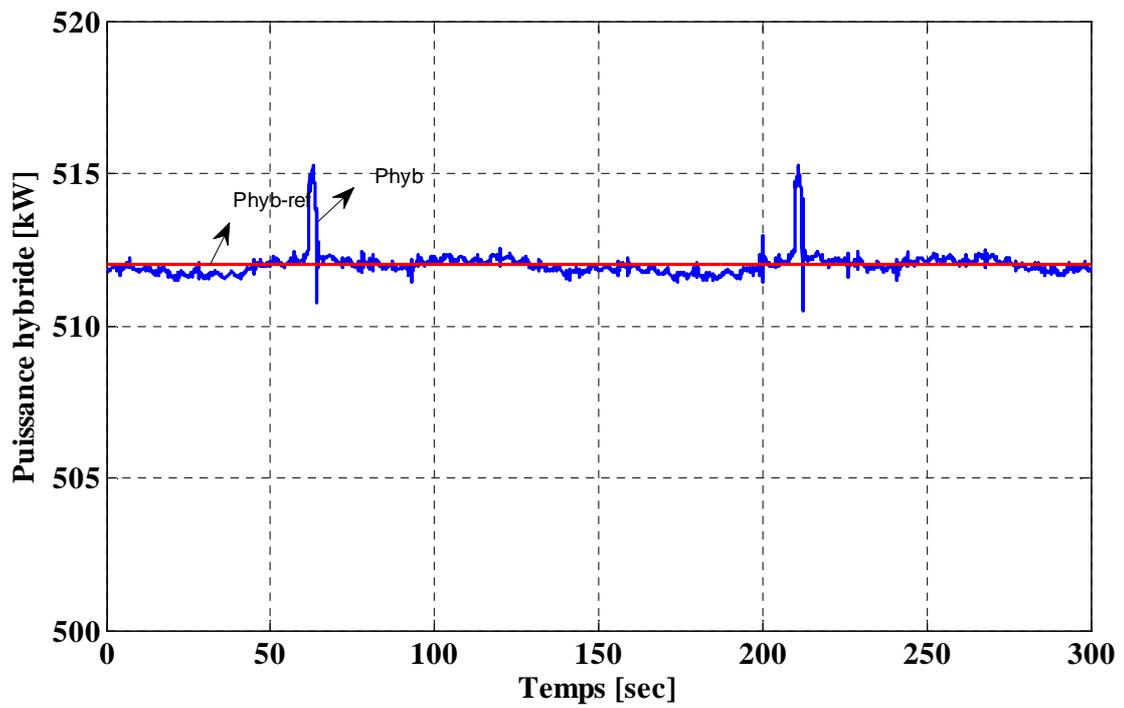


Figure 5.34h. Allure de la puissance hybride produite

L'allure des puissances actives des différentes sources est présentée dans la Figure 5.34a

La figure 5.34b montre la puissance hybride sans contrôle. La figure 5.34c montre la variation de l'énergie de l'unité de stockage. La figure 5.34d montre l'allure de l'énergie hydraulique perdue. La figure 5.34e et la figure 5.34f montrent respectivement l'allure du rendement de la microcentrale hydraulique et celui de la centrale hybride. La figure 5.34g et la figure 5.34h montrent respectivement l'allure de l'énergie produite et la puissance produite de la centrale multi sources. Le tableau 5.12 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur n°4

| Type de source      | Puissance moyenne | Qualité de lissage                              | Rendement |
|---------------------|-------------------|---|-----------|
| •Source éolienne    | •255 kW           | •Écart type de l'éolienne 147,5 kW              | •100%     |
| •Source hydraulique | •254,7 kW         | •Écart type de l'hydraulique 1,5 kW             | •85%      |
| •Unité de stockage  | •2,3 kW           | •Écart type de l'unité de stockage:<br>146,9 kW |           |
| •Source hybride     | •512 kW           | •Écart type de la source hybride: 0,38<br>kW    | •85%      |

Tableau 5.12 Indicateurs du superviseur n°4

#### V.7.4. Interprétation

A partir des résultats de simulations, la figure 5.34b montre qu'en absence de supervision de la centrale multi sources la puissance hybride produite est aussi aléatoire que la puissance éolienne. Nous constatons (figure 5.34c) que la puissance de stockage s'adapte à la variation de la puissance éolienne, ainsi, l'énergie est stockée quand la puissance de l'éolienne est supérieure à la puissance hybride de référence et elle est fournie au réseau lorsque la puissance éolienne est inférieure à la puissance hybride de référence.

La figure 5.34d montre la quantité d'énergie hydraulique productible mais non utilisée. La figure 5.34e montre le rendement de 85 % atteint par la microcentrale hydraulique. La figure 5.34f montre le rendement d'environ 85 % atteint par la centrale multi sources. La figure 5.34g montre que la puissance hybride fournie au réseau est bien régulée par rapport à la puissance hybride de référence. La figure 5.34h montre que l'énergie hybride fournie au réseau au bout de 300 sec est de 153,6 kJ. Le tableau 5.12 résume les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur.

## V.8. Comparaison des quatre stratégies de supervision

Le tableau comparatif des quatre superviseurs est basé sur trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique : puissance moyenne hybride fournit au réseau, écart type de la puissance hybride et rendement de la source hybride.

### 1. Tableau de comparaison des quatre stratégies de supervision

Le tableau 5.13 présente la comparaison des cinq superviseurs avec l'apport d'un système de stockage.

| Indicateurs de qualité de puissance     | Superviseur 1 | Superviseur 2 | Superviseur 3 | Superviseur 4 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Puissance moyenne hydraulique (kW)      | 300           | 300           | 183,8         | 254,7         |
| Puissance moyenne du stockage (kW)      | 5,7           | 21,79         | 21,79         | 2,3           |
| Rendement de l'hydraulique (%)          | 100           | 100           | 61,21         | 85            |
| Puissance moyenne hybride (kW)          | 560,5         | 576,5         | 447,8         | 512           |
| Écart type de la puissance hybride (kW) | 82,53         | 102,6         | 73,68         | 0,38          |
| Rendement de la source hybride (%)      | 99,96         | 99,94         | 77,63         | 85            |

Tableau 5.13 Comparaison des quatre stratégies de supervision avec l'apport d'un système de stockage

Le tableau 5.13 permet de comparer les quatre superviseurs développés précédemment. Ces quatre superviseurs seront analysés selon deux critères

L'indicateur de lissage de puissance de la source hybride (écart type) et l'indicateur d'efficacité énergétique de la source hybride (rendement).

Le superviseur n° 4 obtient de bien meilleurs compromis en lissage et en rendement, suivi du superviseur n°3. Le superviseur n°2 et le superviseur n°1 obtiennent un rendement proche de 100% grâce à la source hydraulique qui fournit 100% de sa capacité, cependant, la qualité de lissage de la puissance hybride produite est mauvaise.

## V.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique associé à un dispositif de stockage et connecté à un réseau puissant.

Quatre types de superviseurs ont été considérés:

- Le superviseur n°1 est basé sur le contrôle du système de stockage en considérant la puissance éolienne filtrée et la puissance hydraulique constante.
- Le superviseur n°2 est basé sur le contrôle du système de stockage en considérant la puissance éolienne non filtrée et la puissance hydraulique constante.
- Le superviseur n°3 est basé sur le contrôle de la puissance hydraulique et la puissance du système de stockage en déterminant la puissance hybride par un bilan des puissances.
- Le superviseur n°4 est basé sur le contrôle de la puissance hydraulique et la puissance du système de stockage en déterminant la puissance hybride par la logique floue.

Le superviseur n°1 fournit la puissance de référence au dispositif de stockage afin de lisser la puissance électrique de la source hybride. Cependant, nous constatons la saturation du système de stockage.

Le superviseur n°2 fournit la puissance de référence au dispositif de stockage. On note simultanément une baisse de l'écart type et une augmentation de variation rapide de la puissance hybride, ceci est dû à l'absence du filtrage de la puissance éolienne. Aucune saturation du système de stockage n'a été constatée.

Le superviseur n°3 permet de contrôler directement la puissance de stockage et la puissance de la source hydraulique et, donc, de contrôler la puissance hybride envoyée au réseau. On remarque une

amélioration de lissage et une augmentation de la puissance hybride, cependant, on note une légère baisse de la puissance produite.

Le superviseur n°4 obtient de bien meilleurs compromis en termes de lissage et en termes de rendement.

D'après les résultats de simulation des quatre superviseurs, il est difficile d'améliorer plus les critères énergétiques de la centrale multi sources sans la connaissance des données provenant des sources primaires. C'est pourquoi, dans le chapitre 6 nous ajoutons une étape moyenne terme (voir tableau 3.2) pour anticiper la disponibilité des sources primaires grâce aux prévisions du débit de l'eau et de la vitesse du vent.

## V.10. Bibliographie

- [Abo 05] F. Abou chakra, « Valorisation et optimisation du stockage d'énergie dans un réseau d'énergie électrique ». Thèse présenté le 4 juillet 2005. Université Paris XI Orsay.
- [Bor 98] P. Borne, J. Rozinoer, J-Y. Dieulot, L. Dubois, « Introduction à la commande floue », Editions TECHNIP, collection sciences et technologies, 1998.
- [Bre 08] Breban S. « Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable », thèse présentée en décembre 2008, ENSAM.
- [Cim 06] G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, « 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.
- [Cou 07] V. Courtecuisse, Mostafa El mokadem, B. Robyns, B. François, M. Petit, J. Deuse., " Supervision par logique floue d'un système éolien à vitesse variable en vue de contribuer au réglage primaire", Rige, N°. 4-5, pages. 423-453, 10-2008.
- [Cou 10] V. Courtecuisse, Jonathan Sprooten, B. Robyns, M. Petit, B. François, J. Deuse., "Methodology to design fuzzy logic based supervision of hybrid renewable energy systems", Mathematics and computers in simulation, vol. 81, issues 2, pp 208-224, October 2010.
- [Spr 09] J. Sprooten, V. Courtecuisse, B. Robyns, J. Deuse "« Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multi source à base d'énergie renouvelable », EJEE vol. 12, N°5-6, pp.553-583, 12-2009.
- [Ver 07] A. Vergnol, « Supervision d'une centrale de production hybride éolienne / hydraulique », Rapport de Master, mars-Juillet 2007, USTL.



# **Chapitre VI : Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique associé à un dispositif de stockage à court et à moyen terme**

Le chapitre six propose la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à deux dispositifs de stockage à court et à moyen terme et connecté sur le bus alternatif. La référence de la puissance hybride est déduite suivant la prévision du vent et de l'eau.

Un tableau de trois indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique permettra de faire le bilan de la stratégie de supervision adoptée: puissance moyenne, qualité de lissage et rendement.



## Chapitre VI

### Supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique associé à un dispositif de stockage à court et à moyen terme

#### VI.1. Introduction

Dans le chapitre 5, le dispositif de stockage est à court terme, il peut être localisé en différents point du réseau alternatif.

Dans ce chapitre on utilise les prévisions des sources primaires pour déduire la référence de la puissance hybride.

Dans le cadre du superviseur étudié, la prise en compte des prévisions implique l'utilisation d'un niveau « moyen terme » (Tableau 3.2). La prise en compte du niveau « moyen terme » permettront d'optimiser le fonctionnement de cette centrale par une meilleure planification des courbes de production des différentes sources impliquées. Étant donné la difficulté de prévoir la production éolienne, un dispositif de stockage à moyen terme est ajouté afin de compenser les erreurs de prévision. Néanmoins, la détermination des puissances de références des éléments constituant la centrale hybride est effectuée par un superviseur « court terme » identique à celui développé dans le chapitre 5.

Nous présenterons un tableau de plusieurs indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique qui permettra de faire le bilan de la stratégie de supervision adoptée.

Le tableau 6.1 présente la gestion de l'énergie d'un système hybride, sur deux niveaux, il montre les problématiques associées à l'échelle de temps et aux services rendus.

| Niveau de supervision                                | Objectifs   | Contraintes  | Moyens d'actions   | Outils         |
|--|---|--|--|----------------|
| •Moyen terme (quelques heures à une demi-heure).     | •Maximiser l'énergie envoyée au réseau.               | •Fluctuation de la puissance éolienne.<br>•Capacité de la source hydraulique.<br>•Capacité de l'unité de stockage à moyen terme. | •La puissance de référence de la source hybride.   | •Logique floue |
| •Court terme (quelques secondes à quelques minutes). | •Lisser la puissance électrique de la source hybride. | • Capacité de l'unité de stockage à court terme.   | •La puissance de référence de la source hydraulique.<br><br>•La puissance de référence de stockage à court et à moyen terme. | •Logique floue |

Tableau 6.1 Gestion de l'énergie d'un système hybride, sur deux niveaux selon l'échelle de temps

Les travaux porteront essentiellement sur deux niveaux de supervision :

- Le superviseur niveau moyen terme qui permet de fournir la puissance de référence de la source hybride
- Le superviseur niveau court terme qui permet de fournir la puissance de référence de chaque élément constituant la centrale multi sources.

Le tableau 6.2 donne les conditions de simulations du superviseur étudié.

| Paramètres                                    | Unités                    |
|---|---------------------------|
| •Vitesse nominale du vent                     | •12 m/sec                 |
| •Puissance nominale de l'éolienne             | •600 kW                   |
| •Puissance nominale de l'hydraulique          | •300 kW                   |
| •Débit de l'eau                               | •1000 m <sup>3</sup> /sec |
| •Puissance de l'unité de stockage moyen terme | •+/- 300 kW               |

Tableau 6.2 Conditions de simulations du superviseur.

## VI.2. Structure global du système

La centrale multi sources étudiée est constituée d'une éolienne de 600 kW non contrôlable, d'une micro centrale hydraulique à vitesse variable et de deux dispositifs de stockage sans à priori technologique. Le schéma de la structure de la centrale hybride est présenté dans la figure 6.1.

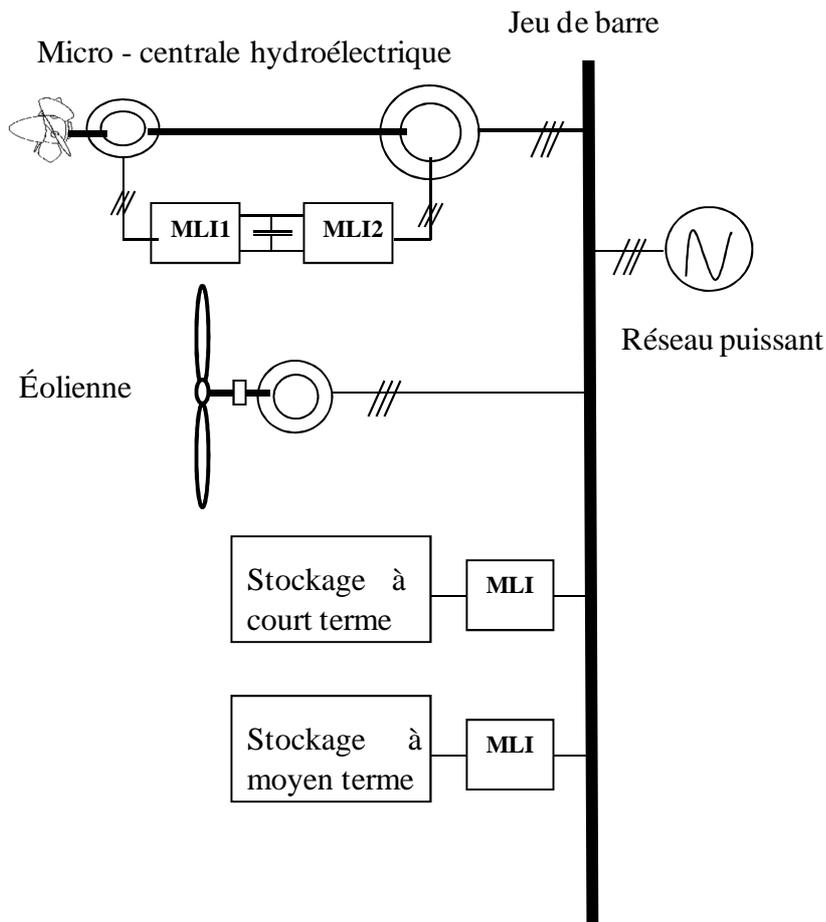


Figure 6.1 : Système étudié

Le tableau 6.3 présente les paramètres du système de stockage moyen terme. Les paramètres du système de stockage court terme ont été définis au tableau 5.1a.

#### Système de stockage moyen terme

$$\begin{aligned}
 P_{chmax-mt} &= 300kW \\
 P_{dchmax-mt} &= -300kW \\
 \tau_{ch-mt} &= 5s \\
 \tau_{dch-mt} &= 5s \\
 W_{max-mt} &= 15000 \times 10^3 kJ
 \end{aligned}$$

---

Tableau 6.3 Paramètres du système de stockage moyen terme

### VI.3. Méthodologie pour la construction du superviseur

#### VI.3.1. Détermination du cahier des charges du système

Le tableau 6.1 présente le cahier des charges du superviseur étudié.

#### VI.3.2. Structure du superviseur étudié

La structure de supervision avec prévisions des sources primaires est présentée par la figure 6.2.

La puissance hybride est déduite suivant la prévision de la vitesse du vent et du débit de l'eau. Ainsi pour compenser les erreurs de prévisions, un dispositif de stockage à moyen terme est ajouté. Le choix du dimensionnement du dispositif de stockage permettra de réduire à une quantité infime l'erreur d'écart entre l'énergie hybride prévisionnel et l'énergie hybride réellement produite.

Le contrôleur situé au niveau de la supervision moyen terme permettra d'éviter la saturation en énergie de l'unité de stockage à moyen terme et d'extraire le maximum de puissance de la centrale hybride. La figure 6.2 présente la structure du superviseur étudié.

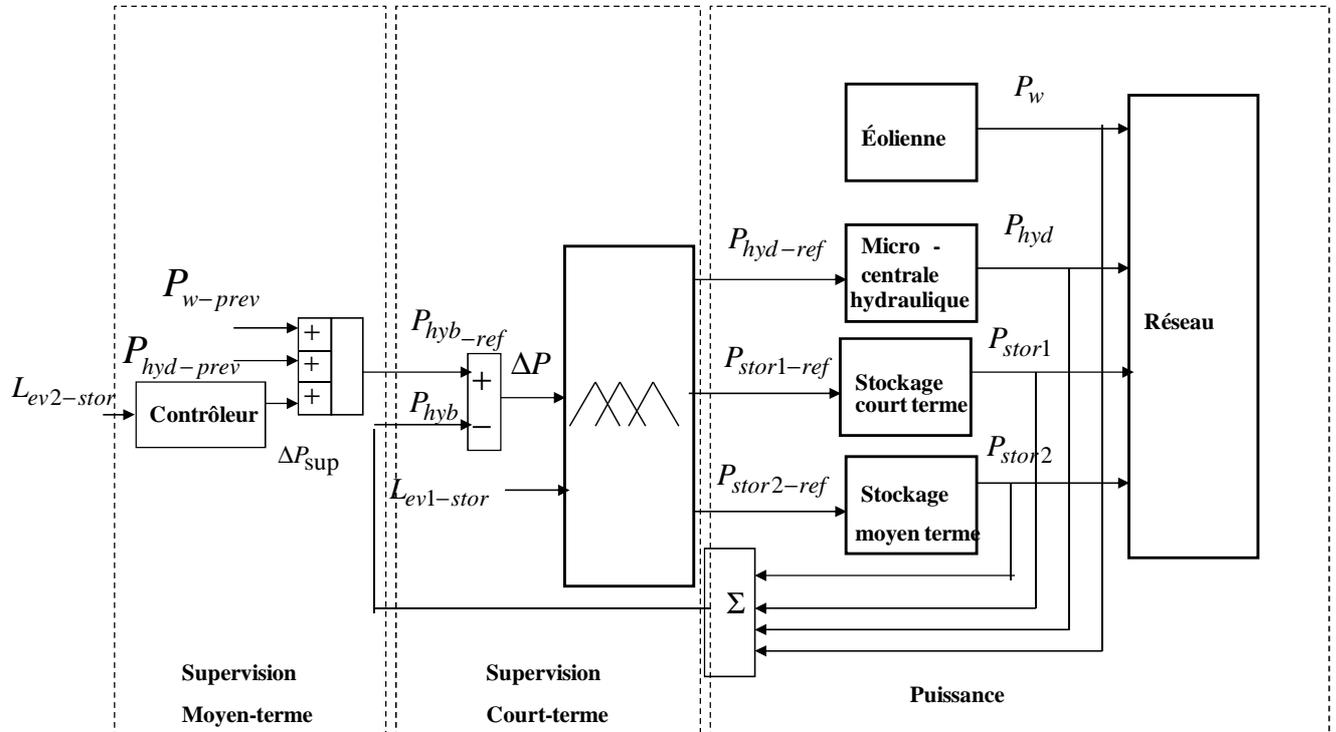


Figure 6.2 Structure du superviseur étudié

Notations :

$P_{w-prev}$  : Puissance moyenne de l'éolienne pendant 75 secondes

$P_{hyd-prev}$  : Puissance moyenne de l'hydraulique pendant 75 secondes

$\Delta P$  : Écart entre la puissance de référence hybride et la puissance hybride produite

$\Delta P_{sup}$  : Puissance supplémentaire permettant à l'unité de stockage à moyen terme de saturer

$L_{ev1-stor}$  : Niveau de stockage à court terme

$L_{ev2-stor}$  : Niveau de stockage à moyen terme

L'équation (6.1) donne la puissance de référence hybride.

$$P_{hyb - ref} = P_{hyd - prev} + P_{w - prev} + \Delta P_{sup} \quad (6.1)$$

La stratégie de commande de contrôleur de dispositif de stockage à moyen terme est la suivante :

Si  $L_{ev2-stor}$  est compris entre 0 et 0,2 p.u. alors  $\Delta P_{sup} = -20kW$

Si  $L_{ev2-stor}$  est compris entre 0,2 et 0,8 p.u. alors  $\Delta P_{sup} = 0kW$

Si  $L_{ev2-stor}$  est compris entre 0,8 et 1 p.u. alors  $\Delta P_{sup} = +20kW$

#### VI.4. Résultat des simulations

Le réseau simulé est celui présenté à la figure 6.1 et les conditions des simulations sont présentées par le tableau 6.2.

Afin de réduire le temps de simulation, la durée de simulation est de 300 secondes. Ainsi nous avons choisi de faire des prévisions par pas de 75 secondes. En supposant que 300 secondes de simulation correspondent à 1h, alors, 75 secondes de prévision correspondent à 15 minutes de prévision, ceci représente des prévisions tout à fait réalistes.

Les courbes présentées de la figure 6.3a à la figure 6.3f correspondent aux résultats de simulation.

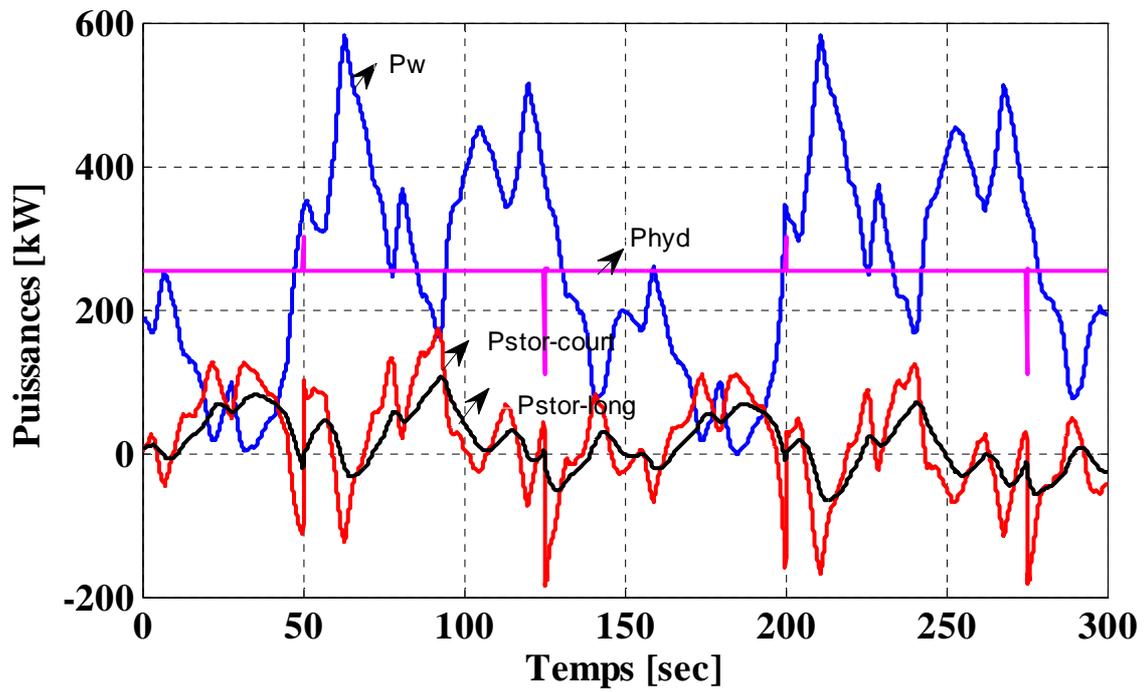


Figure 6.3a. Puissance éolienne, puissance hydrauliques, puissance de deux dispositifs de stockage

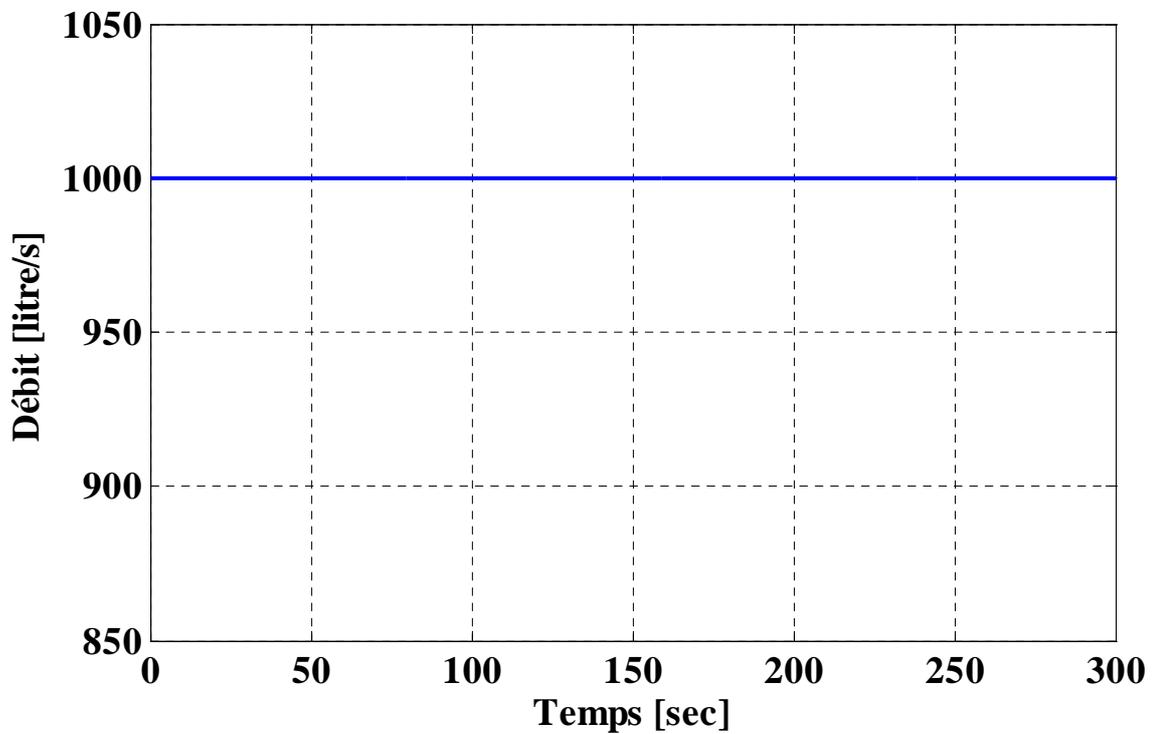


Figure 6.3b. Débit de l'eau

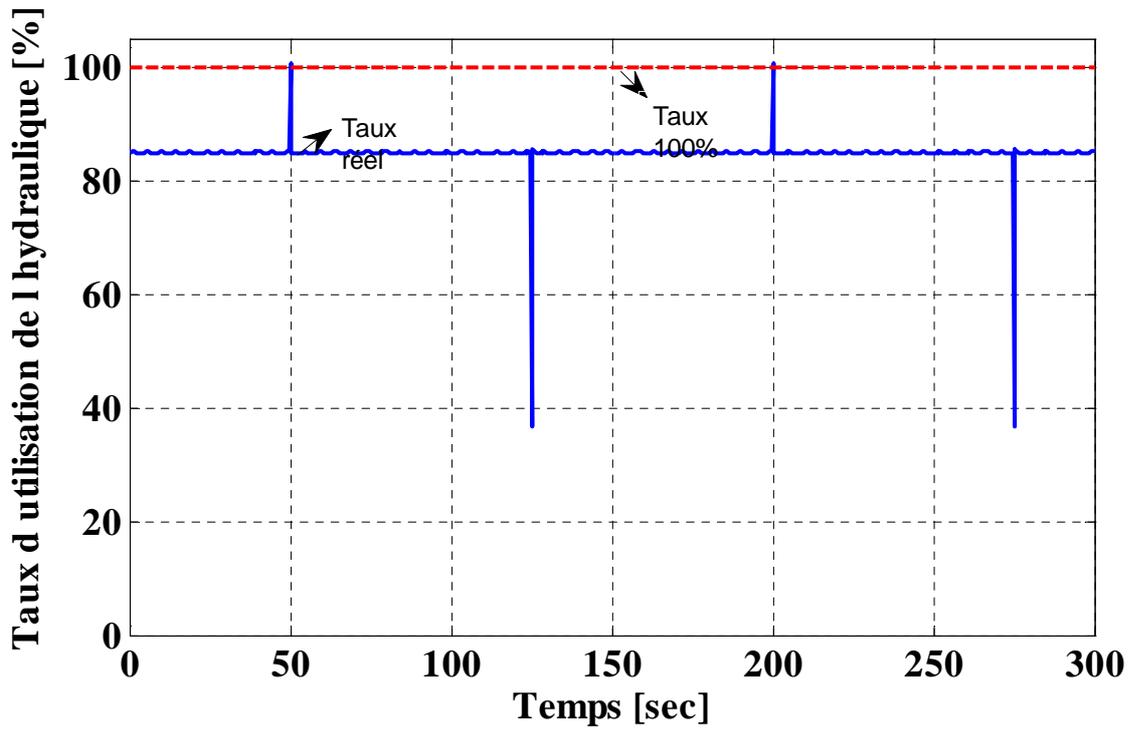


Figure 6.3c. Taux d'utilisation de la source hydraulique

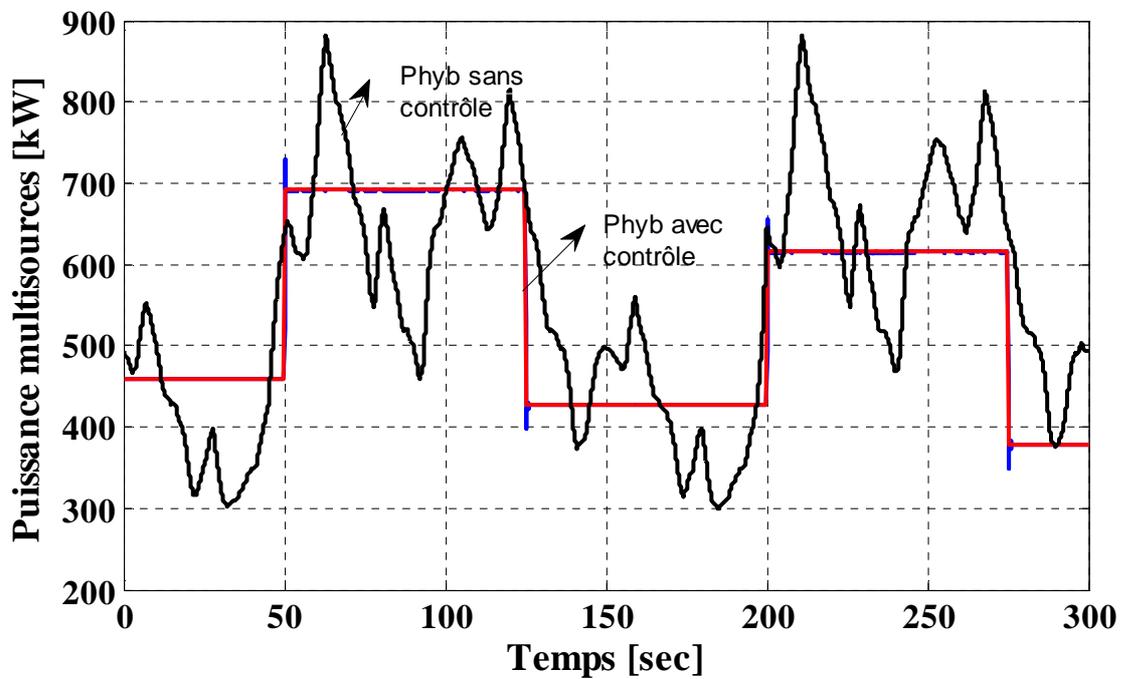


Figure 6.3d. Puissance hybride sans contrôle, puissance hybride avec contrôle

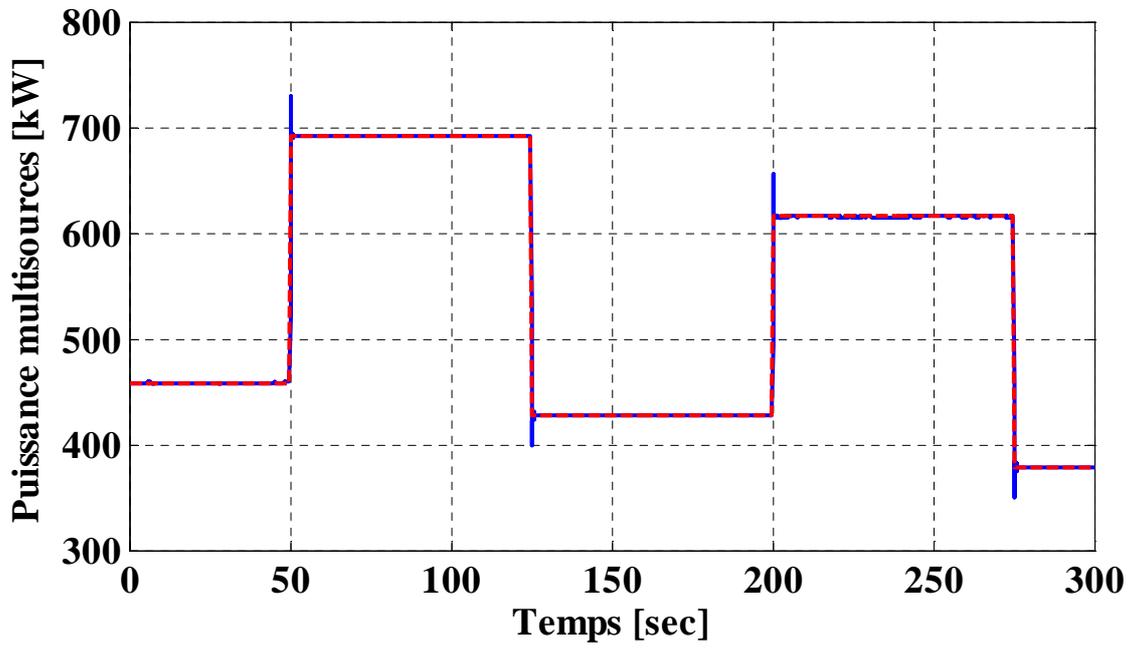


Figure 6.3e. Puissance hybride produite

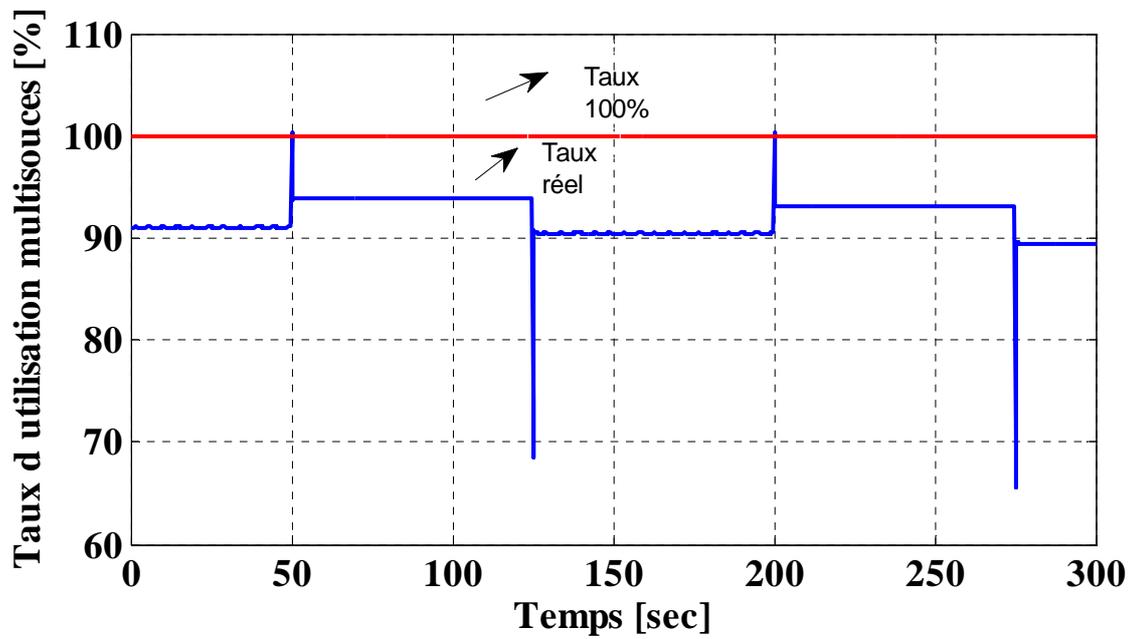


Figure 6.3f. Taux d'utilisation de la source hybride

L'allure des puissances actives de différentes sources est présentée dans la figure 6.3a. La figure 6.3b montre le débit d'eau de la microcentrale hydraulique. La figure 6.3c montre le taux d'utilisation de la source hydraulique. La figure 6.3d montre la puissance de la centrale hybride avec et sans contrôle. La figure 6.3e montre la puissance hybride mesurée et la figure 6.3f montre le taux d'utilisation de la centrale multi sources.

Le tableau 6.9 présente les indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique du superviseur étudié

| Type de source                 | Puissance moyenne | Qualité de lissage                           | Rendement |
|--------------------------------|-------------------|--|-----------|
| •Source éolienne               | •255 kW           | •Écart type de l'éolienne 147,5 kW           | •100%     |
| •Source hydraulique            | •226 kW           | •Écart type de l'hydraulique 30,96 kW        | •75%      |
| •Unité de stockage court terme | •33,39 kW         | •Écart type de l'unité de stockage: 64,67 kW |           |
| •Unité de stockage long terme  | •26,21            | •Écart type de l'unité de stockage: 35,93 kW |           |
| •Source hybride                | •541 kW           | •Écart type de la source hybride: 0,38 kW    | •90%      |

Tableau 69 Indicateurs du superviseur

## VI.5. Interprétation

Nous observons sur la figure 6.3a la variation lente de l'unité de stockage moyen terme en comparaison de stockage court terme. La figure 6.19b montre que le débit de l'eau reste constant. Sur la figure 6.19c le taux d'utilisation de la source hydraulique est de 85%. La figure 6.19d illustre parfaitement la nécessité de la supervision de la centrale multi sources. La figure 6.19f montre la bonne optimisation de la centrale multi source.

## **VI.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique /stockage à court et à moyen terme.

Nous avons ajouté une étape « moyenne terme » afin d'anticiper la disponibilité des sources primaires grâce aux prévisions de l'eau et du vent. La supervision d'un ensemble éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à moyen terme a permis de maximiser la puissance hydraulique grâce aux prévisions des sources primaires et d'anticiper la référence de la puissance hybride.

[Annexe 3] présente les résultats de simulations avec débit hydraulique variable illustrant la réponse du superviseur d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court et à moyen terme lors d'une variation du débit de la micro centrale hydraulique

## VI.6. Bibliographies

- [Abb, 06] C. Abbey, G. Joos, "Energy storage and management in wind turbine generator systems," EPE-PEMC 2006, Portoroz, Slovenia, 30 August-1 September, 2006.
- [Ack, 05] Ackerman T., "Wind power in power systems", Wiley & Sons, Ltd, ISBN 0-470-85508-8, 2005, Chichester, UK
- [Cou 07] V. Courtecuisse, Mostafa El mokadem, B. Robyns, B. François, M. Petit, J. Deuse., " Supervision par logique floue d'un système éolien à vitesse variable en vue de contribuer au réglage primaire", Rige, N°. 4-5, pages. 423-453, 10-2008.
- [Cou 10] V. Courtecuisse, Jonathan Sprooten, B. Robyns, M. Petit, B. François, J. Deuse., "Methodology to design fuzzy logic based supervision of hybrid renewable energy systems", Mathematics and computers in simulation, vol. 81, issues 2, pp 208-224, October 2010.
- [Nas, 09] Mehdi Nasser, Arnaud Vergnol, Jonathan Sprooten, Benoît Robyns, "A global supervision for wind/hydro power plant and storage system connected to AC grid", EPE 09. 8-10 September 2009, Barcelona, Spain
- [Spr 09] J. Sprooten, V. Courtecuisse, B. Robyns, J. Deuse "« Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multi source à base d'énergie renouvelable », EJEE vol. 12, N°. 5-6, pp.553-583, 12-2009.

# Conclusion générale et perspectives

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse a consisté à proposer et à évaluer différentes structures de superviseurs pour mettre en place la supervision multi niveaux d'une centrale multi sources éolien/hydraulique/stockage. Pour répondre à notre objectif, nous avons été amenés à franchir plusieurs étapes.

Le chapitre 1 a présenté l'état de l'art actuel des microcentrales, les turbines hydrauliques et leur principe de fonctionnement. Il en ressort que les microcentrales offrent des perspectives intéressantes pour l'avenir de la production décentralisée d'énergie électrique. Pour les microcentrales au fil de l'eau, les turbines Kaplan sont les plus appropriées. Ce chapitre a permis de choisir une structure originale de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique.

Le chapitre 2 a traité la modélisation des différents composants de la microcentrale sous forme de REM. La simulation et la validation expérimentale d'une microcentrale hydro électrique à vitesse variable capable de fonctionner sur site isolé ou sur réseau électrique puissant ont été présentées. Les simulations et les résultats expérimentaux confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable.

Le chapitre 3 a développé l'association d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable à une centrale éolienne à vitesse fixe. Cet ensemble a été raccordé d'abord à un réseau interconnecté et ensuite raccordé à un site isolé. Les simulations et les résultats expérimentaux du système global ont permis de conclure sur la nécessité d'une gestion multi niveaux de ce système complexe et d'outils pour sa réalisation. La gestion de ce système complexe est divisée en plusieurs niveaux travaillant à des échelles de temps différentes.

Le chapitre 4 a présenté la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage connecté à un réseau puissant. Cinq types de superviseurs ont été considérés:

- Le superviseur n°1 est basé sur le bilan des puissances et il dépend de facteur de pondération  $\tau$  .

- Le superviseur n°2 est basé sur la logique floue, il permet de faire varier la valeur de  $\tau$  en fonction du profil du vent.
- Le superviseur n°3 est basé sur la logique floue qui détermine la valeur de  $\tau$ .
- Le superviseur n°4 est basé sur la logique floue qui détermine la puissance hybride de référence.
- Le superviseur n°5 basé sur la méthodologie explicite avec fonction d'optimisation.

Le tableau C1 présente la comparaison des cinq superviseurs (sans l'apport d'un système de stockage) basé sur les deux principaux indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique: la qualité de lissage (écart type) et l'efficacité (rendement de la puissance hybride).

| Indicateurs d'efficacité énergétique    | Superviseur 1                             |       | Superviseur 2 | Superviseur 3 | Superviseur 4 | Superviseur 5       |                     |
|---|---|-------|---------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|
|   | $\tau = \frac{1}{3}$ $\tau = \frac{2}{3}$ |       |               |               |               | $\alpha = 15 \beta$ | $\beta = 15 \alpha$ |
| Écart type de la puissance hybride (kW) | 122,30                                    | 131,9 | 127,30        | 109,50        | 83,54         | 35,40               | 30,49               |
| Rendement de la source hybride (%)      | 70,6                                      | 82,28 | 76,53         | 77,69         | 78,82         | 99                  | 97                  |

Tableau C.1 Comparaison des cinq stratégies de supervision sans l'apport d'un système de stockage

Le superviseur n° 5 obtient les meilleurs compromis en termes de lissage et de rendement, suivi du superviseur n°4. Ensuite, le superviseur n°3 et le superviseur n°2. Le superviseur n°1 dépend de paramètres empiriques.

On voit que le superviseur n° 5 basé sur une fonction d'optimisation obtient un meilleur résultat, cependant son utilisation en temps réel est difficile car le temps de calcul est trop important. Ainsi le chapitre IV met en évidence que la logique floue est l'outil le plus adapté à la supervision en temps réel. De plus, les intérêts de la logique floue résident sur sa facilité à être implémentée dans les applications informatiques et est bien adaptée à la gestion de systèmes « complexes » dépendant de grandeurs ou d'états difficilement prévisibles.

Le chapitre 5 a présenté la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant avec dispositif de stockage à court terme. Quatre types de superviseurs ont été considérés:

- Le superviseur n°1 est basé sur le contrôle du système de stockage à court terme en considérant la puissance éolienne filtrée et la puissance hydraulique constante.
- Le superviseur n°2 est basé sur le contrôle du système de stockage à court terme en considérant la puissance éolienne non filtrée et la puissance hydraulique constante.
- Le superviseur n°3 est basé sur le contrôle de la puissance hydraulique et la puissance du système de stockage à court terme en déterminant la puissance hybride de référence par un bilan des puissances.
- Le superviseur n°4 est basé sur le contrôle de la puissance hydraulique et la puissance du système de stockage à court terme en déterminant la puissance hybride de référence par la logique floue.

Le chapitre 6 a présenté la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique /stockage à court et à moyen terme. Seul le superviseur n°5 a été considéré :

- Le superviseur n°5 est basé sur le contrôle de la puissance hydraulique et la puissance du système de stockage à court et à moyen terme en déterminant la puissance hybride de référence grâce aux prévisions de l'eau et du vent

Le tableau C2 présente la comparaison des cinq superviseurs avec l'apport d'un système de stockage qui est basé sur les deux principaux indicateurs de qualité de puissance et d'efficacité énergétique: la qualité de lissage (écart type) et l'efficacité (rendement de la puissance hybride).

| Indicateurs de qualité de puissance  | Superviseur 1 | Superviseur 2 | Superviseur 3 | Superviseur 4 | Superviseur 5 |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Qualité de lissage [Écart type (kW)] | 82,53         | 102,6         | 73,68         | 0,38          | 0,38          |
| Rendement de la source hybride (%)   | 99,96         | 99,94         | 77,63         | 85            | 90            |

Tableau C.2 Comparaison des cinq stratégies de supervision avec l'apport d'un système de stockage

En termes de classement, le superviseur n° 5 obtient les meilleurs compromis en termes de lissage et de rendement, suivi du superviseur n°4 et le superviseur n°3. Le superviseur n°2 et le superviseur n°1 utilisent une microcentrale hydraulique non contrôlable.

Dans le but de lissage de la puissance hybride, il est préférable d'utiliser la microcentrale hydraulique contrôlable.

L'utilisation de deux types de dispositif de stockage permet grâce au dispositif court terme de posséder une dynamique rapide afin de compenser l'écart entre la puissance de référence hybride et la puissance hybride mesurée. Tandis que le dispositif de stockage moyen terme permet de compenser les erreurs liées à la prévision. De plus, l'utilisation de deux types de stockage permet d'avoir un meilleur rendement aux pertes de stockage près.

### **Perspectives des travaux**

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives que nous présentons ci-après.

1. Concernant la supervision court terme, il est envisageable de tenir compte des:
  - a. Aspects techniques et économiques plus réalistes dans les contraintes du superviseur ;
  - b. Contraintes liées à la performance du système en cas de défaut ;
  - c. Temps de calcul des algorithmes.
2. Concernant la supervision moyen terme, il est envisageable de tenir compte de:
  - a. Contraintes liées à la participation à l'ajustement du marché ;
  - b. Gestion de réserve secondaire ;
  - c. Gestion de l'îlotage.
3. Au niveau du dimensionnement et du choix technologique des systèmes de stockage, des études technico-économiques doivent être réalisées afin de permettre d'assurer l'autonomie de centrale multi sources même dans des conditions défavorables.
4. Concernant l'outil de conception des superviseurs, il est possible d'optimiser les techniques permettant de choisir les paramètres de la logique floue.

# **Annexes**





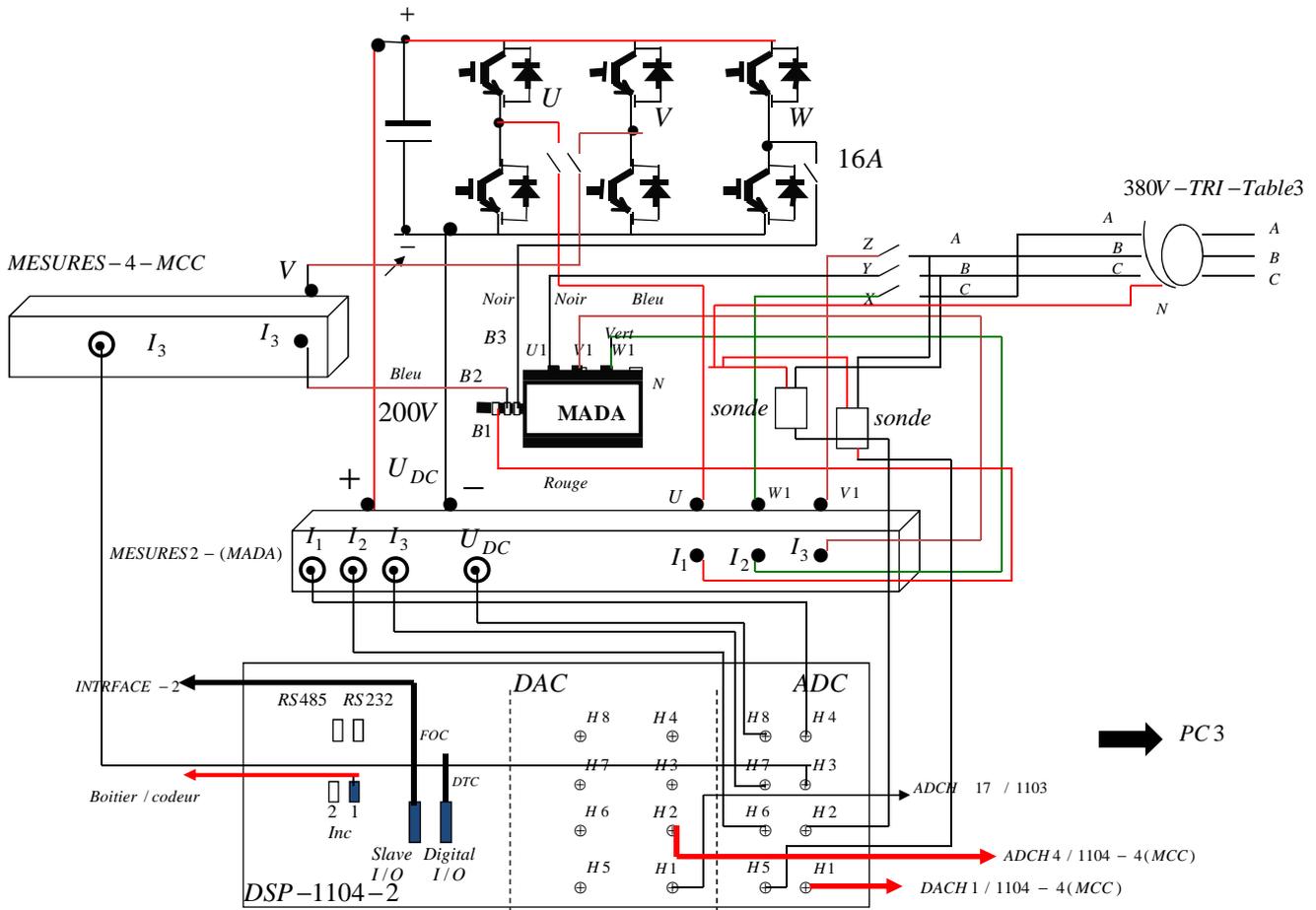


Figure A1.2. Émulateur de la source hydraulique

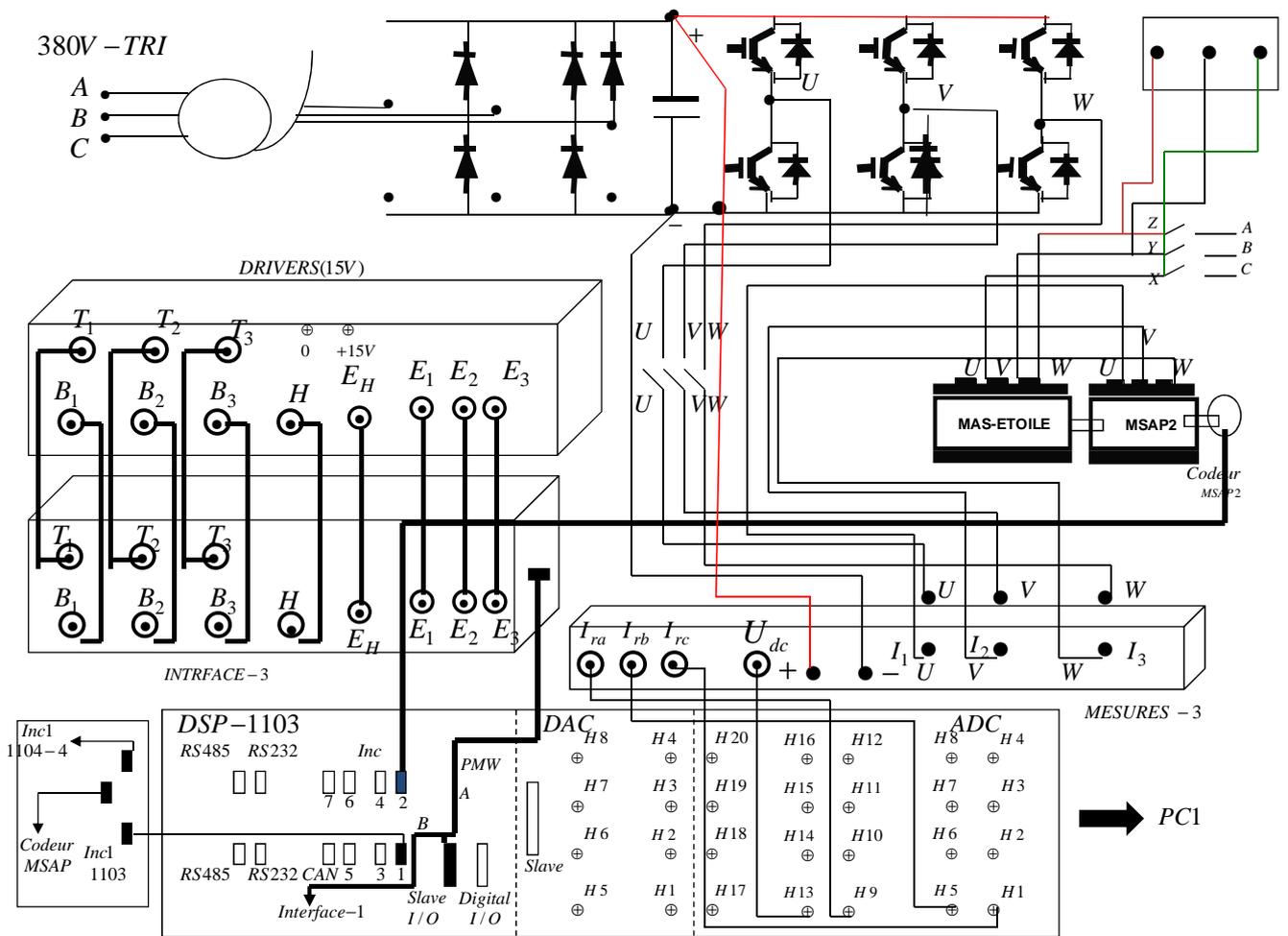


Figure A1.3. Émulateur de l'éolien

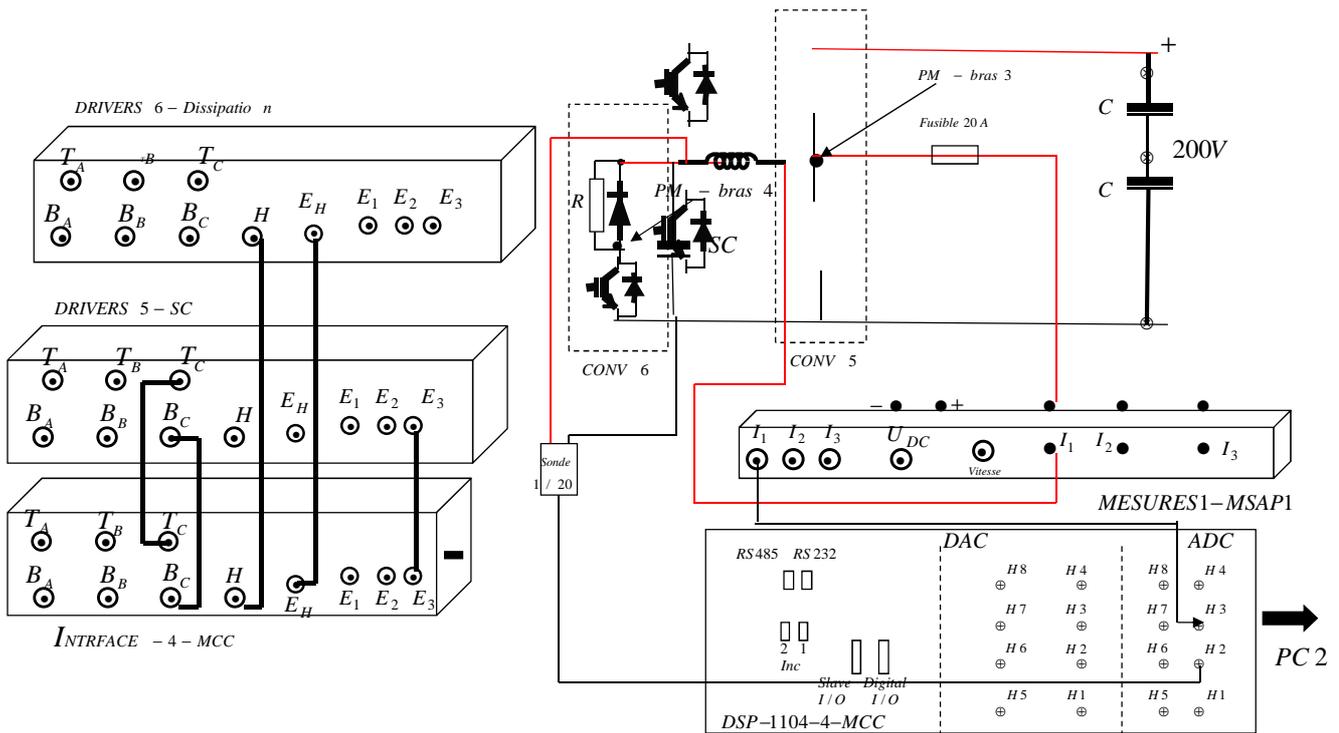


Figure A1.4. Stockage par supercondensateurs

# Annexe 2 : Données de la plateforme expérimentale d'HEI

## I. La machine à courant continu

Inductance d'inducteur :  $L_{emcc} = 47,8H$  ;

Résistance d'inducteur :  $R_{emcc} = 226,7\Omega$  ;

Courant nominal d'inducteur :  $I_{enom} = 0,65A$  ;

Inductance d'induit :  $L_{imcc} = 9,5mH$  ;

Résistance d'induit :  $R_{imcc} = 1,4\Omega$  ;

Courant nominal d'induit :  $I_{inom} = 14A$  ;

Coefficient de force électromotrice :  $k_{tmcc} = 1,115V \times s \times rad^{-1}$

Coefficient de frottement visqueux :  $k_{vmcc} = 0,0021Nm \times V \times s \times rad^{-1}$

Coefficient de frottement sec :  $k_{smcc} = 0,3387Nm$ ;

Coefficient d'inertie de l'arbre :  $J_{mcc} = 0,0223kg \times m^2$

Constante du temps de la commande du pitch control :  $\tau_b = 0,2s$

## II. La machine asynchrone à double alimentation

Nombre de paires de pôles :  $p_{mada} = 2$  ;

Résistance du stator :  $R_{smada} = 1,6\Omega$  ;

Résistance du rotor :  $R_{rmada} = 0,4\Omega$  ;

Inductance mutuelle :  $M_{mada} = 0,055H$  ;

Inductance cyclique au stator :  $L_{smada} = 0,150H$  ;

Inductance cyclique au rotor :  $L_{rmada} = 0,023H$

Coefficient de dispersion :  $\sigma_{mada} = 0,123$

Courant nominal :  $I_{nom} = 14,5A / 8,5A$

## III. La machine asynchrone à cage

Nombre de paires de pôles :  $p_{mas} = 2$

Résistance du stator :  $R_{smas} = 0,76\Omega$

Résistance du rotor :  $R_{rmas} = 0,76\Omega$

Inductance mutuelle :  $M_{mas} = 77,67mH$

Inductance de fuite :  $N_{mas} = 7,3mH$

Inductance cyclique au stator :  $L_{smas} = 81,32mH$

Inductance cyclique au rotor :  $L_{rmas} = 81,32mH$

Coefficient de dispersion :  $\sigma_{mas} = 87,75 \times 10^{-3}$

Courant nominal :  $I_{nom} = 10,9A$

#### IV. Machine synchrone à aimant permanent

Nombre de paires de pôles :  $p_{msap} = 3$

Résistance du stator:  $R_{smsap} = 0,895\Omega$

Inductance directe :  $L_{dmsap} = 12,16mH$

Inductance transversale :  $L_{qmsap} = 21,30mH$

Coefficient de couple :  $k_{msap} = 0,9V \times s \times rad^{-1}$

Inertie :  $J_{masap} = 1,41 \times 10^{-3} kg \times m^2$

Coefficient de frottement visqueux :  $k_{vmsap} = 0,001Nm \times V \times s \times rad^{-1}$

#### V Le bus continu

Capacité équivalente :  $C_{bc} = 2200\mu F$

Tension maximale :  $U_{bc} = 800V$

# Annexe 3: Résultats des simulations

Cette annexe présente les résultats de simulations avec débit hydraulique variable illustrant la réponse du superviseur d'un ensemble hybride éolien/hydraulique connecté à un réseau puissant et associé à un dispositif de stockage à court et à moyen terme lors d'une variation du débit de la micro centrale hydraulique.

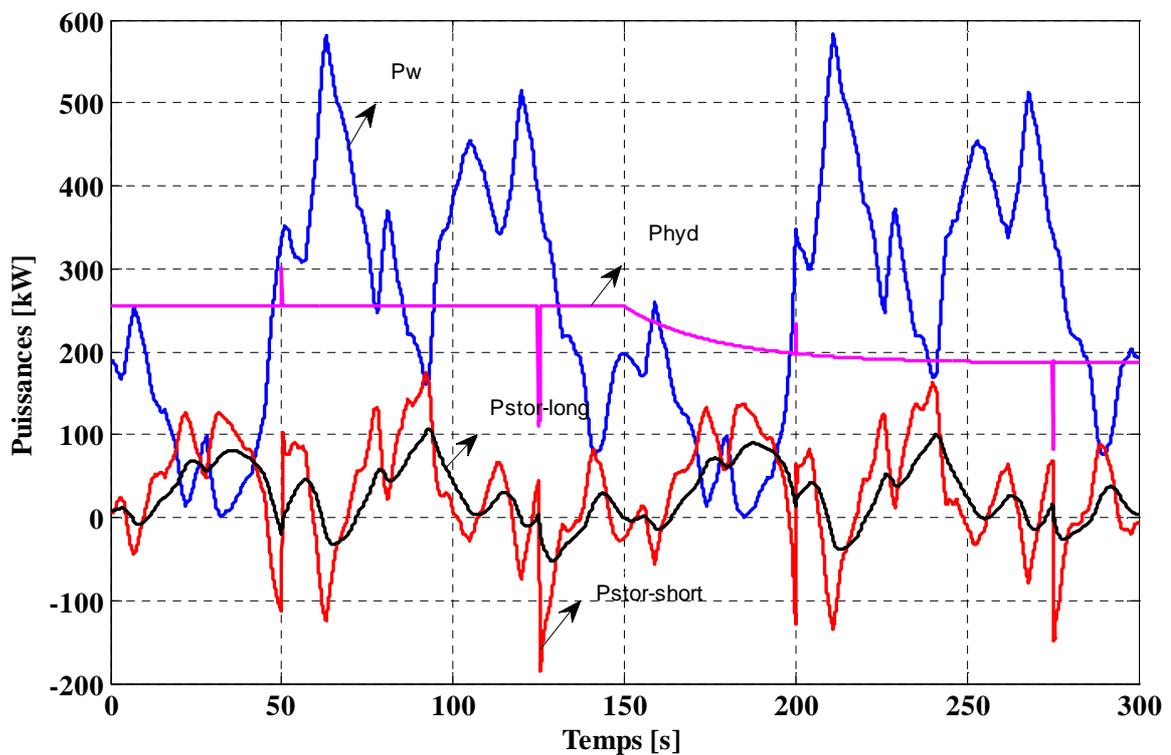


Figure A3.1. Allure des puissances

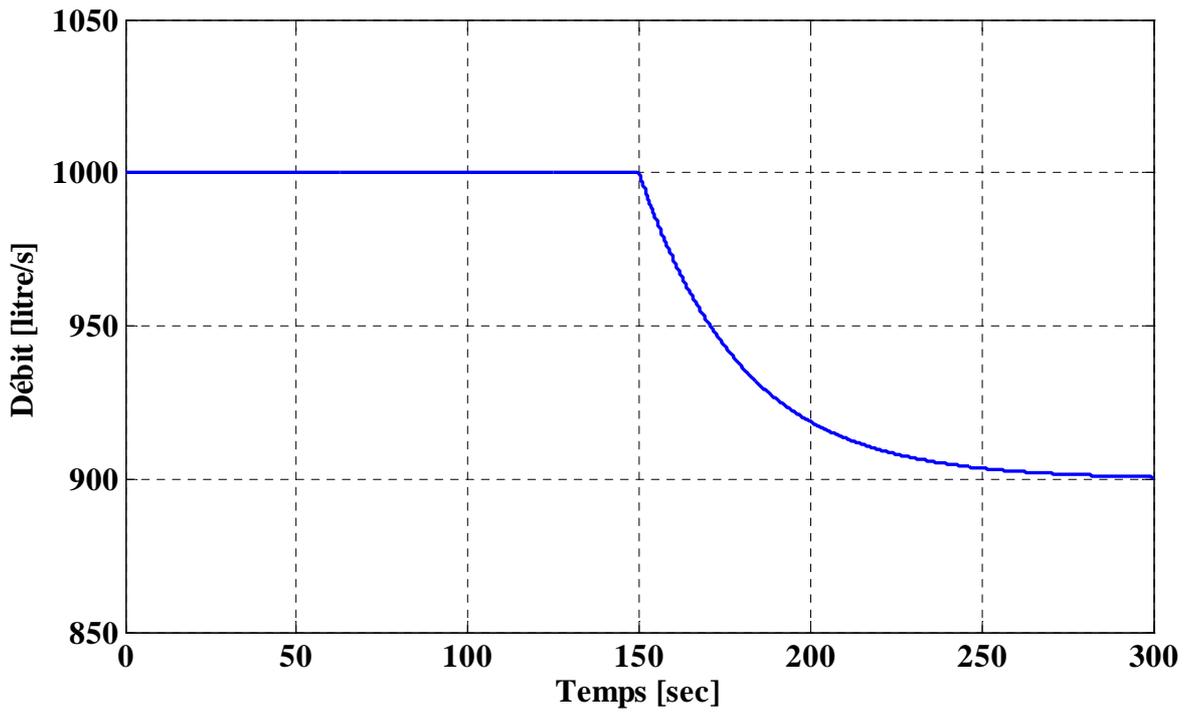


Figure A3.2. Débit de l'eau

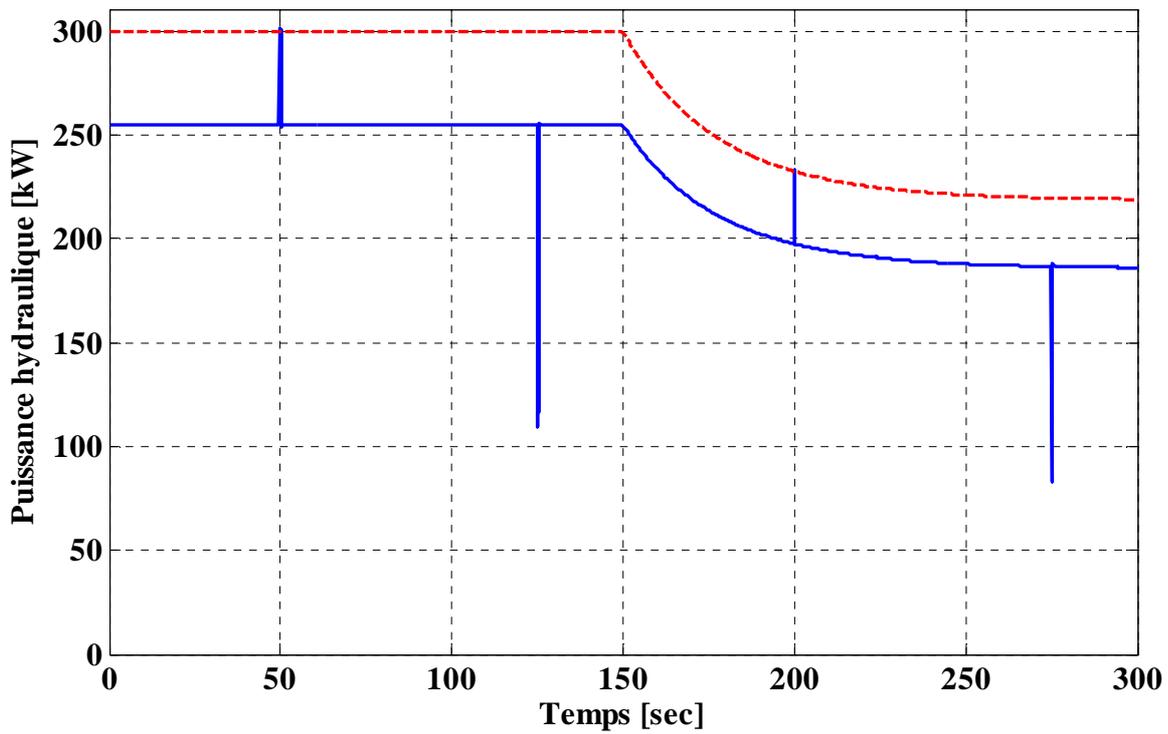


Figure A3.3. Taux d'utilisation de la source hydraulique

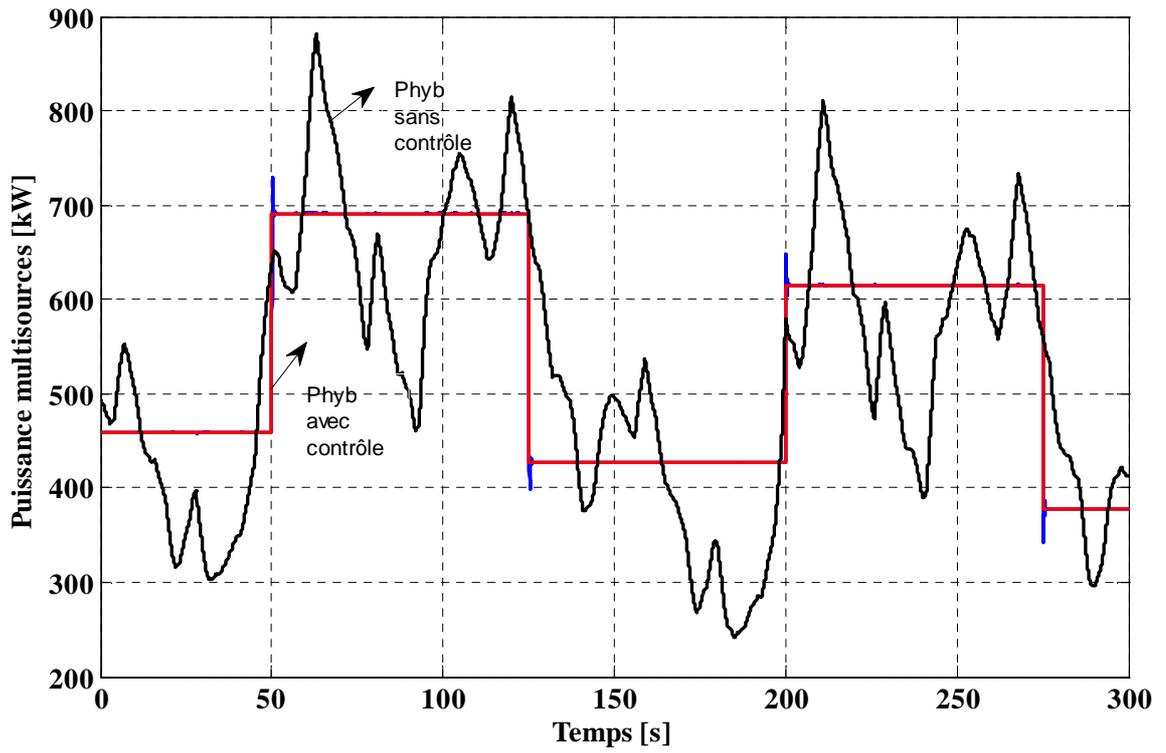


Figure A3.4. Allure des puissances produites

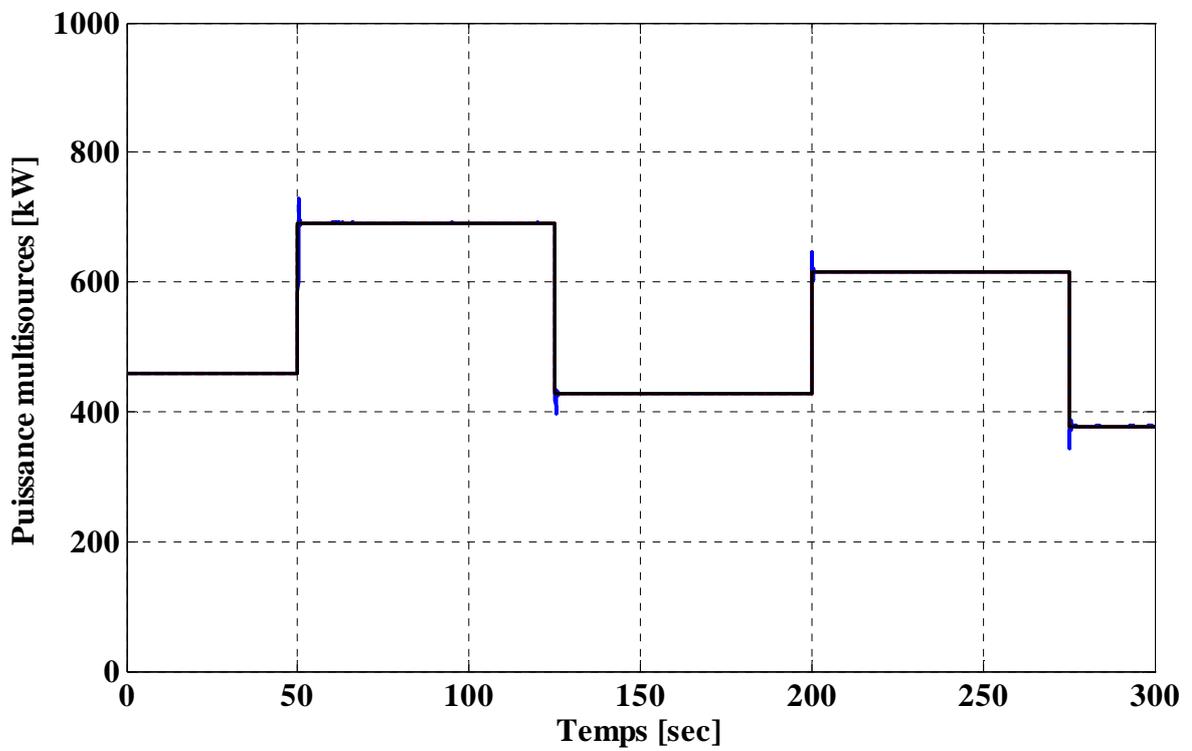


Figure A3.5. Allure de la puissance hybride

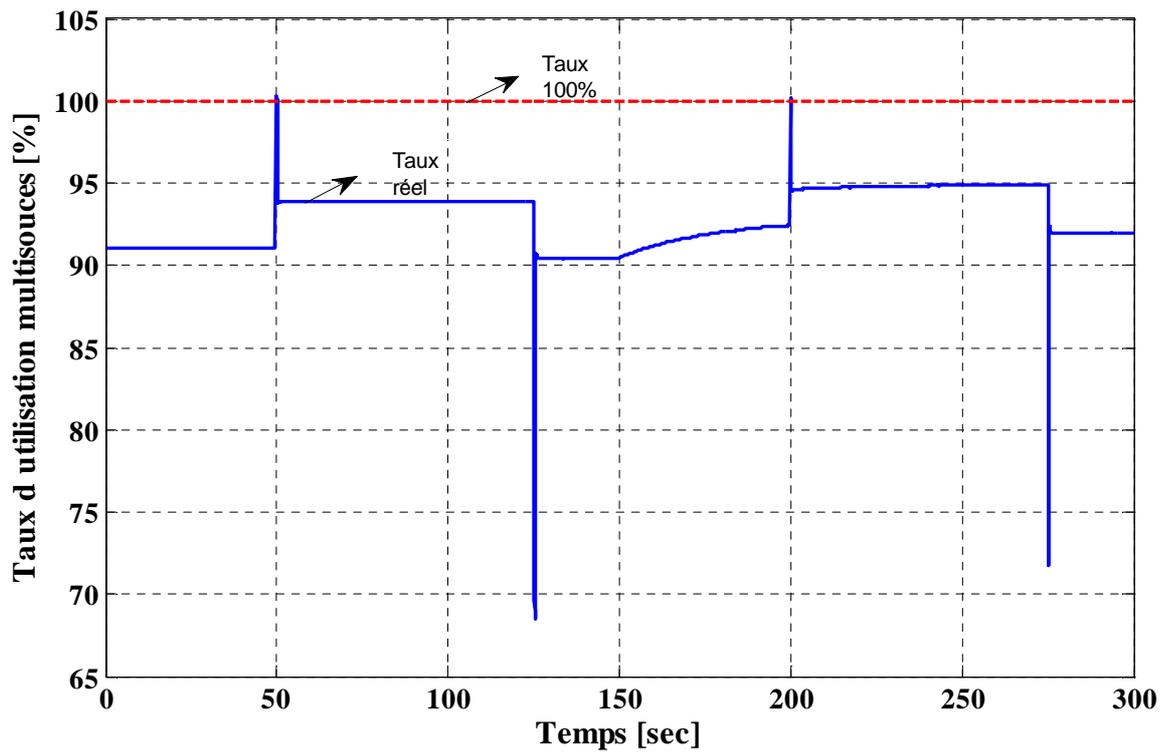


Figure A3.6. Taux d'utilisation de la source hybride



## **SUPERVISION DE SOURCES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ HYBRIDES ÉOLIEN/HYDRAULIQUE DANS LES RÉSEAUX D'ÉNERGIE INTERCONNECTES OU ISOLES**

**RÉSUMÉ :** Le concept de système multi sources, avec une gestion intégrée et optimisée de l'énergie, auquel différents systèmes de stockage sont associés est envisagé comme un élément de réponse à la problématique liée au caractère aléatoire et fluctuant de la production dispersée d'origine éolienne. Dans ce contexte, il apparaît intéressant d'associer les sources de production éoliennes et hydrauliques. Ces dernières sont en effet susceptibles, de par leur souplesse et leur disponibilité, de compenser le caractère aléatoire et fluctuant de l'éolien. Les générateurs et les systèmes de stockage d'une centrale multi sources peuvent être localisés en différents points du réseau mais sont gérés par un opérateur industriel unique. Comme la problématique de l'éolien se retrouve à tous les niveaux temporels de gestion, il est nécessaire de mettre en place une supervision multi niveaux de la centrale intégrée éolien/hydraulique/stockage envisagée. A chaque niveau correspond des objectifs et des moyens à définir pour répondre à ces exigences. Cependant, la problématique étant vaste, les travaux ont porté essentiellement sur deux niveaux : niveau « court terme » et niveau « moyen terme ».

Le but de la thèse est de proposer des méthodes de supervision pour la gestion des systèmes éolien/hydraulique/stockage. Ainsi, dix superviseurs sont proposés suivant différents outils de supervision (logique floue, fonction optimisation,...). Enfin, les performances de ces superviseurs sont comparées à l'aide de différents indicateurs permettant de quantifier leurs apports en fonction des objectifs des différents niveaux de supervision (qualité de puissance, efficacité énergétique,...).

**Mots clés:** Supervision, Système multi sources, Générateur éolien, générateur hydroélectrique, logique floue, Système de stockage à court et à moyen terme.

### **SUPERVISION OF A HYBRID WIND/HYDRO POWER SYSTEM FOR ELECTRICITY PRODUCTION, CONNECTED TO A POWER GRID OR AN ISOLATED GRID ABSTRACT ABSTRACT**

**ABSTRACT:** The concept of multi-sources system with an integrated and optimized power management and associated with several energy storage systems is seen as an important part of the answer to the issue of the randomness and fluctuation of dispersed wind power generation. In this context, it is interesting to combine two generation sources, wind and water. Water power generation is indeed likely to offset the randomness and fluctuation of wind power generation, because of its flexibility and availability. Generators and storage systems from a multi-source power plant can be located in different parts of the network but should be managed by a single industrial operator. Considering that the wind's issue is found at all levels of management time, it is necessary to establish a multi-level supervision of the considered integrated wind / hydro / storage central. Each stage is related to objectives and resources to define these requirements. However as the problem is vast, the work has focused mainly on two levels: "short-term" and "mid-term".

The aim of this thesis is to propose methods for the management of wind / hydro / storage systems. Thus, ten supervisors are proposed according to different monitoring tools (fuzzy logic, optimization function...). Finally, the performance of these supervisors is compared using various indicators to quantify their contributions according to the objectives of different levels of supervision (power quality, energy efficiency ...).

**Keywords :** Supervision, Hybrid renewable energy systems, fuzzy logic supervisor, Wind generator, Hydro generator, a short-term and mid-term storage unit.