

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE
ÉLECTRIQUE

PAR
SOUSSO KELOUWANI

STRATÉGIE DE COMMANDE D'UN SYSTÈME À ÉNERGIE
RENOUVELABLE AVEC STOCKAGE D'HYDROGÈNE

SEPTEMBRE 2002

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

Ce travail vise principalement à apporter une contribution à la compréhension et au contrôle des systèmes à énergie renouvelable avec stockage de l'hydrogène (SERSH) par l'analyse et la conception d'une stratégie de contrôle efficace. Ce mémoire présente une revue bibliographique sur les énergies renouvelables (énergie du vent et du soleil), la problématique reliée à la gestion ou au contrôle d'un SERSH, l'optimisation du transfert de puissance entre la pile à combustible et le bus à courant continu, les modèles des différentes composantes du banc d'essais de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène à Trois-Rivières. Ce dernier est composé d'une éolienne, des panneaux solaires, de batteries, d'un électrolyseur, d'une pile à combustible, d'un survolteur ainsi que d'un dévolteur.

Le premier chapitre, décrit le phénomène de l'effet de serre et comment les énergies renouvelables sont une alternative intéressante pour réduire la production des gaz à effet de serre. D'après les études scientifiques effectuées sur le sujet, le gaz carbonique (CO_2) est de loin l'agent qui accélère le plus l'effet de serre. Déjà en 1992, ce gaz représentait 48% du volume des gaz à effet de serre. Sa production provient en grande partie de l'utilisation de l'énergie fossile. Une solution permettant de réduire l'émission du CO_2 consiste à utiliser les énergies renouvelables (vent et soleil) pour produire de l'électricité. Ce chapitre, situe notre projet de recherche, pose la problématique et expose la méthodologie utilisée. La problématique principale concerne le contrôle efficace d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène pour les sites isolés. Un tel

Le système est caractérisé par la nature intermittente des sources primaires et la non-linéarité des modèles de la plupart des composantes. La méthodologie que nous employons s'appuie sur les travaux scientifiques antérieurs dans les domaines suivants: optimisation de transfert de puissance des convertisseurs à courant continu, modélisation des composantes d'un système à énergie renouvelable et développement d'algorithmes de contrôle.

Le deuxième chapitre analyse les fonctionnements des survoltateurs classiques et multiphasés. Suite à cette analyse, une étude comparative du contenu fréquentiel des signaux de courants démontre l'amélioration appréciable du rendement des survoltateurs et de la qualité des ondes de courant, lorsque la technique de la commande multiphasée est employée. Cette dernière consiste à mettre en parallèle plusieurs circuits de survoltateur afin produire le courant moyen désiré. Au lieu de faire commuter ces circuits en même temps, un déphasage régulier est introduit pendant les phases de commutation. Le survoltateur du banc d'essais de l'IRH comporte 8 cellules (circuit de base d'un survoltateur classique). Les tests de performance réalisés démontrent que le rendement atteint 99% à forte puissance et la forme d'onde des courants d'entrée et de sortie est presque sans ondulation.

L'élaboration d'une stratégie de contrôle requiert le développement d'un modèle complet du système à énergie renouvelable. C'est pourquoi le chapitre 3 porte sur la modélisation dynamique des composantes du banc d'essais de l'IRH. Les modèles de l'électrolyseur et de la pile à combustible s'appuient respectivement sur leurs équations de polarisation.

Les sources primaires ont été représentées par leurs signaux échantillonnés et le modèle des batteries est dérivé de celui utilisé pour la simulation de l'alimentation des moteurs des véhicules électriques. Pour valider les modèles, nous utilisons un exemple d'opération du banc d'essais. L'écart moyen entre les grandeurs estimées par nos modèles et celles mesurées est inférieur à 10%, ce qui est satisfaisant pour prédire correctement le comportement d'un tel système.

À partir des modèles développés, trois algorithmes de contrôle sont étudiés dans le chapitre 4. Le premier algorithme appelé stratégie de contrôle avec la double hystérésis, consiste à gérer les séquences de mise en marche et de mise à l'arrêt de l'électrolyseur et de la pile. Une fois que ces composantes sont mises en marche, elles opèrent sans asservissement du niveau de puissance de fonctionnement. C'est la méthode la plus simple et la plus utilisée dans des applications similaires. Afin de contrôler le niveau de puissance d'opération, un contrôleur proportionnel intégral (PI) est utilisé pour la puissance de l'électrolyseur et un autre pour celle de la pile (deuxième stratégie). Dans ce cas, l'étude théorique démontre une sensibilité aux variations d'énergie sur le bus à courant continu qui diminue l'efficacité de contrôle du système. Ces deux premières stratégies utilisent uniquement l'énergie stockée dans les batteries comme variable de contrôle. La troisième et dernière stratégie étudiée concerne l'utilisation de deux contrôleurs à logique floue, l'un pour la pile et l'autre pour l'électrolyseur. Ces deux contrôleurs permettent de prendre en considération les besoins énergétiques de la charge et la production réelle de l'énergie à partir des sources primaires.

L'étude théorique comparative présentée dans le chapitre 5 concerne les performances des trois stratégies de contrôle. Elle indique que l'utilisation du double hystérésis pour contrôler les séquences de fonctionnement de l'électrolyseur et de la pile procure une robustesse au contrôle du système. Lorsque les contrôleurs à logique floue sont utilisés pour asservir le niveau de puissance des composantes, le système est capable de fonctionner en mode dynamique, caractérisé par des séquences de mise en marche et d'arrêt très rapprochées.

Dans le chapitre 6, l'implantation pratique du contrôle du banc d'essais avec une double hystérésis est présentée. Le logiciel Bridgview est utilisé pour la programmation du contrôle. À partir du programme de contrôle en Bridgeview, plusieurs mesures expérimentales sont réalisées et présentées. Enfin, un programme en assembleur pour microcontrôleur de type 68HC811 permettant de gérer le SERSH de l'IRH avec la stratégie de la double hystérésis est décrit.

Enfin dans le chapitre 7, les conclusions des résultats de notre projet de recherche sont présentées et des recommandations sont énoncées. Ces recommandations portent essentiellement sur l'évaluation des performances à long terme du SERSH de l'IRH et l'optimisation des paramètres des composantes en fonction d'une étude technico-économique.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mes deux directeurs de recherche, Kodjo Agbossou et Chahine Richard, professeurs au département de génie électrique et informatique de l'Université du Québec à Trois-Rivières, d'avoir accepté de diriger ce travail. Je remercie tout particulièrement M. Kodjo qui n'a ménagé aucun effort dans toutes les étapes de réalisation de notre projet de recherche.

Mes remerciements vont également à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) pour son soutien financier et matériel. Le cadre notre projet de recherche est agréable et propice à l'émergence de nouvelles idées.

À M. Rémy Simard, je dis merci pour ses précieux conseils et le soutien technique très apprécié. Je remercie également Alexandre Palardy, technicien à l'IRH pour son aide pendant la phase d'implantation du système de contrôle du banc d'essais.

Mes remerciements vont également pour tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu moralement et intellectuellement. En particulier, je voudrais remercier ma copine Marie-Claude Bluteau, mes parents, mes frères et sœurs. Sans vous, je n'aurais pas pu réaliser correctement le projet de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| RÉSUMÉ..... | i |
| REMERCIEMENTS..... | v |
| TABLE DES MATIÈRES..... | vi |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xii |
| LISTE DES FIGURES..... | xiii |
| LISTES DES SYMBOLES..... | xv |
| | |
| CHAPITRE I: INTRODUCTION: ENERGIES RENOUVELABLES ET GESTION D'ÉNERGIE | 1 |
| 1.1 Effet de serre | 1 |
| 1.2 Énergies du vent et du soleil | 3 |
| 1.3 Problématique reliée à la gestion d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène (SERSH) | 4 |
| 1.4 État de la recherche | 5 |
| 1.5 Banc d'essais de l'IRH | 8 |
| 1.6 Objectifs de la recherche | 10 |
| 1.7 Méthodologie utilisée..... | 11 |
| | |
| CHAPITRE II: TRANSFERT OPTIMAL DE PUISSANCE ENTRE LA PILE ET LE BUS CC | 13 |
| 2.1 Introduction..... | 13 |
| 2.2 Analyse d'un circuit à commande multiphasée : cas du survolteur..... | 14 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.2.1 | Commande multiphasée | 14 |
| 2.2.2 | Modèle en régime permanent d'une cellule de courant. | 16 |
| 2.2.3 | Description mathématique d'un survoltor à commande multiphasée..... | 19 |
| 2.3 | Exemple d'un survoltor à 8 cellules à commande multiphasée..... | 23 |
| 2.4 | Validation des modèles mathématiques des courants du survoltor du banc d'essais. | |
| | 25 | |
| 2.5 | Analyse du contenu harmonique des signaux de courant | 27 |
| 2.6 | Avantages de la technique de commande multiphasée | 31 |
| CHAPITRE III: MODELISATION DYNAMIQUE DU BANC D'ESSAIS DE L'IRH..... | | 32 |
| 3.1 | État de la recherche sur la modélisation des SERSH..... | 32 |
| 3.2 | Modélisation dynamique des composants..... | 34 |
| 3.2.1 | Modèle des batteries..... | 35 |
| 3.2.3 | Dévolteur de puissance: modèle dynamique..... | 37 |
| 3.2.4 | Électrolyseur alcalin..... | 40 |
| 3.2.5 | Survoltor de puissance..... | 41 |
| 3.2.6 | Pile à combustible | 42 |
| 3.2.7 | Sous-système de stockage d'hydrogène | 43 |
| 3.3 | Algorithme pour la simulation du SERSH..... | 45 |
| 3.4 | Validation des modèles et expérimentations..... | 45 |
| 3.5 | Exemple de scénario pratique | 52 |
| CHAPITRE IV: STRATÉGIES DE CONTRÔLE D'UN SYSTÈME À ÉNERGIE RENOUVELABLE..... | | 57 |
| 4.1 | Introduction | 57 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.2 | Problématique de contrôle..... | 58 |
| 4.3 | Choix de la variable de contrôle..... | 59 |
| 4.4 | Stratégies de contrôle basées sur l'énergie des batteries | 60 |
| 4.4.1 | Contrôle par double hystérésis..... | 61 |
| 4.4.2 | Définition d'un scénario de test pour les algorithmes de contrôle | 63 |
| 4.4.2.1 | Profil de la charge | 63 |
| 4.4.2.2 | Profils de production énergétique des sources primaires..... | 64 |
| a- | Production des panneaux solaires | 64 |
| b- | Production de l'éolienne..... | 65 |
| 4.4.3 | Conditions initiales pour l'utilisation du scénario de test..... | 66 |
| 4.4.4 | Paramètres de simulation du scénario | 66 |
| 4.4.5 | Simulation selon le scénario prédéfini | 68 |
| 4.4.5.1 | Stratégie basée sur la double hystérésis | 68 |
| 4.4.5.2 | Stratégie basée sur la double hystérésis et deux contrôleurs PI locaux | 69 |
| a- | Conception du contrôleur pour le module surveilateur-électrolyseur | 70 |
| b- | Évaluation des performances théoriques de contrôle..... | 72 |
| c- | Étude de sensibilité aux variations d'énergie sur le bus CC..... | 74 |
| d- | Test d'une stratégie de contrôle basée sur le PI..... | 75 |
| 4.4.5.3 | Stratégie basée sur la double hystérésis et la logique floue | 76 |
| a- | Conception des contrôleurs basés sur la logique floue | 77 |
| a1- | Détermination des variables d'entrée et de sortie du contrôleur | 78 |
| a2- | Variables linguistiques | 79 |
| a3- | Fuzzification..... | 79 |
| a4- | Table d'inférence | 80 |

| | | |
|--|--|----|
| a5- | Défuzzification..... | 81 |
| b- | Test d'une stratégie basée sur la logique floue..... | 82 |
| CHAPITRE V: ÉTUDE COMPARATIVE DES STRATÉGIES DE CONTRÔLE D'UN SYSTÈME À ÉNERGIE RENOUVELABLE | | 85 |
| 5.1 | Introduction..... | 85 |
| 5.2 | Définition des critères de performances..... | 86 |
| 5.2.1 | Efficacité de régulation de la puissance..... | 86 |
| 5.2.2 | Rendement système..... | 87 |
| 5.2.3 | Durée de vie des composantes les plus coûteuses..... | 88 |
| 5.3 | Scénario de test | 88 |
| 5.4 | Résultats des simulations | 89 |
| 5.5 | Analyse des résultats de la simulation | 90 |
| 5.5.1 | Comparaison des COP | 90 |
| 5.5.2 | Comparaison des rendements..... | 92 |
| 5.5.3 | Comparaison du nombre de cycles d'opération | 92 |
| 5.5.3.1 | Comparaison du nombre de cycles d'opération pour l'électrolyseur..... | 93 |
| 5.5.3.2 | Comparaison du nombre de cycles d'opération pour la PAC | 94 |
| CHAPITRE VI: RESULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION..... | | 95 |
| 6.1 | Introduction..... | 95 |
| 6.2 | Contexte expérimental | 95 |
| 6.3 | Implantation de la stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis..... | 96 |
| 6.3.2 | Conditions d'opération | 98 |

| | | |
|--|---|-----|
| 6.3.3 | Analyse des résultats et discussion | 99 |
| 6.4. | Stabilité du SER contrôlé avec la stratégie basée sur la double hystérésis..... | 100 |
| 6.4.1 | Conditions d'opération | 100 |
| 6.4.2 | Analyse des résultats et discussion | 101 |
| 6.5 | Aperçu sur le programme réalisé en Assembleur avec un microcontrôleur. | 102 |
| 6.5.1 | Organigramme détaillé du programme en assembleur..... | 103 |
| CHAPITRE VII: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS..... | | 106 |
| 7.1 | Conclusions..... | 106 |
| 7.2 | Recommandations..... | 108 |
| VIII. BIBILOGRAPHIE | | 110 |
| ANNEXES I: SYSTÈME DE CONTRÔLE DU BANC D'ESSAIS PROGRAMMÉ EN BRIDGEVIEW | | 114 |
| ANNEXES II: PROGRAMME DE CONTRÔLE DU BANC D'ESSAIS EN ASSEMBLEUR POUR 68HC811 | | 125 |
| ANNEXES III: PROGRAMME EN MATLAB POUR L'IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES | | 133 |
| ANNEXES IV: PROGRAMME EN MATLAB POUR LES STRATÉGIES DE CONTRÔLE | | 134 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1: Contribution des GES à l'effet de serres en 1993..... | 2 |
| Tableau 1.2: Spécifications techniques du banc d'essais..... | 10 |
| Tableau 3.1: Valeurs des paramètres..... | 44 |
| Tableau 4.1: Coefficients des contrôleurs PI..... | 72 |
| Tableau 4.2: Performances théoriques pour une excitation échelon (puissance du bus CC supposée constante)..... | 74 |
| Tableau 4.3: Simulation de la sensibilité du contrôle face aux perturbations de puissance bus CC..... | 75 |
| Tableau 4.4: Table d'inférence pour le CLF..... | 81 |
| Tableau 5.1: Résultats des simulations..... | 90 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1: Augmentation de la proportion du CO ₂ dans l'atmosphère | 2 |
| Fig. 1.2: Schéma du banc d'essai de l'IRH sur les énergies renouvelables..... | 9 |
| Fig. 2.1 : Schéma de puissance d'un survoltor de tension avec une cellule..... | 15 |
| Fig. 2.2 : Schéma d'une cellule de base..... | 15 |
| Fig. 2.3 : Schéma d'un survoltor de tension avec 3 cellules..... | 16 |
| Fig. 2.4 : Signal de commande de la première cellule..... | 17 |
| Fig. 2.5: Exemple de chronogramme des signaux de commande pour un système à 5 cellules, avec un rapport cyclique de 25%..... | 22 |
| Fig. 2.6 : Courants au primaire pour chacune des 8 cellules..... | 24 |
| Fig. 2.7 : Courant total au primaire ($I_{in}(t)$)..... | 24 |
| Fig. 2.8 : Courant total dans la charge..... | 25 |
| Fig. 2.9 : Comparaison des mesures et des simulations..... | 26 |
| Fig. 2.10 : Évolution du TRH au primaire des survoltors multiphasés..... | 30 |
| Fig. 2.11 : Graphique de taux de réduction du contenu fréquentiel du courant en sortie.. | 30 |
| Fig. 3.1: Schéma du processus d'identification de paramètres du dévolteur..... | 39 |
| Fig. 3.2: Organigramme de description du comportement du SERSH..... | 47 |
| Fig. 3.3: Courant $I_{WT}(t)$ à la sortie de bloc redresseur de l'éolienne..... | 48 |
| Fig. 3.4: Profil du courant de la charge..... | 48 |
| Fig. 3.5: Courant de l'électrolyseur pendant la validation..... | 49 |
| Fig. 3.6: Courant à la sortie du survoltor..... | 50 |
| Fig. 3.7: Énergie W(t) dans le tampon..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.8: Exemple de scénario pratique de simulation | 52 |
| Fig. 3.9: Bilan de puissance sur le bus CC sans la contribution de la PAC et de l'électrolyseur..... | 53 |
| Fig. 3.10: Puissance de l'électrolyseur et de la PAC..... | 54 |
| Fig. 3.11: $W(t)$ | 54 |
| Fig. 3.12: $W_{H_2}(t)$ | 56 |
| Fig. 4.1: Diagramme décrivant les cycles de fonctionnement de la PAC et de l'électrolyseur..... | 62 |
| Fig. 4.2: Profil moyen journalier de consommation d'énergie pour le mois de janvier.... | 64 |
| Fig. 4.3: Profil moyen journalier de production des PV..... | 65 |
| Fig. 4.4: Profil moyen journalier de production de l'éolienne le mois de janvier 2001... | 65 |
| Fig. 4.5: $W(t)$, puissance consommée par l'électrolyseur, puissance produite par la PAC..... | 68 |
| Fig. 4.6 Diagramme-bloc pour le contrôle de la puissance absorbée par l'électrolyseur... | 70 |
| Fig. 4.7: Courbes de réponse du sous-ensemble dévolteur - électrolyseur..... | 73 |
| Fig. 4.8: Courbes de réponse du sous-ensemble survolteur - pile à combustible..... | 73 |
| Fig. 4.9: $W(t)$, puissance consommée par l'électrolyseur, puissance produite par la PAC, lorsque les contrôleurs PI sont utilisés..... | 76 |
| Fig. 4.10: Fonction d'appartenance des variables..... | 80 |
| Fig. 4.11: Représentation en 3 dimensions..... | 82 |
| Fig. 4.12: $W(t)$, puissance consommée par l'électrolyseur, puissance produite par la PAC, lorsque les CFL sont utilisés..... | 83 |
| Fig. 5.1 : Comparaison des COP..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 5.2 : Comparaison des rendements de la transformation de l'énergie..... | 92 |
| Fig. 5.3 : Comparaison des nombres de cycles d'opération pour l'électrolyseur..... | 93 |
| Fig. 5.4 : Comparaison des nombres de cycles d'opération pour la PAC..... | 94 |
| Fig. 6.1: Organigramme de haut niveau pour le contrôle du banc d'essais..... | 97 |
| Fig. 6.2 : Profil de charge utilisé..... | 98 |
| Fig. 6.3 : Exemple d'opération du SER..... | 99 |
| Fig. 6.4 : Comparaison mesures-estimations de la variable de contrôle ($W(t)$)..... | 100 |
| Fig. 6.5: Mesures expérimentales pour le test de stabilité du SER..... | 101 |
| Fig. 6.6 : Instrumentation du banc d'essai sur les SER à l'IRH..... | 103 |
| Fig. 6.7: Organigramme pour l'implantation du contrôle par hystérésis dans un microcontrôleur..... | 105 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

| | |
|---------------|--|
| α | Rapport cyclique |
| η_{Bo} | Rendement du survoltEUR |
| η_{Bu} | Rendement du dévolteur |
| η_E | Rendement de transformation d'énergie |
| $\eta_{I,el}$ | Efficacité de courant de l'électrolyseur |
| $\eta_{I,FC}$ | Efficacité de courant de la pile à combustible |
| ARMA | Auto-regressive moving average |
| Bo | SurvoltEUR |
| Bu | Dévolteur |
| CLF | Contrôleur à logique floue |
| COP | Coefficient de performance |
| el | Électrolyseur |
| GES | Gaz à effet de serre |
| i_c | Courant de charge de L (A) |
| $i_{c,n}$ | Courant de charge de L de la cellule n (A) |
| i_d | Courant de décharge de L (A) |
| $i_{d,n}$ | Courant de décharge de L de la cellule n (A) |
| IRH | Institut de Recherche sur l'Hydrogène |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsions |
| PAC | Pile à combustible |

| | |
|--------------------------|--|
| PEM | Proton exchange membrane |
| PV | Panneaux solaires |
| RNA | Réseau de neurones artificiels |
| r | rapport cyclique |
| SERSH | Système d'énergies renouvelables avec stockage d'hydrogène |
| SOC | État de charge |
| T | Période du signal de commutation des transistors de puissance (s) |
| t | Temps (s) |
| T_{el} | Température des cellules de l'électrolyseur ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_{FC} | Température des cellules de la pile à combustible ($^{\circ}\text{C}$) |
| TH | Taux d'harmoniques |
| TH_{ref} | Taux d'harmoniques d'un surveilleur à une cellule |
| TRH | Taux de réduction du contenu harmonique |
| U_B | Tension du bus CC (V) |
| UQTR | Université du Québec à Trois-Rivières |
| W_H | Seuil pour démarrer l'électrolyseur (W) |
| W_{H2} | Énergie stockée sous forme d'hydrogène (W) |
| $W_{H2,0}$ | Énergie stockée initialement sous forme d'hydrogène (W) |
| W_{in} | Énergie d'entrée de la batterie (W) |
| W_L | Seuil pour démarrer la PAC (W) |
| W_{max} | Énergie maximale qui peut être stockée dans les batteries (W) |
| WT | Éolienne |

CHAPITRE I

INTRODUCTION: ENERGIES RENOUVELABLES ET GESTION D'ÉNERGIE

L'activité humaine a entraîné des conséquences dommageables pour l'environnement. L'une de ces conséquences est l'effet de serre qui est une des principales causes du réchauffement de la terre. Dans ce chapitre, nous passons en revue le phénomène de l'effet de serre et quelques solutions qui ont été proposées pour y remédier. La plupart de ces solutions préconisent la réduction de l'émission des gaz à effet de serre. Cette réduction passe, entre autres, par l'utilisation des sources d'énergie non polluantes dont le soleil et le vent. Ces deux sources d'énergie font partie de la classe des énergies renouvelables.

1.1 Effet de serre

Tout corps (ou objet) dont la température est supérieure à zéro kelvin émet un rayonnement infrarouge. La terre, par conséquent, émet vers l'espace des rayonnements infrarouges qui sont interceptés par certains gaz. Ces derniers renvoient alors ces infrarouges vers la surface de la terre au lieu de les laisser poursuivre leurs trajectoires dans l'espace. Les gaz qui ont ces propriétés sont appelés gaz à effet de serre (GES). Les principaux GES [1] sont:

- le gaz carbonique (provenant des combustions de toutes sortes, de la décomposition de la biomasse,...);
- le méthane (émanant de la fermentation anaérobiose, des fuites de gaz naturel,...);

- les chloro-fluoro-carbures (CFC);
- l'ozone O_3 ;

À ce jour, le gaz carbonique (CO_2) et le méthane (CH_4) sont considérés comme les principaux accélérateurs de l'effet de serre [1,2]. Malheureusement, force est de constater à quel point l'émission du CO_2 continue de croître chaque année, comme l'indique la Fig 1.1.

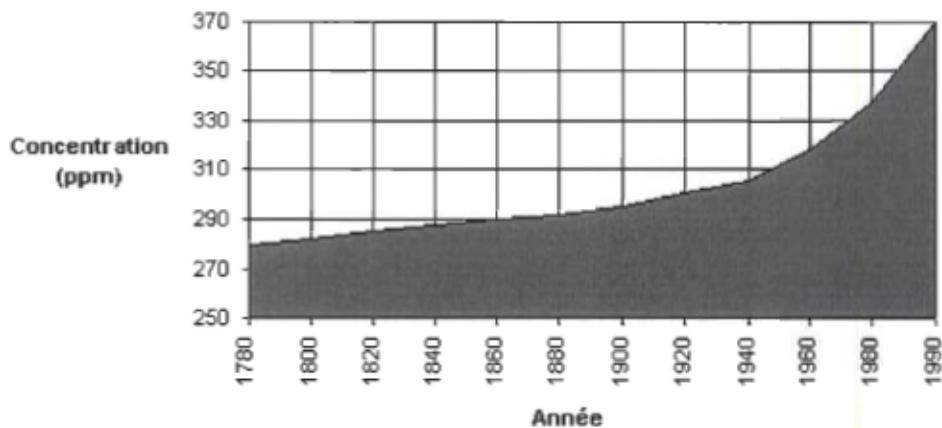


Fig. 1.1: Augmentation de la proportion du CO_2 dans l'atmosphère [2] en fonction des années.

Tableau 1.1: Contribution des GES à l'effet de serre en 1993 (source: [1])

| GES | Contribution (%) |
|-----------------|------------------|
| CO_2 | 48 |
| CH_4 | 17 |
| CFC | 18 |
| N_2O | 6 |
| O_3 et autres | 11 |

Lorsque nous analysons la contribution de chaque GES sur l'effet de serre, nous remarquons que l'émission du CO_2 est de loin la principale cause de l'effet de serre (tableau 1.1). Pour atténuer ce phénomène, il est suggéré de diminuer l'émission des GES et surtout

de réduire le taux de production du CO₂. L'industrie automobile est en grande partie responsable de cette production de CO₂. C'est pourquoi, depuis une dizaine d'années, des efforts sont faits en vue de la mise en opération de voitures hybrides (essence - électricité).

À part l'industrie automobile, les besoins énergétiques des hommes font en sorte que l'énergie fossile est utilisée (pour le chauffage, les activités domestiques,...). Mais cette forme d'énergie produit également de grandes quantités de CO₂. Il est donc souhaitable d'utiliser d'autres sources d'énergie moins polluantes comme la puissance mécanique du vent et la lumière du soleil.

1.2 Énergies du vent et du soleil

L'eau, le vent et le soleil sont les principales sources d'énergie renouvelable utilisées pour produire de l'électricité. La production de l'électricité à partir de l'eau passe par la construction d'un barrage hydroélectrique sur un cours d'eau. Le barrage sert donc à stocker l'énergie hydraulique en vue de sa transformation ultérieure en électricité. Ceci est rendu nécessaire compte tenu du fait que le niveau d'eau des cours d'eau varie au rythme des aléas climatiques. Malheureusement, l'hydroélectricité n'est pas disponible partout (cas des zones désertiques et des sites isolés). Pour les sites non desservis par les installations électriques conventionnelles (réseau électrique), le vent et le soleil sont mis à contribution pour subvenir aux besoins énergétiques des personnes. Comme ces sources d'énergies sont intermittentes, des moyens efficaces de stockage sont requis. Les batteries sont souvent utilisées pour jouer ce rôle [3]. Cependant, elles ne conviennent pas pour des installations

de grandes capacités et de longue durée [3]. En effet, les coûts d'exploitation sont élevés et leurs durées de vie sont limitées. L'une des solutions à ce problème consiste à utiliser les batteries pour le stockage à court terme et l'hydrogène pour le stockage à long terme [3, 14]. Notre projet de maîtrise porte sur le contrôle et la gestion d'un système à énergie renouvelable (SERSH) utilisant cette solution.

1.3 Problématique reliée à la gestion d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène (SERSH)

Le SERSH qui fait l'objet de notre étude est composé d'une éolienne, de panneaux solaires (PV), d'un électrolyseur, d'une pile à combustible (PAC), de batteries et d'un onduleur aux bornes duquel est connectée une charge. Toutes ces composantes sont reliées à un nœud de courant. Les batteries et le nœud de connexion constituent le bus à courant continu (bus CC). Lors du fonctionnement du système, les puissances utilisées par la PAC et l'électrolyseur sont contrôlées par un programme de gestion du SERSH. Le contrôle de ces puissances nécessite l'utilisation d'interfaces de commande. Ces dernières, en plus de permettre le contrôle en puissance, ont un rendement élevé et un taux d'harmoniques générés faible pour ne pas influencer négativement les performances du SERSH. Cette double contrainte pose donc un problème de transfert de puissance d'une part entre le bus CC et la PAC et d'autre part entre le bus CC et l'électrolyseur.

Une fois que le transfert de puissance est optimisé, l'efficacité de tout le système dépend de la façon dont il est contrôlé. En général, le programme de contrôle met en marche

l'électrolyseur lorsqu'il y a un excédent d'énergie. L'hydrogène est alors produit. Quand l'énergie est insuffisante pour alimenter la charge, l'hydrogène déjà produit est utilisé par la PAC pour fournir du courant électrique. Le contrôle, tel que décrit, est basé sur l'état du système. Le problème est de trouver un algorithme de contrôle efficace qui permet de minimiser les pertes afin d'améliorer les performances globales du système. Pour construire cet algorithme, la définition d'une variable de contrôle est nécessaire. Cette variable de contrôle est choisie son aptitude à indiquer l'état du système. À première vue, la tension (au nœud de connexion) peut être considérée comme variable de contrôle. Cependant, elle varie beaucoup en fonction de la puissance électrique disponible au niveau de l'éolienne (source principale d'énergie) et non en fonction de l'état du système. Le deuxième problème concerne le choix d'une variable de contrôle et le développement d'un algorithme de contrôle efficace de SERSH.

1.4 État de la recherche

Une fois que la problématique est définie, nous effectuons une revue de l'état de la recherche. Nous avons, dans la section précédente, identifié deux principaux problèmes : transfert optimal de puissance et contrôle efficace du système. L'état de la recherche que nous présentons est divisé en deux parties, chaque partie traitant d'un de ces problèmes. Avant d'aborder ces deux parties, nous exposons brièvement l'état d'avancement de la recherche sur les SERSH.

La recherche sur l'exploitation des énergies renouvelables éolienne et solaire a commencé depuis longtemps. Dans tous les projets qui s'y rapportent, l'accent a été mis sur les différentes combinaisons de sources d'énergie permettant de subvenir aux besoins énergétiques dans les régions éloignées des systèmes de distribution de courant. Ainsi, l'énergie solaire combinée aux batteries a longtemps été préférée à l'énergie éolienne. Au début des années 80, un regain d'intérêt s'est fait sentir pour l'éolienne. De nos jours, certains projets intègrent des éoliennes, des panneaux solaires et des génératrices entraînées par des moteurs à combustion interne.

Dans ce paragraphe, nous abordons l'état d'avancement de la recherche en ce qui concerne l'optimisation du transfert de puissance entre différentes composantes utilisées dans les SERSH. Depuis les années 50, les PV sont très utilisés pour produire de l'énergie qui est stockée dans les batteries. Afin de maximiser le transfert de puissance entre les panneaux solaires et les batteries, des algorithmes de poursuite de la puissance maximale disponible aux bornes des PV [4, 5] ont été mis au point. Ces algorithmes sont appliqués sur des convertisseurs de puissance (survolteur - dévolteur) pour moduler la tension aux bornes de la charge en fonction des caractéristiques de l'ensoleillement [6]. Même si dans la plupart des cas, ces algorithmes sont performants, il n'en demeure pas moins que l'efficacité globale de tels systèmes est liée au rendement de ces convertisseurs. La maximisation du transfert de puissance dont il a été question dans la problématique concerne les connexions PAC - bus CC ou électrolyseur - bus CC. Dans des cas pareils, l'amélioration de l'efficacité du convertisseur est réalisée en augmentant la fréquence de commutation [7]. Cette solution conduit habituellement à la génération de bruit nuisible au bon fonctionnement des circuits,

en plus d'augmenter l'échauffement des transistors de puissance [7]. Lorsqu'on considère les transistors, ils introduisent deux types de pertes:

- par conduction: lorsqu'un transistor est saturé, il subsiste une résistance entre le drain et la source ($R_{DS,ON}$). Les pertes par conduction sont directement proportionnelles à cette résistance.
- par commutation: ces pertes sont proportionnelles à la fréquence de commutation.

Bien que de nouveaux développements dans la technologie des semi-conducteurs permettent actuellement d'avoir des transistors de puissance avec $R_{DS,ON}$ très faible [9], l'augmentation de la fréquence de commutation entraîne des pertes par commutation. C'est pourquoi en 1994, le groupe de recherche en électronique industrielle de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) a introduit un nouveau prototype de convertisseur permettant de réduire considérablement le taux d'harmoniques sur les réseaux d'alimentation et d'améliorer le rendement [9]. La technique proposée consiste à utiliser des circuits de convertisseurs identiques mais à commutation déphasée pour obtenir la puissance désirée. Cette technique, appelée circuit à commande multiphasée, est utilisée par les deux convertisseurs CC-CC du projet sur les énergies renouvelables.

Les algorithmes de contrôle sont développés à partir de modèles fiables de SERSH. En ce qui concerne l'état d'avancement de la recherche sur les méthodes de contrôle des SERSH, peu d'information est disponible. Ceci provient de la difficulté à décrire de façon dynamique l'évolution d'un système à énergie renouvelable compte tenu de la présence de composantes non-linéaires. Néanmoins des modèles de différentes composantes du SERSH sont présentés dans diverses publications scientifiques [10, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 22]. En

analysant ces modèles, nous avons remarqué que certaines études traitent uniquement de la chaîne de production de l'hydrogène [11, 15, 22], tandis que d'autres [18, 19] modélisent la chaîne de production de l'électricité à travers la PAC. L'un de nos objectifs est de bâtir le modèle complet d'un SERSH à partir des sous-modèles de chaque composante afin d'élaborer des algorithmes de contrôle efficace. Le plus simple et le plus couramment utilisé est basé sur l'état de charge des batteries [3, 10, 11, 14]. En 1999, l'équipe de Vosen [3] a utilisé la capacité d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour contrôler un système à énergie renouvelable avec stockage d'énergie, semblable à celui sur lequel nous faisons notre projet de maîtrise. Dans ce type de contrôle, la capacité d'apprentissage du RNA est mise à profit pour prédire le comportement du système. Il a été démontré que ce genre de contrôle permet de mieux utiliser les composantes les plus coûteuses (PAC et électrolyseur). Un handicap majeur entrave l'exploitation réelle de cette nouvelle technique: l'hypothèse de répétition des conditions climatiques d'une année à l'autre. En effet, pour que la méthode soit efficace, il est nécessaire que les conditions climatiques soient identiques d'une année à l'autre. Ce qui n'est pas réaliste.

1.5 Banc d'essais de l'IRH

Afin de trouver de nouvelles façons d'exploiter les énergies éolienne et solaire, l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) s'est doté d'un banc d'essais dont le schéma fonctionnel et les caractéristiques techniques sont présentées respectivement à la Fig. 1.2 et sur le tableau 1.2. Nous décrivons ci-après, ce banc d'essais sur lequel porte notre projet de maîtrise.

L'énergie produite par l'éolienne et les PV sert principalement à alimenter une charge à travers un onduleur. La charge peut être de type inductif, capacitif ou résistif. Lorsqu'il y a un excédent énergétique, celui-ci est converti en hydrogène via un électrolyseur. Le dévolteur sert à contrôler la puissance envoyée aux cellules de l'électrolyseur. Quand la charge manque d'énergie, l'hydrogène, préalablement produit et stocké, est utilisé pour produire du courant à l'aide d'une pile à combustible (PAC). Cette pile est contrôlée via un surveleur. Le processus se déroule de façon à ce qu'il ait le moins possible de fluctuations de tension à l'entrée de la charge. Les batteries sont utilisées pour stabiliser le système et servir de "réservoir tampon d'énergie". Les demandes ponctuelles de fortes puissances sont absorbées par ces batteries. Elles constituent l'élément principal du bus CC.

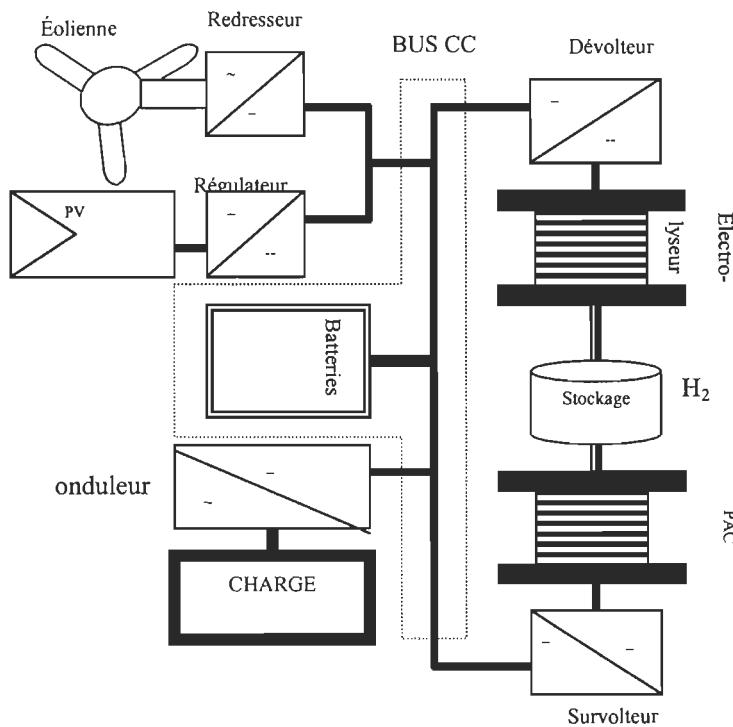


Fig. 1.2: Schéma du banc d'essais de l'IRH sur les énergies renouvelables

Tableau 1.2: Spécifications techniques du banc d'essais

| Composant | Type | Puissance (kW) | Tension (V) |
|-------------------------|------------------|----------------|-------------|
| PV | | 1 | 48 |
| Éolienne et Régulateur | | 10 | 48 |
| Électrolyseur | Alcalin | 5 | 26-48 |
| Dévolteur | MLI multiphasé | 5 | 26-48 |
| PAC | | 5 | 24 |
| Survolteur | MLI multiphasé | 5 | 24/48 |
| Onduleur | - | 5 | 110 VCA |
| Charge | | 0-5 | 110 VCC |
| Capacité (kWh) | | | |
| Batteries | Plomb - acide | 10.5-55 | 48 |
| Stockage H ₂ | (basse pression) | 125 | - |

1.6 Objectifs de la recherche

Le présent travail de recherche a pour objectif principal l'élaboration d'une stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène. La stratégie de contrôle développée est appliquée au banc d'essais de l'IRH. Pour atteindre cet objectif, les sous objectifs suivants sont définis:

- l'analyse et la modélisation de la commande multiphasée du survolteur de tension (entre la pile à combustible et le bus CC). Cette étude permet de démontrer les avantages d'une telle architecture par rapport aux architectures conventionnelles;
- le développement d'un modèle du banc d'essais de l'IRH sur les SERSH;
- la conception d'une stratégie de commande permettant de gérer l'offre et la demande d'énergie;
- le test et la validation de la stratégie de commande.

1.7 Méthodologie utilisée

Le domaine de recherche sur les énergies renouvelables est très récent. Une méthodologie axée sur les centres d'intérêts des sous-objectifs énoncés dans la précédente section est utilisée. Pour atteindre le premier sous-objectif, nous étudions dans un premier temps l'architecture d'un survolteur conventionnel et la description d'une architecture de convertisseur basée sur la commande multiphasée. Dans un second temps, une étude comparative visant à démontrer les avantages de la commande multiphasée est faite. Le logiciel Matlab sert de plate-forme de simulation. Des mesures réelles de courant et de tension sont effectuées sur le survolteur du banc d'essais afin valider l'étude théorique.

Pour rencontrer le deuxième sous-objectif, nous étudions les modèles des différentes composantes du SERSH qui sont déjà présentés dans la littérature. Ces modèles, après études, sont adaptés ou modifiés en fonctions des spécifications du banc d'essais de l'IRH. Pour chacun des modèles développés, une validation expérimentale est effectuée.

Les modèles développés sont mis ensemble pour former le modèle complet du SERSH. À partir de ce dernier, nous faisons une étude théorique afin de déterminer les algorithmes de contrôle potentiellement intéressants pour le SERSH. À la fin de cette étude, trois types de contrôle sont retenus et simulés avec la plate forme de Matlab. Par la suite nous effectuons une analyse comparative afin de déterminer les forces et les faiblesses de chaque algorithme testé.

Pour atteindre le dernier sous objectif, l'un de ces algorithmes est implanté sur le banc d'essais avec l'environnement de Bridgeview. Les mesures réelles effectuées sont comparées à la simulation.

CHAPITRE II

TRANSFERT OPTIMAL DE PUISSANCE ENTRE LA PILE ET LE BUS CC

2.1 Introduction

Après avoir énoncé la problématique, défini les objectifs et exposé la méthodologie adoptée dans ce projet, nous nous intéressons au premier problème posé dans le chapitre précédent. Ce problème concerne le transfert de puissance entre la pile à combustible et le bus CC. La tension nominale du bus CC est de 48V alors que la tension de sortie de la pile varie entre 24 et 30V. Il n'est pas possible de les connecter directement. D'où la nécessité d'employer une interface de puissance: le survoltEUR.

Celui qui a été conçu et implanté sur le banc d'essais de l'IRH est bâti avec la technique de la commande multiphasée [9]. Dans ce chapitre, nous démontrons les avantages de cette technologie par rapport aux convertisseurs classiques. Pour ce faire, nous débutons avec la description de la commande multiphasée et le fonctionnement de l'architecture de survoltEUR classique. Nous présentons dans un deuxième temps le modèle de la commande multiphasée du survoltEUR en régime permanent. Dans un troisième temps, une étude comparative entre les deux types d'architectures est effectuée. Cette dernière tente de démontrer que la commande multiphasée, en plus d'augmenter le rendement des convertisseurs, permet une réduction appréciable du contenu harmonique des signaux de courant.

2.2 Analyse d'un circuit à commande multiphasée : cas du survolteur

2.2.1 Commande multiphasée

Les hacheurs (survolteur - dévolteur) sont construits autour des éléments de commutation de puissance (transistor MOSFET par exemple). Les fréquences auxquelles ces éléments sont commutés, entraînent beaucoup d'harmoniques sur les réseaux électriques [7, 9]. Le taux d'harmoniques est directement lié aux niveaux de puissance en jeu. Afin de réduire ce taux, la technique de commande multiphasée a été proposée [9]. Elle consiste à utiliser plusieurs cellules de base (Fig. 2.2) pour obtenir la puissance moyenne désirée. La Fig. 2.3 est une représentation d'un survolteur à commande multiphasée comportant 3 cellules. Dans ce type de montage, les transistors utilisés sont commutés (à la même fréquence) de façon à produire, à l'intérieur d'une période de fonctionnement T , le courant moyen désiré avec une certaine réduction du taux d'ondulation. En considérant un circuit à commande multiphasée à N cellules numérotées de 1 à N , le délai entre les temps de début de commutation (passage de l'état bloqué à l'état saturé) de deux cellules consécutives est de T/N . Nous y reviendrons plus en détail dans les prochaines sections.

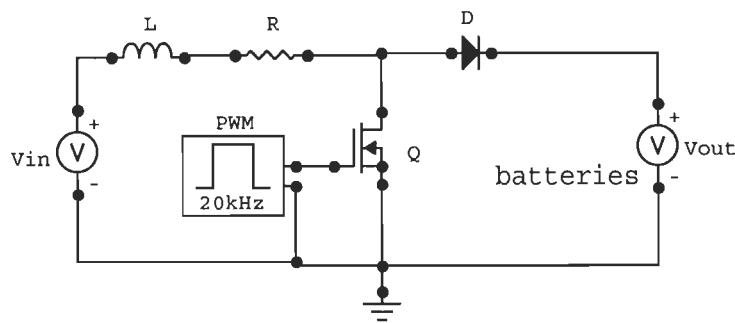


Fig. 2.1 : Schéma de puissance d'un survolteur de tension avec une cellule.

- V_{in} : tension primaire (à l'entrée du survolteur);
 V_{out} : tension secondaire (sortie connectée sur les batteries);
 L : inductance; sa résistance interne est R ;
 D : diode;
 Q : transistor de commutation (interrupteur statique);

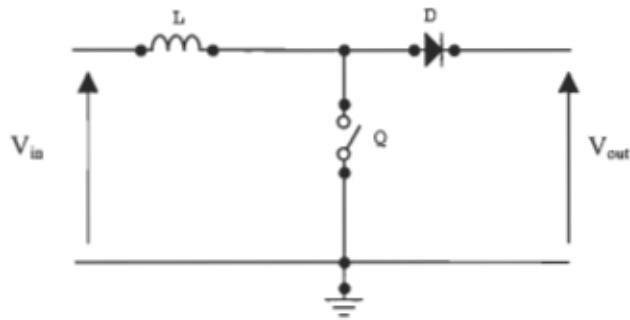


Fig. 2.2 : Schéma d'une cellule de base.

Tout au long de notre démarche, nous utiliserons l'approximation de la figure 2.2 pour désigner une cellule du circuit de puissance. La résistance interne de l'inductance est supposée R . La résistance drain-source du commutateur Q , lorsqu'il est fermé, est supposée négligeable. La résistance interne de la diode D est nulle (dans le sens passant) et son temps de recouvrement arrière est négligeable devant la période de commutation. D'autres considérations seront évoquées dans la section concernant la modélisation d'une cellule.

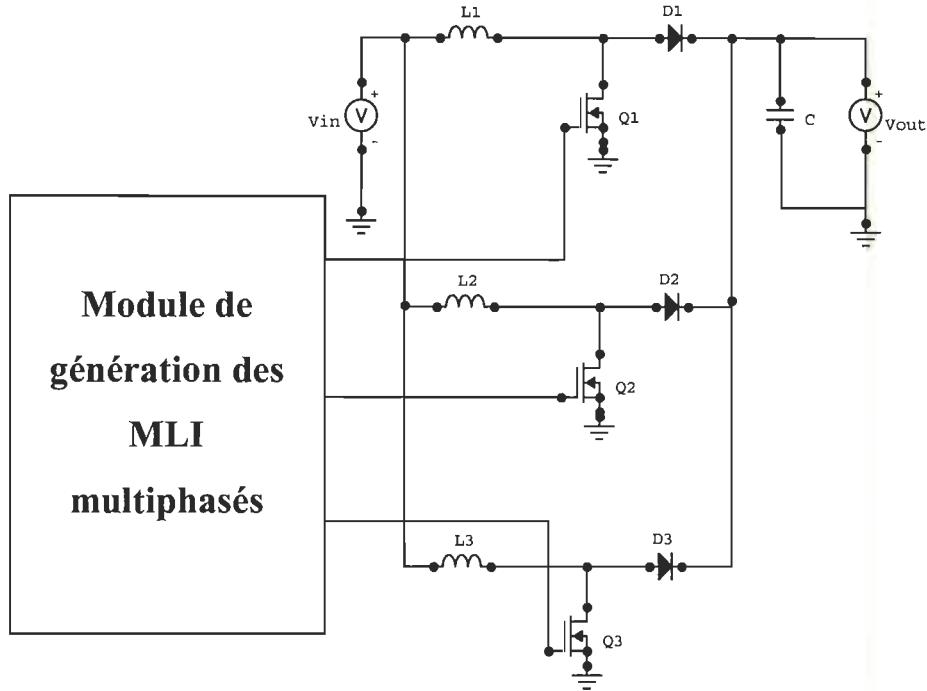


Fig. 2.3 : Schéma d'un survolteur de tension avec 3 cellules.

2.2.2 Modèle en régime permanent d'une cellule de courant.

Le circuit de la Fig. 2.2 comporte un élément non-linéaire (l'interrupteur statique Q).

L'étude du modèle est faite en considérant deux séquences dans le fonctionnement du circuit :

- séquence 1 : interrupteur Q fermé;
- séquence 2 : interrupteur Q ouvert.

En observant le chronogramme du signal de commande de la première cellule, nous définissons T_0 , T_1 , T_2 et T de la façon suivante:

T_0 : temps indiquant le début de la charge de l'inductance;

T_1 : temps indiquant la fin de la charge et le début de décharge de l'inductance;

T_2 : temps de fin de décharge de l'inductance (on suppose que $T_2 < T$);

T : période de commutation.

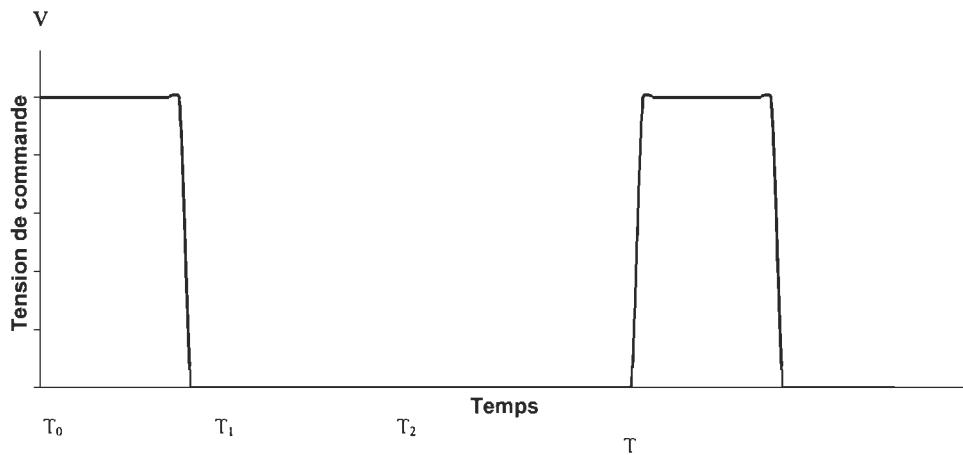


Fig. 2.4 : Signal de commande de la première cellule

Afin d'analyser le fonctionnement en régime permanent d'un survoltageur classique, nous posons les hypothèses énumérées à la sous-section (a) de la présente section.

a- Hypothèses de travail

$$1- \text{ le rapport cyclique } \alpha \text{ est inférieur à } 50\%; \quad \alpha = \frac{T_1 - T_0}{T}$$

- 2- le courant au début de chaque cycle est nul, l'inductance ayant eu le temps nécessaire pour se décharger;

- 3- l'interrupteur Q est fermé de T_0 à T_1 puis ouvert le reste du temps;
- 4- la tension de la batterie est supposée constante;
- 5- la tension d'entrée est supposée constante;
- 6- la période de commutation est T.

b- Modélisation en régime permanent

Soient $i_c(t)$ et $i_d(t)$, les courants instantanés dans l'inductance respectivement pour les phases de charge et de décharge.

$$T_0 \leq t \leq T_1 :$$

$$V_{in} = L \frac{di_c(t)}{dt} + Ri_c(t)$$

$i_c(T_0) = 0$ d'après l'hypothèse 2. L'expression du courant est:

$$i_c(t) = \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-T_0)} \right) \quad (2.1)$$

$$T_1 \leq t \leq T_2 :$$

$$V_{in} - V_{out} = L \frac{di_d(t)}{dt} + Ri_d(t)$$

$$i_d(t) = \frac{V_{in} - V_{out}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-T_1)} \right) + \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}\alpha T} \right) \quad (2.2)$$

Le temps T_2 (paramètre important) est évalué comme suit :

$$i(T_2) = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_{in} - V_{out}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(T_2 - T_1)} \right) + \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}\alpha T} \right) = 0 \quad (2.3)$$

De l'équation 2.3, l'expression de T_2 est obtenue:

$$T_2 = -\frac{L}{R} \ln \left[1 - \frac{V_{in}}{V_{out} - V_{in}} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}\alpha T} \right) \right] + T_0 + \alpha T \quad (2.4)$$

2.2.3 Description mathématique d'un survoltEUR à commande multiphasée

Les équations 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 permettent de modéliser le courant de l'inductance dans une cellule. Pour modéliser un circuit avec plusieurs cellules à commande multiphasée, ces quatre équations sont généralisées.

D'après la Fig. 2.3, le courant total au primaire $I_{in}(t)$ est la somme de tous les courants d'inductances. La connaissance de l'expression de chaque courant contribue à établir l'équation de $I_{in}(t)$. Avant d'aborder la généralisation et la modélisation, certaines considérations sont présentées:

- chaque cellule est numérotée. Les numéros vont de 1 à N; N étant le nombre total de cellules dans l'architecture du circuit et n désigne le numéro d'une cellule. La numérotation suit l'ordre chronologique de commutation des interrupteurs statiques. Ainsi, la cellule n commute (passe de l'état bloqué à l'état saturé) avant la cellule n+1.

- toutes les cellules sont commandées avec le même rapport cyclique α ;
- le délai entre les temps d'activation (temps séparant la commutation de deux cellules consécutives) est donné par la relation :

$$T_{0,n} - T_{0,n-1} = \frac{T}{N}, \quad (2.5a)$$

où $T_{0,n}$ est le début de commutation de la cellule n et $T_{0,n-1}$ est le début de commutation de la cellule $(n-1)$.

Le rapport cyclique est représenté par :

$$\alpha = \frac{T_{1,n} - T_{0,n}}{T}, \quad (2.5b)$$

où $T_{1,n}$ est le temps de fin de charge de l'inductance.

La Fig. 2.5 présente un exemple de chronogramme d'un système comportant 5 cellules de courant. Une cellule n est activée à $T_{0,n}$. De $T_{0,n}$ à $T_{1,n}$, l'inductance de cette cellule conduit; à partir de $T_{1,n}$, l'interrupteur électronique s'ouvre et la bobine commence à se décharger. Le rapport cyclique α est dans cet exemple de 1/4 (25%). Le déphasage entre les signaux de commande est de $T/5$.

Considérons le cas général d'un circuit à N cellules de courant (cellules de base). Les courants d'inductance de la cellule n seront notés $i_{c,n}(t)$ et $i_{d,n}(t)$ respectivement pour les

phases de charge et de décharge. Le temps où le courant $i_{d,n}(t)$ s'annule lors de la décharge sera noté $T_{2,n}$; Les équations 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 deviennent :

$$0 \leq t \leq (n-1)\frac{T}{N} : \quad i_{c,n}(t) = 0$$

$$(n-1)\frac{T}{N} \leq t \leq (n-1)\frac{T}{N} + \alpha T : \quad i_{c,n}(t) = \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \left(t - (n-1)\frac{T}{N} \right)} \right) \quad (2.6)$$

$$(n-1)\frac{T}{N} + \alpha T \leq t \leq T_{2,n} : \quad i_{d,n}(t) = \frac{V_{in} - V_{out}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \left(t - (n-1)\frac{T}{N} - \alpha T \right)} \right) + \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} (\alpha T)} \right) \quad (2.7)$$

$$T_{2,n} = -\frac{L}{R} \ln \left[1 - \frac{V_{in}}{V_{out} - V_{in}} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \left(T_{1,n} - (n-1)\frac{T}{N} \right)} \right) \right] + (n-1)\frac{T}{N} + \alpha T \quad (2.8)$$

Le courant est nul ailleurs.

Si $T_{1,n}$ ou $T_{2,n}$ est supérieure à T , les propriétés de translation des fonctions sont appliquées [12].

Le courant total au primaire $I_{in}(t)$ est déterminé par la relation:

$$I_{in}(t) = \sum_{n=1}^N (i_{c,n}(t) + i_{d,n}(t)) \quad (2.9)$$

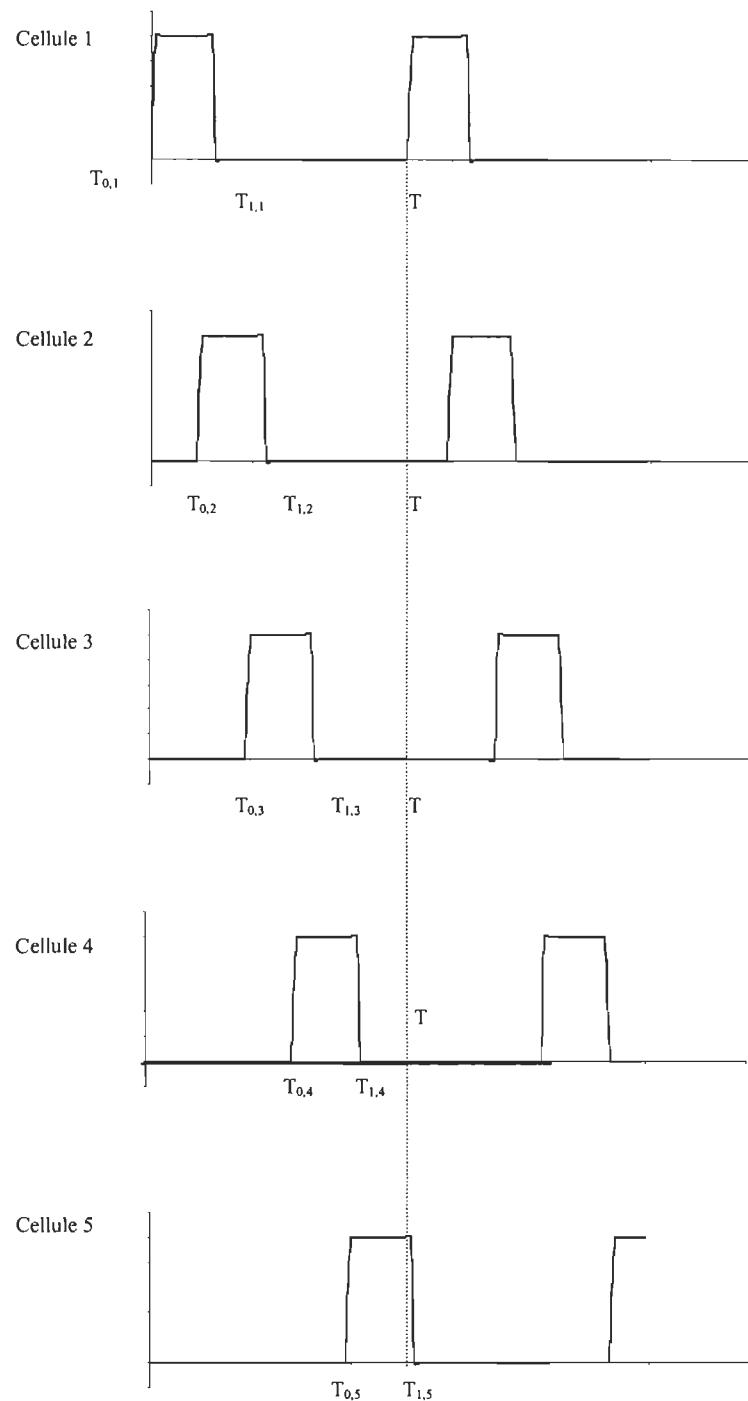


Fig. 2.5: Exemple de chronogramme des signaux de commande pour un système à 5 cellules, avec un rapport cyclique de 25%.

Le courant total au secondaire (courant allant dans la batterie) est constitué par les courants des inductances des cellules pendant la phase de décharge.

$$I_{\text{out}}(t) = \sum_{n=1}^N i_{d,n}(t) \quad (2.10)$$

2.3 Exemple d'un survoltEUR à 8 cellules à commande multiphasée

Un exemple de survoltEUR à 8 cellules comme celui implanté sur le banc d'essais de l'IRH est présenté dans ce paragraphe. Les spécifications du circuit sont:

- Tension primaire : 25V;
- Tension secondaire : 50V (batteries);
- Rapport cyclique α : 0.27;
- Nombre de cellules de courant : 8;
- Fréquence de commutation : 20 kHz;
- Valeur de l'inductance d'une cellule : 10 μ H;
- Résistance interne de l'inductance : $10^{-6} \Omega$

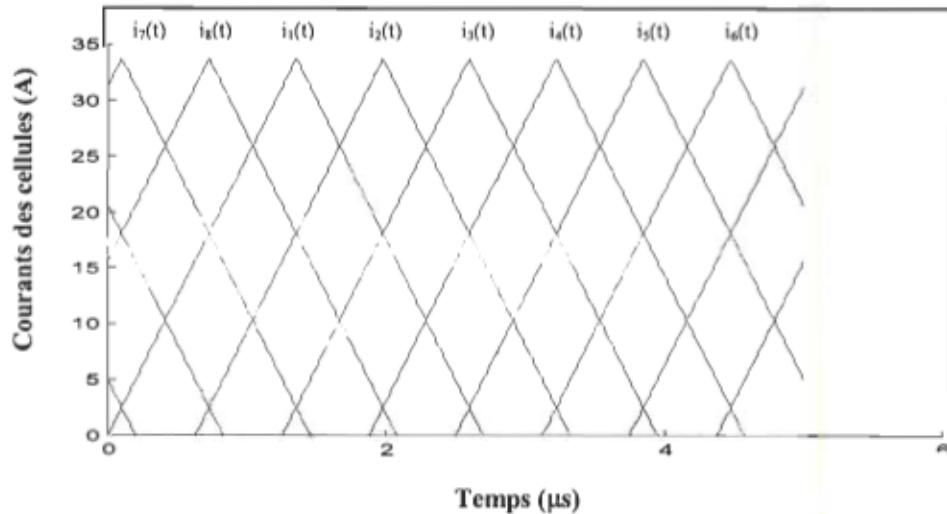


Fig. 2.6 : Courants au primaire pour chacune des 8 cellules

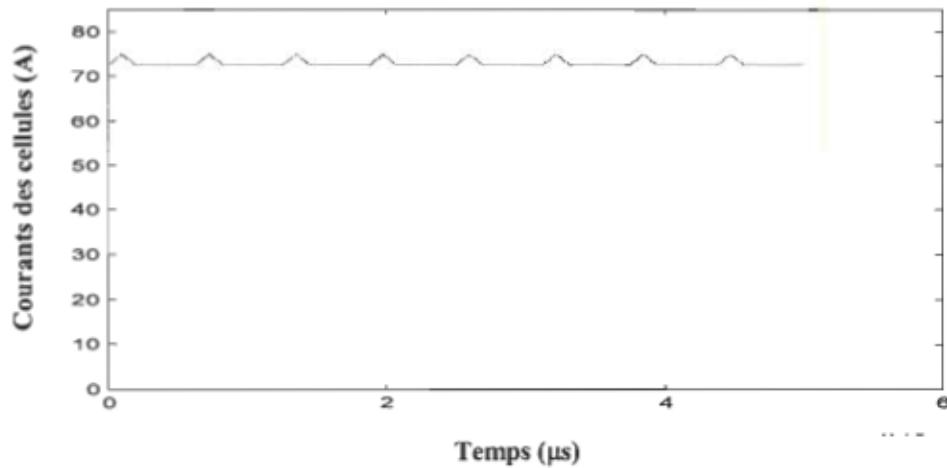


Fig. 2.7 : Courant total au primaire ($I_{in}(t)$).

La Fig. 2.7 représente le courant $I_{in}(t)$, sans filtre additionnel. Le taux d'ondulation du courant est très réduit comparativement à un montage classique (montage avec une cellule). L'ajout d'un filtre de petite dimension suffit à rendre le courant quasiment constant (sans ondulation). Les courants dans les diodes (courants allant directement à la charge) sont illustrés sur la Fig. 2.8.

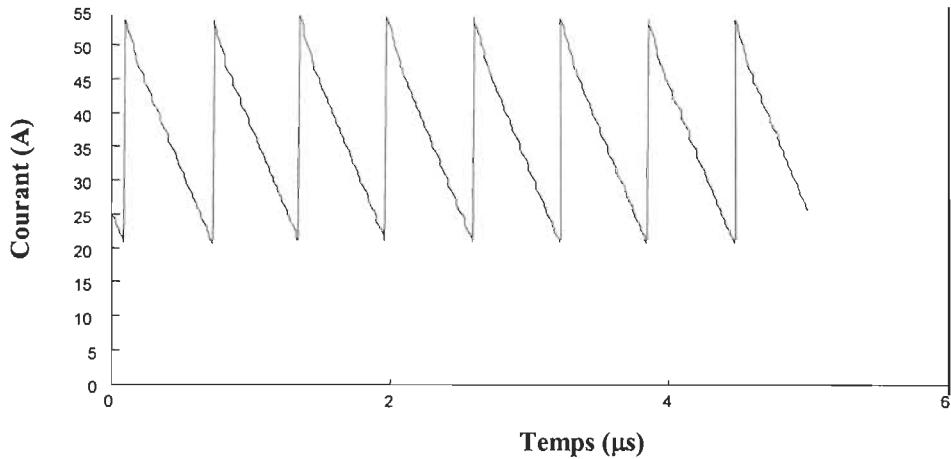


Fig. 2.8 : Courant total dans la charge.

Le courant total au secondaire présente une amplitude d'ondulation plus faible que celle d'un montage conventionnel. La fréquence du signal sur la Fig. 2.8 est 8 fois la fréquence de commutation. Ceci est un avantage, car un simple filtre de valeurs réduites, lisserait convenablement le courant. Pour mieux quantifier l'impact de la commande multiphasée sur le contenu harmonique du courant du survolteur, une étude dans le domaine des fréquences est présentée à la section 2.5.

2.4 Validation des modèles mathématiques des courants du survolteur du banc d'essais.

Pour valider les équations décrivant le fonctionnement des survoltateurs, nous avons procédé aux mesures des courants au primaire et au secondaire du doubleur de tension installé sur le

bac d'essais de l'IRH. Ce survoltEUR dont la sortie est directement connectée sur le bus CC a été réglé pour fournir un courant moyen de 9A en sortie.

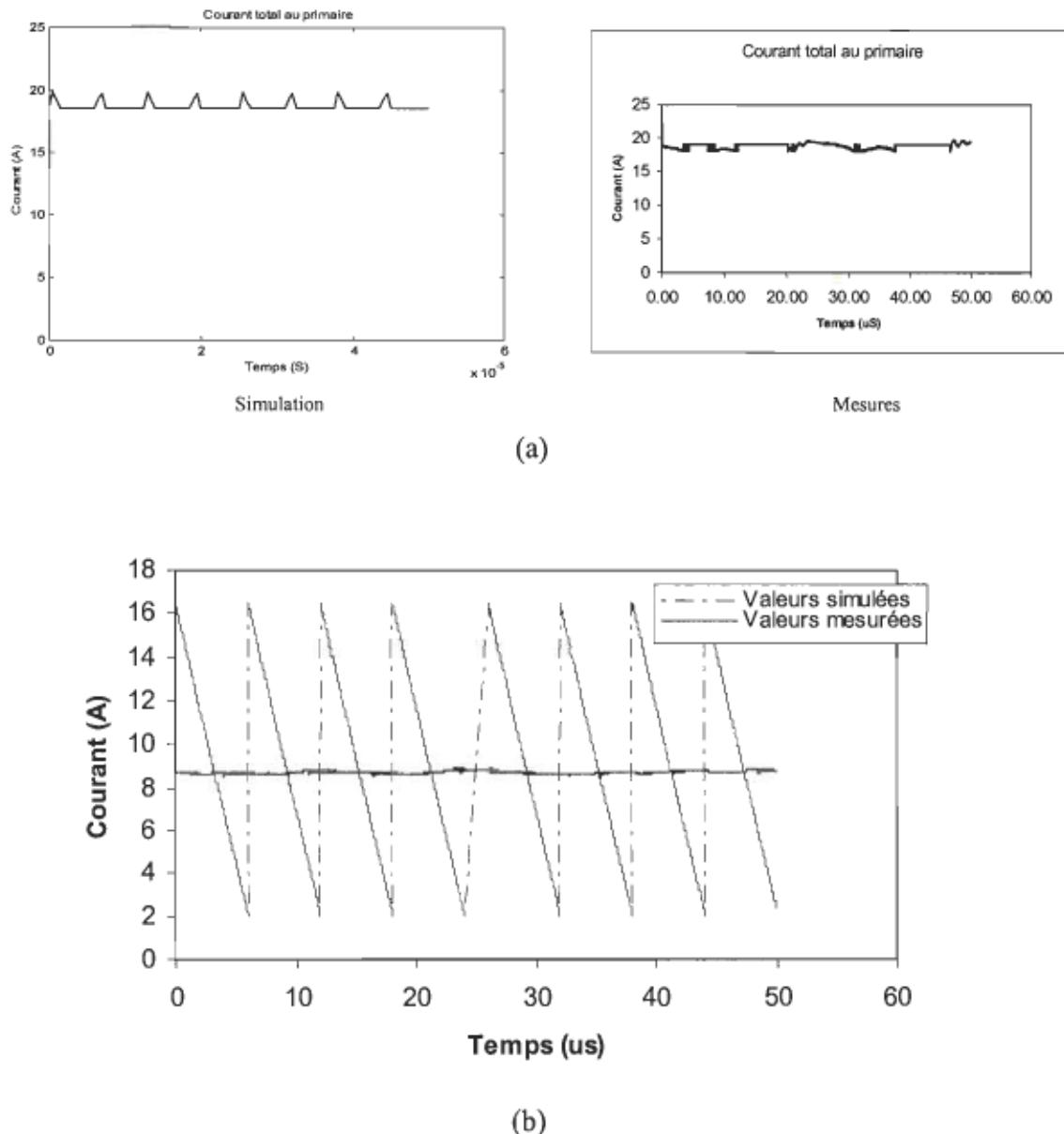


Fig. 2.9 : Comparaison des mesures et des simulations. (a): Courants au primaire du survoltEUR. (b): Courants au secondaire du survoltEUR

L'analyse de la Fig. 2.9 indique que les valeurs moyennes de courants (à l'entrée ou à la sortie) sont presque les mêmes en simulation ou en pratique. Ceci est un indice de la fiabilité des modèles descriptifs présentés. Par contre, le taux d'ondulation des courants est

presque nul en pratique en raison du filtrage appliqué sur le survoltEUR du banc d'essais.

Cet effet de filtrage n'a pas été modélisé.

Le rendement mesuré est de 95%. A forte puissance, le rendement atteint 99%, ce qui est excellent pour le projet. Au même moment, le taux d'ondulation du courant ou de la tension est presque nul. Ceci démontre que la nouvelle technique améliore la qualité de l'onde de courant tout en assurant un rendement supérieur à celui d'un survoltEUR classique.

2.5 Analyse du contenu harmonique des signaux de courant

Dans la première partie, tous les courants présents dans le convertisseur CC-CC ont été décrits de façon formelle. Nous tentons d'évaluer le taux de réduction du contenu harmonique du courant, principalement celui du primaire du survoltEUR en utilisant le théorème de Fourier. Si $f(t)$ est une fonction du temps alors la décomposition en série de Fourier donne:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.11)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) dt; \quad n \geq 0 \quad (2.12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) dt; \quad n \geq 0 \quad (2.13)$$

Pour analyser les courants totaux au primaire et dans la charge, nous employons la transformée discrète en série de Fourier. La fréquence de base pour l'analyse harmonique est la fréquence de commutation des interrupteurs statiques. Les signaux harmoniques sont des signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence de base. Ils sont donc caractérisés par leurs fréquences et leurs amplitudes. Le taux d'harmoniques TH [9] contenus dans le signal est défini par:

$$TH = \frac{1}{C_0} \left(\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} C_n^2} \right) \quad (2.14)$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2.15)$$

$$C_0 = \frac{a_0}{2} \quad (2.16)$$

Le TH donne une idée sur la proportion d'énergie contenue dans les signaux harmoniques (par rapport à l'énergie contenue dans un signal continu). Une valeur de TH qui tend vers 0 indique que le signal analysé est proche d'un signal continu.

L'analyse comparative est effectuée entre le TH d'un survoltor avec une cellule (représente l'architecture conventionnelle) et ceux des survoltors à commande multiphasée. Les deux types de circuits sont supposés produire le même courant moyen en sortie. Le taux de réduction des harmoniques (TRH) par rapport à une architecture conventionnelle équivalente est défini par:

$$TRH\% = 1 - \frac{TH}{TH_{ref}}, \quad (2.17)$$

où TH est le taux d'harmoniques du circuit multiphasé et TH_{ref} représente le taux d'harmonique d'un survolteur conventionnel produisant le même courant moyen.

L'un des objectifs de ce projet est de démontrer les avantages de la commande multiphasée. L'étude comparative qui suit montre l'évolution du TRH en fonction du nombre de cellules implantées dans l'architecture du circuit. Le nombre de cellules varie de 2 à 30. Les rapports cycliques r de toutes les configurations varient de 0.01 à 0.49 par pas de 0.04. Les autres paramètres de simulation sont :

- Résistance de l'inductance : 1 mΩ
- Inductance de base (cette valeur change d'une configuration à l'autre afin de respecter la condition concernant le courant moyen) : 1.25 μH
- Fréquence de commutation : 20 kHz
- V_{in} (tension au primaire) : 25 V
- V_{out} (tension au secondaire) : 50 V

Lorsque nous observons la Fig. 2.10, nous remarquons que:

- pour un rapport cyclique fixe, le TRH augmente avec le nombre de cellules (exemple : 1^{ère} courbe de la Fig. 2.10); mais si le survolteur à commande multiphasée fonctionne avec une valeur de r supérieure à 0.35, le TRH est proche de celui du courant continu pour un nombre de cellules égal à 5. Pour un même nombre de cellules, le TRH augmente lorsque r augmente. Ceci est un résultat très intéressant car, au lieu d'avoir un grand nombre de cellules (ce qui augmenterait la complexité du circuit), il suffirait de faire fonctionner le circuit multiphasé aux alentours de r=0.5.
- Ces remarques sont aussi valables pour les signaux de courant dans la charge.

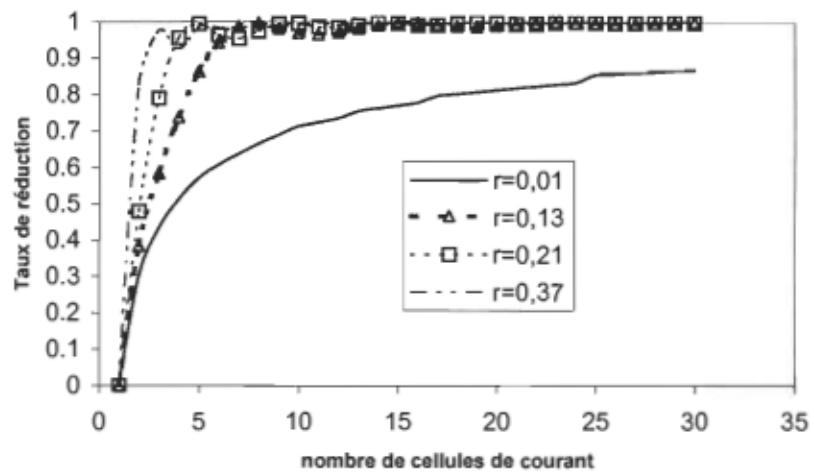


Fig. 2.10 : Évolution du TRH au primaire des survoltateurs à commande multiphasée

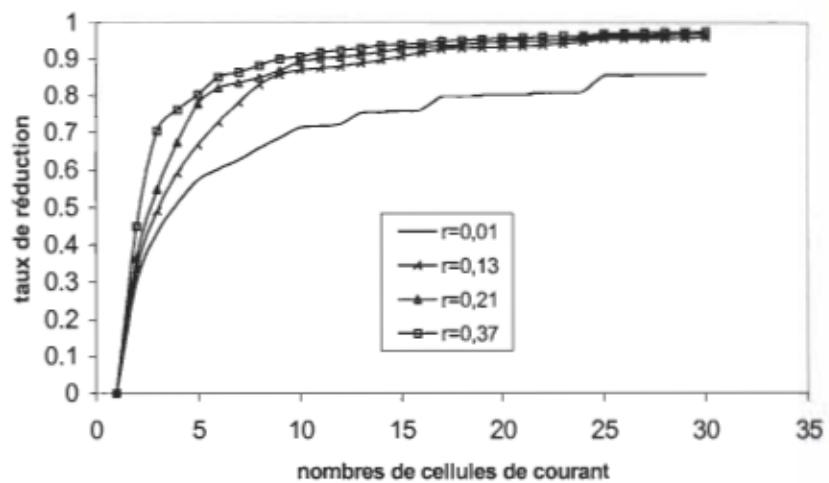


Fig. 2.11 : Graphique de taux de réduction du contenu fréquentiel du courant en sortie.

La comparaison entre les Figs. 2.10 et 2.11 montrent que le TH au primaire du surveleur est plus faible que celui du secondaire. Ceci est dû au fait que les courants dans les diodes ne sont présents que pendant le temps où les transistors de puissance sont ouverts. Toutes les configurations étudiées ne tiennent pas compte de l'effet d'un filtrage supplémentaire.

2.6 Avantages de la technique de commande multiphasée

Comme nous venons de le montrer, le principal avantage de la technique multiphasée réside dans son aptitude à réduire considérablement le taux d'ondulation sur les signaux de courant. Ceci a pour conséquence directe la réduction du contenu harmonique des signaux. La mesure directe du rendement prouve que le taux de transfert de puissance est optimisé. Ceci donne une raison particulière pour utiliser cette technologie dans l'implantation des interfaces de puissance dans les applications à énergie renouvelable où l'optimisation de la gestion d'énergie est un facteur important.

La génération des MLI (modulation de largeurs d'impulsions) se faisant de façon numérique, il est facile d'implanter un algorithme de régulation de courant. Le courant peut, comme nous l'avons mentionné au paragraphe 2.4.1, être considéré comme continu, ce qui simplifie énormément la conception des algorithmes de commandes des surveleurs.

CHAPITRE III

MODÉLISATION DYNAMIQUE DU BANC D'ESSAIS DE L'IRH

Dans le précédent chapitre, nous avons démontré que la technique de commande multiphasée des interfaces de puissance (survolteur ou dévolteur) est une solution efficace au problème d'optimisation de transfert de puissance entre les différentes composantes du SERSH. Le but ultime de notre projet de recherche étant d'élaborer une méthode efficace de contrôle du SERSH, nous nous penchons dans ce chapitre sur l'aspect concernant la modélisation dynamique de ce système. Cet aspect est important car l'efficacité globale de l'algorithme de contrôle dépend de la capacité du modèle à suivre l'évolution du SERSH dans le temps. À partir du modèle dynamique, des algorithmes de contrôle sont expérimentés dans le chapitre 4.

3.1 État de la recherche sur la modélisation des SERSH

Comme nous l'avions mentionné dans le premier chapitre, l'application des systèmes autonomes d'énergie renouvelable (vent, soleil) dans les régions éloignées requiert l'utilisation d'un dispositif de stockage d'énergie compte tenu du caractère intermittent de ces sources d'énergie. Plusieurs travaux ont démontré l'efficacité de systèmes utilisant les batteries pour le stockage à court terme et l'hydrogène pour le stockage à long terme (SERSH) [1, 14, 17]. Dans de tels systèmes, l'hydrogène est produit par un électrolyseur alimenté par l'excédent d'énergie en provenance des sources primaires [3] notamment

l'éolienne et les panneaux solaires. Lorsque cette énergie est insuffisante pour alimenter la charge du SERSH, l'hydrogène préalablement stocké, est utilisé par une pile à combustible (PAC) pour produire de l'électricité. La conception, la gestion et l'optimisation de tels systèmes requièrent l'élaboration d'un modèle réaliste. Peu de travaux traitent de la modélisation de systèmes autonomes de production d'énergie. Le présent travail propose un modèle permettant de décrire le comportement dynamique des SERSH. Ce modèle intègre les sous-modèles de l'électrolyseur, de la pile à combustible, des batteries, des interfaces de puissance et du stockage d'hydrogène. Les problèmes d'interdépendance (la consommation de l'hydrogène est liée à la quantité de l'hydrogène produite) dans le fonctionnement des équipements est prise en compte. Une attention particulière a été accordée au comportement en régime transitoire des composantes majeures du système, ce qui nous a permis d'énoncer des hypothèses simples et réalistes pour décrire le comportement à court et à long terme du SERSH. La plupart des modèles sont établis en utilisant les courbes de polarisation (courant-tension-température). La validation des modèles est faite à partir d'un exemple d'opération du banc d'essai sur les SERSH de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène qui a été décrit en détails ailleurs [4, 6] et dont l'architecture et les spécifications techniques sont respectivement présentées dans la Fig. 1.2 et le tableau 1.2. Partant des données de consommation réelle d'une résidence familiale et considérant la production typique de l'éolienne et des panneaux solaires dans une région de vent modéré, un scénario a été bâtit et utilisé pour prédire le comportement du SERSH.

3.2 Modélisation dynamique des composants

De façon générale, un SERSH est conçu pour une tension nominale du bus à courant continu (bus CC) qui, dans notre cas, est de 48V. Toutefois, la tension réelle sur le bus varie suivant l'état du système. Ainsi, lorsque les batteries (élément de stockage temporaire) se chargent, les sources primaires qui engendrent cette situation tendent à imposer leurs niveaux de tension. En présence de grandes bourrasques de vents, la tension du bus peut passer de 48V à 56V très rapidement. Par contre les batteries imposent la tension du bus lorsque la charge absorbe de l'énergie (phase décharge). Cette variation de tension introduit un problème de contrôle majeur pour le bus CC. En effet, la tension ne peut en aucun cas être considérée comme grandeur témoin de l'évolution de l'état du système (voir chapitre I). L'énergie dans les batteries sera donc utilisée comme variable de contrôle du SERSH. Les modèles pour la plupart seront décrits comme étant des fonctions du courant, de la tension, de la température et du temps.

Les signaux d'entrée du modèle complet du SERSH sont les courants I_{WT} , I_{PV} , I_L qui représentent respectivement les courants à la sortie du module redresseur de tension de l'éolienne, à la sortie du bloc régulateur de tension des PV et à l'entrée de l'onduleur de puissance (Fig. 1.2). Compte tenu de leurs natures intermittentes, les signaux échantillonnés seront utilisés pour les représenter. Cette façon de représenter les signaux d'entrée du modèle complet du SERSH offre la possibilité d'intégrer n'importe quel profil de

production et de consommation d'énergie. Notons que I_s représente le courant total produit par les sources primaires.

La modélisation des composants suit le cheminement normal du flux énergétique. Ainsi, seront présentés dans l'ordre, les modèles des batteries, du dévolteur de puissance, de l'électrolyseur, du surveleur de puissance, de la PAC et du sous-système de stockage de H₂.

3.2.1 Modèle des batteries

Les batteries constituent le principal élément du bus CC et jouent le rôle d'élément tampon, pour les pics de courant et pour le stockage d'énergie à court terme. Il existe dans la littérature plusieurs modèles décrivant le comportement de la batterie et tout particulièrement dans le domaine des véhicules électriques [16, 13, 20]. Dans le cas des SERSH, les modèles décrits dans la référence [11] comportent beaucoup de paramètres expérimentaux qui ne sont pas toujours faciles à estimer. Il y a parmi ces paramètres, ceux qui permettent de tenir compte de l'effet de surcharge de la batterie. Pour un SERSH convenablement contrôlé, cet effet ne peut pas survenir. D'où l'intérêt de ne pas en tenir compte dans l'élaboration du modèle. Par contre la résistance interne de la batterie, l'effet de la résistance de polarisation et les pertes d'énergie associées à l'autodécharge de la batterie sont les paramètres les plus pertinents qui influencent le comportement de la batterie. Les pertes par autodécharge de la batterie sont plus difficiles à estimer. En effet, elles sont influencées par plusieurs facteurs [16] (la température d'opération, le nombre de

cycles d'opération, les matériaux et la technologie utilisée dans la fabrication). Ces pertes sont évaluées [27] à 5% de la charge des batteries par mois à 25°C (pour les batteries au plomb et à l'acide sulfurique, utilisées dans notre cas.).

La tension aux bornes de la batterie (ou du banc de batteries) peut être exprimée par [20]:

$$U_B(t) = (1 + \beta t)U_{B,0} + R_i(t)I(t) + K_i Q_R(t) \quad (3.1)$$

où $Q_R(t)$ représente le taux de la charge accumulée par rapport à la charge totale de la batterie, lorsqu'elle complètement chargée. β est le taux d'autodécharge (1/s). $U_{B,0}$ représente la tension de la batterie (en circuit ouvert) à $t=0$, $R_i(t)$ est la résistance interne et K_i (V) est le coefficient de polarisation. Lorsque le courant $I(t)>0$ alors la batterie est en train de se charger; quand $I(t)<0$ alors la batterie est en train de se décharger.

L'énergie $W(t)$ de la batterie est exprimée par:

$$W(t) = W_0 + \int_0^t P_{in}(t')dt', \quad (3.2)$$

Où $P_{in}(t) = U_B I(t)$ la puissance aux bornes de la batterie, W_0 est l'énergie initialement stockée dans la batterie. Comme nous le verrons plus tard, l'algorithme de contrôle du SERSH sera basé sur l'évaluation de l'état de charge des batteries (SOC) défini par:

$$SOC(t) = \frac{W(t)}{W_{\max}} \quad (3.3)$$

où W_{\max} est l'énergie maximale (sans surcharge) que la batterie peut emmagasiner.

3.2.3 Dévolteur de puissance: modèle dynamique

Lorsqu'il y a un excédent énergétique dans le SERSH, l'électrolyseur est mis en marche pour produire de l'hydrogène. Afin de contrôler la production de H₂, un dévolteur a été conçu pour asservir le courant des cellules de l'électrolyseur. C'est un abaisseur de tension à courant continu dont le but est, entre autre, de maximiser le transfert de puissance du bus CC vers les cellules de l'électrolyseur. Ce dévolteur utilise la technique multiphasée (voir chapitre II) pour générer les signaux de modulation de largeurs d'impulsions [12]. Son modèle dynamique permet de connaître la tension appliquée aux cellules de l'électrolyseur en fonction du rapport cyclique imposé par le système de contrôle du SESH. Compte tenu de la complexité des équations descriptives (voir chapitre II) du fonctionnement des circuits commutés à commande multiphasée [12] et dans le soucis d'obtenir un modèle très proche de la réalité, la technique numérique d'identification des paramètres est utilisée. Le modèle de base retenu est du type ARMA (Auto Regressive Moving Average). Ce modèle se présente sous forme de rapport entre deux polynômes en z dont les coefficients sont constants [30]. L'éq. 3.4 est un exemple de modèle ARMA dont les coefficients ($A_{Bu,0}$, $A_{Bu,I}$, $B_{Bu,0}$, $B_{Bu,I}$) sont déterminés par la méthode de minimisation de l'erreur de prédiction entre la sortie réelle du système et la sortie estimée par le modèle. Au départ, ces

coefficients sont initialisés de façon aléatoire. À partir de cet instant, la sortie $U_{Bu,Out}$ du système est estimée à l'aide de l'éq. 3.4. L'écart entre la valeur estimée et la valeur mesurée est calculé. Les valeurs des coefficients sont alors mises à jour en fonction de cet écart. Le processus se répète jusqu'à ce que l'écart final soit inférieur à un seuil prédéfini.

Le pas de calcul utilisé est la seconde et la température d'opération du dévolteur est de 25°C. Le processus d'identification (Fig. 3.1), en ce qui concerne le dévolteur, consiste à adapter les coefficients du modèle ARMA afin de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la sortie réelle du dévolteur et son estimation par le modèle. La fonction de transfert du modèle recherchée est représentée par:

$$U_{Bu,Out}(n) = U_B(n) \frac{(B_{Bu,0} + B_{Bu,1}z^{-1})D_{Bu}(n)}{A_{Bu,0} + A_{Bu,1}z^{-1}} \quad (3.4)$$

où $A_{Bu,0}$, $A_{Bu,1}$, $B_{Bu,0}$, $B_{Bu,1}$ sont les paramètres à déterminer. Leurs valeurs, dans notre cas, sont présentées dans le tableau 3.1 à la page 44. U_B est la tension du bus CC, $U_{Bu,Out}$ est la tension moyenne à la sortie du dévolteur (tension appliquée aux cellules de l'électrolyseur) et D_{Bu} représente le rapport cyclique du dévolteur. La tension d'entrée du dévolteur ($U_{Bu,In}$) est égale à la tension du bus CC car le dévolteur y est directement connecté. Le courant d'entrée $I_{Bu,In}$ est calculé à partir du bilan de puissance autour du dévolteur:

$$\eta_{Bu} = \frac{U_{Bu,Out}(n)I_{Bu,Out}(n)}{U_{Bu,In}(n)I_{Bu,Out}(n)} \quad (3.5)$$

où $I_{Bu,Out}$ est le courant absorbé par les cellules de l'électrolyseur. Il est évalué dans la prochaine section concernant l'électrolyseur.

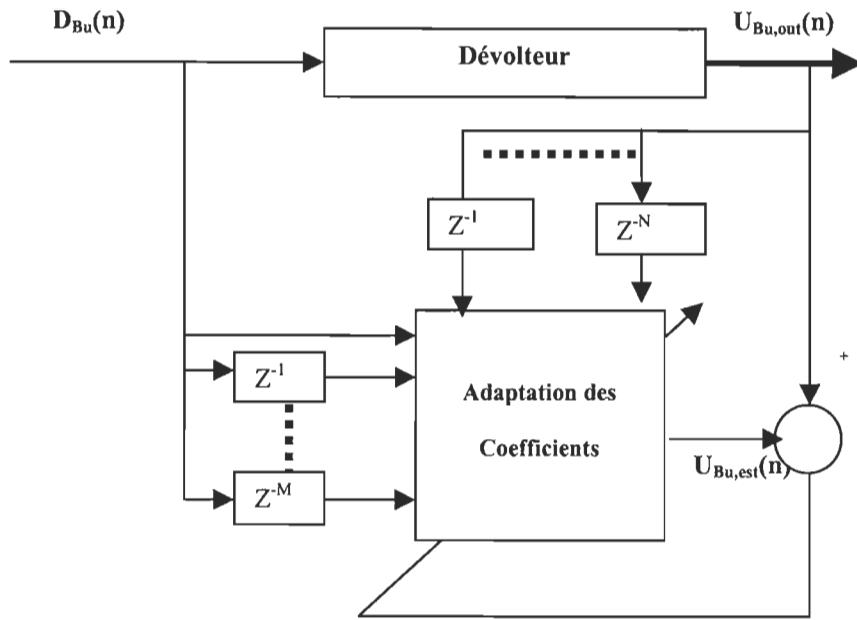


Fig. 3.1: Schéma du processus d'identification de paramètres du dévolteur.

D'un point d'opération à l'autre, les coefficients identifiés changent très légèrement, mais les modèles dans leur ensemble représentent bien le comportement en régime dynamique de l'interface de puissance.

3.2.4 Électrolyseur alcalin

Étant donné que le temps de réaction de l'électrolyseur, suite à une variation de consigne, est très inférieur au pas d'échantillonnage (1 s) utilisé pour le système, le comportement dynamique de l'électrolyseur [14-15] est représenté par:

$$U_{el}(t) = U_{el,0} + C_1 T_{el}(t) + C_2 \ln\left(\frac{I_{el}(t)}{I_{el,0}}\right) + \frac{R_{el}}{T_{el}(t)} I_{el}(t) \quad (3.6)$$

où $U_{el,0}[V]$, $C_1[V \cdot C^1]$, $C_2[V]$, $I_{el,0}[A]$, $R_{el}[\Omega^\circ C^1]$ sont des paramètres déterminés expérimentalement. Leurs valeurs, dans notre cas sont présentées dans le tableau 3.1 pour des températures d'opération allant de 22°C à 52°C. $T_{el}(t)$ est la température d'opération des cellules. Les deux premiers termes de l'éq. (3.6) représentent le potentiel théorique d'une cellule idéale. Le troisième terme correspond au potentiel d'activation tandis que le dernier représente les pertes ohmiques. Ces paramètres varient d'un électrolyseur à l'autre.

Rappelons $U_{Bu,Out}(t)$ et $I_{Bu,Out}(t)$ sont respectivement équivalent à $U_{el}(t)$ et $I_{el}(t)$, compte tenu du fait que la sortie du dévolteur est directement connectée aux cellules de l'électrolyseur.

$I_{Bu,Out}(t)$ est évalué à l'aide de l'éq. 3.6. Le taux $\dot{V}_{el}(t)$ de l'hydrogène produit est donnée par:

$$\dot{V}_{el} = N_{Cell,el} \frac{\eta_{I,el} I_{el}(t)}{C_{H_2}} \quad (3.7)$$

où $\eta_{I,el}$, l'efficacité de l'électrolyseur, dépend de la température des cellules; $N_{Cell,el}$ représente le nombre de cellules et C_{H_2} est un coefficient de conversion qui vaut 2.39 Ah/l d'hydrogène. Pour les électrolyseurs de type alcalin, des études [15, 14] rapportent des efficacités entre 0.6 et 0.75. Une estimation plus rigoureuse peut être obtenue par mesures directes du rendement. L'hydrogène qui est produit par l'électrolyseur est stocké. La modélisation du sous-système de stockage sera présentée à la section 3.2.7.

3.2.5 Survolteur de puissance

La tension de sortie nominale de la PAC est de 24 V alors que le bus CC est conçu pour une tension de 48 V. Une interface de puissance est donc nécessaire pour interconnecter les deux. Afin de maximiser le transfert de puissance entre ces deux éléments, le survolteur, utilisé dans notre cas, est conçu avec la même technique que le dévolteur, en ce qui concerne la génération des signaux de modulation de largeurs d'impulsions. L'efficacité de transfert de puissance mesurée est supérieure à 95%. En utilisant la même méthode de modélisation (section 3.2.3), la relation qui lie le rapport cyclique $D_{Bo}(t)$ au courant d'entrée du survolteur $I_{Bo,In}(t)$ est exprimée à travers:

$$I_{Bo,In}(n) = I_{FC,Max} \frac{(B_{Bo,0} + B_{Bo,I}z^{-1})D_{Bo}(n)}{A_{Bo,0} + A_{Bo,I}z^{-1}} \quad (3.8)$$

où $I_{FC,Max}$ est le courant maximal de la PAC; $A_{Bo,0}$, $A_{Bo,I}$, $B_{Bo,0}$, $B_{Bo,I}$ sont les paramètres à déterminer. Dans notre cas, leurs valeurs sont présentées dans le tableau 3.1 à la page 44.

D_{Bo} , représente le rapport cyclique; $I_{Bo,In}$ est le courant d'entrée du survolteur. Il représente aussi le courant $I_{FC}(t)$ de sortie de la PAC. Le courant $I_{Bo,Out}(t)$ à la sortie du survolteur est évalué par:

$$I_{Bo,Out}(n) = \eta_{Bo} \frac{U_{FC}(n)I_{Bo,In}(n)}{U_B(n)} \quad (3.9)$$

où η_{Bo} est l'efficacité du survolteur dont la valeur est supérieure à 95%. La tension de sortie $U_{FC}(t)$ de la PAC sera évaluée dans la section suivante.

3.2.6 Pile à combustible

D'après [23, 18, 19], les constantes de temps pendant la phase transitoire de la PAC sont faibles (<50ms); ceci peut être considéré comme négligeable par rapport au pas d'échantillonnage utilisé pour le système. L'évaluation du comportement dynamique [14] de la PAC est effectuée en utilisant l'équation:

$$U_{FC}(t) = U_{FC,0} + E_1 T_{FC}(t) + E_2 \ln\left(\frac{I_{FC}(t)}{I_{FC,0}}\right) + \frac{R_{FC}}{T_{FC}(t)} I_{FC}(t) \quad (3.10)$$

où $U_{FC,0}[V]$, $E_1[V C^l]$, $E_2[V]$, $I_{FC,0}[A]$, $R_{FC}[\Omega^o C^l]$ sont des paramètres expérimentaux dont les valeurs, dans notre cas, sont présentées dans le tableau 3.1 pour les températures d'opération allant de 24°C à 72°C. Ces paramètres varient fortement d'une pile à

combustible à une autre. $T_{FC}(t)$ est la température d'opération des cellules. Les deux premiers termes de l'éq. (3.10) représentent le potentiel à vide. Le troisième terme correspond au potentiel d'activation tandis que le dernier représente les pertes ohmiques. Le taux $\dot{V}_{FC}(t)$ de H_2 consommé par la PAC est déterminé par:

$$\dot{V}_{FC} = N_{Cell,FC} \frac{\eta_{I,FC} I_{FC}(t)}{C_{H_2}}, \quad (3.11)$$

où $\eta_{I,FC}$ est l'efficacité en courant de la PAC; sa valeur dépend de la température. $N_{Cell,FC}$ représente le nombre de cellules. Pour les PAC de type PEM, la littérature rapporte des rendements entre 0.3 et 0.6 [18, 15]. Une estimation plus précise peut être obtenue par mesures directes.

3.2.7 Sous-système de stockage d'hydrogène

L'hydrogène produit par l'électrolyseur est stocké dans un réservoir. Bien que le système sur les énergies renouvelables de l'IRH dispose d'un compresseur et d'un réservoir où l'hydrogène pourrait être stocké à 150 PSI (environ 10 bars), le cas hypothétique de stockage sous pression et température normales est considéré ici. Le bilan de puissance au niveau du réservoir est:

$$\frac{dW_{H_2}(t)}{dt} = P_{el}(t) - P_{FC}(t) \quad (3.12)$$

où $W_{H_2}(t)$ est l'énergie stockée dans le réservoir sous forme d'hydrogène. $P_{el}(t)$ et $P_{FC}(t)$ sont respectivement les puissances électriques correspondant aux débits de H₂ produit par l'électrolyseur et consommé par PAC. La solution de l'éq. (3.12) dans le domaine de Laplace nous donne:

$$W_{H_2}(s) = \frac{P_{el}(s) - P_{FC}(s)}{s} + W_{H_2,0} \quad (3.13)$$

avec $P_{el}(s) = \frac{\dot{V}_{el}(s)}{V_T} \Delta H$; $P_{FC}(s) = \frac{\dot{V}_{FC}(s)}{V_T} \Delta H$

où \dot{V}_{el} et \dot{V}_{FC} sont respectivement les taux de production et de consommation de H₂. $W_{H_2,0}$ est l'équivalent énergétique de l'hydrogène stocké initialement. Sous les conditions normales de température et de pression [14], V_T vaut 22.4 l/mol. L'enthalpie de l'hydrogène ΔH est de 286 kJ/mol (Valeur calorifique supérieure).

Tableau 3.1: Valeurs des paramètres

| Composant | Paramètres | Valeurs | Paramètres | Valeur |
|-------------------------|-------------------|-----------|----------------------|---------|
| Tampon d'énergie | R _i | 0.076 Ohm | Q ₀ | 880 Ah |
| | K _i | ~0 | E ₀ | 48 V |
| | Q _{FC} | 880 Ah | | |
| Survolteur | A _{Bo,0} | 1 | B _{Bo,0} | 1.236 |
| | A _{Bo,1} | -0.2045 | B _{Bo,1} | -0.4275 |
| Dévolteur | A _{Bu,0} | 1 | B _{Bu,0} | 0.057 |
| | A _{Bu,1} | -1.485 | B _{Bu,1} | -0.082 |
| | η _{I,el} | 0.7 | | |
| Électrolyseur | U _{el,0} | 22.25 | L _{el,0} | 0.1341 |
| | C ₁ | -0.1765 | R _{el} | -3.3189 |
| | C ₂ | 5.5015 | N _{Cell,el} | 24 |

| | | | | |
|------------|---------------|--------|---------------|-------|
| PAC | $\eta_{I,FC}$ | 0.45 | | |
| | U_{FC} | 33.18 | $I_{FC,0}$ | 8.798 |
| | D_1 | -0.013 | R_{FC} | -2.04 |
| | D_2 | -1.57 | $N_{Cell,FC}$ | 35 |

3.3 Algorithme pour la simulation du SERSH

À partir des équations énoncées plus-haut, une approche systématique d'évaluation du comportement d'un SERSH est élaborée. L'organigramme de la Fig. 3.2 résume cette approche. Rappelons que le pas de simulation et d'échantillonnage retenu est de 1 s et le nombre total de pas de simulation pour une période d'opération complète est noté N. La simulation reproduit les courants de l'électrolyseur, du survoltor et l'énergie stockée dans les batteries. Le courant à la sortie du survoltor dépend à la fois du modèle du survoltor et de celui de la PAC. Le courant de l'électrolyseur est étroitement associé aux modèles du dévoltor et de l'électrolyseur. Les termes suivants qui se retrouvent dans le diagramme sont ainsi définis:

$Q(n)$ représente la charge accumulée dans les batteries (Ah); Q_{FC} est la charge totale de ces batteries complètement chargées. $P_{in}(n)$, $P_{Ri}(n)$ et $P_{Ki}(n)$ désignent respectivement la puissance à l'entrée des batteries, les pertes ohmiques et les pertes dues à la polarisation.

3.4 Validation des modèles et expérimentations

Le SERSH de l'IRH a été modélisé en utilisant le sous-modèle dynamique de chaque composante. Un exemple d'opération du système a été utilisé pour valider les modèles. Au

cours de ce processus, la stabilité des modèles, en présence de grandes variations de puissance introduites par l'éolienne et les PV, est vérifiée. Le courant $I_{WT}(n)$ à la sortie du module redresseur de l'éolienne, le courant $I_{PV}(n)$ à la sortie du module régulateur des PV, le courant $I_L(n)$ à l'entrée de l'onduleur, les températures des cellules de l'électrolyseur et la PAC ($T_{el}(n)$ et $T_{FC}(n)$) sont les grandeurs d'entrée de la simulation. Les courants à l'entrée de l'électrolyseur ($I_{el}(n)$) et à la sortie du surveilateur ($I_{Bo,Out}(n)$) et l'énergie $W(n)$ des batteries sont les grandeurs de sortie qui nous renseignent sur l'évolution des points sensibles du SERSH. Les paramètres de simulation et des modèles des composants sont résumés dans le tableau 3.1.

L'opération sur une courte période avec des seuils de contrôle très proches nous permet de valider tous les cycles de fonctionnement. Ainsi, le seuil permettant de mettre en marche l'électrolyseur ($SOC_{el,ON}$) est fixé à 42240Wh; celui permettant de mettre la PAC en marche ($SOC_{FC,ON}$) est fixé à 42238Wh. Les seuils d'arrêt $SOC_{el,OFF}$ de l'électrolyseur et de la PAC $SOC_{FC,OFF}$ sont fixés à 42239Wh. Les batteries sont complètement chargées ($W_0=W_{max}=42240Wh$) au départ. Les profils de $I_{WT}(n)$ et $I_L(n)$ sont respectivement représentés par les Fig. 4 et 5. $I_{PV}(n)$ est constant et égale à 5.5A. T_{el} est presque constant (25°C) tandis que T_{FC} varie linéairement de 25°C à 35°C avec une pente de 3.3°C/s.

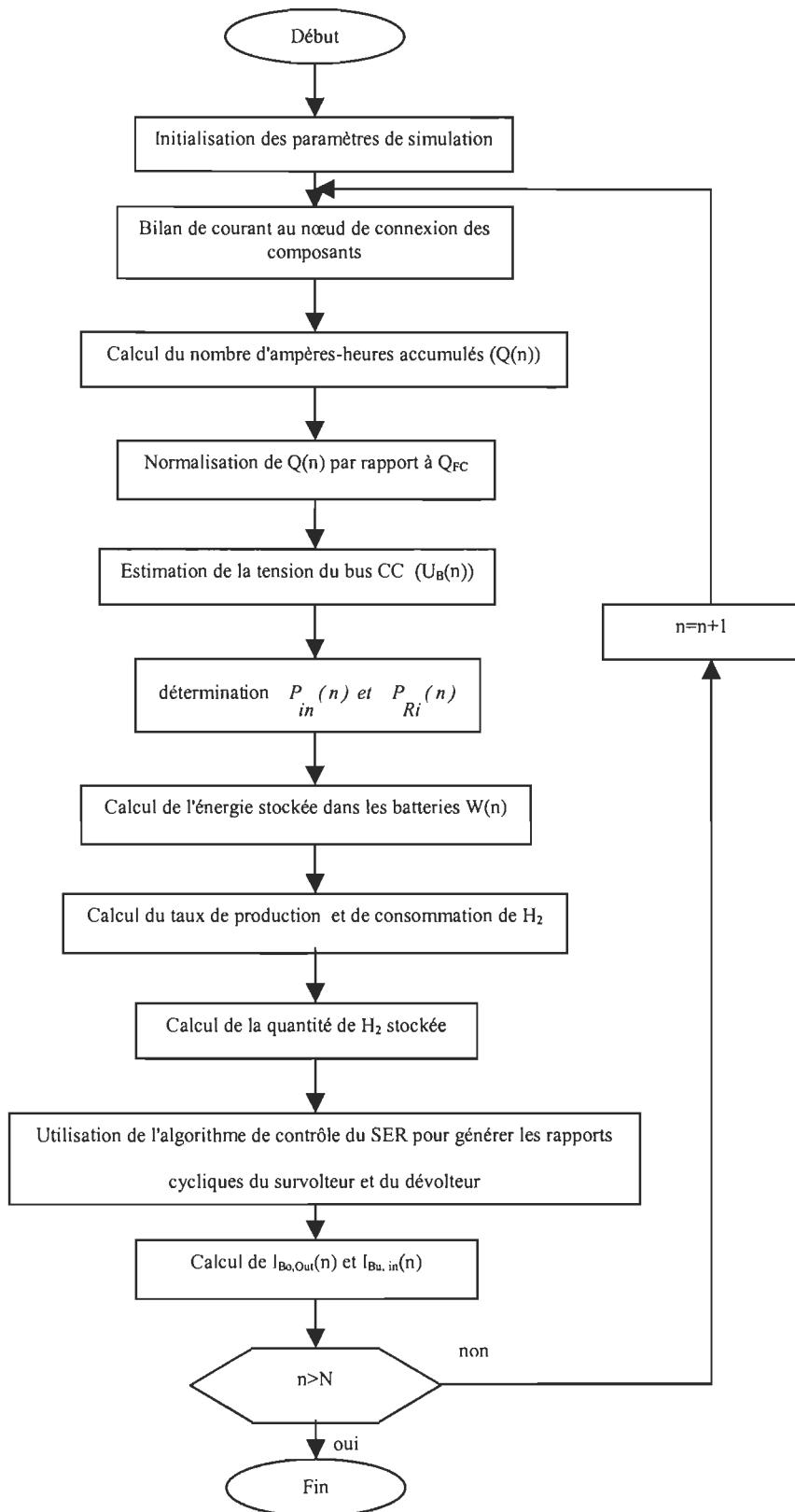


Fig. 3.2: Organigramme de description du comportement du SERSH

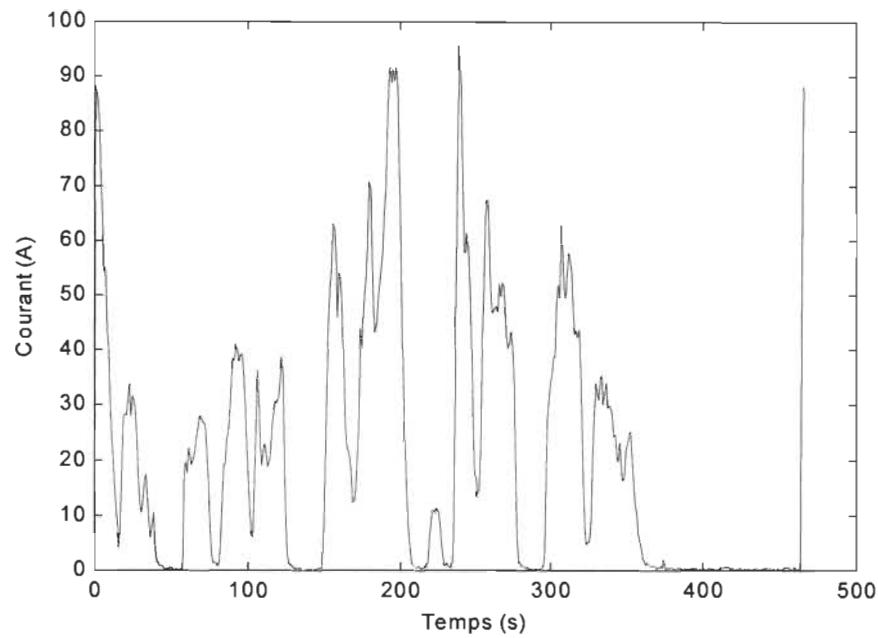


Fig. 3.3: Courant $I_{WT}(t)$ à la sortie de bloc redresseur de l'éolienne

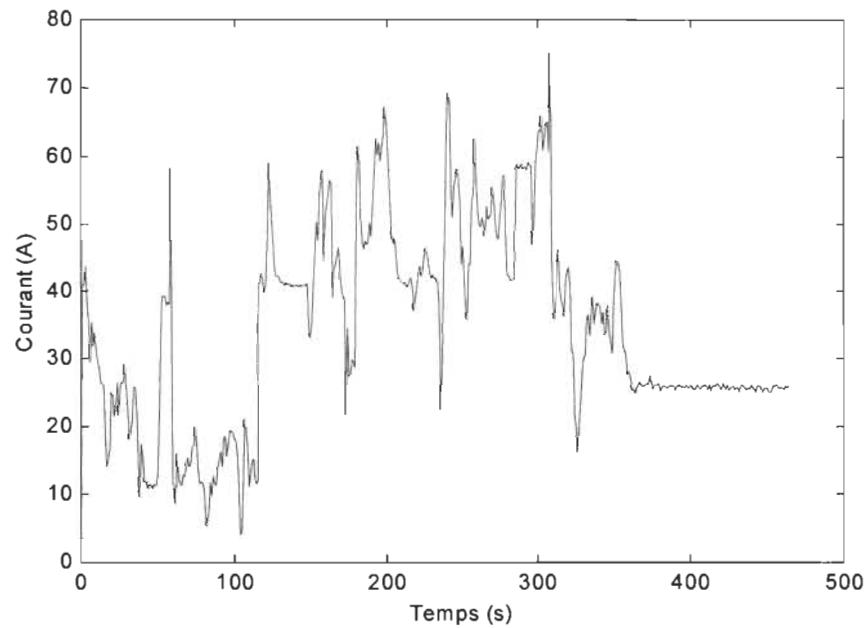


Fig. 3.4: Profil du courant de la charge

L'électrolyseur est configuré à travers le dévolteur pour absorber une puissance nominale de 1500W lorsqu'il est en marche. Comme mentionné un peu plus haut, dès que le SERSH est mis en opération, la condition de mise en marche de l'électrolyseur est remplie. Il démarre et absorbe en moyenne 28A. La Fig. 3.5 représente une comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation. L'écart maximal est de 8.5%, ce qui démontre que les modèles du dévolteur et de l'électrolyseur sont assez réalistes. L'écart observé lorsque l'électrolyseur est en régime établi (régime stationnaire) est dû à l'imprécision entourant l'évaluation de la charge initiale des batteries et aux fortes variations d'énergies sur le bus CC. En effet, le modèle du tampon d'énergie est directement lié à l'énergie qui y est initialement stockée. En dépit de ceci, la séquence arrêt-marche de l'électrolyseur est la même pour la simulation et les mesures expérimentales.

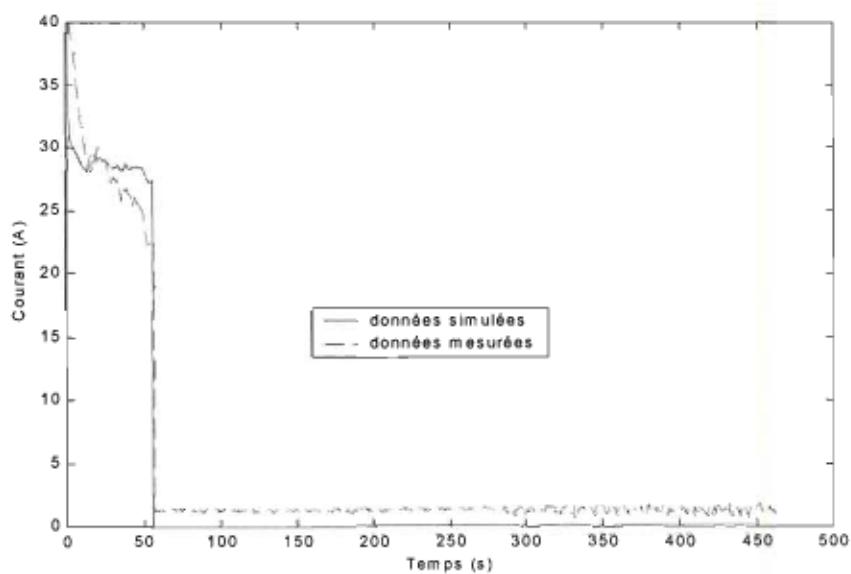


Fig. 3.5: Courant de l'électrolyseur pendant la validation

En ce qui concerne le survoltEUR et la PAC, les modèles ont reproduit parfaitement leurs comportements (Fig. 3.6) l'écart maximal est de 2%. Le courant à la sortie du survoltEUR est peu sensible aux variations de tension sur le bus CC.

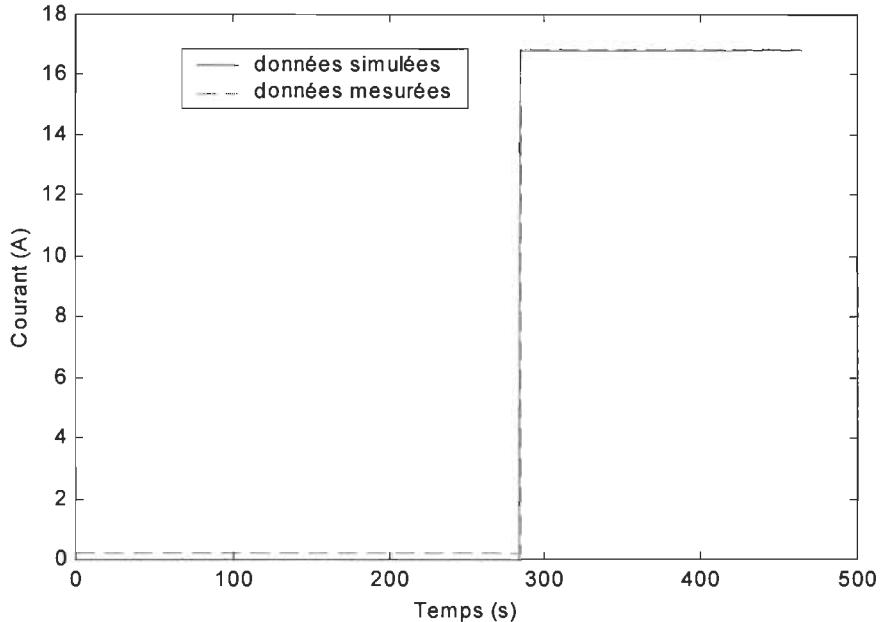


Fig. 3.6: Courant à la sortie du survoltEUR

L'état complet du SERSH est évalué en observant l'évolution de $W(t)$ (Fig. 3.6). De $t=0$ s à $t=65$ s, il y a une décroissance prononcée de $W(t)$ due au fait que la production électrique est trop faible pour faire face à la demande de l'électrolyseur et de la charge. Une fois que l'électrolyseur est arrêté par le programme de contrôle du SERSH, $W(t)$ se met à augmenter (de $t=66$ s à $t=135$ s). Les Figs. 3.3 et 3.4, montre un excédent global de courant (et donc d'énergie) sur le bus CC. Cet excédent permet alors de recharger les batteries. À partir de $t=136$ s à $t=200$ s, $W(t)$ décroît de nouveau à cause de la forte consommation de la charge

(Fig. 3.4), pendant que l'énergie en provenance de l'éolienne et des panneaux solaires arrivait à peine à combler cette demande énergétique.

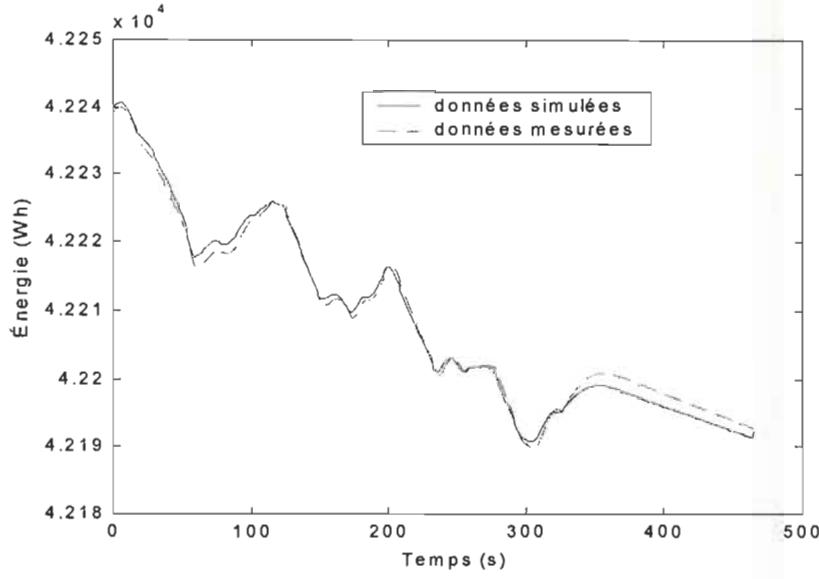


Fig. 3.7: Énergie $W(t)$ dans le tampon

À partir de $t=295$ s, l'énergie $W(t)$ atteint le seuil critique inférieur signifiant un manque d'énergie dans le système. Dès cet instant, la PAC est activée (Fig. 3.6) pour apporter plus d'énergie au système d'où la recharge des batteries jusqu'à $t=350$ s. De $t=351$ s jusqu'à l'arrêt complet du SERSH, l'énergie en provenance de l'éolienne est quasiment nulle. Pendant ce temps, la charge absorbe en moyenne 25 A alors que la PAC ne fournit que l'équivalent de 17 A. Ce déficit en courant entraîne une nouvelle phase de décharge des batteries. L'écart maximal entre l'estimation et les mesures de $W(t)$ reste inférieur à 2%. Ce

qui est un indice de fiabilité des modèles. Il ressort donc que le modèle du sous-système de stockage est raisonnable et réaliste.

3.5 Exemple de scénario pratique

Un scénario, basé sur la consommation énergétique réelle d'une résidence familiale, est bâti. Les productions réelles des panneaux solaires et de l'éolienne dans notre région sont utilisées. La simulation du scénario s'échelonne sur deux heures. La Fig. 3.8 représente la puissance électrique produite par les panneaux solaires et l'éolienne (figure du haut) et la puissance consommée par la charge (figure du bas).

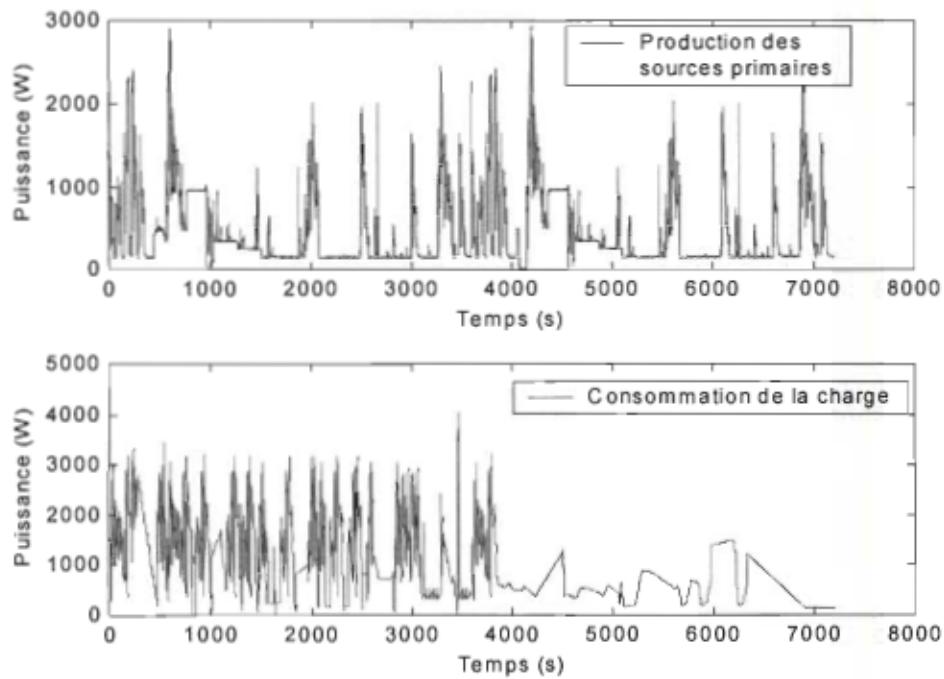


Fig. 3.8: Exemple de scénario pratique de simulation

Le bilan de puissance sur le bus CC, sans les contributions de la PAC et de l'électrolyseur est donc la somme algébrique des puissances des PV, de l'éolienne et de la charge tel qu'illustré à la Fig. 3.9. Les puissances positives représentent un excédent d'énergie sur le bus CC et les puissances négatives sont les insuffisances du système à fournir la puissance demandée par les charges.

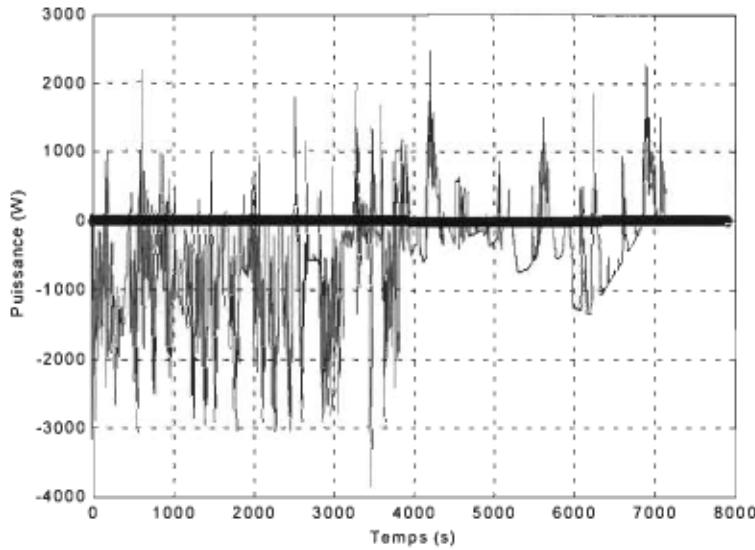


Fig. 3.9: Bilan de puissance sur le bus CC sans la contribution de la PAC et de l'électrolyseur

Les paramètres des modèles sont les mêmes que ceux mentionnés dans le tableau 3.1. L'électrolyseur et la PAC sont configurés comme nous l'avions indiqué plus haut. La logique de contrôle de l'énergie, basée sur $W(t)$, se présente comme suit: l'électrolyseur est mis en marche lorsque $W(t) \geq 0.75 W_{max}$ et arrêté quand $W(t) < 0.70W_{max}$. La PAC est mise en marche lorsque $W(t) < 0.65W_{max}$ et arrêtée quand $W(t) > 0.70W_{max}$. La charge maximale des batteries est fixée à 11 kWh. La charge initiale des batteries (W_0) est fixée à $0.75W_{max}$. Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures ci-dessous.

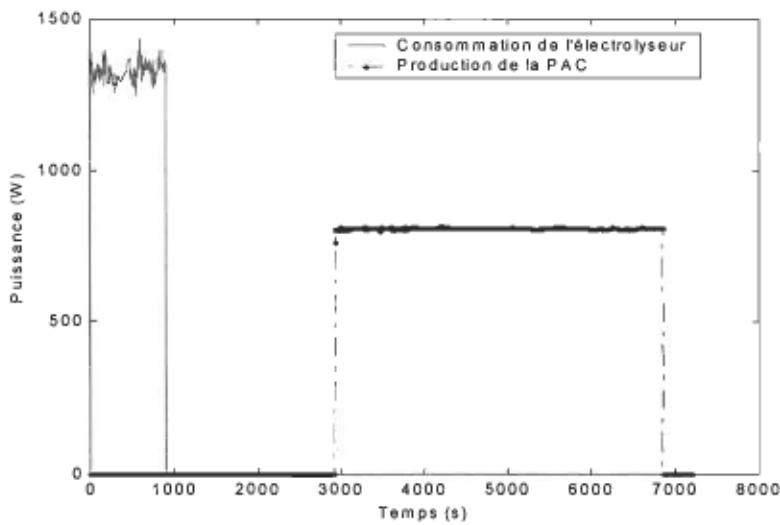


Fig. 13.10: Puissance de l'électrolyseur et de la PAC

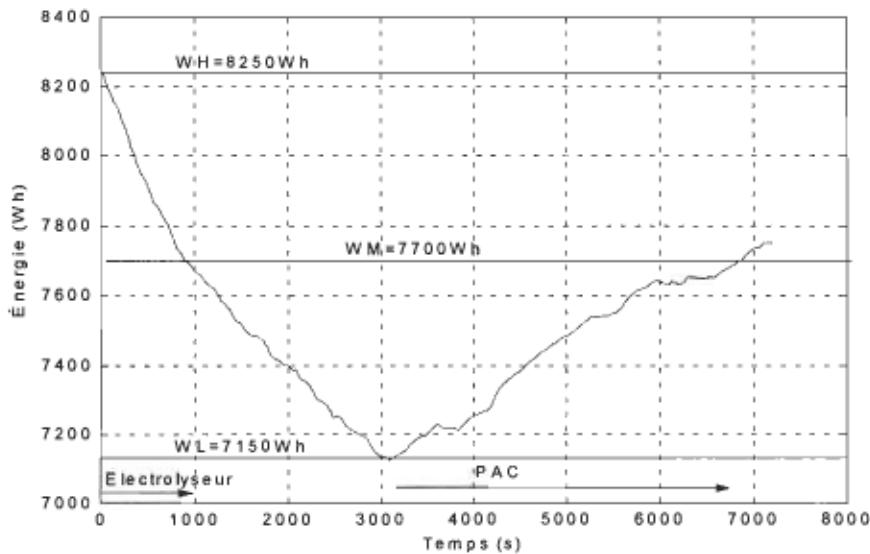


Fig. 3.11: $W(t)$

Au démarrage du système ($t=0$ s), W_0 était à $0.75W_{max}$. Cette condition est suffisante pour démarrer l'électrolyseur (le système a un surplus d'énergie). L'énergie dans les batteries

$(W(t))$ diminue car le bilan de puissance de la Fig 3.8 indique une puissance négative (la consommation est plus grande que la production d'énergie) et aussi parce que l'électrolyseur est en fonctionnement. À $t=990$ s, $W(t)$ atteint $0.7W_{max}$: l'électrolyseur s'arrête, conformément à la stratégie de contrôle définie plus haut. À partir de $t=991$ s jusqu'à $t=2995$ s, ni la PAC, ni l'électrolyseur ne fonctionnent. Mais compte tenu du fait que le bilan sur le bus CC est toujours négatif (Fig. 3.8), $W(t)$ continu de décroître jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de $0.65W_{max}$. C'est le seuil inférieur qui signifie qu'il y a un manque d'énergie dans le système.

Le système de contrôle démarre alors la PAC. La PAC fonctionne de 2996 s à 6900 s (Fig. 3.9). Pendant ce temps, la contribution de la PAC fait en sorte que $W(t)$ augmente jusqu'à atteindre $0.7W_{max}$ (Fig. 3.11). La Fig. 3.12 représente l'évolution de l'équivalent énergétique de l'hydrogène stocké ($W_{H2}(t)$). L'énergie initialement stockée ($W_{H2,0}$) est de 15 kWh. On peut remarquer que lorsque l'électrolyseur est en marche, $W_{H2}(t)$ augmente et arrête quand il cesse de fonctionner. À partir de $t=2990$ s, lorsque la PAC fonctionne, cette énergie diminue.

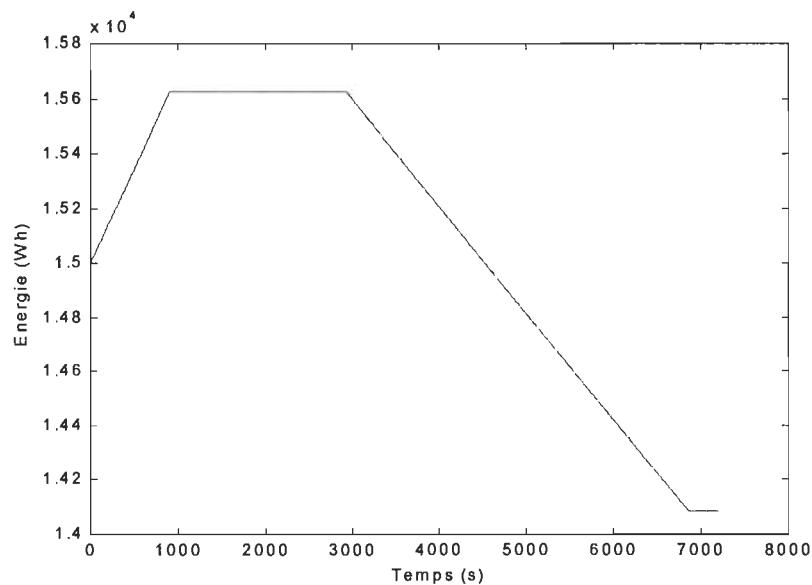


Fig. 3.12: $W_{H2}(t)$

Ces résultats indiquent que les modèles décrits permettent de prédire le comportement de chaque composante du SERSH en fonction d'un scénario donné. De plus il est possible de savoir les conditions nécessaires pour assurer l'autonomie du système en observant par exemple le stock d'hydrogène (Fig. 3.12). En effet, la quantité d'hydrogène témoigne de l'autosuffisance énergétique du système dans les conditions extrêmes de non-production d'électricité par les sources primaires.

CHAPITRE IV

STRATÉGIES DE CONTRÔLE D'UN SYSTÈME À ÉNERGIE RENOUVELABLE

4.1 Introduction

A travers le chapitre précédent, des modèles ont été développés et validés. Dans ce chapitre il est question du contrôle d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène (SERSH). Le SERSH de l'IRH est un système dont les composantes sont fortement non-linéaires. En effet la puissance délivrée par l'éolienne ou les panneaux solaires est intermittente, l'électrolyseur et la pile à combustible (PAC) fonctionnent sous certaines conditions liées à l'état du système. Cette non-linéarité du SERSH fait en sorte que les méthodes de conception des lois de commande basées sur les systèmes linéaires [24, 26] sont inappropriées. De plus, aucune méthode systématique n'existe pour permettre la synthèse de contrôleur pour un système non-linéaire [24]. L'une des solutions souvent rencontrées consiste à linéariser le système autour d'un point d'opération avant d'appliquer les méthodes de conception de lois de commande pour les systèmes linéaires. Cette solution, à première vue, n'est pas envisagée dans notre cas parce que le SERSH fonctionne autour de plusieurs points d'opération qui sont liés à l'état du système (manque ou surplus d'énergie). Afin de trouver une approche qui soit applicable au SERSH, nous analysons encore une fois la problématique de contrôle déjà abordée dans le premier chapitre.

4.2 Problématique de contrôle

La grandeur contrôlée dans le SERSH est l'énergie fournie à la charge du système. Compte tenue de la nature intermittente des deux principales sources, l'électrolyseur et la PAC sont mis à contribution pour assurer l'approvisionnement énergétique de la charge. L'algorithme de contrôle a pour rôle de faire fonctionner chacune de ces composantes pendant les périodes appropriées afin de fournir à tout instant, l'énergie nécessaire à la charge. En analysant la mission de l'algorithme de contrôle, nous faisons ressortir deux aspects: le contrôle des séquences "marche-arrêt" de l'électrolyseur et de la PAC et le contrôle de la puissance de fonctionnement de ces deux composantes.

Pour contrôler les séquences "marche-arrêt", un algorithme de type hystérésis est utilisé à cause de sa robustesse et de sa facilité de mise en oeuvre pratique. Les détails de fonctionnement de cet algorithme sont exposés à la section 4.4.1.

Une fois que l'électrolyseur ou la PAC est mis en marche, deux situations peuvent subvenir:

- fonctionnement de ces composantes à leurs pleines puissances;
- modulation des puissances de fonctionnement suivant un algorithme de contrôle.

Dans les prochaines sections, nous allons nous intéresser à la deuxième situation.

La conception d'un algorithme de contrôle suppose la connaissance de la variable de contrôle. C'est pourquoi, nous abordons le choix de la variable de contrôle avant d'étudier les méthodes permettant de contrôler les puissances de fonctionnement de la PAC et de l'électrolyseur.

4.3 Choix de la variable de contrôle

Une variable de contrôle est choisie pour sa capacité à indiquer l'état du SERSH qui est subdivisé en 3 parties:

- manque d'énergie pour alimenter la charge: l'énergie consommée par la charge est supérieure à l'énergie produite par les sources primaires.
- surplus d'énergie: l'énergie consommée par la charge est inférieure à l'énergie produite par les sources primaires.
- état intermédiaire: il n'y a ni manque, ni surplus d'énergie.

Nous avons recensé quelques candidats potentiels: le courant, la tension, la puissance sur le bus CC, l'énergie accumulée dans les batteries. Le courant, la tension ou la puissance sur le bus CC varie en fonction de la puissance en provenance des sources primaires et de la puissance absorbée par la charge. S'il y a de grands vents, la puissance est grande mais cela ne signifie pas qu'il y a un surplus d'énergie. Le même raisonnement, appliqué au courant et la tension du bus CC, montre qu'ils ne sont pas de bons candidats. Par contre lorsqu'on considère l'énergie accumulée dans les batteries, elle témoigne de l'état réel de tout le système. En effet, si l'énergie accumulée est faible, il est raisonnable de penser qu'il y a un manque d'énergie dans le système et les batteries ont été mises à contribution pour fournir de l'énergie. Un surplus d'énergie dans le système se manifeste par une augmentation de l'énergie accumulée dans les batteries, quelles que soient les puissances disponibles au niveau des sources primaires. Partant de ces faits, nous avons retenu l'énergie accumulée dans les batteries comme variable de contrôle. Ce résultat concorde avec les travaux

d'autres chercheurs [3, 11, 22, 28]. Dans la littérature, cette variable de contrôle est désignée par l'abréviation SOC (State Of Charge) dont l'équation est représentée par:

$$SOC = \frac{Q_{IN}}{Q_{FC}} \quad (4.1)$$

où Q_{IN} et Q_{FC} représentent respectivement, la charge courante des batteries (Ah) et la charge totale des batteries quand elles sont complètement chargées.

4.4 Stratégies de contrôle basées sur l'énergie des batteries

Comme nous l'avions signalé dans le paragraphe 4.2, le contrôle des séquences de mise en marche et d'arrêt de l'électrolyseur et de la PAC est dédié à l'algorithme basé sur l'hystérésis [28]. Cette technique fait l'objet d'une étude dans la section 4.4.1.

Parmi les lois de commande permettant de contrôler la puissance de ces composantes, nous pouvons citer la commande optimale, la commande par retour d'état, les contrôles de type PI ou PID, la commande par la logique floue. Cette liste n'est pas exhaustive. Les commandes PI, par retour d'état ou optimale sont souvent utilisées pour la régulation [26]. Cette catégorie de commande est utile lorsque le SERSH est appelé à fonctionner autour d'un point d'équilibre avec le minimum possible de fluctuation d'énergie. En effet si les paramètres du système changent beaucoup (puissance disponible sur le bus CC), ces méthodes sont limitées en performance [24, 26]. Pour prouver cette affirmation, nous avons choisi d'étudier un contrôle de puissance basé sur des régulateurs de type PI ou PID.

Ce choix est motivé par le fait que ces contrôleurs sont très répandus en industries et sont aussi faciles à implanter.

Nous avons retenu le contrôle de puissance par la logique pour approcher la gestion de l'énergie comme l'aurait fait un système expert. En effet, la première famille de contrôleurs mentionnés ci-haut ne tient pas compte de la demande énergétique réelle de la charge, ni de la puissance réellement disponible au niveau des sources primaires. Ces informations sont pourtant importantes afin de mieux gérer le système. De plus, comme nous le démontrons dans ce chapitre, c'est une commande robuste car elle est capable de supporter d'importante variation de paramètres du système [18, 25].

4.4.1 Contrôle par double hystérésis

Le fonctionnement par hystérésis de l'électrolyseur ou de la PAC fait référence à une séquence de mise en marche et d'arrêt en utilisant l'énergie $W(t)$ comme variable contrôlée et des seuils prédéfinis. W_H représente le seuil au-dessus duquel, le système est considéré comme possédant un excès énergétique. Dans cette situation, l'électrolyseur est mis en marche pour produire de l'hydrogène. Il ne sera arrêté que si $W(t)$ descend en deçà de la valeur W_M (Fig. 4.1). Ceci décrit le cycle de fonctionnement de l'électrolyseur. Par rapport à la variable de contrôle, une hystérésis est réalisée.

Par un raisonnement similaire, la PAC est mise en marche lorsque $W(t)$ est inférieure à W_L et est arrêté quand $W(t)$ redevient supérieur à W_M . Ce mode de fonctionnement représente une autre hystérésis autour de la PAC. Au total, deux hystérésis sont nécessaires pour

contraindre à chaque instant, $W(t)$ entre W_H et W_L . D'un point de vue simplifié, le contrôle du SERSH revient à maintenir à chaque instant, $W(t)$ entre W_H et W_L .

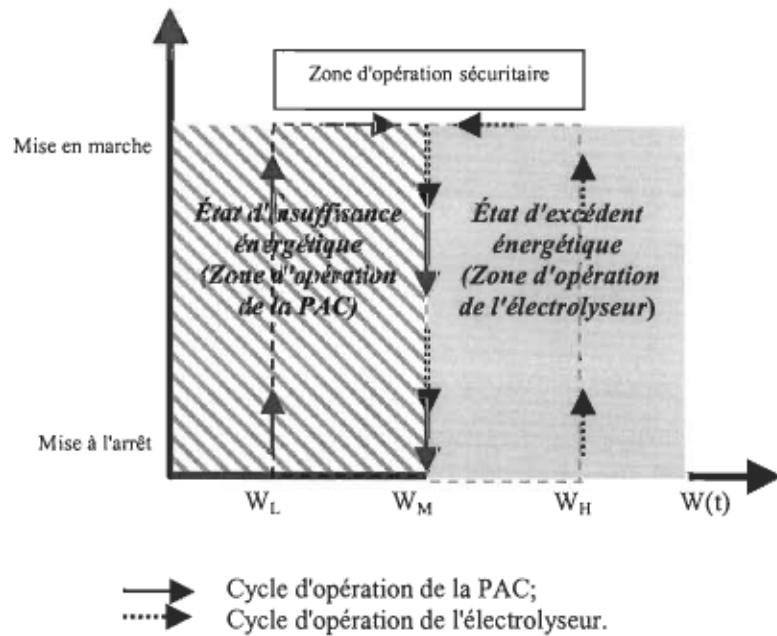


Fig. 4.1: Diagramme décrivant les cycles de fonctionnement de la PAC et de l'électrolyseur.

La plage de valeurs entre W_L et W_H définit la zone d'opération sécuritaire. Lorsque $W(t)$ se trouve dans cette zone, et que la PAC et l'électrolyseur sont arrêtés, un équilibre relatif est établi entre la consommation de la charge et la production des sources primaires. Pour un système dont les puissances d'opération de la PAC et de l'électrolyseur sont du même ordre de grandeur, W_M est défini comme étant la moyenne entre W_H et W_L . Cette façon de procéder attribue la même probabilité pour le nombre de cycles de fonctionnement de l'électrolyseur et la PAC à l'intérieur d'une certaine période.

Pour faire l'étude théorique des algorithmes de contrôle, nous avons défini un scénario qui est un ensemble de données relatives à la production de l'éolienne et des panneaux solaires de l'IRH et à la consommation énergétique d'une résidence familiale.

4.4.2 Définition d'un scénario de test pour les algorithmes de contrôle

Le scénario que nous avons choisi est composé d'un profil de consommation d'une charge connectée sur le SERSH, de profils de production de puissance électrique, respectivement par les PV et l'éolienne. Nous supposons que le scénario est défini pour une journée complète d'opération du SERSH. Les différents profils composant le scénario de test des algorithmes sont ci-après présentés.

4.4.2.1 Profil de la charge

Le profil de la charge retenu reflète la consommation moyenne d'énergie d'un abonné de la compagnie d'électricité Hydro-Québec pendant une journée du mois de janvier 1994. Ce mois particulièrement froid, entraîne de grandes consommations d'énergie électrique pour le chauffage. Le profil de consommation du mois de janvier (Fig. 4.1) donne un aperçu sur la plus grande demande d'énergie que le SERSH est amené à combler dans une application résidentielle. Dans tout ce chapitre, t désignera le temps. L'axe des abscisses commence à $t=0$ min, ce qui correspond à 0 h de la journée.

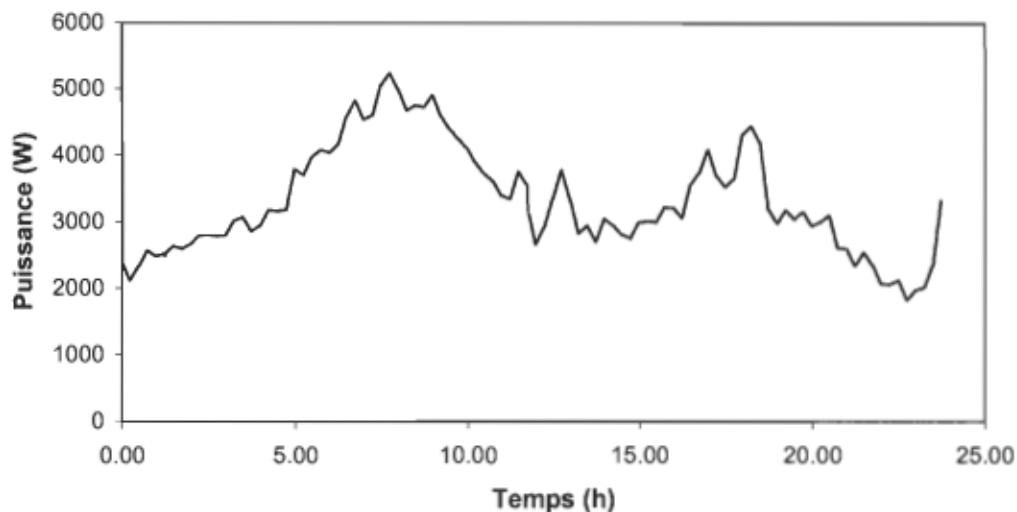


Fig. 4.2: Profil moyen journalier de consommation d'énergie pour le mois de janvier

4.4.2.2 Profils de production énergétique des sources primaires

a- Production des panneaux solaires

Les panneaux solaires installés dans le cadre du projet sur les énergies renouvelables peuvent fournir 1kW. La production moyenne pendant une journée est utilisée pour bâtir le scénario (Fig. 4.3).

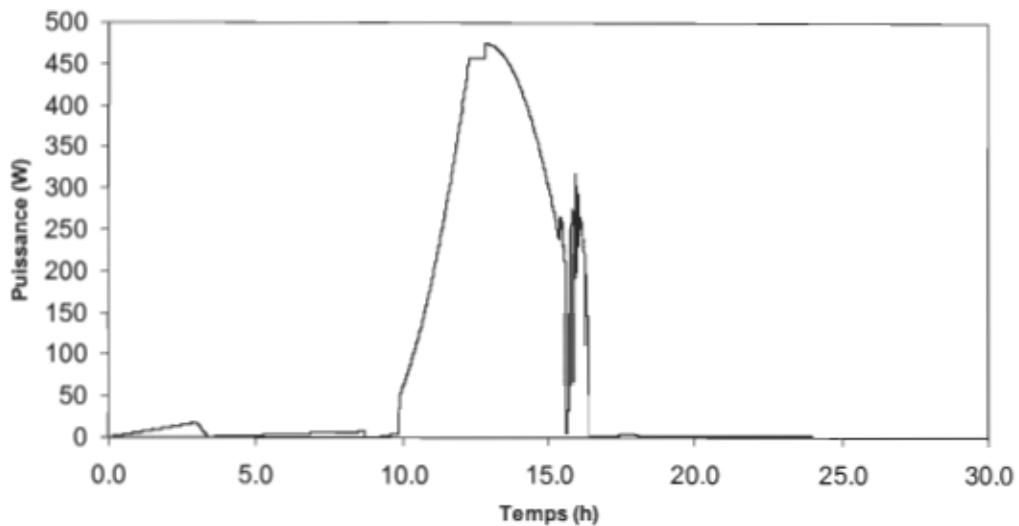


Fig. 4.3: Profil moyen journalier de production des PV

b- Production de l'éolienne

Nous avons considéré la production moyenne de l'éolienne au mois de janvier 2001 sur le site de l'université du Québec à Trois-Rivières.

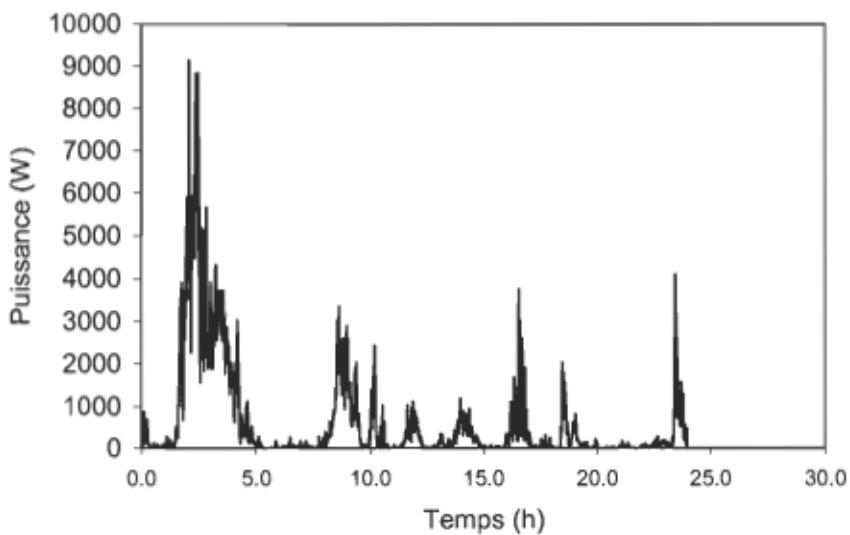


Fig. 4.4: Profil moyen journalier de production de l'éolienne le mois de janvier 2001

Les calculs statistiques nous donnent les résultats suivants:

moyenne = 628.42W

écart-type standard = 1224.82W

Pour compléter le scénario, nous avons défini les conditions initiales pour les énergies stockées dans les batteries et sous forme d'hydrogène. La prochaine section aborde ce point.

4.4.3 Conditions initiales pour l'utilisation du scénario de test

D'après la modélisation du banc d'essais sur les énergies renouvelables présentées au chapitre 3, deux composants présentent des conditions initiales de fonctionnement: (i) les batteries, (ii) le sous-système de stockage d'hydrogène.

Ainsi, pour le scénario en étude, les batteries sont supposées chargées à 80% de leurs pleines capacités. De son côté, le réservoir d'hydrogène est supposé contenir 75% de sa capacité de stockage.

4.4.4 Paramètres de simulation du scénario

Le logiciel Matlab-Simulink est utilisé comme plate-forme de simulation. Le pas d'intégration est fixé à 1min. Cette valeur de pas d'intégration a été choisie car le SERSH est un système qui évolue lentement. La capacité de batteries est de 220Ah pour une tension nominale de 48V. Les valeurs des autres paramètres qui sont utilisés pour la simulation sont les mêmes que ceux présentés dans le tableau 3.1 à l'exception des valeurs des paramètres concernant le dévolteur et le survoltateur. En effet, ces deux modèles ont été

réalisés en considérant un pas d'échantillonnage de 1s. Étant donné que le pas de simulation est de 1min, les fonctions de transfert sont réévaluées pour tenir compte de cette nouvelle situation. D'après les éq. 3.21 et 3.25, les fonctions de transfert (pour un pas d'échantillonnage de 1s) sont:

- pour le dévolteur:

$$\frac{U_{Bu,Out}(z)}{D_{Bu}(z)} = U_B(z) \frac{(1.6343 - 0.79396z^{-1})}{1 - 0.17081z^{-1}} \quad (4.2)$$

- pour le survoltEUR:

$$\frac{I_{Bo,In}(z)}{D_{Bo}(z)} = I_{FC,Max} \frac{(0.9499 + 0.003679z^{-1})}{1 - 0.046z^{-1}} \quad (4.3)$$

Les nouvelles fonctions de transfert avec un pas d'échantillonnage de 1min se présentent comme suit:

- pour le dévolteur:

$$\frac{U_{Bu,Out}(z)}{D_{Bu}(z)} = U_B(z) \frac{(1.632 - 6221z^{-1})}{1 - 8.9 * 10^{-47}z^{-1}} \quad (4.4)$$

- pour le survoltEUR:

$$\frac{I_{Bo,In}(z)}{D_{Bo}(z)} = I_{FC,Max} (0.95 + 0.0418z^{-1}) \quad (4.5)$$

Les éq. 4.4 et 4.5 seront intégrées dans le modèle général du SER à la place des éq. 3.21 et 3.25.

4.4.5 Simulation selon le scénario prédéfini

4.4.5.1 Stratégie basée sur la double hystérésis

Les résultats de la simulation seront présentés sous forme de puissance exprimée en watt.

Les paramètres de contrôle sont fixés de la façon suivante:

$$W_H = 0.75 W_{\max};$$

$$W_L = 0.60 W_{\max};$$

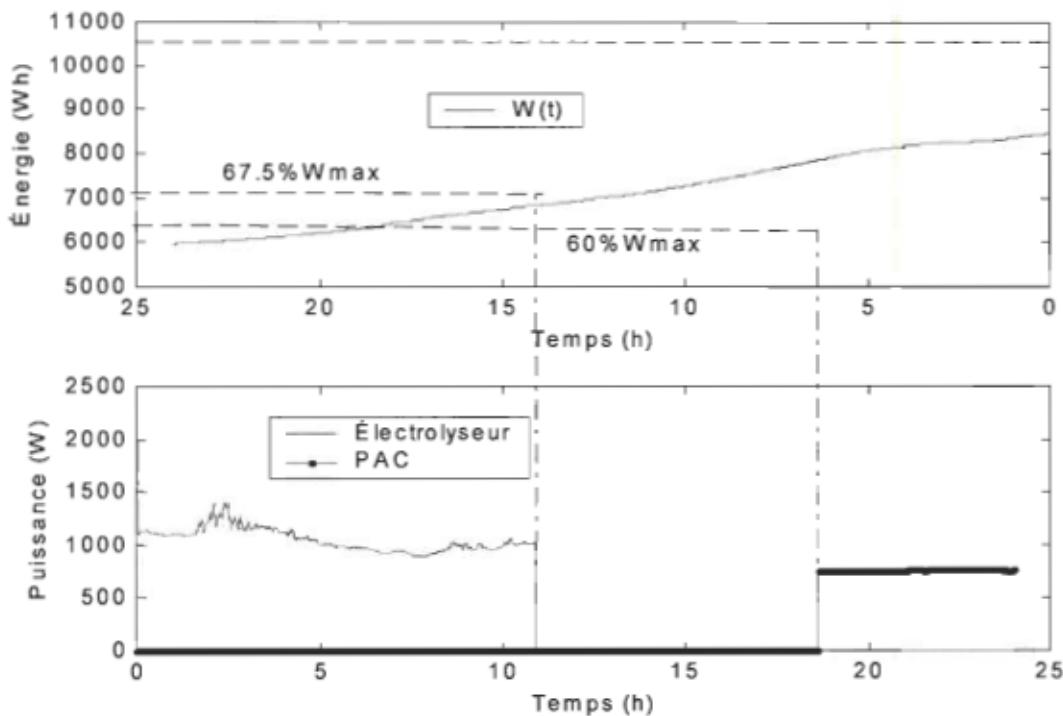


Fig. 4.5: $W(t)$, puissance consommée par l'électrolyseur, puissance produite par la PAC

Lorsque nous observons la Fig. 4.5, nous remarquons qu'au démarrage du SERSH, l'énergie $W(t)$ contenue dans les batteries est supérieure à W_H . Le système se trouve alors dans un

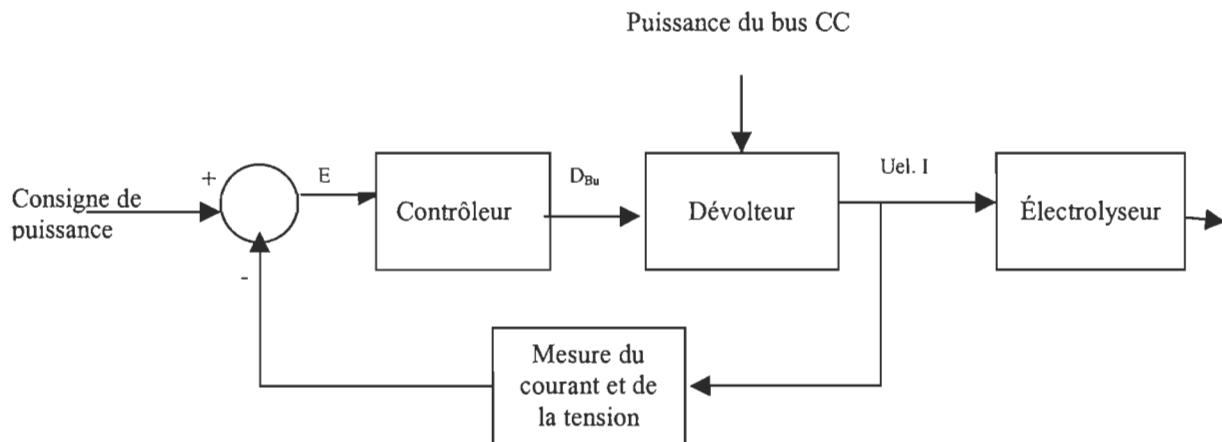
état d'excédent énergétique. L'électrolyseur est mis en marche (courbe en trait fin sur la Fig. 4.5). Cette opération fait décroître $W(t)$ jusqu'à la valeur de $67.5\%W_{max}$ (valeur de W_M). L'électrolyseur s'arrête mais $W(t)$ continu de diminuer à cause de la consommation énergétique de la charge. Lorsqu'elle atteint W_L , le SERSH se retrouve dans un état de manque énergétique. La PAC est alors mis à contribution pour fournir un supplément d'énergie.

Ce résultat montre qu'effectivement, un contrôle de séquence "marche-arrêt" basé sur l'hystérésis permet de coordonner le fonctionnement de l'électrolyseur et de la PAC. Mais, d'après les résultats de la simulation, aucune régulation n'est établie sur le niveau de puissance de fonctionnement de ces appareils.

4.4.5.2 Stratégie basée sur la double hystérésis et deux contrôleurs PI locaux

Lorsque la stratégie basée sur la double hystérésis est utilisée comme moyen de contrôle, aucun asservissement de la puissance n'est effectué que ce soit pour l'électrolyseur ou la PAC, comme nous l'avions mentionné un peu plus tôt. Le démarrage de l'électrolyseur, comme l'indique la Fig. 4.5, entraîne un appel de courant élevé qui peut causer un creux de tension néfaste pour la charge. De plus, l'absence d'asservissement en puissance fait que la puissance absorbée par l'électrolyseur varie avec les fluctuations de la tension sur le bus CC. De son côté, le courant délivré par la PAC est directement lié à la température de cellules qui varie tout au long de sa mise en opération.

Le contrôleur pour la PAC a pour objectif de réguler la puissance délivrée sur le bus CC tandis que le contrôleur de l'électrolyseur permet de réguler la puissance tout en réduisant au minimum le dépassement pendant la phase de démarrage. Ces objectifs sont vérifiés pour une consigne échelon de puissance pendant la phase de conception. Le schéma-bloc pour le sous-ensemble dévolteur - électrolyseur est présenté sur la Fig. 4.6.



E, D_{Buck} , Uel et I représentent respectivement, l'erreur, le rapport cyclique, la tension appliquée aux cellules de l'électrolyseur et le courant absorbé par l'électrolyseur.

Fig. 4.6 Diagramme-bloc pour le contrôle de la puissance absorbée par l'électrolyseur

a- Conception du contrôleur pour le module survolteur-PAC

La principale difficulté dans la conception d'un tel contrôleur provient de la non-linéarité du modèle du PAC (voir éq. 3.6) et du survolteur. De plus les fluctuations sur le bus CC

entraînent des perturbations importantes au niveau de la puissance absorbée par les cellules de l'électrolyseur. Un contrôleur non-linéaire simple été retenu. Il s'agit d'un PI numérique (contrôleur à action proportionnelle et intégrale) dont les coefficients K_p et K_i sont déterminés dans le domaine continu à l'aide de la méthode basée sur le placement des pôles et zéros. Ce type de contrôleur entraîne la saturation de la grandeur de sortie à la suite d'un changement brusque de consigne [24]. C'est pourquoi nous intégrons un saturateur à la sortie du PI.

Pour obtenir l'équivalent numérique du PI, nous utilisons l'approximation trapézoïdale de l'intégrale (éq. 4.8). Ainsi, le rapport cyclique D_{Bu} (signal échantillonné de α ou r) généré par le contrôleur PI est calculé à l'aide de l'éq. (4.8).

$$D_{Bu}(n) = D_{Bu}(n-2) + \left(K_p + \frac{K_i}{2} \right) E(n) + K_i E(n-1) + \left(-K_p + \frac{K_i}{2} \right) E(n-2) \quad \text{éq. (4.8)}$$

L'introduction du saturateur se fait de la façon suivante:

Si $D_{Bu}(n) > 1$ alors $D_{Bu}(n)=1$; Si $D_{Bu}(n) < 0.75$ alors $D_{Bu}(n)=0.75$;

La valeur de 0.75 qui apparaît sur la ligne précédente provient du fait, que la mise en opération de l'électrolyseur requière un minimum de 36V pour une tension nominale du bus CC de 48V. Après conception du contrôleur, les coefficients trouvés pour le dévolteur et le survoltage sont donnés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1: Coefficients des contrôleurs PI

| | Paramètre K_p du contrôleur | Paramètre K_I du contrôleur |
|------------|---|---|
| Dévolteur | 1 | 10 |
| Survolteur | 20 | 10 |

b- Évaluation des performances théoriques de contrôle

Pour évaluer les performances des contrôleurs conçus, nous avons choisi d'utiliser une excitation échelon comme consigne d'entrée. Ce choix est motivé par le fait que c'est le type d'excitation qui peut causer des dommages au dévolteur. En étudiant théoriquement la réaction du système face à une telle excitation, un contrôleur efficace pouvant protéger le dévolteur est développé. Le temps de réponse, le dépassement sont utilisés comme indice de performance. Les Figs. 4.7 et 4.8 représentent respectivement les réponses des sous-systèmes dévolteur - électrolyseur et survolteur - PAC en boucles ouverte et fermée. Les relevés des performances de contrôle sont mentionnés dans le tableau 4.2.

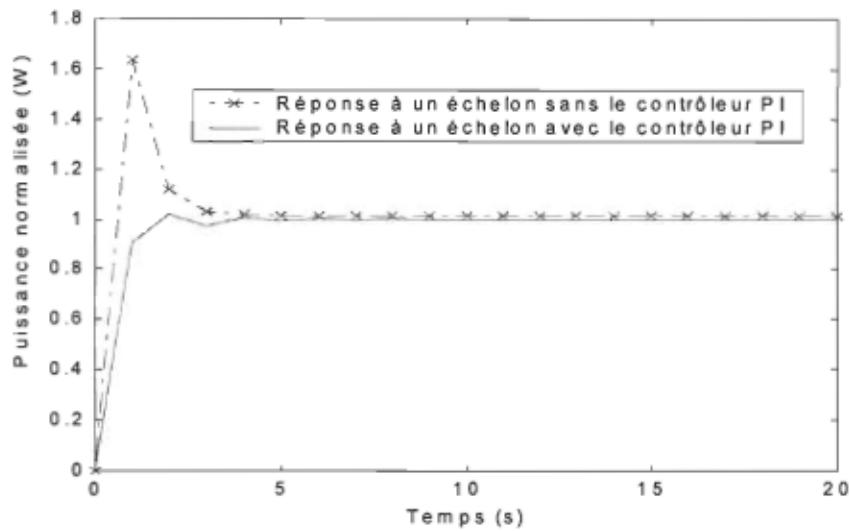


Fig. 4.7: Courbes de réponse du sous-ensemble dévolteur - électrolyseur

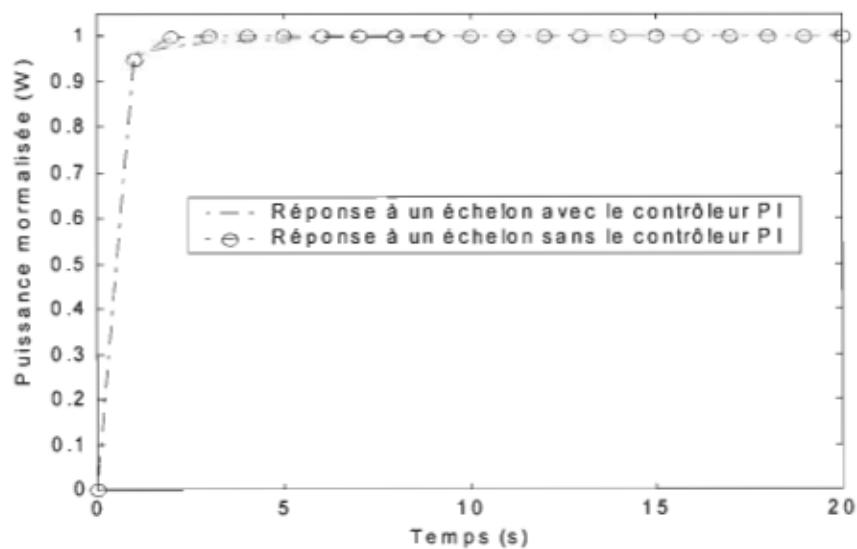


Fig. 4.8: Courbes de réponse du sous-ensemble survoltateur - pile à combustible

Tableau 4.2: Performances théoriques pour une excitation échelon (puissance du bus CC supposée constante).

| | Boucle ouverte | | Boucle fermée avec PI | |
|------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | Temps de réponse (s) | Dépassement (%) | Temps de réponse (s) | Dépassement (%) |
| Dévolteur | 4 | 65 | 3 | 2 |
| Survolteur | 2 | 0 | 2 | 0 |

Lorsque nous analysons la Fig. 4.7, nous remarquons que le dépassement de 65% observé en boucle ouverte est réduit à 2% en boucle fermée. Ceci démontre qu'un contrôleur PI est capable de réguler la puissance et d'éviter des pointes de puissance trop grandes. En ce qui concerne la Fig. 4.8, l'action du contrôleur est minime car le dépassement en boucle ouverte est réduit. Les résultats du tableau 4.2 sont obtenus en ne considérant aucune perturbation de puissance sur le bus CC, ce qui n'est pas tout à fait réaliste.

c- Étude de sensibilité aux variations d'énergie sur le bus CC

Pour étudier l'impact qu'ont les variations de puissance du bus CC sur le système contrôlé, nous procédons à une étude de sensibilité. Lors de cette étude, le temps de réponse et le dépassement sont évalués en fonction de différentes valeurs du ratio P_{BUS}/P_C où P_{BUS} représente la variance de la puissance du bus CC et P_C est la puissance de consigne.

Tableau 4.3: Simulation de la sensibilité du contrôle face aux perturbations de puissance bus CC.

| | | Boucle fermée avec PI | |
|------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| | | Temps de réponse moyen (s) | Dépassement moyen (%) |
| | P _{BUS} /P _C (%) | | |
| Dévolteur | 0.1 | 2 | 3 |
| | 0.5 | 5 | 4 |
| | 1 | 7 (pour 5%) | 5 |
| | 5 | indéterminé | 10 |
| | 10 | indéterminé | 20 |
| | 0.1 | 2 | 0 |
| Survolteur | 0.5 | 3 | 0.4 |
| | 0.1 | 4 | 0.7 |
| | 0.5 | 5.5 | 2 |
| | 10 | 7 | 0 |

Les résultats du tableau 4.3 indiquent que le sous-ensemble dévolteur-électrolyseur est très sensible aux variations d'énergie du bus CC. Son implantation pratique requiert beaucoup d'attention. Le contrôleur PI avec le sous-ensemble constitué par la PAC et le survolteur est beaucoup moins sensible aux perturbations que le premier.

d- Test d'une stratégie de contrôle basée sur le PI

Lorsque la stratégie basée sur le PI, combinée avec la double hystérésis est utilisée pour contrôler l'énergie, le test avec le scénario précédent permet d'obtenir les résultats graphiques de la Fig. 4.9. Ces résultats, en ce qui concerne l'électrolyseur (courbe en trait fin), prouvent que le PI a pu limiter le dépassement au démarrage (comparaison des Figs. 4.5 et 4.9). Par contre le PI a un effet limité sur le survolteur.

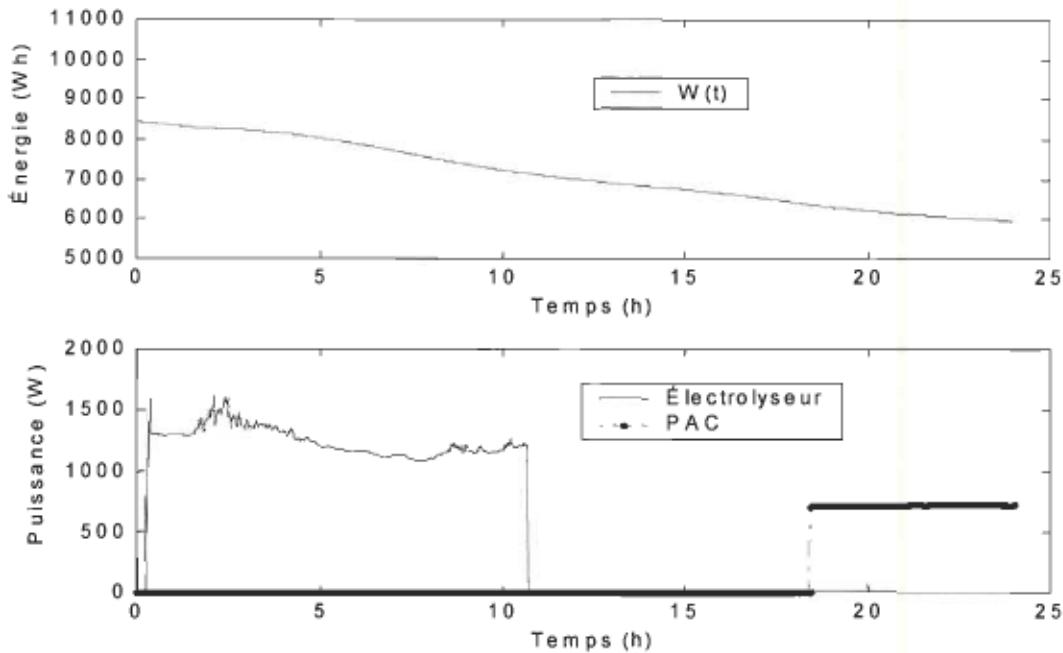


Fig. 4.9: Énergie $W(t)$, puissance consommée par l'électrolyseur, puissance produite par la PAC,
lorsque les contrôleurs PI sont utilisés

4.4.5.3 Stratégie basée sur la double hystérésis et la logique floue

Les deux méthodes étudiées précédemment contrôlent l'électrolyseur et la PAC en fonction de l'énergie disponible dans les batteries. La stratégie de contrôle est améliorée si elle tient compte des besoins énergétiques de la charge et de l'énergie réellement disponible au niveau des sources primaires. Ceci revient à faire une différence entre:

- l'excédent d'énergie lorsqu'il y a une grande production d'énergie à partir des sources primaires. Dans ce cas l'électrolyseur fonctionne à pleine capacité;

- l'excédent d'énergie lorsqu'il n'y a pas de production d'énergie à partir des sources primaires. Ici l'électrolyseur fonctionne à puissance modérée pour ménager la charge du SERSH

La commande par la logique est capable de prendre en considération ces facteurs pour contrôler les puissances de fonctionnement de la PAC et de l'électrolyseur. Dans les prochaines sections, nous étudions la conception de contrôleurs basée sur la logique floue.

a- Conception des contrôleurs basés sur la logique floue

L'objectif visé par cette étude est de trouver une nouvelle façon de contrôler l'énergie du bus CC. Il s'agit en fait de moduler les amplitudes des puissances absorbées par l'électrolyseur et fournies par la PAC pour accommoder le plus possible la demande énergétique de la charge. Cette opération suppose la prise en considération de l'excédent réel d'énergie et du déficit réel d'énergie.

Ainsi, en plus de la variable $W(t)$ mentionnée précédemment, le contrôleur à logique floue (CLF) pour l'électrolyseur et le dévolteur prend en compte l'énergie produite par les sources primaires. De cette façon, il peut faire la différence entre excédent d'énergie avec ou sans production d'énergie de la part des sources primaires. Le CLF pour la PAC et le survolteur utilise $W(t)$ et la demande énergétique réelle de la charge comme paramètres de contrôle.

La double hystérésis génère les temps de mise en marche et de mise à l'arrêt de l'électrolyseur et de la PAC, tandis que la logique détermine les niveaux de puissance en jeu. Cinq étapes permettent de concevoir un CLF [18, 25]:

- la définition des variables d'entrée et de sortie du contrôleur;
- la détermination des variables linguistiques;
- la fuzzification;
- la table d'inférence;
- la défuzzification.

Les détails de conception du CFL pour l'électrolyseur et le dévolteur sont exposés dans les sections subséquentes. La conception du CFL de la PAC et du survolteur suit la même démarche.

a1- Détermination des variables d'entrée et de sortie du contrôleur

Les variables d'entrée du CLF pour le dévolteur et l'électrolyseur sont:

- $W_{EL}(n)=W(n)-W_M$ où $W(n)$ est un échantillon de $W(t)$ et où W_M est le seuil au-dessous duquel l'électrolyseur s'arrête;
- $P_S(n)=I_s(n)E(n)$ où $I_s(n)$ représente un échantillon du courant total en provenance des sources primaires et où $E(n)$ représente un échantillon de la tension du bus CC.

La variable de sortie du CLF est le rapport cyclique du dévolteur ($D_{Buck}(n)$).

$$D_{Buck}(n) = 0.75 + \rho \Delta D_{Buck}(n) \quad (4.9)$$

où $\Delta D_{Buck}(n)$ représente le résultat de la défuzzification et ρ désigne un coefficient. Le rapport cyclique minimum est 0.75, ce qui correspond à une tension de 36V lorsque $E(n)=48V$. En effet la tension minimale applicable aux cellules de l'électrolyseur est 36V. Toutes les valeurs des variables sont normalisées. La dynamique des nombres varie de 0 à 1.

a2- Variables linguistiques

Les variables d'entrée sont exprimées à l'aide des variables linguistiques suivantes: grand (G), moyen (M), petit (P).

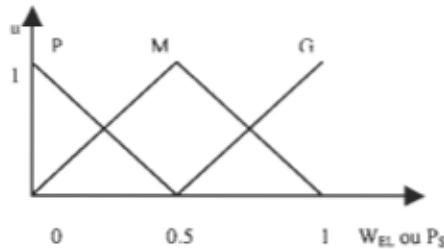
En plus des variables linguistiques mentionnées ci-dessus, la variable "Très Grand (TG)" est ajoutée pour la variable de sortie ($\Delta D_{Buck}(n)$).

À partir de ces variables linguistiques, des sous-ensembles flous seront construits: c'est la fuzzification [25].

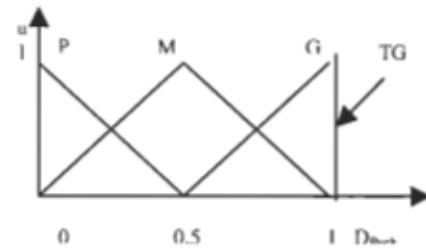
a3- Fuzzification

Il s'agit de définir les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie. C'est le passage de grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (variables floues) [29]. Pour le contrôle du SERSH, les fonctions triangulaires ont été

retenues pour définir les fonctions d'appartenance (Fig. 4.10). Le logiciel Matlab est utilisé comme plate-forme de conception et de simulation.



a- Fonctions d'appartenance de W_{EL} et P_S normalisées



b- Fonctions d'appartenance de DBuck
normalisées

Fig. 4.10: Fonctions d'appartenance des variables

D'après la Fig. 4.10, les variables linguistiques P, M et G sont représentées respectivement par les triangles $((0,0);(0,1);(0.5,0))$, $((0,0);(0.5,1);(1,0))$ et $((0.5,0);(1,1);(1,0))$. Quant à TG, elle est représentée par la droite verticale passant par l'abscisse 1 (Fig. 4.10). $\mu(x)$ représente le facteur d'appartenance de la variable x [25].

a4- Table d'inférence

Une fois la fuzzification terminée, les règles d'inférence sont élaborées. Elles sont basées sur les actions que prendrait un expert, lorsque différentes situations se présentent. Le tableau 4.4 résume toutes les règles d'inférence utilisées par les deux CLF. La lecture de la table d'inférence se fait de la manière suivante: considérons la situation décrite par l'intersection de la première ligne et de la première colonne du tableau 4.4. Si l'écart W_{EL}

entre l'énergie stockée dans les batteries et le seuil d'arrêt de l'électrolyseur est grand et que la puissance P_S disponible aux bornes des sources primaires est aussi grande, alors la sortie ΔD_{Buck} du contrôleur est très grande.

Tableau 4.4: Table d'inférence pour le CLF

| | | $W_{EL}(n) = W(n) - W_M$ (Valeur normalisée) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | G | M | P |
| $P_S(n) = I_S(n) * E(n)$ (valeur normalisée) | G | TG | G | M |
| | M | | G | M |
| | P | | M | P |

La méthode d'inférence min-max est utilisée [25].

a5- Défuzzification

La méthode de défuzzification utilisée est basée sur la détermination du centre de gravité de la figure définie par la fonction d'appartenance résultante de la sortie. En se basant sur la table d'inférence et la méthode de défuzzification énoncée ci-dessus, la représentation en trois dimensions donnant un aperçu sur les différentes combinaisons est déduite (Fig. 4.11).

Sur cette figure, les vraies valeurs du rapport cyclique du dévolteur sont affichées. ρ est fixé à 0.2439 pour que D_{Buck} soit égale à 1 lorsque ΔD_{Buck} est maximal.

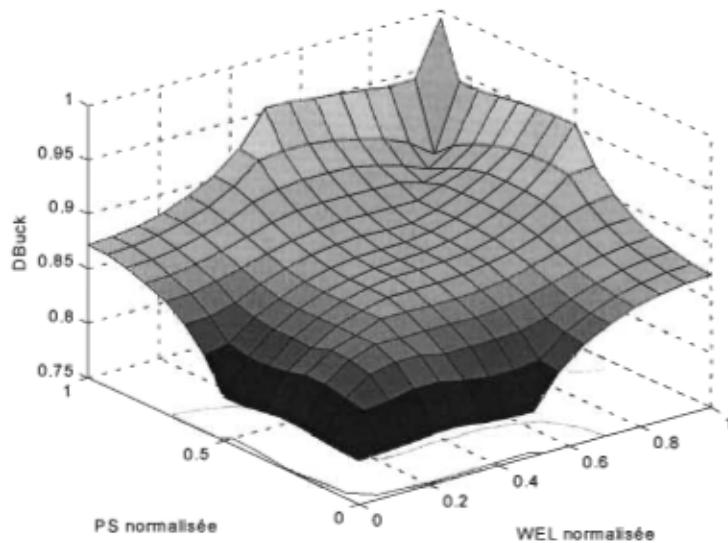


Fig. 4.11: Représentation en 3 dimensions

À travers la Fig. 4.11, on peut remarquer que la sortie du CLF sera maximale si W_{EL} et P_S (valeurs normalisées) sont égales à 1. Ceci s'interprète par le fait que s'il y a excédent énergétique ($W_{EL} \approx 1$) et que les sources primaires produisent beaucoup d'énergie ($P_S \approx 1$), alors l'électrolyseur peut fonctionner à pleine puissance. Ce raisonnement s'applique pour n'importe quel triplet (W_{EL}, P_S, D_{Buck}) .

b- Test d'une stratégie basée sur la logique floue

Lorsque la logique floue est utilisée pour moduler la puissance absorbée par l'électrolyseur et celle produite par la pile à combustible, les composantes les plus coûteuses (électrolyseur et PAC) sont utilisées adéquatement. En effet, lorsqu'on compare les Figs. 4.5, 4.9, 4.12, on

peut remarquer que seules les CLF permettent de suivre véritablement l'évolution réelle du système. Lorsqu'il y a beaucoup de vent (comme c'est le cas entre $t=150$ min et $t=250$ min lorsqu'on observe la Fig. 4.4), l'électrolyseur absorbe plus d'énergie et donc produit plus d'hydrogène. De $t=300$ min à $t=490$ min, l'écart entre $W(t)$ et W_M se réduit. Le CLF diminue progressivement la puissance absorbée par l'électrolyseur afin de ne pas trop affecter l'énergie disponible pour la charge. De $t=500$ min à $t=675$ min, seul le niveau de puissance de l'éolienne (Fig. 4.4) entraîne la production réelle de l'hydrogène, préservant ainsi l'énergie des batteries.

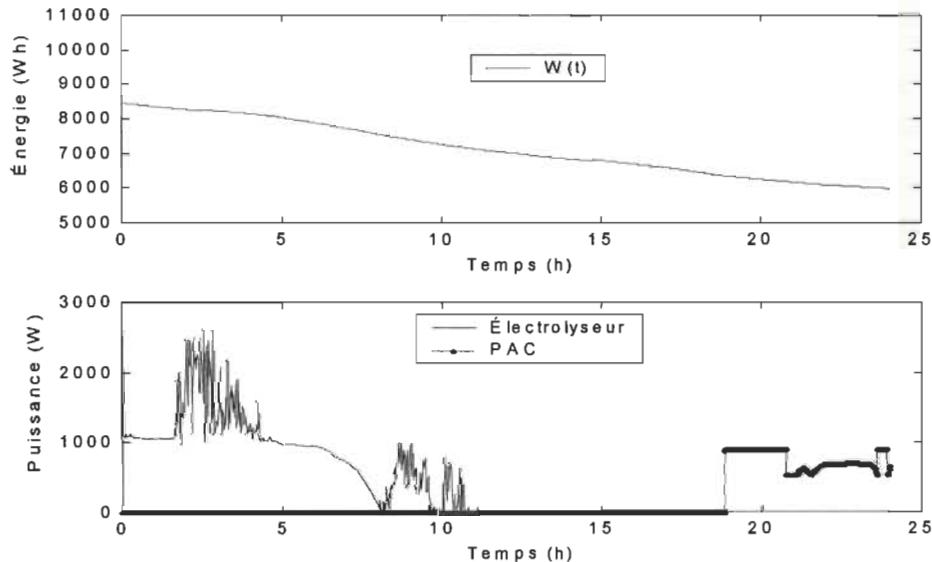


Fig. 4.12: $W(t)$, puissance consommée par l'électrolyseur, puissance produite par la PAC, lorsque les CFL sont utilisés

Entre $t=1200$ min et $t=1380$ min (Fig. 4.2), la demande énergétique de la charge a diminué. Le CLF de la PAC et du survolteur réduit alors la production de l'énergie électrique (Fig. 4.12) pour économiser l'hydrogène.

Avec une stratégie basée sur la double hystéresis et la logique floue, la chaîne de production et d'utilisation de l'hydrogène est efficacement utilisée en régime dynamique.

CHAPITRE V

ÉTUDE COMPARATIVE DES STRATÉGIES DE CONTRÔLE D'UN SYSTÈME À ÉNERGIE RENOUVELABLE

5.1 Introduction

Ce chapitre a pour objet d'approfondir l'étude sur les trois méthodes de contrôle que nous avons abordées dans le précédent chapitre. Cette étude permet de les comparer en mesurant leurs impacts sur les performances globales du SERSH. La comparaison nécessite des critères. C'est pourquoi dans un premier temps, nous définissons les critères de comparaison. Ces derniers ne sont pas faciles à cerner car dans la littérature peu de travaux portent sur des études comparatives des méthodes de gestion de SERSH. L'étude faite par Vosen [3] a pour objet d'optimiser le contrôle de SERSH en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette étude révèle une faiblesse due au fait que la performance d'un tel système dépend du processus d'apprentissage du RNA. Ainsi pour garantir la performance désirée, les conditions climatiques sont supposées se répéter d'une année à l'autre. Ce qui n'est pas réaliste.

Dans un deuxième temps, nous procédons à l'étude comparative afin de mettre en lumière les forces et les faiblesses de chacune des trois méthodes de contrôle de SERSH. Pour ce faire nous utilisons le même scénario pour tester chaque algorithme. La troisième partie de ce chapitre concerne l'analyse des résultats de simulation et quelques commentaires.

5.2 Définition des critères de performances

5.2.1 Efficacité de régulation de la puissance

Revenons encore une fois à la mission principale d'un SERSH. Dans un tel système, la variable de contrôle $W(t)$ varie en fonction de l'état du système. L'objectif du système de contrôle du SERSH est de permettre à la charge de disposer d'autant d'énergie qu'elle le désire. Ceci revient à s'assurer qu'à chaque instant, $W(t)$ se trouve dans la zone d'opération sécuritaire (Fig. 4.1). Cette contrainte se traduit par la relation:

$$W_L \leq W(t) \leq W_H, \quad (5.1)$$

où W_L est le seuil minimum prédéfini qui signale qu'il manque d'énergie dans le système. C'est en ce moment que la PAC est mis en marche. W_L est le seuil prédéfini signalant un excédent d'énergie. Partant de la relation 5.1, nous pouvons définir l'aptitude d'un algorithme de contrôle à remplir cette relation comme étant un critère de performance. Considérons maintenant l'évolution de $W(n)$ (signal $W(t)$ échantillonné; n variant de 0 à N) pendant la période de simulation. Supposons que W_{HL} est la somme de toutes les valeurs de $W(n)$ ne remplissant pas la condition 5.1 et que W_T est la somme de toutes les valeurs de $W(n)$, sans exception. Le coefficient de performance (COP) dérivé de la relation 5.1 est alors défini par:

$$COP = 1 - \frac{W_{HL}}{W_T}. \quad (5.2)$$

Le COP tel que défini, indique la proportion d'énergie respectant la relation 5.1. L'algorithme de contrôle qui donne un COP proche de 1 est le plus efficace et le plus performant.

5.2.2 Rendement du SERSH

Le SERSH est avant tout un système de transformation d'énergie. En effet, l'énergie mécanique du vent ou l'énergie solaire sont transformées en électricité puis stockée sous forme d'hydrogène. Pour évaluer l'efficacité de transformation d'énergie, nous définissons un rendement énergétique η_E de la façon suivante:

$$\eta_E = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (P_{P,el}(n) + P_{P,FC}(n))}{\sum_{n=1}^N (P_S(n) + W_0 + W_{H20})} \quad (5.3)$$

où

$P_{P,el}(n) = (1 - \eta_{l,el}) I_{el}(n) U_{el}(n)$ représente la puissance perdue lors de la transformation de l'électricité en hydrogène.

$P_{P,FC}(n) = (1 - \eta_{l,FC}) I_{FC}(n) U_{FC}(n)$ représente la puissance perdue lors de la transformation de l'hydrogène en électricité.

P_S est la puissance produite par les sources primaires, W_0 est l'énergie initiale des batteries et W_{H20} représente l'énergie initialement stockée sous forme d'hydrogène.

Une stratégie de contrôle est efficace si le COP et η_E sont élevés. Les éléments suivants ne sont pas pris en compte dans l'évaluation des pertes de transformation d'énergie:

- l'énergie utilisée par le compresseur de la PAC;
- l'énergie utilisée par le compresseur de l'électrolyseur;
- les purges sur l'électrolyseur et la PAC;
- l'énergie consommée par toute l'instrumentation du SER.

Ces éléments sont actuellement en cours d'évaluation par d'autres chercheurs de l'IRH.

5.2.3 Durée de vie des composantes les plus coûteuses

Un autre facteur important intervient dans la mise en œuvre du SERSH: le nombre de cycles d'opération ($N_{C,el}$ ou $N_{C,FC}$) des composantes les plus coûteuses (électrolyseur et PAC). En effet leurs durées de vie sont, dans la majorité des cas, liées au nombre de cycles de fonctionnement. Une bonne stratégie de contrôle ménage ces composantes afin de réduire au minimum possible le nombre de fois qu'ils sont mis en marche. Dans [3], la durée de vie des composantes constitue un critère de performance important.

5.3 Scénario de test

Les trois stratégies de contrôle participent au même scénario de test. La puissance nette produite par les sources primaires et la puissance consommée par la charge, constituent les signaux d'entrée de la simulation. La durée de simulation représente un temps d'opération du SERSH d'une journée. Pour le même scénario, les valeurs des paramètres W_L et W_H sont modifiées plusieurs fois pour faire ressortir l'effet de la réduction de l'autonomie des

batteries. D'après les capacités des batteries, le SERSH peut satisfaire aux besoins énergétiques de la charge pendant un temps limité. Ceci se traduit par le rapprochement des valeurs de seuils W_L et W_H (relation 5.1). Si nous supposons que ε représente l'écart normalisé en les deux seuils, alors :

$$\varepsilon = \frac{W_H - W_L}{W_{\max}} \quad (5.4)$$

Lorsque ε tend vers 0 (régime de commutation rapide de la PAC et de l'électrolyseur), alors l'effet des batteries sur le SERSH est négligeable.

5.4 Résultats des simulations

Le tableau 5.1 présente les résultats des simulations pour 5 scénarios différents. Tous les paramètres des modèles sont identiques à ceux déjà mentionnés.

Tableau 5.1: Résultats de simulation

| $\varepsilon(\%) = \frac{W_h - W_l}{W_{\max}}$ | Double hystérésis | | | Double hystérésis et PI | | | Double hystérésis et logique floue | | |
|--|-------------------|----------|-----------------------|-------------------------|----------|-----------------------|------------------------------------|----------|-----------------------|
| | COP | η_E | $N_{C,el} / N_{C,FC}$ | COP | η_E | $N_{C,el} / N_{C,FC}$ | COP | η_E | $N_{C,el} / N_{C,FC}$ |
| 0.5 | 0.9847 | 0.8589 | 1 | 0.9835 | 0.8558 | 1 | 0.9812 | 0.8582 | 1 |
| | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 0.4 | 0.9841 | 0.8535 | 2 | 0.9828 | 0.8474 | 2 | 0.9804 | 0.8544 | 2 |
| | | | 0 | | | 1 | | | 1 |
| 0.3 | 0.9834 | 0.8432 | 2 | 0.9821 | 0.8411 | 4 | 0.9795 | 0.8512 | 2 |
| | | | 1 | | | 1 | | | 0 |
| 0.2 | 0.9827 | 0.8343 | 4 | 0.9814 | 0.8426 | 3 | 0.9786 | 0.8433 | 4 |
| | | | 2 | | | 1 | | | 1 |
| 0.1 | 0.9819 | 0.8153 | 10 | 0.9806 | 0.8244 | 9 | 0.9777 | 0.8267 | 8 |
| | | | 6 | | | 5 | | | 5 |
| 0.05 | 0.9816 | 0.7768 | 26 | 0.9802 | 0.8109 | 20 | 0.9773 | 0.8042 | 20 |
| | | | 23 | | | 13 | | | 16 |
| 0.01 | - | - | - | - | - | - | 0.9769 | 0.7325 | 74 |
| | | | | | | | | | 76 |

5.5 Analyse des résultats de la simulation

L'analyse des résultats est faite en fonction des trois critères prédéfinis: COP, η_E , le nombre de cycles de fonctionnement pour la PAC et l'électrolyseur ($N_{C,FC}$, $N_{C,el}$).

5.5.1 Comparaison des COP

Lorsque ε est très faible, le contrôle avec la double hystérésis et le contrôle avec PI ne donne pas de bons résultats (dernière ligne du tableau 5.1). Pour expliquer ce résultat, considérons le cas où l'électrolyseur est mis en marche. Au démarrage, il absorbe sa pleine

puissance. Ceci crée un déséquilibre car la puissance absorbée par l'électrolyseur s'additionne à celle absorbée par la charge. S'il n'y a pas de production suffisante d'énergie, les batteries se déchargent rapidement et le seuil W_M est vite atteint. Par contre la logique floue est capable de gérer une pareille situation. En effet, avant de démarrer l'électrolyseur, le contrôleur évalue la production réelle d'énergie des sources primaires. Si elle est appréciable, le contrôleur met l'électrolyseur en marche à pleine capacité. Sinon, il calcule la puissance que l'électrolyseur peut absorber sans pour autant déranger le bon fonctionnement du système.

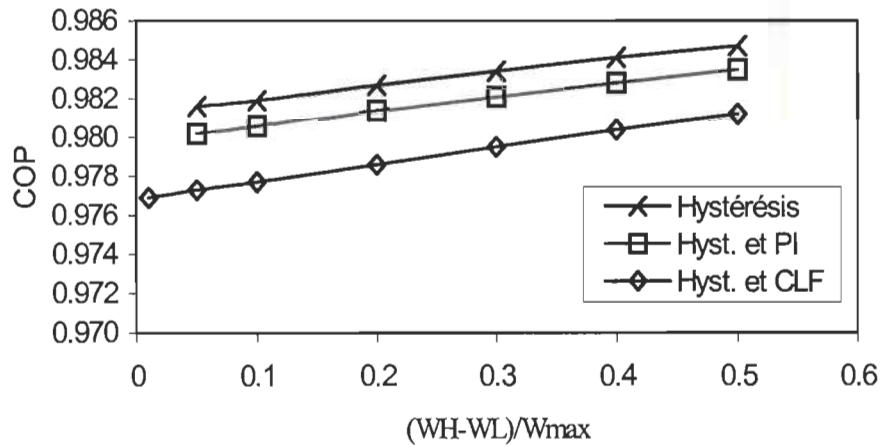


Fig. 5.1 : Comparaison des COP

Lorsque les seuils de commutation sont éloignés (c'est le cas pour un fonctionnement à long terme du SERSH), la stratégie de commande basée sur la double hystérésis permet d'obtenir un coefficient de performance meilleur par rapport aux autres stratégies (Fig. 5.1). C'est l'une des raisons qui rend ce type de contrôle populaire dans l'implantation réelle des SERSH.

5.5.2 Comparaison des rendements

Étant donné que les deux premières stratégies sont limitées par ϵ , le rendement est très faible quand ϵ tend vers 0. La stratégie basée sur la commande avec la logique floue, en plus d'être capable de fonctionner avec de petites valeurs de ϵ , permet d'obtenir un rendement d'énergie légèrement supérieur aux autres méthodes (Fig. 5.2).

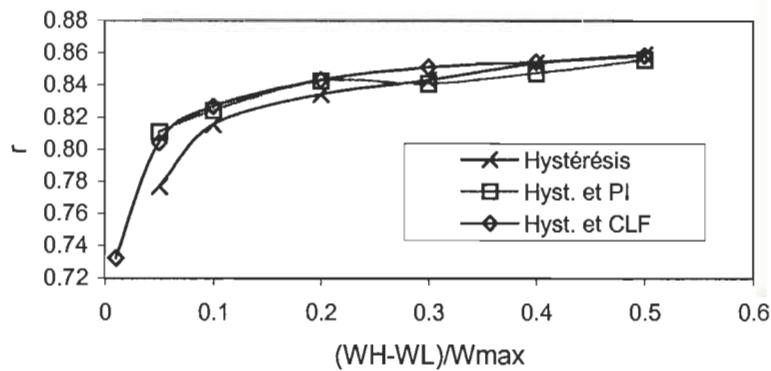


Fig. 5.2 : Comparaison des rendements de transformation de l'énergie

5.5.3 Comparaison du nombre de cycles d'opération

La durée de vie de l'électrolyseur et de la PAC dépend de leur temps d'opération et surtout du nombre de fois qu'ils ont décrit la séquence «marche - arrêt» [3]. Les stratégies de contrôle, pour être performantes, ménagent l'électrolyseur et la PAC. Pour étudier l'incidence des trois stratégies de contrôle sur la durée de vie des équipements les plus

coûteux du SERSH, nous procémons à l'analyse séparée du nombre de cycle de fonctionnement.

5.5.3.1 Comparaison du nombre de cycles d'opération pour l'électrolyseur

La Fig. 5.3 montre que dans le cas d'un scénario aléatoire, le nombre de cycle d'opération de l'électrolyseur décroît exponentiellement quand ε croît. Ceci indique que pour prolonger sa durée de vie, il faudrait fixer une valeur de ε assez raisonnable (pas trop petite, pas trop grande). Un critère d'optimisation est utilisé pour déterminer le meilleur compromis entre la capacité de batterie (représentée indirectement par ε) et la puissance absorbée par l'électrolyseur.

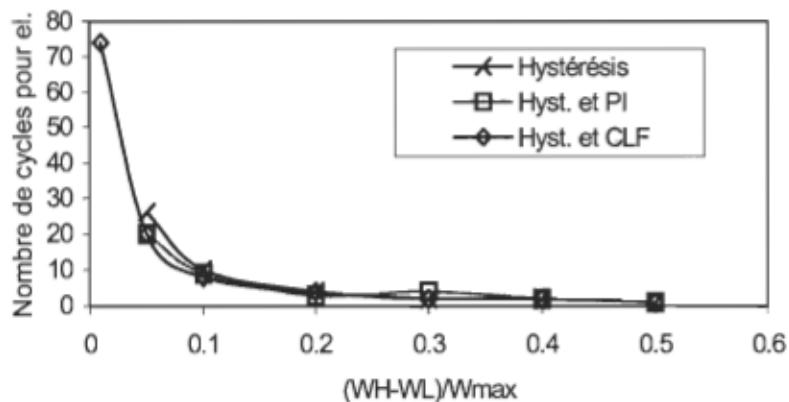


Fig. 5.3 : Comparaison du nombre de cycles d'opérations pour l'électrolyseur

Les trois stratégies de contrôle donnent des résultats semblables. Mais la stratégie basée sur le CLF permet de fonctionner à très faibles valeurs de ε (régime dynamique).

5.5.3.2 Comparaison du nombre de cycles d'opération pour la PAC

Les remarques faites plus haut s'applique également pour la pile à combustible. Encore une fois, en commutation non rapide des composantes coûteuses, les trois stratégies sont équivalentes. En commutation rapide, le CLF permet d'obtenir des résultats acceptables.

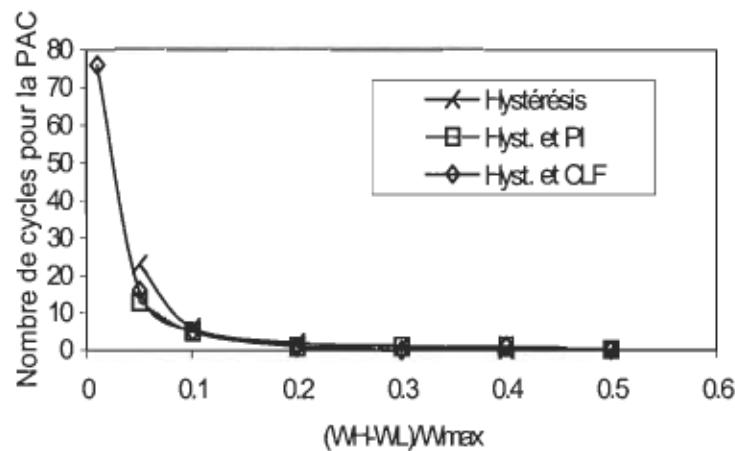


Fig. 5.4 : Comparaison du nombre de cycles d'opérations pour la PAC

Il apparaît, après cette étude, que les trois stratégies de contrôle sont équivalentes. Le contrôle par la double hystérésis est simple et efficace, lorsque le SERSH fonctionne à long terme. La stratégie basée sur les PI est limitée par les grandes variations de puissance sur le bus. En pratique, elle est difficile à appliquer. Le contrôle avec la logique floue est plus compliqué à implanter mais permet au système de fonctionner en régime dynamique.

CHAPITRE VI

RESULTATS EXPÉIMENTAUX ET DISCUSSION

6.1 Introduction

Plusieurs expériences ont été faites dans le but de tester la stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis sous deux aspects: (i) la validité de contrôle (séquences de commutation) sans la production des sources primaires, (ii) la stabilité de l'algorithme en présence de fortes perturbations de puissance sur le bus CC. Dans ce chapitre, quelques résultats expérimentaux seront présentés et analysés. Une discussion sur les stratégies de contrôle est également exposée.

6.2 Contexte expérimental

L'accent est mis sur la mise en opération du banc d'essais en mode dynamique (commutations rapprochées de l'électrolyseur et de la pile à combustible), sans pour autant permettre l'oscillation des composantes, afin de faire ressortir les effets transitoires du système et tester la stabilité de l'algorithme de contrôle implanté.

La stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis a été implantée. Ce choix est justifié par le fait qu'elle sert de base aux deux autres stratégies énoncées dans le chapitre 5. La stratégie utilisant le CLF pourrait être implantée pendant la phase d'optimisation du

système. Le logiciel Bridgeview a servi de plate forme d'instrumentation de tout le système. Une version du système de contrôle a été également réalisée en assembleur sur microcontrôleur. Dans les prochaines sections, nous allons successivement traiter de l'implantation du contrôle de la double hystérésis en Bridgeview et dans un microcontrôleur de type MC68HC811.

6.3 Implantation de la stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis.

6.3.1 Organigramme du système de contrôle

L'explication détaillée de l'organigramme (Fig. 6.1) est présentée en annexes I. Le programme de contrôle débute avec une routine d'initialisation des paramètres dont les plus importants sont:

- l'environnement de sauvegarde (création ou ouverture de fichier, test de l'intégrité du système de sauvegarde automatique, écriture de l'entête des données à sauvegarder);
- les SOC pour la pile à combustible et l'électrolyseur;
- les niveaux de puissance de fonctionnement de la PAC et de l'électrolyseur;
- l'énergie stockée dans les batteries.

L'évaluation de l'état du système est faite en lisant via le port RS232 de l'ordinateur, la tension et le courant des batteries. Cet ordinateur est relié par une connexion RS232 à un module appelé VCS10 qui contrôle la charge et la décharge des batteries et sert de système de protection contre les surtensions en provenance de l'éolienne. Le VCS10 effectue

l'acquisition de données (courant, tension) sur le bus CC. Une fois que l'état du système est évalué, l'algorithme de la double hystérésis est utilisé pour déterminer les actions appropriées à prendre (mis en marche de l'électrolyseur ou la pile). Les signaux nécessaires pour analyser l'évolution du système sont échantillonnés et sauvegarder.

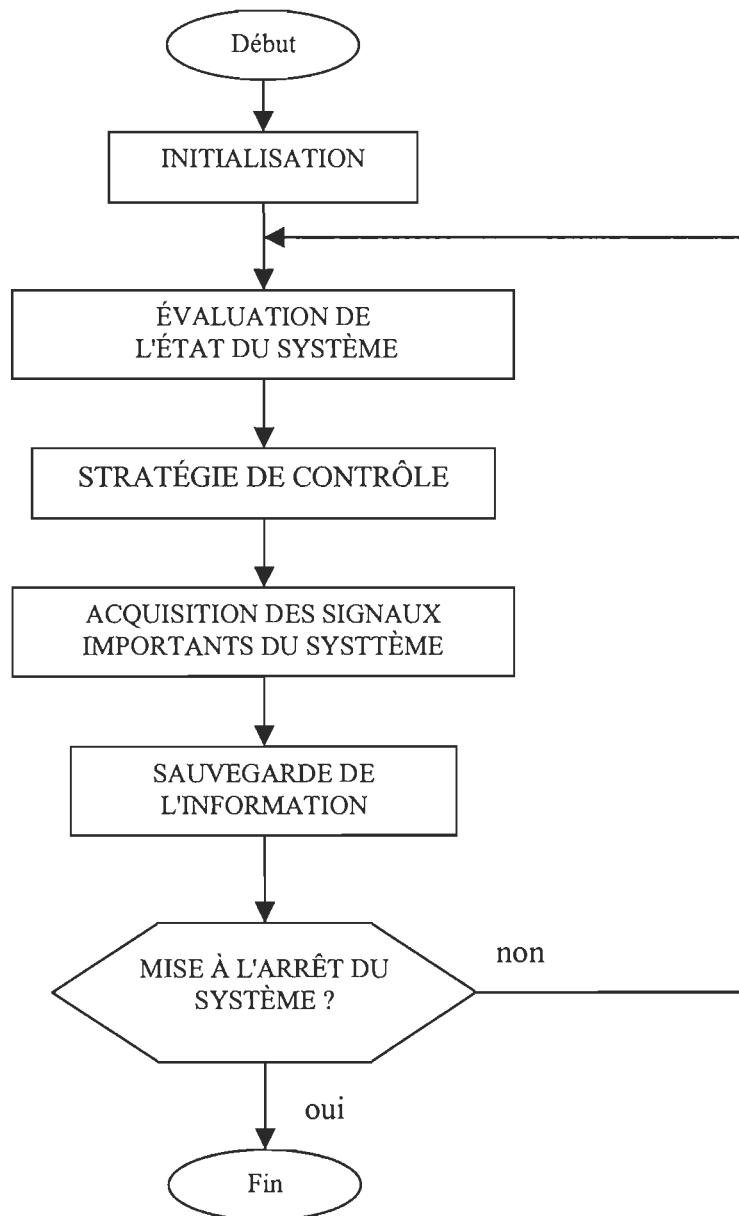


Fig. 6.1: Organigramme de haut niveau pour le contrôle du banc d'essais

6.3.2 Conditions d'opération

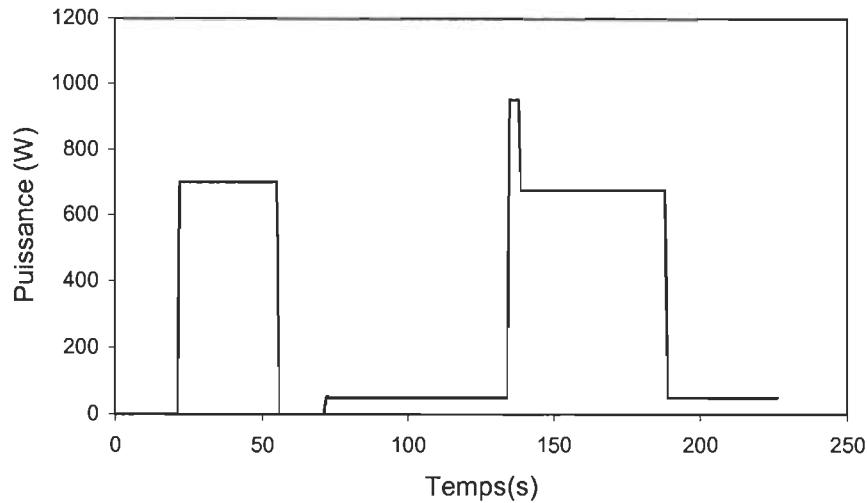


Fig. 6.2: Profil de charge utilisé

Le profil de charge utilisé est représenté sur la Fig. 6.2. Initialement les batteries sont complètement chargées ($W_0=W_{\max}=42240\text{Wh}$). La production de puissance en provenance des sources primaires est nulle. Le survolteur et le dévolteur sont respectivement configurés pour fonctionner avec des puissances moyennes en sortie de 625W et de 500W. Ces valeurs ont été fixées compte tenu de la puissance absorbée par la charge (Fig. 6.2). La stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis est utilisée pour contrôler le système.

La quantité d'hydrogène initialement stockée est suffisamment grande pour répondre aux besoins de la pile pendant sa mise en opération. Les résultats d'opération sont présentés à la Fig. 6.3.

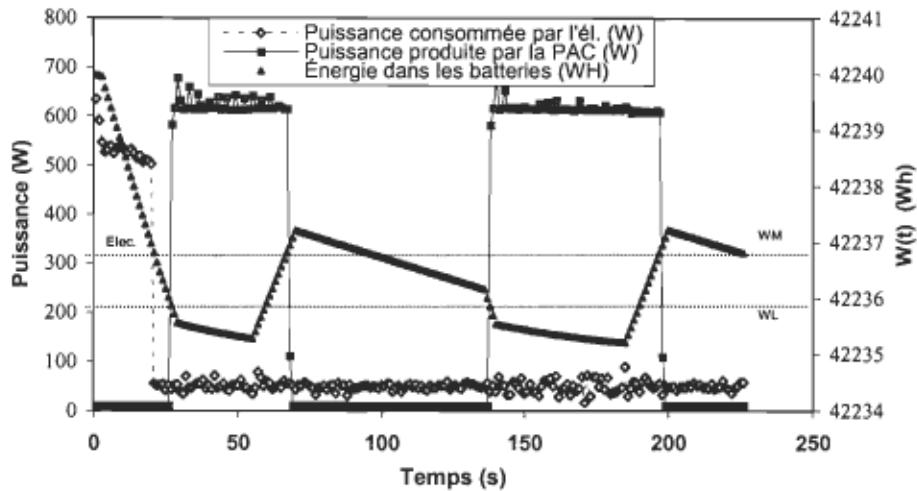


Fig. 6.3: Exemple d'opération du SER

6.3.3 Analyse des résultats et discussion

Quelques fractions de seconde après le démarrage du SER, l'électrolyseur est mis en marche (Fig. 6.3). De $t=1\text{s}$ à $t=22\text{s}$, $W(t)$ décroît quasi linéairement (la puissance absorbée par l'électrolyseur et la charge en régime permanent est presque constante) jusqu'à atteindre le seuil critique défini par W_M (comme indiqué sur la Fig. 6.3). De son côté, la PAC est mise en marche deux fois pendant toute la durée de l'opération. Nous voulons, à travers cette expérience valider encore une fois le modèle (la première validation ayant été présentée au chapitre III). Pour ce faire, nous avons simulé tout le système avec les conditions de l'expérience. La Fig. 6.4 compare les profils mesurés et prédits par les modèles de la variable de contrôle $W(t)$.

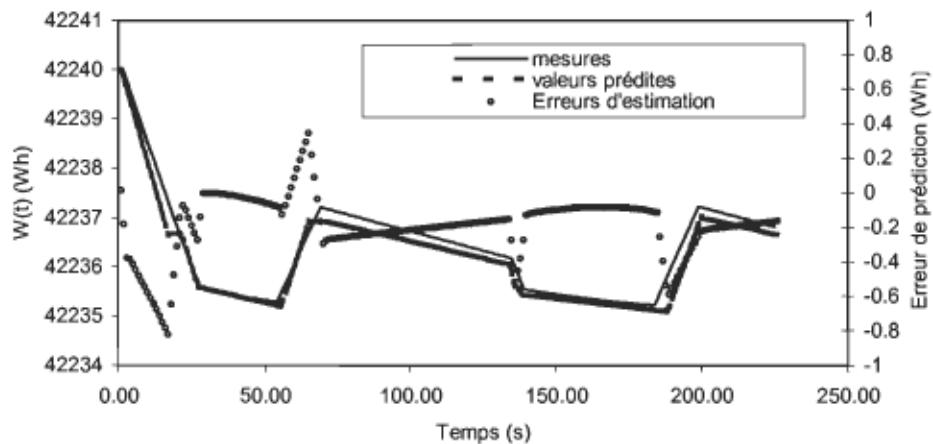


Fig. 6.4: Comparaison mesures-estimations de la variable de contrôle ($W(t)$)

Nous remarquons que l'erreur moyenne d'estimation ou de prédiction de $W(t)$ est inférieure à 1%, ce qui est acceptable. Ce résultat prouve que le modèle établi est réaliste. Mais il ne prouve pas que le système fonctionne bien quand il y a de grandes variations de puissance sur le bus CC. C'est pourquoi nous faisons, dans la section suivante, l'expérimentation lorsque l'éolienne produit beaucoup d'énergie.

6.4. Stabilité du SER contrôlé avec la stratégie basée sur la double hystérésis.

6.4.1 Conditions d'opération

Les conditions d'opération restent pratiquement les mêmes que celles présentées à la section précédente. Le bilan de puissance du bus CC à chaque instant est représenté sur la première partie de la Fig. 6.5.

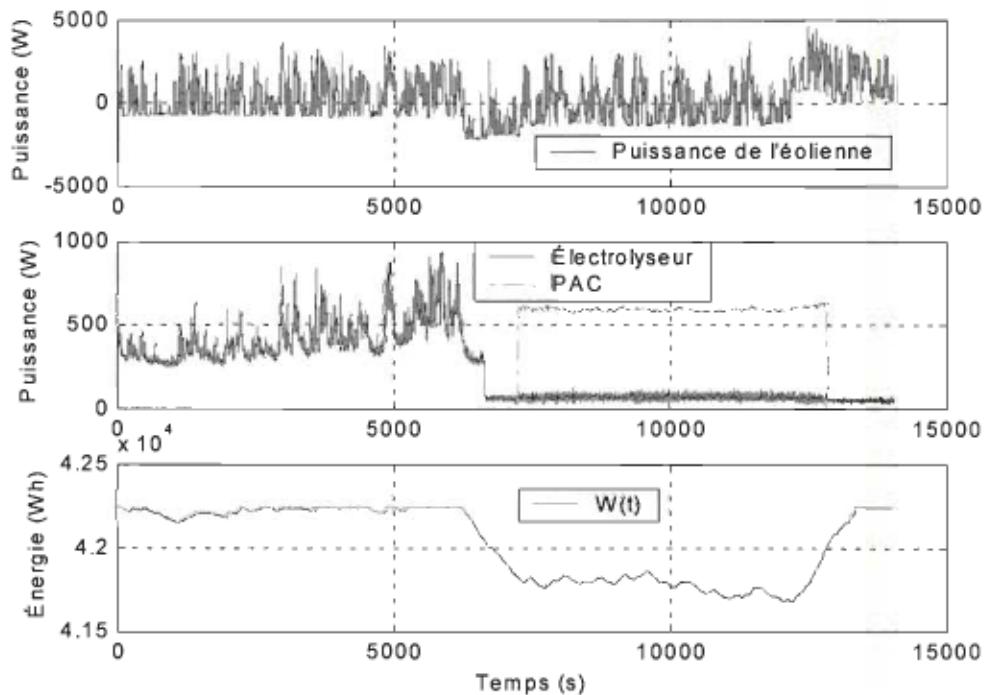


Fig. 6.5: Mesures expérimentales pour le test de stabilité du SER

6.4.2 Analyse des résultats et discussion

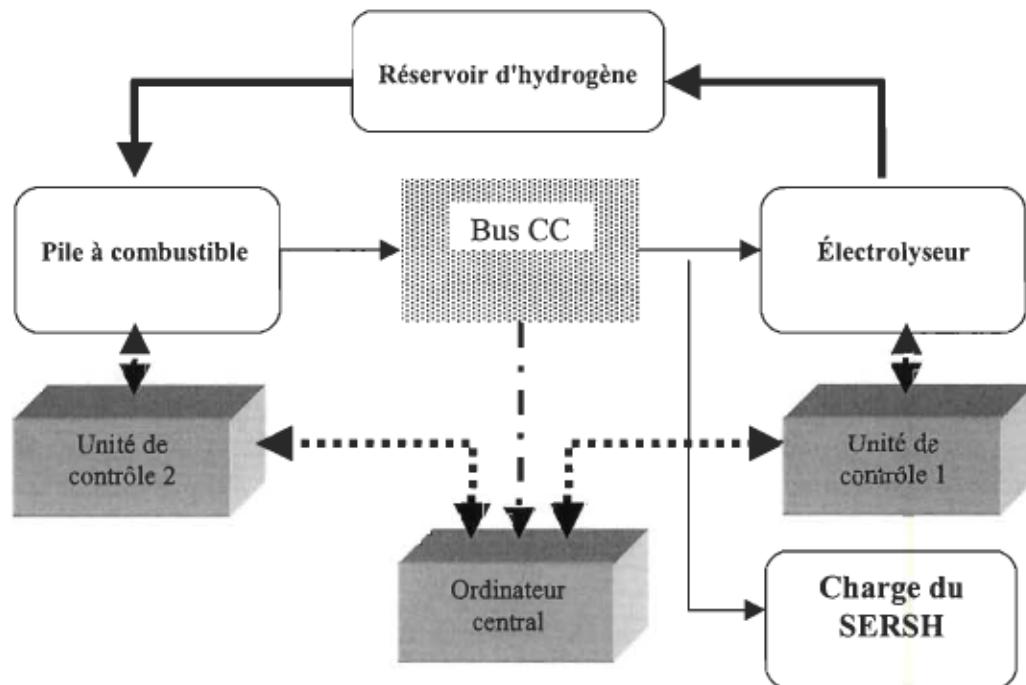
Malgré la présence de fortes variations de puissance, les séquences marche-arrêt de l'électrolyse et de la PAC ne se chevauchent pas. Ce résultat témoigne de la stabilité du programme de contrôle en présence de fortes perturbations sur le bus CC. Les décisions de démarrer ou d'arrêter la pile ou l'électrolyseur sont uniquement basées sur $W(t)$.

6.5. Aperçu sur le programme réalisé en Assembleur avec un microcontrôleur.

Le système de contrôle et le système d'Instrumentation du banc d'essais utilisent des technologies éprouvées (Labview ou Bridgeview, cartes de National Instrument). Pour minimiser les coûts de développement, advenant une mise en marché réelle du concept, il est préférable de réduire au minimum possible le nombre d'instruments utilisés pour la mise en opération. Une partie importante du système étant constituée de l'ordinateur central et des unités de contrôle de la pile et de l'électrolyseur (Fig. 6.6), ils sont remplacés par des modules simples, conçus autour de microcontrôleur.

Dans ce projet de maîtrise, nous nous intéressons à l'implantation de l'algorithme basé sur la double hystérésis dans un microcontrôleur de type 68HC811 pour remplacer l'ordinateur central. Le microcontrôleur central (à la place de l'ordinateur central de la Fig. 6.6) évalue l'état du système en se basant sur l'énergie stockée dans les batteries. Au démarrage du programme du microcontrôleur, il a besoin de connaître l'énergie initiale des batteries. Cette information est soit fourni par un opérateur ou fixée d'avance dans le programme. Nous avons opté pour la seconde méthode, dans la présente implémentation. Ce choix est motivé par le soucis de rendre le système de contrôle moins dépendant de l'intervention humaine. Une autre alternative intéressante consiste à indiquer les paramètres initiaux tels que l'énergie des batteries et les SOC à l'aide d'un terminal.

Une fois que le microcontrôleur a évalué l'état du système au complet, il démarre l'électrolyseur en envoyant une consigne à travers un de ces ports ou il démarre la pile.



Légende:

- Parcours de l'hydrogène
- Circuit de la puissance électrique
- Circuit de contrôle
- Estimation de l'état du système

Fig. 6.6: Instrumentation du banc d'essai sur les SER à l'IRH

6.5.1: Organigramme détaillé du programme en assembleur

L'organigramme est présenté à la Fig. 6.7. Le programme assembleur figure à l'annexe II.

La lecture des informations sur le bus CC par le microcontrôleur central se fait à l'aide

d'une interface comportant un port série RS-232. Ces informations recueillies sont décodées et enregistrées en mémoire. Les deux données utilisées à l'intérieur du paquet en provenance du port RS-232 sont le courant $I_B(n)$ et la tension $U_B(n)$. À partir du produit de ces valeurs, la puissance à l'entrée des batteries est calculée. Cette puissance peut avoir des valeurs positives ou négatives (une valeur négative indique que les batteries sont en train de se décharger). Pour calculer l'énergie des batteries, leur état initial est d'abord estimé et enregistré dans le microcontrôleur. L'éq. 6.1 est ensuite utilisée pour approximer ($W(n)$).

$$W(n) = W(n-1) + I_B(n)U_B(n)\Delta t, \quad (6.1)$$

où Δt représente le pas d'intégration qui est de 1s dans notre cas. Durant Δt , la puissance à l'entrée des batteries est supposée constante. $W(n)$ étant exprimée en watt-heure, la puissance mesurée est divisée par 3600. Une fois que $W(n)$ est évaluée, le programme, basé sur l'algorithme de la double hystérésis, décide de démarrer l'électrolyseur ou la pile à combustible. Les variables `Etat_El` et `Etat_FC` servent respectivement à enregistrer l'état courant de l'électrolyseur et de la PAC. Elles prennent la valeur 0, lorsque les composantes ne sont pas mises en marche et 1 dans le cas contraire. Les consignes en provenance du microcontrôleur central sont envoyées aux dévolteur et survolteur à travers les ports parallèles B et C. Ces consignes sont en réalité des octets variant entre 127 et 255. 127 est la consigne d'arrêt, tandis qu'un octet de valeur supérieure 128 indique la mise en marche du survolteur ou du dévolteur. La puissance de fonctionnement dépend de cette valeur. Ainsi, pour l'électrolyseur par exemple, une consigne dont l'octet vaut 255 indique un fonctionnement à pleine puissance.

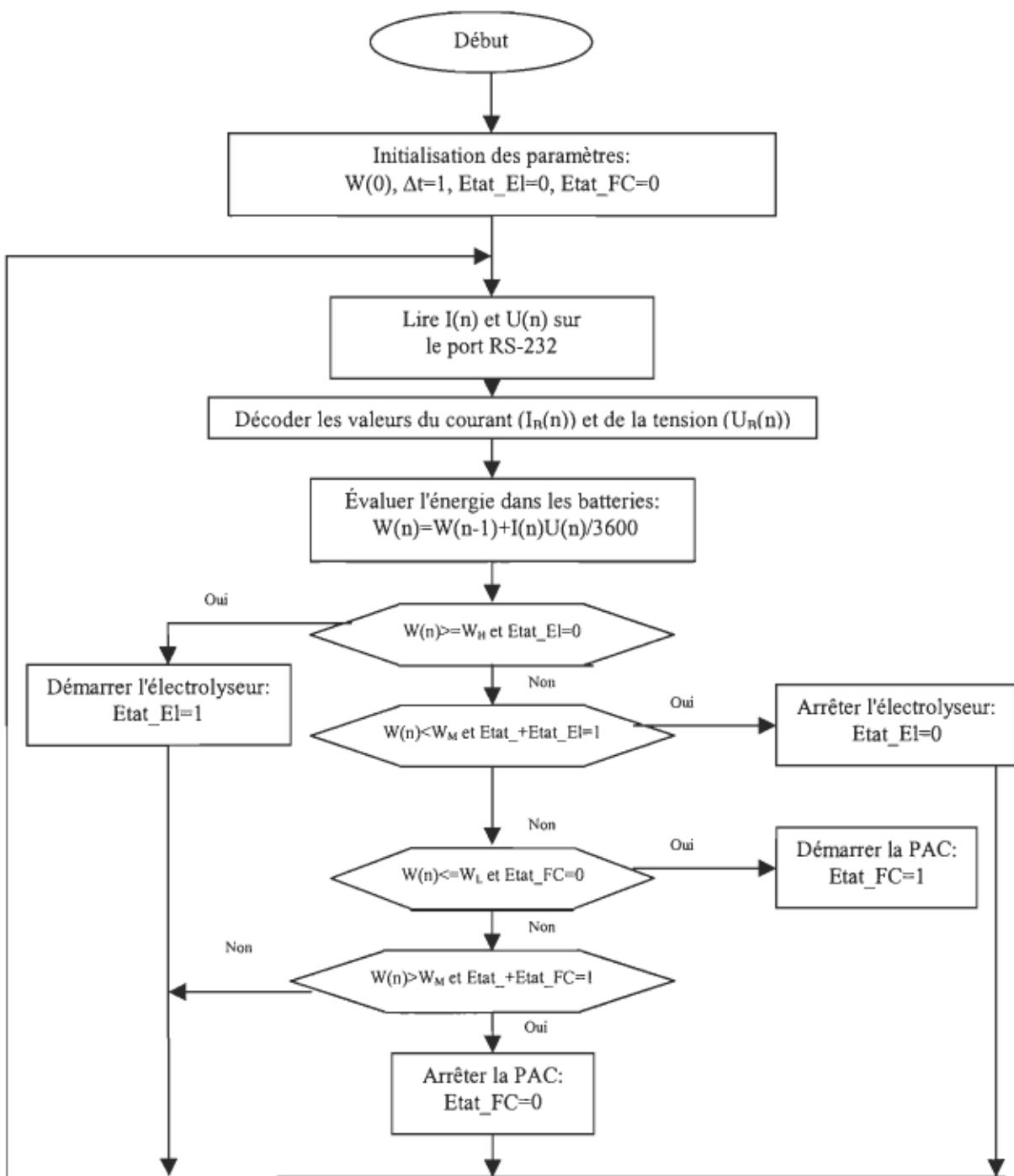


Fig. 6.7: Organigramme pour l'implantation du contrôle par hystérésis dans un microcontrôleur

CHAPITRE VII

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions

Les objectifs fixés dans le cadre de ce projet de recherche ont été tous atteints. Ils concernent l'élaboration d'une stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène (SERSH). Pour atteindre ces objectifs nous avons analysé et modélisé la commande multiphasée du survoltateur de tension (entre la pile à combustible et le bus CC) afin de démontrer les avantages d'une telle architecture par rapport aux architectures conventionnelles. Nous avons aussi développé un modèle complet du banc d'essais de l'IRH sur les SERSH. À partir de ce modèle, trois stratégies de contrôles ont été analysées et comparées. Nous avons alors choisi et implanté la stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis. Tout ce travail a été validé par les expérimentations.

Avant de commencer notre projet de recherche, nous avons effectué une étude bibliographique qui a permis d'identifier les différentes méthodes de contrôle d'un système tel que celui de l'IRH sur les énergies renouvelables. Afin d'étudier les stratégies retenues dans le cadre de ce projet, nous avons modélisé les différentes composantes du SERSH: les batteries, l'électrolyseur, la pile à combustible, le survoltateur et le dévolteur. Les sources primaires (éolienne et panneaux solaires) sont représentées par des signaux échantillonnés. Les modèles développés sont validés à l'aide d'expériences menées sur le banc d'essais de

l'IRH. Il ressort de l'analyse et de la comparaison des résultats de simulation et expérimentaux que ces modèles sont réalistes. Les écarts observés sont pour la plupart inférieurs à 10%.

À partir de ces modèles, nous avons élaboré un scénario afin de démontrer comment ils peuvent prédire efficacement le comportement d'un SERSH. Le contrôle par la double hystérésis, par des contrôleurs PI ou par des contrôleurs à logique floue sont les trois stratégies de contrôle qui ont retenu notre attention.

La stratégie de contrôle basée sur la double hystérésis permet de gérer les séquences de mise en "marche-arrêt" de l'électrolyseur et de la pile. La puissance de fonctionnement n'est pas directement contrôlée. Pour réguler la puissance, nous avons étudié la possibilité d'introduire deux contrôleurs de type PI; chaque contrôleur est destiné à asservir la puissance du survolteur ou du dévolteur. Cette façon de contrôler le SERSH n'est pas indiquée, lorsque la puissance sur le bus CC fluctue beaucoup. La dernière stratégie étudiée utilise la double hystérésis pour gérer les séquences de mise en opération de l'électrolyseur et de la pile et deux contrôleurs à logique floue (CLF) pour moduler les puissances de fonctionnement. L'asservissement de la puissance de l'électrolyseur avec un CLF permet de prendre en compte l'énergie réellement disponible au niveau des sources primaires, lorsqu'il y a un excédent énergétique dans le système. De son côté, le contrôle de la puissance de la pile avec un CLF permet de tenir compte des besoins réels de la charge du SERSH. Ce type de contrôle, d'après notre analyse théorique, convient au mode de fonctionnement dynamique du SERSH. C'est un mode de fonctionnement dans lequel les seuils de contrôle des séquences "marche-arrêt" sont rapprochés.

En ce qui concerne l'aspect pratique de ce projet, nous avons implanté la stratégie basée sur la double hystérésis sur le banc d'essais de l'IRH en utilisant le logiciel Bridgeview 2.0 comme plate-forme de développement. À l'aide de ce programme de contrôle, plusieurs expériences ont été menées dont deux sont présentées dans ce mémoire. Dans le premier exemple, l'accent a été mis sur la validation des cycles de fonctionnement de l'électrolyseur et de la PAC conformément à un scénario que nous avons élaboré. Lors de la deuxième phase d'opération du SERSH, l'objectif a été de tester la stabilité du SERSH en présence de fortes variations de puissance sur le bus CC. L'exemple d'opération présenté démontre que la logique implantée garantit la stabilité du SERSH si les seuils de commutation de l'électrolyseur et de la PAC ne sont pas trop rapprochés.

7.2 Recommandations

Suite à notre étude sur les systèmes à énergie renouvelable en général et ceux utilisant l'hydrogène comme vecteur énergétique, nous formulons les recommandations suivantes:

- les mesures de performance à long terme sont actuellement en cours d'exécution. Nous suggérons de les poursuivre et d'évaluer le rendement de tout le système sous diverses conditions d'opération.
- à partir des mesures effectuées pour le fonctionnement à long terme du SERSH, nous proposons de déterminer les conditions optimales d'opération du système. Ceci permet d'améliorer la stratégie de contrôle afin de la rendre beaucoup plus performante.

- Nous suggérons d'optimiser les paramètres des composantes du SERSH (les puissances nominales de l'électrolyseur, de la pile à combustible, de l'éolienne, des panneaux solaires, le nombre de batteries) en fonction d'une étude technico-économique.
- Pendant la phase d'optimisation, nous proposons d'utiliser par exemple l'algorithme génétique pour trouver la meilleure combinaison entre les caractéristiques des composantes du SERSH.

VIII. BIBILOGRAPHIE

- [1] http://www.amisdelaterre.org/publications/publications_4.html#mecanisme.
- [2] <http://www.mygale.org/voutay/meteo/effetdes.html>.
- [3] S.R. vosen, JO Keller, " Hybrid energy storage system for stand-alone electric power systems: optimisation of system performance and cost through control strategies", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 24, pp 1139-1156,1999.
- [4] Z. Salameh, F. Dagher, W.A. Lynch, "Step-Down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System", Solar System, vol. 46, N°1, pp.278-282, 1991.
- [5] S.M Alqhuwainem, "Matching of a DC motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 9, N°1, 1994.
- [6] C. Hua, C. Shen, "Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control DC/DC Converters for Photovoltaic Power System IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.1, pp. 86 - 93, 1998.
- [7] A. Kislovski, R. Redl, N. Sokal, "Dynamic Analysis of Swintching-Mode DC/DC converters",Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [8] <http://www.IRF.com>.
- [9] R. Simard, V. Rajagopalan, "An AC-DC converter with reduced electromagnetic interference", Canadian Journal of Electrical and Computer engineering, vol. 19, N°3, 1994

- [10] J. P. Vanhanen, P.D. Lund et al. "Simulation of Solar Hydrogen Energy Systems", Solar Energy, vol. 53, N°3, pp. 267-278, 1994.
- [11] P.S. Kauranen, P.D Lund, J.P. Vanhanen, "Development of self-sufficient solar-hydrogen energy system", International Association for Hydrogen Energy, vol.19, N°1, 1994.
- [12] K. Agbossou, R. Simard, S. Kelouwani et al., " Multiphase control of a boost converter for a renewable energy system ", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2001, vol. 2 , pp.1029-1034, 2001.
- [13] Unnewehr, L. E. and Nsar, S. A., Electric Vehicle Technology, John Wiley, pp. 81-91, 1982.
- [14] J. P. Vanhanen, P.D. Lund, "Computational approaches for improving seasonal storage systems based on hydrogen technologies, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 20, N°7, 1995.
- [15] W. Hug, H. Bussmann and A. Brinner, "Intermittent operation and operation modeling of an alkaline electrolyzer", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 18, pp 973-977, 1993.
- [16] D. Linden, "Handbook of batteries", McGraw-Hill, USA ,1994.
- [17] L. Barra, D. Coiante, " Energy cost analysis for hydrogen-photovoltaic stand-alone power stations", International Association for Hydrogen Energy, vol. 18, N°8, pp 685-693, 1993.
- [18] Y. Kim, S. Kim, " An Electrical Modeling and Fuzzy Logic Control of a Fuel Cell

Generation System", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, N°2, June 1999.

- [19] F. Laurencelle, R. Chahine, "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack", Fuel Cells, vol. 1, N°1, pp 66-71, 2001.
- [20] <http://www.radtherm.com/support/publications/batterymodelsdoc.html>.
- [21] Peter Mauracher, Eckhard Karden, Klaus Rembe, "Measurement of the Ultra-Low Frequency Impedance of Lead-Acid Batteries", International Conference on Lead-Acid Batteries LABAT'96, Varna/Bulgaria.
- [22] A.G. Dutton, J.A.M. Bleijs, and Al., "Experience in the design, sizing, economics and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems", International Journal of Hydrogen, 2000.
- [23] J. Hamelin, K. Agbossou et Al, "Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26, pp 625-629, 2001.
- [24] Pierre Sicard, André Jacob, Yves Dubé, "Théorie des systèmes asservis échantillonnés et non linéaires", Notes de cours GEI-6026, Université du Québec à Trois-Rivières, automne 1995
- [25] H. Bühler, "Réglage par logique floue", Presse Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1994
- [26] Torkel Glad and Lennart Ljung, "Control theory", Taylor and Francis, 2000.
- [27] K. Agbossou, J. Hamelin, R. Chahine et al., "Fuel cells and hydrogen storage for stand alone renewable energy system", International Journal of

Renewable Energy Engineering, v. 2, N°3, 2000.

- [28] S. Galli, M. Stefanoni, "Aloule II E.C. Project for Solar Hydrogen", 11th world hydrogen energy conference, juin 1996.
- [29] <http://fleche.org/pierre/logfloue/partie2/partie2.html>
- [30] <http://www.mathworks.com/support/matrixx/knowbase/OnLineDocs/XMATH/ISID1/ID.pdf>

ANNEXES I

SYSTÈME DE CONTRÔLE DU BANC D'ESSAIS PROGRAMMÉ EN BRIDGEVIEW

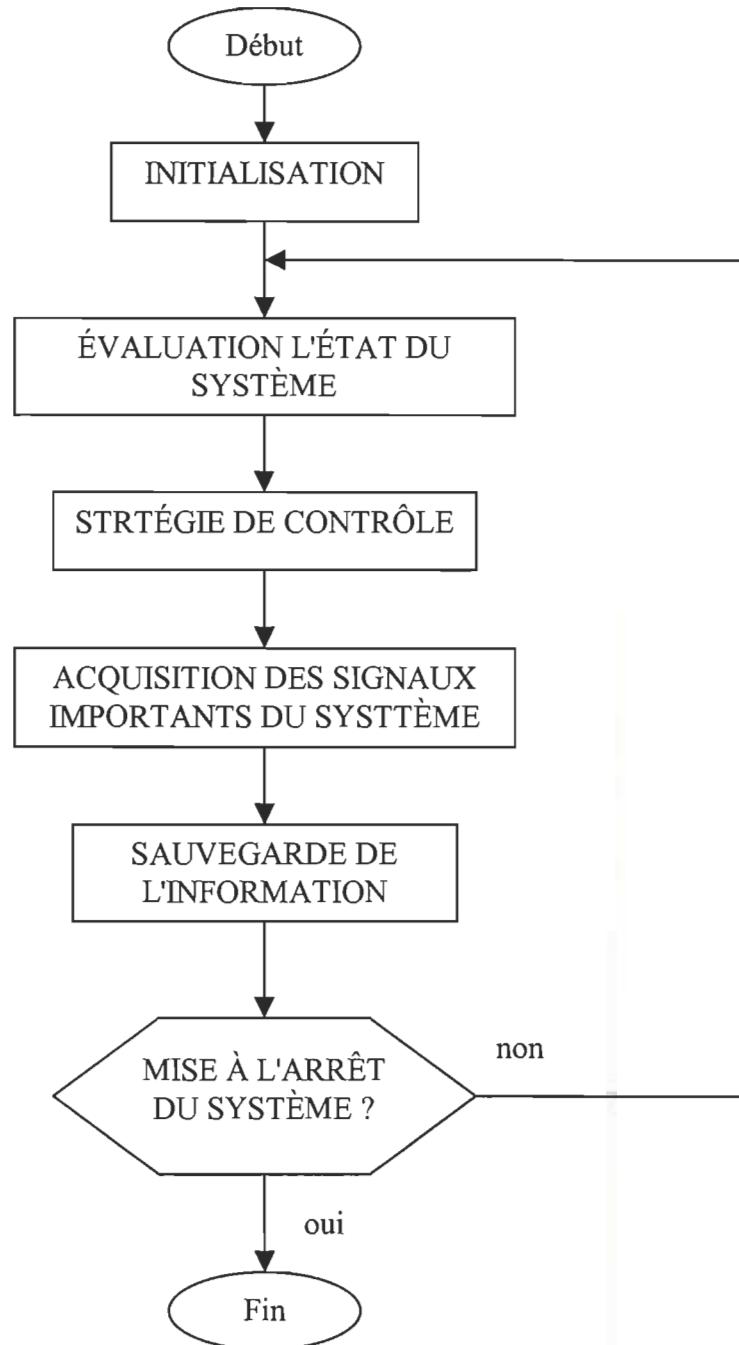


Fig. i: Organigramme général

Étape 1: Initialisation.

C'est l'étape la plus délicate car le comportement futur du système de contrôle en dépend.

La séquence d'initialisation se présente comme suit:

a- Séquences 0 et 1: Écriture de paramètres de contrôle dans le fichier de sauvegarde.

Les entêtes des paramètres suivants sont d'abord enregistrés dans le fichier. Ensuite, les valeurs de ces paramètres sont enregistrées.

- **Maximum Battery Energy (WH):** énergie maximum que les batteries peuvent emmagasiner sans effet de surcharge;
- **Bat. initial charge (WH):** charge initiale dans les batteries. L'utilisateur du programme est tenu d'estimer cette valeur. Une estimation erronée entraîne un mauvais calcul de la valeur d'énergie dans les batteries. Par contre, cela affecte très peu la stratégie de contrôle si ΔW est négligeable devant W_{\max} . En effet, si W_i est l'énergie initiale estimée, ΔW est l'incertitude entourant l'estimation de cette grandeur et ΣW est l'énergie cumulée du début de la mise en opération du système jusqu'à t (temps), l'état de charge est évalué comme suit:

$$SOC(t) = \frac{W_i + \Delta W + \Sigma W}{W_{\max}}$$

ce qui est équivalent à:

$$SOC(t) = \frac{W_i + \Sigma W}{W_{\max}} + \frac{\Delta W}{W_{\max}}$$

L'estimation doit être faite pour que ΔW soit négligeable devant W_{\max} .

- ***SOC START FC (%)***: état de charge au-dessous duquel la pile à combustible est mise en opération;
- ***SOC STOP FC (%)***: état de charge au-dessus duquel la pile est arrêtée;
- ***SOC START ELEC (%)***: état de charge au-dessus duquel l'électrolyseur est mis en opération;
- ***SOC STOP ELEC (%)***: état de charge au-dessous duquel l'électrolyseur est arrêté;

b- Séquence 2: Écriture des entêtes pour les différentes mesures

Les données mesurées sont stockées dans le fichier sous forme de table dont les noms de colonnes sont inscrits à cette étape. Les valeurs mesurées sont: la date, l'heure, la tension du bus CC, le courant à l'entrée des batteries, le courant de la charge, l'énergie stockée dans les batteries, le courant absorbée par l'électrolyseur, le patron envoyé sur la dévolteur, le taux de production de l'hydrogène, le courant produit par la PAC, le patron envoyé sur le survolteur, le taux de consommation d'hydrogène, le courant de l'éolienne, le courant des PV, le courant de la source de courant continue.

c- Séquence 3: Initialisation des interfaces de puissance (remise à zéro du dévolteur)

Un patron 127 (consigne de mise à l'arrêt) est envoyé au dévolteur et au survolteur. Une série de message apparaît à l'écran. L'utilisateur est tenu de respecter les consignes affichées surtout en ce qui concerne l'électrolyseur.

Étape 2: Évaluation de l'état du système.

Le module **Emeter.vi** permet de lire la tension du bus CC, le courant à la sortie du survoltEUR, la tension à la sortie de la source CC (Si elle est utilisée). Le module **I_V_Wind.vi** permet de lire le courant de l'éolienne. Le module **I_V_PV.vi** permet de lire le courant des panneaux solaires. Le courant de la charge est lu à travers le réseau via un **Tag** dont la valeur est envoyée par l'ordinateur HYDROGÉNIC.

À partir de toutes ces informations, l'énergie accumulée par les batteries est calculée, permettant ainsi d'évaluer l'état du système. Notons que deux bases de temps sont disponibles pour le système de contrôle:

- la base de temps de 1 seconde (utile en régime dynamique);
- la base de temps de 1 minute (utile pour un fonctionnement à long terme);

Les échantillons sont pris à intervalle régulier. Pour tout calcul d'intégral, la quantité à intégrer est supposée constante pendant l'intervalle d'échantillonnage.

Étape 3: Application de la stratégie de contrôle.

Une fois que l'état du système est complètement évalué, des actions sont prises en fonction de l'algorithme de double hystérésis implanté. Ces actions concernent essentiellement les états de la PAC et de l'électrolyseur. Les modules **Contrôle PAC.vi** et **Contrôle Electrolyseur.vi** sont utilisés pour interagir avec la PAC ou l'électrolyseur. Les consignes pour la PAC sont envoyées par réseau via un **Tag**.

Étape 4: Sauvegarder des données.

Toutes les données sont sauvegarder dans le fichier spécifié au début par l'utilisateur du programme. Le temps entre deux séries de sauvegarde dépend de la base de temps (seconde ou minute) choisie.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU PROGRAMME DE CONTRÔLE EN BRIDGEVIEW

Le programme de contrôle en Bridgeview comporte deux parties:

- la fenêtre de contrôle;
- la fenêtre de diagramme.

1. Description de la fenêtre de contrôle.

Lorsque le programme est mis en marche, le bouton *ON/OFF* permet de l'arrêter. Les informations les plus importantes affichées à l'écran sont:

- l'indicateur de l'initialisation du dévolteur et de l'électrolyseur: pour des raisons de sécurité, une consigne d'arrêt (patron 127) est envoyée au dévolteur à travers le port digital de la carte de Nationale Instrument au démarrage du système. L'indicateur change de couleur, une fois que le dévolteur est correctement initialisé. C'est à ce moment que l'électrolyseur est mis en marche manuellement.
- La fenêtre de message permet à l'utilisateur de suivre l'évolution du système et surtout de coordonner la mise en marche du dévolteur et de l'électrolyseur.

- *Bat. Initial Charge* indique l'énergie contenue dans les batteries au démarrage du système.
- *Bat. Maximun Energie* est un contrôle permettant à l'utilisateur de spécifier l'énergie maximale (sans surcharge) que les batteries sont capables d'absorber.
- *DC Bus Current* est un indicateur du courant entrant (+) ou sortant (-) des batteries.
- *DC Bus Voltage* est un indicateur de la tension du bus CC.
- *DC Source* est le graphique qui affiche la valeur du courant en provenance de la source de courant continu.
- *Electrolyser* est le graphique qui affiche la valeur du courant absorbée par les cellules de l'électrolyseur et son système de contrôle.
- *El. Pattern* indique le patron de consigne pour l'électrolyseur (toutes valeurs inférieures à 127 sont considérées comme étant des consignes d'arrêt du dévolteur).
- *FC pattern* indique le patron de consigne pour la pile.
- *Fuel Cell Current* est le graphique qui affiche la valeur du courant à la sortie de la pile.
- *load Current* est le graphique qui affiche la valeur du courant de la charge.
- *PV Current* est le graphique qui affiche la valeur du courant en provenance des panneaux solaires.
- *SOC START FC* permet de spécifier l'état de charge des batteries au-dessous duquel la pile est mise en marche.
- *SOC STOP FC* permet de spécifier l'état de charge des batteries au-dessus duquel la pile est arrêtée.
- *SOC START ELEC* permet de spécifier l'état de charge des batteries au-dessus duquel l'électrolyseur est mis en marche.

- *SOC STOP ELEC* permet de spécifier l'état de charge des batteries au-dessous duquel l'électrolyseur est arrêté.
- *Wind AC Current* est le graphique qui affiche en continu la valeur du courant en provenance de l'éolienne.

2 Diagramme de fonctionnement

C'est lui qui génère les commandes destinées à piloter tout le système. Le programme principal comporte deux grandes séquences:

- l'initialisation des paramètres et test d'intégrité du système (S0);
- exécution de la boucle de contrôle permettant de contrôler le système (S1).

2.1 Initialisation des paramètres

Cette opération est effectuée à la séquence S0 (voir pages A.7, A.8, A.9). Elle comporte 4 séquences (S00, S01, S02, S03):

- *séquence S00*: les en-têtes des champs devant recevoir les valeurs des paramètres de contrôle sont écrits. Un message indiquant que le système procède à l'initialisation est affiché.
- *séquence S01*: les valeurs de ces paramètres sont écrites dans leurs champs respectifs.

- *séquence S02*: les en-têtes des champs devant recevoir les valeurs mesurées sont écrits.

- *séquence S03*: elle comporte 4 autres séquences (pages A.7 et A.8):
 - *séquence S030*: le patron 127 est envoyé au dévolteur afin de l'initialiser. L'indicateur de l'initialisation de l'électrolyseur change de couleur.
 - *séquence S031*: le patron 127 est aussi envoyé sur le port parallèle de l'ordinateur afin de l'initialiser. Cette opération est requise au cas où le surveolteur ou le dévolteur était branché sur ce port.
 - *séquence S032*: une fois que le dévolteur est initialisé, un message s'affiche invitant l'opérateur à mettre l'électrolyseur en marche. Pendant ce temps, le programme tombe dans une boucle infinie, désactivée par le changement de l'état du contrôle *Elect. Ready*.
 - *séquence S033*: un autre message s'affiche indiquant que le système de contrôle a effectivement démarré les opération de contrôle du banc d'essais.

2.2 Exécution de la principale boucle de contrôle

Comme dans tout programme de contrôle, des actions répétées sont effectuées, notre programme comporte une grande boucle qui est décrite après un délai choisi par l'opérateur. Ce délai peut être d'une seconde ou d'une minute.

Au début de chaque itération, l'énergie accumulée dans les batteries est mise à jour à travers la variable *Batteries Energy*. Pendant la mise à jour, la nouvelle charge calculée ne peut en

aucun cas dépasser l'énergie maximale des batteries spécifiée au début. Après la mise à jour de l'énergie des batteries, plusieurs séquences sont exécutées.

- *séquences S10:* Le courant *DC Bus Current*, la tension *DC Bus voltage* du bus CC et le courant à la sortie de la source de courant CC *DC Source* sont mesurés grâce au sous-programme *Emeter* initialement développé par M. Jean Hamelin. Ce sous-programme lit les informations du module E-METER du VCS10 via un port série RS 232 (pages B1 à B10). À partir de *DC Bus Current* et de *DC Bus voltage*, la variation d'énergie est calculée (représentée par la variable *Énergie Instantanée*). En tenant compte de l'énergie initiale des batteries, l'énergie accumulée *Batteries Energy* dans les batteries est calculée. Afin de prendre la décision de démarrer ou arrêter l'électrolyseur ou la pile, les seuils sont recalculés. Ceci est nécessaire car, d'après le cahier de charge, il est important de pouvoir modifier ces seuils lors du fonctionnement du programme. Pour calculer le seuil de mise en marche de la pile (*Bat. Level FC on*) par exemple, *SOC START FC* est multiplié par *Bat. Maximum Energy* et divisé par 100. De cette façon, les quatre seuils sont recalculés.
 - En fonction de l'énergie accumulée dans les batteries et des seuils calculés, les opérations appropriées sont effectuées au niveau de la pile et de l'électrolyseur.
 - Dans cette séquence, le courant de la charge est lu à travers une connexion réseau et stocké dans la variable *Load Current* pour affichage.
 - La variable *Bat.* représente l'indicateur de l'énergie accumulée dans les batteries (situé à l'extrême gauche de la fenêtre de contrôle).

- *Séquence S01:* (page A.3) C'est au cours de cette séquence que les patrons sont envoyés au survolteur via le réseau et au dévolteur via la carte de National Instrument.
- *séquence S02:* Toutes les grandeurs mesurées sont stockées dans le fichier: la tension du bus DC Bus Voltage, le courant à l'entrée des batteries *DC Bus Current*, le courant de la charge *Load Current*, l'énergie des batteries *Batteries Energy*, le courant à l'entrée de l'électrolyseur *Electrolyser Current*, le patron envoyé au dévolteur *El. Pattern*, le courant à la sortie de la source de courant à travers le sous-programme *Emeter*, le courant à la sortie de la pile *Fuel Cell Current*, le patron envoyé au survolteur *FC Pattern*, le courant à la sortie de l'éolienne *Wind Current*, la tension de l'éolienne *Wind Voltage*, le courant à la sortie des PV *PV Current* et la tension aux bornes des PV *PV voltage*.
- Dans cette séquence, deux indicateurs (Elect. State et FC State) changent de couleurs si l'électrolyseur et/ou la pile sont en marche.

3 Divers sous-programmes utilisés.

Le programme général décrit plus haut fait appel aux sous-programmes suivant:

- Contrôle PAC. vi:
(pages C.1 à C.3) module de contrôle de l'électrolyseur. Il avait été écrit au départ pour utiliser le port parallèle LPT1 de l'ordinateur. Le patron de consigne est envoyé au survolteur grâce à un *tag* faisant appel aux fonctions réseaux et qui se trouve dans le sous-programme *patron pile réseau.vi*
- Contrôle Electrolyseur.vi:

(pages D.1 à D.3) c'est lui qui a en charge d'activer le dévolteur en augmentant le numéro de patron de sa valeur initiale jusqu'à la valeur de consigne de façon régulière avec un pas de 1 et un délais variable au gré de l'opérateur.

- I_Elect.vi: c'est le module qui lit le courant à l'entrée de l'électrolyseur.
- debitmetre.vi: il lit la tension correspondant au débit d'hydrogène sur la voie 6 de la carte d'acquisition.
- I_V_Wind.vi: (pages F.1 et F.2) il lit le courant et la tension à la sortie de l'éolienne.
- I_V_PV.vi: (pages F.1 et F.2) Il lit le courant et la tension à la sortie des PV.

ANNEXES II: PROGRAMME DE CONTRÔLE DU BANC D'ESSAIS EN ASSEMBLEUR POUR 68HC811

```

; PROGRAMME ÉCRIT LE 10 OCTOBRE 2001 ET MODIFIÉ LE 11 MAI 2000
;
; PAR: SOUSSO KELOUWANI, ÉTUDIANT À LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
;
; OBJECTIF DU PROGRAMME:
; LIRE LE PORT RS-232 DE EMETER ET COMMANDER L'ÉLECTROLYSEUR ET LA PILE
;
; ALGORITHME DEGESTION IMPLANTÉ: DOUBLE HYSTÉRÉSYS
; L'INITIALISATION DE PARAMÈTRES DE CONTRÔLE SE FAIT DANS LA SECTION " AUTRES
; PARAMÈTRES"
; REMARQUE: LA VERSION AVEC L'ACTIVATION DU COP N'A PAS ÉTÉ TESTÉE.
;

DEBUTROM EQU $F800 ; ADRESSE DE DEBUT DE LA EEPROM
DEBUTRAM EQU $0000 ; ADRESSE DE DEBUT DE LA RAM
BAUD EQU $102B ; REGISTRE DE CONFIGURATION DE LA VITESSE DE COM
SCCR1 EQU $102C
SCCR2 EQU $102D
SCSR EQU $102E
SCDR EQU $102F
PORTB EQU $1004 ; A VÉRIFIER (par défaut le port B active le BOOST)
PORTC EQU $1003 ; A VÉRIFIER (par défaut le port C active le buck)
DDRC EQU $1007
COPRST EQU $103A ; REGISTRE POUR LE COP
ROPTION EQU $1039 ; REGISTRE D'OPTION
CONF EQU $103F ; REGISTRE DE CONFIGURATION
NBECAR EQU 57 ; NOMBRE DE CARACTÈRES À LIRE SUR LE EMETER

ORG CONF ; PROGRAMMATION DU REGISTRE DE CONFIGURATION
FCB $FB ; POUR ACTIVATION DU COP

ORG DEBUTRAM

EMETER RMB 57 ; ESPACE RÉSERVÉ POUR STOCKER LE PACKET DE EMETER
I_STRING RMB 6 ; CHAÎNE DE CARATÈRE CONTENANT LA VALEUR DE I
U_STRING RMB 5 ; CHAÎNE DE CARATÈRE CONTENANT LA VALEUR DE U
POWER RMB 2 ; PUISSANCE CALCULÉE
I_H RMB 1 ; PARTIE HAUTE DE I (8BITS)
I_L RMB 1 ; PARTIE BASSE DE I (8BITS)
U_H RMB 1 ; PARTIE HAUTE DE U (8BITS)
U_L RMB 1 ; PARTIE BASSE DE U (8BITS)
VAR1 RMB 2 ; VARIABLE DE CALCUL
RESTE RMB 2 ; VARIABLE DE CALCUL
ENERGY RMB 2 ; ENERGIE CALCULÉE (16 BITS)
S RMB 1 ; SIGNE DE RESTE
SOC_FC RMB 2 ; NIVEAU BAS POUR DÉMARRER LA PILE
SOC_EL RMB 2 ; NIVEAU HAUT POUR DÉMARRER L'ÉLECTROLYSEUR
SOC_STOP RMB 2 ; NIVEAU POUR ARRÊTER LA PILE OU L'ÉLECTROLYSEUR
STATE_EL RMB 1 ; ETAT DE L'ÉLECTROLYSEUR =1 SI EN MARCHE
STATE_FC RMB 1 ; ETAT DE LA PILE =1 SI EN MARCHE
POS_DECIMAL_I RMB 1 ; POSITION DE LA VIRGULE DANS I_STRING
POS_DECIMAL_U RMB 1

```

```

PATRON_FC    RMB    1          ; PATRON À ENVOYER À LA PILE SI EN MARCHE
PATRON_EL    RMB    1          ; PATRON À ENVOYER À L'ÉLECTOLYSEUR SI EN MARCHE

        ORG    DEBUTROM

        LDAA  #$30          ; INITIALISATION DE LA COMMUNICATION
        STAA  BAUD
        CLR   SCCR1
        LDAA  #$0C
        STAA  SCCR2
        CLR   SCSR
        CLR   SCDR          ; FIN INITIALISATION DE LA COMMUNICATION

AUTRES_PARAMETRES:
        LDD   #0          ; DEBUT INITIALISATION DES AUTRES PARAMÈTRES
        STD   POWER
        STD   RESTE
        LDD   #42240
        STD   ENERGY
        LDAA  #0
        STAA  S
        LDD   #42237
        STD   SOC_FC
        LDD   #42238
        STD   SOC_STOP
        LDD   #42239
        STD   SOC_EL
        LDAA  #0
        STAA  STATE_FC
        STAA  STATE_EL
        LDAA  #211         ; PATRON À ENVOYER À L'ÉLECTROLYSEUR
        STAA  PATRON_EL
        LDAA  #200         ; PATRON À ENVOYER À LA PILE
        STAA  PATRON_FC
        LDAA  #255
        STAA  DDRC          ; DEBUT INITIALISATION DES AUTRES PARAMÈTRES
        LDAA  #0          ; INITIALISATION DU PORT B ET C
        STAA  PORTB
        STAA  PORTC

MAIN:
LO:
        JSR   INITEMETER      ; PRÉPARATION POUR LIRE LE PORT SÉRIE
        JSR   RECEPTION
        JSR   I_ET_U_BUS      ; LECTURE DU EMETER
        JSR   CONV_I
        JSR   CONV_U
        JSR   CAL_POWER        ; CALCUL DE LA PUISSANCE
        JSR   CAL_ENERGY       ; CALCUL DE L'ÉNERGIE ET PRISE DE DÉCISION
        JMP   LO

INITEMETER:
        LDX   #EMETER
        LDAA  #0
        LDAB  #0

BOUCLE1:
        STAA  0,X              ; INITIALISER LES NBECAR CARACTÈRES
        INCB
        INX
        CMPB  #NBECAR
        BNE   BOUCLE1
        RTS

RECEPTION:
        LDAB  #0

RECEPT1:
        LDX   #SCSR            ; RECEPTION DE LA CHAÎNE DE CARACTÈRES

```

```

PSHA
LDAA    #$55          ; RESET DU COP
STAA    COPRST
LDAA    #$AA
STAA    COPRST
PULA

BRCLR  0,X,#$20,RECEPT1
LDAA    SCDR
CMPA    #10          ; RECHERCHER NEWLINE AVANT DE LIRE LES AUTRES
CARACTÈRES
BNE    RECEPT1

RECEPT2:
LDX    #SCSR          ; RECPTION DES AUTRES CARACTÈRES

PSHA
LDAA    #$55          ; RESET DU COP
STAA    COPRST
LDAA    #$AA
STAA    COPRST
PULA

BRCLR  0,X,#$20,RECEPT2
LDAA    SCDR
LDX    #EMETER
ABX
STAA    0,X

INC B
CMP B #NBECAR
BNE    RECEPT2
RTS

I_ET_U_BUS:
LDAB    #0          ; COMPTEUR DE VIRGULE
LDX    #EMETER

L1:
LDAA    0,X
CM PA #44          ; RECHERCHE LES VIRGULES
BNE    L2
INC B
CMP B #2
BNE    L2
JSR    ECRIRE_I      ; MIS À JOUR DE LA CHAINE I_STRING
JSR    ECRIRE_U      ; MIS À JOUR DE LA CHAINE U_STRING
RTS

L2:
INX
JMP    L1

ECRIRE_I:
LDAB    #0
INX
LDY    #I_STRING

L3:
LDAA    0,X
STAA    0,Y
CM PA #46
BEQ    L333

L33:
INX
INY
INC B
CMP B #6
BNE    L3
RTS

L333:
STAB    POS_DECIMAL_I
JMP    L33

```

```

ECRIRE_U:
    LDAB    #0
    INX
    LDY    #U_STRING
L4 :
    LDAA    0,X
    STAA    0,Y
    CMPA    #46
    BEQ    L444
L44 :
    INX
    INY
    INCB
    CMPB    #5
    BNE    L4
    RTS
L444 :
    STAB    POS_DECIMAL_U
    JMP    L44

CONV_I:
    LDAA    #0          ; CONVERTI I_STRING EN NOMBRE
    LDD    #0
    STD    VAR1
    LDX    #I_H
    STAA    0,X          ; INITIALISATION DES 2 OCTETS
    LDX    #I_L
    STAA    0,X
    LDY    #I_STRING
    INY
    LDAA    0,Y
    SUBA    #48
    LDAB    #100
    MUL
    LDX    #VAR1
    STAB    0,X
    STAA    1,X
    LDAB    I_L
    LDAA    I_H
    ADDD    VAR1
    STAA    I_H
    STAB    I_L
    INY
    LDAA    0,Y
    SUBA    #48
    LDAB    #10
    MUL
    LDX    #VAR1
    STAB    0,X
    STAA    1,X
    LDAB    I_L
    LDAA    I_H
    ADDD    VAR1
    STAA    I_H
    STAB    I_L
    INY
    LDAA    0,Y
    SUBA    #48
    LDAB    #1
    MUL
    LDX    #VAR1
    STAB    0,X
    STAA    1,X
    LDAB    I_L
    LDAA    I_H
    ADDD    VAR1
    STAA    I_H
    STAB    I_L
    INY
    INY

```

```

LDAA    0,Y
SUBA    #48
CMPA    #5
BGE     ARROND_I
JMP     FIN_CONV_I
ARROND_I:
LDAA    I_H
INCA
STAA    I_H
FIN_CONV_I:
RTS

CONV_U:
LDAA    #0           ; CONVERTI U_STRING EN NOMBRE
LDD     #0
STD     VAR1
LDX     #U_H
STAA    0,X           ; INITIALISATION DES 2 OCTETS
LDX     #U_L
STAA    0,X
LDY     #U_STRING
LDAA    0,Y
SUBA    #48
LDAB    #100
MUL
LDX     #VAR1
STAB    0,X
STAA    1,X
LDAB    U_L
LDAA    U_H
ADDD    VAR1
STAA    U_H
STAB    U_L
INY
LDAA    0,Y
SUBA    #48
LDAB    #10
MUL
LDX     #VAR1
STAB    0,X
STAA    1,X
LDAB    U_L
LDAA    U_H
ADDD    VAR1
STAA    U_H
STAB    U_L
INY
LDAA    0,Y
SUBA    #48
LDAB    #1
MUL
LDX     #VAR1
STAB    0,X
STAA    1,X
LDAB    U_L
LDAA    U_H
ADDD    VAR1
STAA    U_H
STAB    U_L

INY
INY
LDAA    0,Y
SUBA    #48
CMPA    #5
BGE     ARROND_U
JMP     FIN_CONV_U
ARROND_U:
LDAA    U_H
INCA
STAA    U_H

```

```

FIN_CONV_U:
    RTS

CAL_POWER:
    LDD      #0
    STD      POWER          ; INITIALISATION ET CALCUL DE PUISSANCE
    LDAA    I_H
    LDAB    U_H
    MUL
    STD      POWER
    RTS

CAL_ENERGY:
    LDY      #I_STRING
    LDAA    0,Y
    CMPA    #43           ; IDENTIFICATION DU SIGNE DU COURANT
    BEQ     M2
    LDAA    S
    CMPA    #0
    BEQ     M3
    LDD      RESTE
    ADDD    POWER
    STD      RESTE
    LDAA    #1
    STAA    S
    JMP     M4

M2:
    LDAA    S
    CMPA    #0
    BEQ     M5
    LDD      POWER
    CPD     RESTE
    BGE     M6
    LDD      RESTE
    SUBD    POWER
    STD      RESTE
    LDAA    #1
    STAA    S
    JMP     M4

M3:
    LDD      POWER
    CPD     RESTE
    BGE     M7
    LDD      RESTE
    SUBD    POWER
    STD      RESTE
    LDAA    #0
    STAA    S
    JMP     M4

M5:
    LDD      RESTE
    ADDD    POWER
    STD      RESTE
    LDAA    #0
    STAA    S
    JMP     M4

M6:
    LDD      RESTE
    SUBD    POWER
    STD      RESTE
    LDAA    #0
    STAA    S
    JMP     M4

M7:
    LDD      POWER
    SUBD    RESTE
    STD      RESTE
    LDAA    #1
    STAA    S
    JMP     M4

```

```

M4 :
    LDD      RESTE
    CPD      #3600
    BGE      MODIF_ENERGY
    JMP      CONTROL          ; ALGORITHME
    RTS

MODIF_ENERGY :
    LDD      RESTE
    SUBD    #3600
    STD      RESTE          ; MISE EN JOUR DU RESTE
    LDAA    S
    CMPA    #0
    BEQ     ENERGY_PLUS
    LDD      ENERGY
    CPD      #0          ; COMPARE A ZERO POUR ENERGIE
    BEQ     ENERGY_ZERO
    SUBD    #1
    STD      ENERGY
    JMP     M4

ENERGY_PLUS :
    LDD      ENERGY
    ADDD    #1
    STD      ENERGY
    JMP     M4

ENERGY_ZERO :
    LDD      #0
    STD      ENERGY
    RTS

CONTROL :
    LDD      ENERGY          ; PRISE DE DÉCISION
    CPD      SOC_FC
    BLE     C1
    LDD      ENERGY
    CPD      SOC_STOP
    BLE     C2
    LDD      ENERGY
    CPD      SOC_EL
    BLE     C3
    LDAA    #1
    STAA    STATE_EL

    LDAA    PATRON_EL          ; ACTIVATION DU PORT DE BUCK
    STAA    PORTC
    RTS      ; JMP     INIT_I

C1 :
    LDAA    #1
    STAA    STATE_FC

    LDAA    PATRON_FC          ; ACTIVATION DU BOOST
    STAA    PORTB
    RTS      ; JMP     INIT_I

C2 :
    LDAA    STATE_EL
    CMPA    #1
    BEQ     C4
    RTS      ; JMP     INIT_I

C3 :
    LDAA    STATE_FC
    CMPA    #1
    BEQ     C5
    RTS      ; JMP     INIT_I

C4 :
    LDAA    #0
    STAA    STATE_EL

    LDAA    #127          ; ARRET DU BUCK

```

```
        STA A      PORTC
        RTS          ; JMP      INIT_I

C5:
        LDAA      #0
        STA A    STATE_FC

        LDAA      #127
        STA A    PORTB
        RTS          ; JMP      INIT_I

        ORG      $FFFA
        FDB      DEBUTROM      ; INITIALISATION DU VECTEUR D'INTERRUPTION
                                ; POUR LE COP

        ORG      $FFFE
        FDB      DEBUTROM      ; INITIALISATION DU VECTEUR D'INTERRUPTION
                                ; POUR LE RESET GÉNÉRAL
```

ANNEXES III: PROGRAMME EN MATLAB POUR L'IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES

```
function Identification_Buck()
% fonction utilisée pour l'identification des paramètres

clear all;
NomFichier='C:\SOUSSO\Mémoire\Identification\Identification_Buck.txt'
Courant_Regime_Permanent=43.5;

[t, y]=LectureFichier(NomFichier);
% utile pour la normalisation

y=y./Courant_Regime_Permanent;
length(y)
u(1)=0;
for i=2:length(y),
    u(i)=1;
end

open_system('Ident1');
sim('Ident1');

%plot (u)

function Identification_Boost()
% fonction utilisée pour l'identification des paramètres

clear all;
NomFichier='C:\SOUSSO\maîtrise
cours\Systeme\Identification\Ident_Boost_Pac_data.txt'
Courant_Regime_Permanent=1;

[t, y]=LectureFichier(NomFichier);
% utile pour la normalisation

y=y./Courant_Regime_Permanent;
length(y)
u(1)=0;
for i=2:length(y),
    u(i)=1;
end

open_system('Ident1');
sim('Ident1');

%plot (u)
```

ANNEXES IV: PROGRAMME EN MATLAB POUR LES STRATÉGIES DE CONTRÔLE

```
function simul_Hyst_Double()
% simulation avec le double hystérésis

%initialisation

close all;
clear all;
%figure
global Uelz0;
global C1;
global C2;
global Ielz0;
global Relz;
global Telz;
global Uelz;

%BATTERY%%%%%%%%%%%%%
Ki=0;
QFC=220;%4*220;
Q0=220;%4*220;
E0=48;
Wmax= QFC*E0;%42240; %charge maximale
RFC=0.0076; %résistance interne totale des bat
Charge_Init_Bat=0.8*Wmax;%42240;
W0=Charge_Init_Bat; %Q0*E0;
alpha=Ki/E0;
Temperature_Ope=25;
WH=0.75*Wmax;%0.99995*Wmax
WL=0.60*Wmax;%0.9990*Wmax
P_El=1000; %puissance nominale de l'électrolyseur
% BUCK%%%%%%%%%%%%%
%  
Buck_Duty_Cycle=206/255; %pour le premier scénario
Buck_Duty_Cycle=223/255;%223/255;minimum =0.80
A0=1;
%paramètre pour 1 min
A_Buck0=1;
A_Buck1=-0.17;
B_Buck0=1.632;
B_Buck1=-0.794;

% BOOST%%%%%%%%%%%%%
```

```

%paramètres pour 1 min
Boost_Duty_Cycle=0.140;%0.1;%153.3/255;%0.5*60/255; due à la temperature
A_Boost0=1;
A_Boost1=0;
B_Boost0=0.9499;
B_Boost1=0.00418;

% ELECTROLYZER %%%%%%%%%%%%%%
Uelz0=22.75;
C1=-0.1765;
C2=5.5015;
Ielz0=0.1341;
Relz=-3.3189;
Telz=Temperature_Ope;
Elz_Current_ef=0.7;
CH2=2.39;
Ncell_elz=24;
IELzmax=120;
% PEMFC %%%%%%%%%%%%%%
D0=33.18;
D1=-0.013;
D2=-1.57;
Ipemfc0=8.798;
IpemfcMax=120;
Rpmefc=-2.04;
Ncell_PEMFC=35;
PEMFC_Current_ef=1/0.45; % car il consomme et on connaît I en sortie

% INVERTER %%%%%%%%%%%%%%
r_inv=0.9;

% storage %%%%%%%%%%%%%%
WTank=50000;
WH2O=0.75*WTank;
deltaH=286;

% PV current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\soussso\Mémoire\Profils\PV.txt'
[tt, IPV]=LectureFichier(NomFichier);

% WT current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\Sousso\Mémoire\Profils\WT.txt'
[tt, IWT]=LectureFichier(NomFichier);
%IWT=0.5*IWT;

% LOAD current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\Sousso\Mémoire\Profils\ProfilLoad.txt'
[tt, ILoad]=LectureFichier(NomFichier);
%ILoad=0.35.*ILoad;

SimTime=length(tt);
%open_system('systeme');
%sim('systeme');

%%%%%%%%%%%%%5

```

```

%SimTime=50;
t=tt(1:SimTime);
I=zeros(1,SimTime);
IELz=zeros(1,SimTime);
IPEMFC=zeros(1,SimTime);
W=zeros(1,SimTime);
WH2=zeros(1,SimTime);
Q=zeros(1,SimTime);
UELz=zeros(1,SimTime);
Perte_EL=zeros(1,SimTime);
Perte_FC=zeros(1,SimTime);

Q(1)=Q0;
W(1)=W0;
WH2(1)=WH20;
deltaT=1;
alpha=0;
StatePEMFC='OF';
StateElz='OF';
Cur_Eff_PEMFC=0.45;
Cur_Eff_Elz=0.7;
VT=22.4; deltaH=286;
WM=(WL+WH)/2;
DBoost(1)=0;
DBuck(1)=0;

Ecart_Pce_El(1)=0;
for n=2 : SimTime
    n
    I(n)=IWT(n-1)+IPV(n-1)+IPEMFC(n-1)-IELz(n-1)-ILoad(n-1);
    Q(n)=Q(n-1)+I(n)*deltaT;
    f(n)=Q(n)/QFC;
    E(n)=E0+RFC*I(n)+Ki*f(n);
    Pin(n)=E(n)*I(n);
    PRi(n)=RFC*(I(n)^2);
    W(n)=W(n-1)+(Pin(n)-PRi(n))*deltaT/(3600*(1+alpha));
    if (StatePEMFC=='ON'),
        VPEMFC(n)=Cur_Eff_PEMFC*Ncell_PEMFC*IPEMFC(n-1)/CH2;
    else
        VPEMFC(n)=0;
    end
    if StateElz=='ON',
        VElz(n)=Cur_Eff_Elz*Ncell_elz*IELz(n-1)/CH2;
    else
        VElz(n)=0;
    end
    WH2(n)=WH2(n-1)+(VELz(n)-VPEMFC(n))*deltaH*deltaT/(VT*3600);
    %%%%%%%%
    if W(n)<WL,
        StatePEMFC='ON';
    else
        if W(n)>WM,
            if StatePEMFC=='ON',
                StatePEMFC='OF';
            end
        else
    end
else

```

```

        if StateElz=='ON',
            StateElz='OF';
        end
    end
    if W(n)>WH,
        StateElz='ON';
    end
end
if StateElz=='ON'
    DBuck(n)=Buck_Duty_Cycle;%206/255;
    %DBuck(n)=Ecart_Pce_El(n)+9*Ecart_Pce_El(n-1)+Dbuck(n-1);
    ElzCom=1;
else
    DBuck(n)=0;
    ElzCom=0;
end
if StatePEMFC=='ON'
    DBoost(n)=Boost_Duty_Cycle;
    PEMFCCom=1;
else
    DBoost(n)=0;
    PEMFCCom=0;
end
IPEMFC(n)=PEMFCCom*((IpemfcMax*(B_Boost0*DBoost(n)+B_Boost1*DBoost(n-1))-A_Boost1*IPEMFC(n-1))/A_Boost0);
if IPEMFC(n)<=0,
    UPEMFC(n)=0;
else

UPEMFC(n)=D0+D1*Temperature_Ope+D2*log(IPEMFC(n)/Ipemfc0)+Rpmfc*IPEMFC(n)/Temperature_Ope;
end
UELz(n)=ElzCom*((E(n)*(B_Buck0*DBuck(n)+B_Buck1*DBuck(n-1))-A_Buck1*UELz(n-1))/A_Buck0);
if UELz(n)>E(n),
    UELz(n)=E(n);
end

Uelz=UELz(n);
aa=UELz(n)/19.85;
if aa==0,
    aa=eps;
end
b=ElzCom*(-167+0.4585*Temperature_Ope+273*log(aa)-11.85*UELz(n)/Temperature_Ope);
IELz(n)=b*UELz(n)/E(n);
if IELz(n)>IELzmax
    IELz(n)=IELzmax;
end
    %Évaluation des pertes
Perte_El(n)=((1-Cur_Eff_Elz)/Cur_Eff_Elz)*E(n)*IELz(n);
Perte_FC(n)=((1-Cur_Eff_PEMFC)/Cur_Eff_PEMFC)*UPEMFC(n)*IPEMFC(n);

end
WHL=0;
subplot(211);plot(t,W) ; %hold on; plot(t,W_V)
subplot(212);plot(t,IELz.*E); hold on; plot(t,IPEMFC.*E,'r')

```

```

%figure
%subplot (211); plot(t,(IWT+IPV).*E');
%subplot (212); plot(t,ILoad.*E');
display('HYST')
WH
WL
W0

for i=1 : SimTime,
    if (W(i)<WL),
        WHL=WHL+(WL-W(i));
    end
    if (W(i)>WH),
        WHL=WHL+(W(i)-WH);
    end
end
WHL
WT=sum(W)
Perte_Totale=sum(Perte_El) + sum(Perte_FC)
COP=1-WHL/WT
rendement=1-Perte_Totale/(sum((IWT+IPV).*E)+W0+WH20)

COP=1-WHL/WT
return

function simul_Pour_PI()
%% simulation avec le double hystérésis + PI

%initialisation

close all;
clear all;
global Uelz0;
global C1;
global C2;
global Ielz0;
global Relz;
global Telz;
global Uelz;

%BATTERY%%%%%%%%%%%%%
Ki=0;
QFC=220;%4*220;
Q0=220;%4*220;
E0=48;
Wmax= QFC*E0;%42240; %charge maximale
RFC=0.0076; %résistance interne totale des bat
Charge_Init_Bat=0.8*Wmax;%42240;
W0=Charge_Init_Bat; %Q0*E0;
alpha=Ki/E0;
Temperature_Ope=25;
WH=0.75*Wmax;%0.99995*Wmax
WL=0.60*Wmax;%0.9990*Wmax
P_El=1250; %puissance nominale de l'électrolyseur

```

```

P_FC=750; %puissance nominale de la PAC

% BUCK%%%%%%%%%%%%%
%Buck_Duty_Cycle=206/255; %pour le premier scénario
Buck_Duty_Cycle=223/255;%223/255;
A0=1;
%paramètre pour 1 min
A_Buck0=1;
A_Buck1=-0.17;
B_Buck0=1.632;
B_Buck1=-0.794;

% BOOST%%%%%%%%%%%%%
%paramètres pour 1 min
A_Boost0=1;
A_Boost1=0;
B_Boost0=0.9499;
B_Boost1=0.00418;

% ELECTROLYZER %%%%%%
Uelz0=22.75;
C1=-0.1765;
C2=5.5015;
Ielz0=0.1341;
Relz=-3.3189;
Telz=Temperature_Ope;
Elz_Current_ef=0.7;
CH2=2.39;
Ncell_elz=24;
IELzmax=120;
% PEMFC %%%%%%
Boost_Duty_Cycle=0.14;%0.1;%153.3/255;%0.5*60/255; due à la temperature
D0=33.18;
D1=-0.013;
D2=-1.57;
Ipemfc0=8.798;
IpemfcMax=120;
Rpemfc=-2.04;
Ncell_PEMFC=35;
PEMFC_Current_ef=1/0.45; % car il consomme et on connaît I en sortie

% INVERTER %%%%%%
r_inv=0.9;

% storage %%%%%%
WTank=50000;
WH20=0.75*WTank;
deltaH=286;

% PV current %%%%%%
NomFichier='C:\sousso\Mémoire\Profils\PV.txt'
[tt, IPV]=LectureFichier(NomFichier);

% WT current %%%%%%
NomFichier='C:\Sousso\Mémoire\Profils\WT.txt'
[tt, IWT]=LectureFichier(NomFichier);

```

```

%IWT=0.5*IWT;

% LOAD current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\Sousso\Mémoire\Profils\ProfilLoad.txt'
[tt, ILoad]=LectureFichier(NomFichier);

SimTime=length(tt);
%open_system('systeme');
%sim('systeme');

%%%%%%%%%%%%%
%SimTime=100;
t=tt(1:SimTime);

I=zeros(1,SimTime);
IELz=zeros(1,SimTime);
IPEMFC=zeros(1,SimTime);
W=zeros(1,SimTime);
WH2=zeros(1,SimTime);
Q=zeros(1,SimTime);
UELz=zeros(1,SimTime);
Perte_EL=zeros(1,SimTime);
Perte_FC=zeros(1,SimTime);

% initialisation spéciale
DebutSim=3;
for i=1:DebutSim,
    Q(i)=Q0;
    W(i)=W0;
    WH2(i)=WH20;
end

deltaT=1;
alpha=0;
StatePEMFC='OF';
StateElz='OF';
Cur_Eff_PEMFC=0.45;
Cur_Eff_Elz=0.7;
VT=22.4; deltaH=286;
WM=(WL+WH)/2;
DBoost(1)=0;
DBuck(1)=0;

Ecart_Pce_El(1)=0;
Ecart_Pce_El(2)=0;
Ecart_Pce_FC(1)=0;
Ecart_Pce_FC(2)=0;

for n=DebutSim : SimTime
    n
    I(n)=IWT(n-1)+IPV(n-1)+IPEMFC(n-1)-IELz(n-1)-ILoad(n-1);
    Q(n)=Q(n-1)+I(n)*deltaT;
    f(n)=Q(n)/QFC;
    E(n)=E0+RFC*I(n)+Ki*f(n);
    Pin(n)=E(n)*I(n);

```

```

PRi(n)=RFC*(I(n)^2);
W(n)=W(n-1)+(Pin(n)-PRI(n))*deltaT/(3600*(1+alpha));
if (StatePEMFC=='ON'),
    VPEMFC(n)=Cur_Eff_PEMFC*Ncell_PEMFC*IPEMFC(n-1)/CH2;
else
    VPEMFC(n)=0;
end
if StateElz=='ON',
    VELz(n)=Cur_Eff_Elz*Ncell_elz*IELz(n-1)/CH2;
else
    VELz(n)=0;
end
WH2(n)=WH2(n-1)+(VELz(n)-VPEMFC(n))*deltaH*deltaT/(VT*3600);
%%%%%%%%%%%%%%%
r=(P_El-UELz(n)*IELz(n))/P_El; %normalisation
r=r/500;
Ecart_Pce_El(n)=r;
r=(P_FC-E(n)*IPEMFC(n))/P_FC; %normalisation
r=r/150;
Ecart_Pce_FC(n)=r;

if W(n)<WL,
    StatePEMFC='ON';
else
    if W(n)>WM,
        if StatePEMFC=='ON',
            StatePEMFC='OF';
        end
    else
        if StateElz=='ON',
            StateElz='OF';
        end
    end
    if W(n)>WH,
        StateElz='ON';
    end
end
if StateElz=='ON'
%
    DBuck(n)=Buck_Duty_Cycle;%206/255;
    DBuck(n)=6*Ecart_Pce_El(n)+10*Ecart_Pce_El(n-1)+4*Ecart_Pce_El(n-2)+DBuck(n-2);
    ElzCom=1;
    if DBuck(n)>0.89,
        DBuck(n)=0.89;
    end
    if DBuck(n)<0.5,
        DBuck(n)=0.5;
    end

else
    DBuck(n)=0;
    ElzCom=0;
end
if StatePEMFC=='ON'
    %DBoost(n)=Boost_Duty_Cycle;

```

```

    DBoost(n)=25*Ecart_Pce_FC(n)+10*Ecart_Pce_FC(n-1)-
15*Ecart_Pce_FC(n-2)+DBuck(n-2);
    PEMFCCom=1;
else
    DBoost(n)=0;
    PEMFCCom=0;
end
IPEMFC(n)=PEMFCCom*((IpemfcMax*(B_Boost0*DBoost(n)+B_Boost1*DBoost(n-
1))-A_Boost1*IPEMFC(n-1))/A_Boost0);
if IPEMFC(n)<=0,
    UPEMFC(n)=0;
else

UPEMFC(n)=D0+D1*Temperature_Ope+D2*log(IPEMFC(n)/Ipemfc0)+Rpmfc*IPEMFC(n
)/Temperature_Ope;
end

UElz(n)=ElzCom*((E(n)*(B_Buck0*DBuck(n)+B_Buck1*DBuck(n-1))-A_Buck1*UElz(n-1))/A_Buck0);
if UElz(n)>E(n),
    UElz(n)=E(n);
end
Uelz=UElz(n);
aa=UElz(n)/19.85;
if aa==0,
    aa=1;
end
b=ElzCom*(-167+0.4585*Temperature_Ope+273*log(aa)-
11.85*UElz(n)/Temperature_Ope);
IELz(n)=b*UElz(n)/E(n);
if IElz(n)>IELzmax
    IElz(n)=IELzmax;
end
if IElz(n)<0
    IElz(n)=0;
end
I=IELz(n);
%Évaluation des pertes
Perte_El(n)=((1-Cur_Eff_Elz)/Cur_Eff_Elz)*E(n)*IELz(n);
Perte_FC(n)=((1-Cur_Eff_PEMFC)/Cur_Eff_PEMFC)*UPEMFC(n)*IPEMFC(n);

%pause
end
WHL=0;
subplot(211);plot(t,W) ; %hold on; plot(t,W_V)
subplot(212);plot(t,IELz.*E); hold on; plot(t,IPEMFC.*E,'r')
%figure
%subplot (211); plot(t,(IWT+IPV).*E');
%subplot (212); plot(t,ILoad.*E');
display('PI')
WH
WL
W0
for i=1 : SimTime,
    if (W(i)<WL),
        WHL=WHL+(WL-W(i));
    end

```

```

    if (W(i)>WH),
        WHL=WHL+(W(i)-WH);
    end
end
WHL
WT=sum(W)
Perte_Totale=sum(Perte_El) + sum(Perte_FC)
COP=1-WHL/WT
rendement=1-Perte_Totale/(sum((IWT+IPV).*E)+W0+WH20)
COP=1-WHL/WT
return

function simul_CLF()
%% simulation avec le double hystérésis + FL

%initialisation

close all;
clear all;
global Uelz0;
global C1;
global C2;
global Ielz0;
global Relz;
global Telz;
global Uelz;

%BATTERY%%%%%%%%%%%%%
Ki=0;
QFC=220;%4*220;
Q0=220;%4*220;
E0=48;
Wmax= QFC*E0;%42240; %charge maximale
RFC=0.0076; %résistance interne totale des bat
Charge_Init_Bat=0.8*Wmax;%42240;
W0=Charge_Init_Bat; %Q0*E0;
alpha=Ki/E0;
Temperature_Ope=25;
WH=0.75*Wmax;%0.99995*Wmax
WL=0.60*Wmax;%0.9990*Wmax
P_El=1250; %puissance nominale de l'électrolyseur
P_FC=750; %puissance nominale de la PAC

% BUCK%%%%%%%%%%%%%
%Buck_Duty_Cycle=206/255; %pour le premier scénario
Buck_Duty_Cycle=223/255;%223/255;
A0=1;
%paramètre pour 1 min
A_Buck0=1;
A_Buck1=-0.17;
B_Buck0=1.632;
B_Buck1=-0.794;

% BOOST%%%%%%%%%%%%%

```

```

%paramètres pour 1 min
A_Boost0=1;
A_Boost1=0;
B_Boost0=0.9499;
B_Boost1=0.00418;

% ELECTROLYZER %%%%%%%%%%%%%%
Uelz0=22.75;
C1=-0.1765;
C2=5.5015;
Ielz0=0.1341;
Relz=-3.3189;
Telz=Temperature_Ope;
Elz_Current_ef=0.7;
CH2=2.39;
Ncell_elz=24;
IELzmax=120;
% PEMFC %%%%%%%%%%%%%%
Boost_Duty_Cycle=0.14;%0.1;%153.3/255;%0.5*60/255; due à la température
D0=33.18;
D1=-0.013;
D2=-1.57;
Ipemfc0=8.798;
IpemfcMax=120;
Rpemfc=-2.04;
Ncell_PEMFC=35;
PEMFC_Current_ef=1/0.45; % car il consomme et on connaît I en sortie

% INVERTER %%%%%%%%%%%%%%
r_inv=0.9;

% storage %%%%%%%%%%%%%%
WTank=50000;
WH2O=0.75*WTank;
deltaH=286;

% PV current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\sousso\Mémoire\Profils\PV.txt';
[tt, IPV]=LectureFichier(NomFichier);

% WT current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\Sousso\Mémoire\Profils\WT.txt';
[tt, IWT]=LectureFichier(NomFichier);
Norm_IWT=max(IWT);

%IWT=0.5*IWT;

% LOAD current %%%%%%%%%%%%%%
NomFichier='C:\Sousso\Mémoire\Profils\ProfilLoad.txt';
[tt, ILoad]=LectureFichier(NomFichier);
Norm_ILoad=max(ILoad);

SimTime=length(tt);
%open_system('systeme');
%sim('systeme');

```

```

%%%%%5
%SimTime=300;
t=tt(1:SimTime);

I=zeros(1,SimTime);
E=zeros(1,SimTime);
IELz=zeros(1,SimTime);
IPEMFC=zeros(1,SimTime);
W=zeros(1,SimTime);
WH2=zeros(1,SimTime);
Q=zeros(1,SimTime);
UELz=zeros(1,SimTime);
Perte_EL=zeros(1,SimTime);
Perte_FC=zeros(1,SimTime);

% initialisation spéciale
DebutSim=2;
for i=1:DebutSim,
    Q(i)=Q0;
    W(i)=W0;
    WH2(i)=WH20;
end

deltaT=1;
alpha=0;
StatePEMFC='OF';
StateElz='OF';
Cur_Eff_PEMFC=0.45;
Cur_Eff_Elz=0.7;
VT=22.4; deltaH=286;
WM=(WL+WH)/2;
DBoost(1)=0;
DBuck(1)=0;

for n=DebutSim : SimTime
    n
    I(n)=IWT(n-1)+IPV(n-1)+IPEMFC(n-1)-IELz(n-1)-ILoad(n-1);
    Q(n)=Q(n-1)+I(n)*deltaT;
    f(n)=Q(n)/QFC;
    E(n)=E0+RFC*I(n)+Ki*f(n);
    Pin(n)=E(n)*I(n);
    PRi(n)=RFC*(I(n)^2);
    W(n)=W(n-1)+(Pin(n)-PRi(n))*deltaT/(3600*(1+alpha));
    if (StatePEMFC=='ON'),
        VPEMFC(n)=Cur_Eff_PEMFC*Ncell_PEMFC*IPEMFC(n-1)/CH2;
    else
        VPEMFC(n)=0;
    end
    if StateElz=='ON',
        VELz(n)=Cur_Eff_Elz*Ncell_elz*IELz(n-1)/CH2;
    else
        VELz(n)=0;
    end
    WH2(n)=WH2(n-1)+(VELz(n)-VPEMFC(n))*deltaH*deltaT/(VT*3600);
    %%%%%5

```

```

if W(n)<WL,
    StatePEMFC='ON';
else
    if W(n)>WM,
        if StatePEMFC=='ON',
            StatePEMFC='OF';
        end
    else
        if StateElz=='ON',
            StateElz='OF';
        end
    end
    if W(n)>WH,
        StateElz='ON';
    end
end
if StateElz=='ON'
    DBuck(n)=Buck_Duty_Cycle;%206/255;
    I=IWT(n)/Norm_IWT;
    DBuck(n)=FL_El((W(n)-WM)/(WH-WM),I);
    ElzCom=1;
else
    DBuck(n)=0;
    ElzCom=0;
end
if StatePEMFC=='ON'
    %DBoost(n)=Boost_Duty_Cycle;
    I=ILoad(n)/Norm_ILoad;
    DBoost(n)=FL_FC((WM-W(n))/(WM-WL),I);
    PEMFCCom=1;
else
    DBoost(n)=0;
    PEMFCCom=0;
end
IPEMFC(n)=PEMFCCom*((IpemfcMax*(B_Boost0*DBoost(n)+B_Boost1*DBoost(n-1))-A_Boost1*IPEMFC(n-1))/A_Boost0);
if IPEMFC(n)<=0,
    UPEMFC(n)=0;
else
    UPEMFC(n)=D0+D1*Temperature_Ope+D2*log(IPEMFC(n)/Ipemfc0)+Rpmfc*IPEMFC(n)/Temperature_Ope;
end

UElz(n)=ElzCom*((E(n)*(B_Buck0*DBuck(n)+B_Buck1*DBuck(n-1))-A_Buck1*UElz(n-1))/A_Buck0);
if UElz(n)>E(n),
    UElz(n)=E(n);
end
Uelz=UElz(n);
aa=UElz(n)/19.85;
if aa==0,
    aa=1;
end

```

```

b=ElzCom*(-167+0.4585*Temperature_Ope+273*log(aa)-
11.85*UELz(n)/Temperature_Ope);
IELz(n)=b*UELz(n)/E(n);
if IELz(n)>IELzmax
IELz(n)=IELzmax;
end
if IELz(n)<0
IELz(n)=0;
end
I=IELz(n);
%Évaluation des pertes
Perte_El(n)=((1-Cur_Eff_Elz)/Cur_Eff_Elz)*E(n)*IELz(n);
Perte_FC(n)=((1-Cur_Eff_PEMFC)/Cur_Eff_PEMFC)*UPEMFC(n)*IPEMFC(n);

%pause
end
WHL=0;
subplot(211);plot(t,W) ; %hold on; plot(t,W_V)
subplot(212);plot(t,IELz.*E); hold on; plot(t,IPEMFC.*E,'r')
%figure
%subplot (211); plot(t,(IWT+IPV).*E');
%subplot (212); plot(t,ILoad.*E');
display('PI')
WH
WL
W0
for i=1 : SimTime,
if (W(i)<WL),
WHL=WHL+(WL-W(i));
end
if (W(i)>WH),
WHL=WHL+(W(i)-WH);
end
end
WHL
WT=sum(W)
Perte_Totale=sum(Perte_El) + sum(Perte_FC)
COP=1-WHL/WT
rendement=1-Perte_Totale/(sum((IWT+IPV).*E)+W0+WH20)
return

```