

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
ALEXIS BILODEAU

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE GESTION DU FLUX
D'ÉNERGIE POUR UN SYSTÈME À ÉNERGIES RENOUVELABLES
UTILISANT L'HYDROGÈNE COMME MODE DE STOCKAGE

NOVEMBRE 2007

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.

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, M. Kodjo Agbossou, pour m'avoir donné l'occasion d'acquérir de l'expérience qui m'est maintenant très précieuse. Il m'a en effet fait confiance pour réaliser plusieurs projets très enrichissants, en stage comme à la maîtrise. J'apprécie beaucoup la bonne relation que nous avons développée. Je voudrais aussi remercier M. Rémy Simard qui m'a fait profiter de sa grande expérience. Je ne saurais oublier de remercier ma conjointe, Mme Mylène Robitaille, pour son appui sans faille sans lequel ce projet aurait été beaucoup plus difficile, en plus d'être toujours prête à réfléchir pour trouver une bonne piste de solution. J'ai aussi pu compter sur l'appui de ma famille, et tout particulièrement de mes parents, qui ont su me transmettre le désir de terminer ce que j'ai commencé. Je tiens à remercier M. Adam Skorek, qui n'a jamais hésité à défendre mon dossier ou à me fournir des lettres de référence lorsque je voulais poser ma candidature sur des bourses. Je remercie aussi M. Pierre Sicard, qui m'a lui aussi fourni nombre de lettres de référence en plus de ne jamais compter son temps pour répondre à des questions techniques, que ce soit dans le cadre de ses cours ou non. Je remercie aussi M. Ahmed Chériti pour sa grande disponibilité et pour m'avoir transmis le goût de faire ce que je fais aujourd'hui. Je voudrais bien sûr remercier tous ceux qui ont rendu mon séjour à l'Institut de recherche sur l'hydrogène plus

agréable, tout particulièrement M. Mamadou Lamine Doumbia, Mme Annalise Czerny et M. Alexandre Palardy. Finalement, je tiens à remercier tous les organismes qui m'ont offert leur appui financier, soit la fondation de l'Université du Québec à Trois-Rivières, le Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies, le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada et, finalement, Hydro-Québec.

Sommaire

Les sources d'énergie distribuée sont devenues une solution intéressante pour contribuer à la réduction des besoins grandissants en énergie. Cette alternative est encore plus attirante lorsqu'elle utilise des sources d'énergie renouvelables. Cependant, les systèmes utilisant ces sources, dont la puissance disponible varie dans le temps, doivent être en mesure de stocker l'excédent d'énergie disponible. L'hydrogène a été retenu par l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) comme mode de stockage à long terme pour son système à énergies renouvelables. Des batteries sont également utilisées pour stocker l'énergie à court terme.

Quoique le système installé à l'IRH présente des bons résultats jusqu'à maintenant, certaines problématiques demeurent. En effet, l'efficacité énergétique du système aurait avantage à être améliorée, principalement au niveau du stockage sous forme d'hydrogène. De plus, il serait préférable de réduire le nombre de batteries utilisées puisque celles-ci augmentent considérablement le coût initial du système en plus d'exiger un entretien onéreux.

Ce travail présente un nouveau système de contrôle permettant d'améliorer les performances du système à énergies renouvelables au niveau de l'efficacité. Le système proposé regroupe un contrôleur global à logique floue interagissant avec des contrôleurs locaux permettant de déterminer la puissance d'opération de l'électrolyseur et de la pile à combustible. Le contrôleur global utilise deux variables en entrée, soit la différence entre la puissance fournie par les sources et celle consommée par les charges ainsi que l'état de charge des batteries. Cette nouvelle méthode permet d'utiliser le système de stockage plus efficacement en réduisant les échanges inutiles entre l'énergie stockée dans les batteries et celle stockée sous forme d'hydrogène.

Ce travail présente également la conception d'un nouvel hacheur élévateur utilisé pour contrôler la puissance d'opération de la pile à combustible. Dans un premier temps, l'asservissement de la puissance de sortie du convertisseur est abordé en comparant les performances d'un contrôleur classique de type proportionnel-intégral et d'un contrôleur à logique floue. La conception des circuits de puissance et de commande du convertisseur est ensuite étudiée.

Finalement, la conception du contrôleur global à logique floue est exposée en détails et des résultats de simulation du système complet sont présentés afin d'établir les performances du contrôleur. Les résultats du système proposé sont

comparés aux performances offertes par le système de contrôle actuellement implanté.

Table des matières

Remerciements	2
Sommaire.....	4
Table des matières.....	7
Table des figures.....	10
Chapitre 1 : Introduction.....	12
1.1 Contexte de la recherche.....	12
1.1.1 Contexte énergétique.....	12
1.1.2 Système à énergies renouvelables.....	14
1.2 Problématique	17
1.3 Objectifs de la recherche	18
1.4 Structure du mémoire	18
Chapitre 2 : Méthode de contrôle du système à énergies renouvelables	21
2.1 Revue des méthodes existantes.....	21
2.1.1 Contrôle par état de charge (SOC) des batteries.....	22
2.1.2 Contrôle par réseaux de neurones	26
2.2 Méthode proposée.....	26
2.2.1 Gestion dynamique de l'énergie	27
2.2.2 Réduction de l'utilisation des batteries	28
Chapitre 3 : Contrôle local des convertisseurs de puissance	30
3.1 Méthodes comparées	30
3.1.1 Contrôleur à logique floue.....	32

3.1.2	<i>Contrôle proportionnel, intégral et dérivatif</i>	34
3.2	Modélisation	36
3.2.1	<i>Pile à combustible</i>	36
3.2.2	<i>Convertisseur CC-CC</i>	38
3.2.3	<i>Batteries</i>	39
3.2.4	<i>Charges</i>	40
3.3	Résultats et discussions	41
Chapitre 4 : Conception d'un convertisseur élévateur		45
4.1	Module d'alimentation.....	47
4.2	Modules de puissance	48
4.3	Système de mesure.....	51
4.4	Système de contrôle	55
4.5	Résultats et discussions	58
Chapitre 5 : Contrôle global du système à énergies renouvelables		62
5.1	Modélisation du système	62
5.1.1	<i>Modèle des batteries</i>	63
5.1.2	<i>Modèle de l'électrolyseur et du convertisseur abaisseur</i>	65
5.1.3	<i>Modèle de la pile à combustible et du convertisseur élévateur</i>	67
5.1.4	<i>Modèle du système de stockage de l'hydrogène</i>	70
5.2	Contrôleur global à logique floue	71
5.2.1	<i>Structure du contrôleur à logique floue</i>	73
5.2.2	<i>Fonctions d'appartenance</i>	75
5.2.3	<i>Règles</i>	77
5.3	Simulations.....	78

5.4	Implantation	82
5.5	Résultats et discussions	85
Chapitre 6 : Conclusions et recommandations.....		92
6.1	Conclusions	92
6.2	Recommandations.....	96
Bibliographie		97

ANNEXE A : Articles publiés

ANNEXE B : Modèles Matlab des contrôleurs locaux PI et à logique floue

ANNEXE C : Code du contrôleur local du hacheur élévateur

ANNEXE D : Code Labview du contrôleur global à logique floue

ANNEXE E : Modèles Matlab du système à énergies renouvelables

Table des figures

Figure 1 : Système à énergies renouvelables de l'IRH.....	15
Figure 2 : Contrôle de la pile à combustible et de l'électrolyseur par double hystérésis.....	24
Figure 3 : Boucle d'asservissement du système	31
Figure 4 : Surface de contrôle du contrôleur logique floue.....	34
Figure 5 : Modèle du système à énergies renouvelables	36
Figure 6 : Réponse des deux contrôleurs pour différentes consignes échelon.....	42
Figure 7 : Réponse des deux contrôleurs aux différentes perturbations.....	43
Figure 8 : Schéma-bloc du convertisseur élévateur	46
Figure 9 : Circuit d'un hacheur élévateur constituant un module de puissance	49
Figure 10 : Photos d'un module de puissance.....	50
Figure 11 : Circuit de filtrage et de mise à l'échelle de la mesure de tension	53
Figure 12 : Circuit de filtrage et de mise à l'échelle de la mesure de courant.....	53
Figure 13 : Circuit de filtrage et de mise à l'échelle de la mesure de température.....	54
Figure 14 : Circuit de multiplication pour la mesure de puissance	55
Figure 15 : Circuit du microcontrôleur.....	56
Figure 16 : Circuit de génération des signaux de modulation par largeur d'impulsion.....	58
Figure 17 : Schéma d'un hacheur élévateur	59
Figure 18: Formes d'onde du hacheur élévateur à la puissance de sortie maximale	61
Figure 19 : Fonctions d'appartenance pour l'écoulement de puissance net (dP) et la consigne de puissance (P*).....	75
Figure 20: Fonctions d'appartenance pour l'état de charge des batteries	76
Figure 21: Surface de contrôle pour le contrôleur à logique floue.....	77
Figure 22: Modèle Simulink global du système à énergies renouvelables.....	80
Figure 23 : Interface du contrôleur à logique floue	83
Figure 24 : diagramme du contrôleur à logique floue	84
Figure 25: Écoulement de puissance dans le système	86

Figure 26: Stockage d'énergie dans le système avec le contrôleur à logique floue.....	87
Figure 27 : Stockage d'énergie dans le système avec le contrôleur à double hystérésis	88
Figure 28 : Stockage d'énergie dans le système avec le contrôleur à logique floue en divisant le nombre de batterie par deux.....	90

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Contexte de la recherche

1.1.1 Contexte énergétique

Le secteur énergétique subit depuis plusieurs années une pression constante puisqu'un certain nombre de problématiques bien réelles demeurent toujours sans solutions établies.

Tout d'abord, l'économie de croissance en vigueur dans la plupart des pays industrialisés fait croître la demande en énergie à un rythme souvent plus rapide que l'offre. Les nouvelles réalités environnementales telles que le réchauffement de la planète et le problème relié à la gestion des déchets radioactifs, par exemple, imposent quant à elles un nombre grandissant de contraintes et contribuent à ralentir le développement de nouvelles sources de puissance électrique. Ceci s'ajoute au fait que plus de 2 milliards de personnes vivent toujours aujourd'hui sans apport d'électricité adéquat [1]. Pourtant, cette électricité serait nécessaire pour maintenir des services essentiels tels que le

pompage de l'eau et la réfrigération des médicaments. Cette situation s'explique notamment par le fait que dans la plupart des cas, le coût des infrastructures nécessaires serait inabordable. En effet, environ 80 % de la population mondiale vit dans des communautés rurales des pays en voie de développement [2].

Cette situation explique l'émergence d'une tendance à construire des unités de production d'électricité de petite taille, situées plus près des charges auxquelles elles sont destinées. Ces unités, appelées unités de production distribuée, permettent de réduire grandement la taille, et donc le coût, des infrastructures nécessaires à la production et au transport de l'électricité. Ainsi, la production distribuée est une alternative intéressante pour alimenter en électricité les régions qui sont situées loin des sources de production plus importantes.

De plus, l'utilisation des énergies renouvelables telles que le vent et le soleil comme sources de systèmes de production distribuée peut être une solution intéressante face aux considérations environnementales qui prennent de plus en plus d'importance. En effet, les énergies renouvelables peuvent être utilisées pour compléter puis éventuellement remplacer l'utilisation des groupes diesels qui sont actuellement employés sur des sites isolés, par exemple [2]. Ceci contribuerait à réduire l'utilisation des combustibles fossiles donc à atténuer notre dépendance envers cette ressource qui s'épuise, tout en réduisant l'émission de

gaz à effet de serre. De tels systèmes pourraient aussi être utilisés pour appuyer l'alimentation des grands réseaux électriques sans augmenter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les systèmes à énergies renouvelables utilisés en tant que sources de production distribuée pourraient contribuer à réduire la pression que subit le secteur de l'énergie.

Le caractère variable des sources d'énergie renouvelable comme le vent et le soleil exige cependant que ce type de système possède un mode de stockage d'énergie pour être autonome et efficace. Un grand nombre de scientifiques voient actuellement l'hydrogène comme étant un vecteur énergétique prometteur [1-12]. C'est dans cette optique qu'*Agbossou et al.* ont conçu leur système à énergies renouvelables à l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH).

1.1.2 Système à énergies renouvelables

Le système à énergies renouvelables installé à l'IRH (Figure 1) se compose de cinq principales parties, soit les sources d'énergie renouvelable, un bus CC, un sous-système de stockage à court terme (batteries), un sous-système de stockage à long terme (hydrogène) et une charge [10, 11].

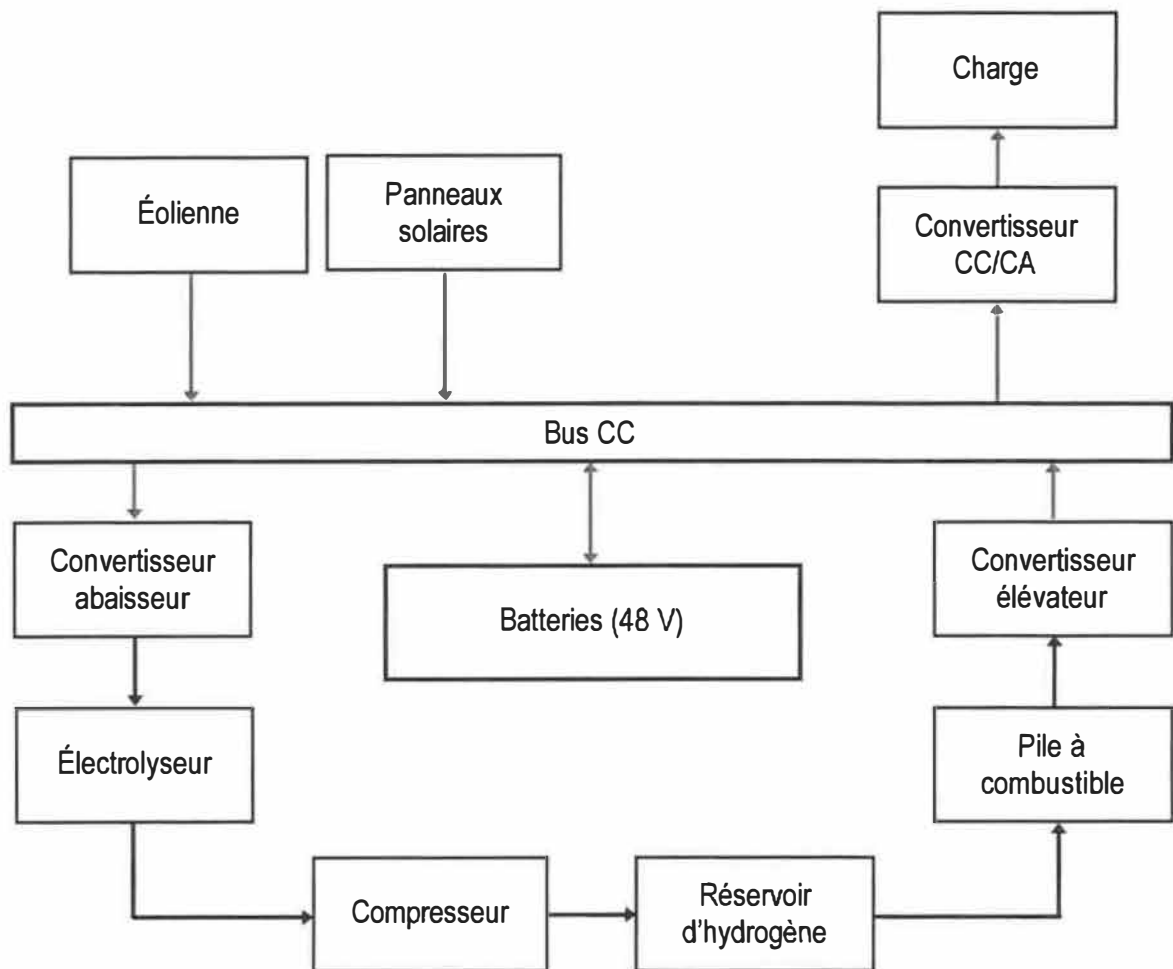


Figure 1 : Système à énergies renouvelables de l'IRH

Les sources, soit une éolienne et des panneaux solaires, fournissent l'énergie au système. Cette énergie se distribue entre la charge et le stockage. En effet, si la charge n'absorbe pas toute l'énergie disponible, l'excédent peut être stocké dans des batteries ou sous forme d'hydrogène.

Les batteries, en plus de servir de mode de stockage à court terme, permettent de maintenir une tension constante sur le bus CC. Ce rôle est important puisque la réduction des variations de tension sur le bus enlève des contraintes sur le choix des composants.

La boucle de stockage à long terme possède quant à elle plusieurs éléments. L'hydrogène est produit grâce à un électrolyseur alimenté par un convertisseur abaisseur. Ce convertisseur remplit deux fonctions, soit adapter le niveau de tension du bus à celui de fonctionnement de l'électrolyseur et contrôler l'écoulement de puissance vers celui-ci. L'hydrogène produit est ensuite compressé puis il est stocké dans un réservoir. Lorsque nécessaire, le système peut reconvertir l'hydrogène en électricité en utilisant la pile à combustible qui alimente un convertisseur élévateur. Ce convertisseur, de la même façon que le convertisseur abaisseur, adapte les niveaux de tension entre la pile à combustible et le bus CC et contrôle l'écoulement de puissance en provenance de celle-ci.

Finalement, la charge est composée d'un convertisseur CC/CA et d'une charge résistive. Le convertisseur produit une tension alternative de $120V_{\text{eff}}$, ce qui lui permet d'alimenter n'importe quel appareil électrique standard.

1.2 Problématique

Quoique les systèmes utilisant les énergies renouvelables comme source d'électricité et l'hydrogène comme mode de stockage possèdent plusieurs avantages au niveau environnemental, il demeure quelques obstacles à surmonter avant d'envisager l'installation à plus grande échelle de ces systèmes [1-12]. Le premier obstacle concerne l'efficacité. En effet, ce facteur est déterminant au niveau du coût initial du système : un système plus efficace permet de sélectionner des composantes (éolienne, panneaux solaires, électrolyseur et pile à combustible) de plus petite taille. L'efficacité d'un tel système peut être améliorée de différentes manières. Dans un premier temps, il est possible d'améliorer l'efficacité de chacune des composantes de façon individuelle. Il est aussi possible de développer des méthodes de calcul plus précises pour dimensionner les différentes composantes en fonction des conditions (ensoleillement, vent, charge) d'un site en particulier. Finalement, il est possible d'élaborer la stratégie de contrôle du système permettant ainsi de minimiser les pertes d'énergie. C'est à cet aspect en particulier qu'aborde le présent travail.

Le deuxième obstacle concerne l'utilisation des batteries dans le système. Celles-ci jouent effectivement un rôle important en termes de stockage à court terme et de maintien de la tension du bus CC. Cependant, les coûts d'acquisition

et de maintenance des batteries sont élevés. De plus, les batteries posent un défi au niveau environnemental lorsqu'elles doivent être remplacées puisqu'elles contiennent plusieurs matières toxiques. Il est donc préférable de réduire leur utilisation au minimum.

1.3 Objectifs de la recherche

Le présent travail comporte un objectif principal qui peut se diviser en deux objectifs secondaires. L'objectif principal consiste à proposer une nouvelle méthode globale de contrôle du flux d'énergie dans le système à énergies renouvelables de l'IRH. Les objectifs secondaires consistent à augmenter l'efficacité du système à énergies renouvelables et à réduire l'utilisation des batteries dans le système.

1.4 Structure du mémoire

Le chapitre deux propose une revue des différentes méthodes de contrôle qui ont déjà été proposées pour différents systèmes à énergies renouvelables. Ce chapitre présente aussi la méthode proposée pour le présent travail.

Le chapitre trois établit une comparaison entre deux méthodes de contrôle qui peuvent être employées pour réguler le flux d'énergie à partir de la pile à combustible pour rendre le système plus efficace. Un modèle de ce sous-système a été développé à l'aide de Matlab/Simulink et les deux contrôleurs ont été simulés pour évaluer leurs performances respectives.

Le chapitre quatre présente, quant à lui, le convertisseur élévateur qui a été développé pour agir comme interface de puissance entre la pile à combustible et le bus CC. Une description du fonctionnement de chacune des parties du convertisseur, soit le module d'alimentation, les modules de puissance, le système de mesure et le système de contrôle, est ensuite présentée.

Le chapitre cinq expose un modèle global du système à énergies renouvelables ainsi que du système de contrôle qui est proposé dans ce travail. Le modèle a été implanté à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Des simulations réalisées sur de longues périodes de temps sous des conditions d'opération réelles ont été effectuées pour vérifier les performances du système. Ce chapitre présente également une analyse des résultats obtenus lors de ces simulations.

Finalement, le chapitre six regroupe les conclusions qui ont pu être tirées de chacune des parties du travail et il propose quelques recommandations pour la suite de ce projet de recherche.

Chapitre 2 : Méthode de contrôle du système à énergies renouvelables

Ce chapitre présente dans un premier temps les différentes méthodes de contrôle qui ont été développées pour les systèmes à énergies renouvelables, et ce pour fins de comparaison avec la méthode proposée. Cette méthode sera ensuite présentée de même que les objectifs visés et les avantages du nouveau système de contrôle.

2.1 *Revue des méthodes existantes*

L'un des plus grands défis concernant les systèmes à énergies renouvelables avec stockage sous forme d'hydrogène est la gestion de l'énergie. Puisque ces systèmes possèdent deux modes de stockage de l'énergie, soit via des batteries ou sous forme d'hydrogène, il est important de choisir judicieusement la façon d'emmagasiner l'énergie afin d'optimiser l'efficacité de ceux-ci en fonction des demande de la charge. Cette section présentera les différentes méthodes de contrôle répertoriées dans les articles scientifiques du domaine.

2.1.1 Contrôle par état de charge (SOC) des batteries

Plusieurs méthodes de contrôle ont été élaborées pour les systèmes à énergies renouvelables avec stockage sous forme d'hydrogène. Cependant, la gestion par état de charge des batteries est de loin la plus commune [3, 5, 7, 11, 12]. Cette méthode consiste principalement à stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène uniquement lorsque les batteries sont suffisamment chargées. La gestion par état de charge peut se subdiviser en trois catégories selon le type de contrôle choisi : contrôle par hystérésis, contrôle par double hystérésis et contrôle par programmation dynamique. Voici une brève description de chacune de ces catégories.

2.1.1.1 Contrôle par hystérésis

Le contrôle par hystérésis consiste à déterminer deux seuils d'état de charge des batteries, soit un seuil maximum et un seuil minimum. Lorsque la charge des batteries atteint le seuil maximum, l'électrolyseur est démarré pour produire de l'hydrogène. À l'inverse, lorsque le seuil minimum de charge des batteries est atteint, l'électrolyseur est arrêté puis la pile à combustible (ou le moteur à combustion interne) est démarrée pour reconvertir l'hydrogène en électricité. Selon Kauranen [5], l'électrolyseur et la pile à combustible fonctionnent toujours à pleine puissance puisqu'ils sont couplés directement au bus CC. Par contre,

dans d'autres cas, des interfaces de puissance permettent de contrôler le régime de fonctionnement de la pile à combustible et de l'électrolyseur [3, 7]. Ceci ajoute un degré de liberté au contrôleur puisque la pile à combustible et l'électrolyseur peuvent alors être opérés dans leur plage de fonctionnement optimal.

2.1.1.2 Contrôle par double hystérésis

Le contrôle par double hystérésis est une extension du contrôle par hystérésis proposée par Agbossou et al. [10, 11]. Cet algorithme comporte quatre seuils distincts d'état de charge des batteries. Deux seuils (minimum et maximum) d'état de charge des batteries sont attribués au fonctionnement de l'électrolyseur et deux autres seuils au fonctionnement de la pile à combustible. L'électrolyseur démarre lorsque l'état de charge des batteries atteint son seuil maximum et il cesse de fonctionner lorsque l'état de charge atteint son seuil minimum. À l'inverse, la pile à combustible démarre lorsque l'état de charge des batteries atteint son seuil minimum puis elle arrête lorsque l'état de charge atteint son seuil maximum (figure 2).

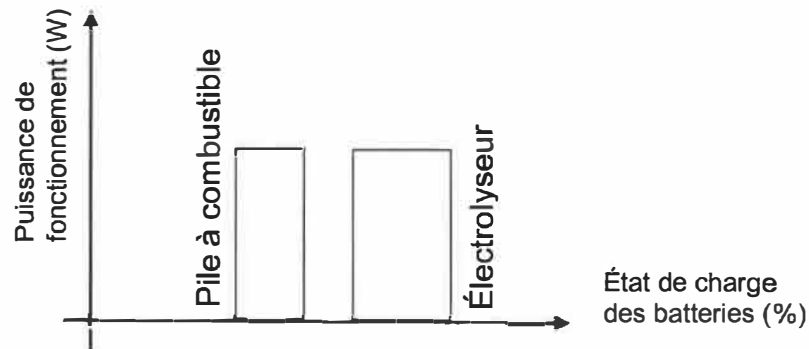


Figure 2 : Contrôle de la pile à combustible et de l'électrolyseur par double hystérésis.

Grâce aux quatre seuils d'état de charge des batteries, cette méthode offre plus de souplesse que le contrôle par hystérésis simple. De plus, cette méthode permet de contrôler le système à énergies renouvelables sans obligatoirement mettre en fonction l'électrolyseur ou la pile à combustible si la situation ne l'exige pas. Finalement, la méthode de contrôle par double hystérésis permet de s'assurer que l'électrolyseur et la pile à combustible ne fonctionnent pas en même temps, ce qui représente une situation de fonctionnement inefficace.

Des interfaces de puissance permettant de contrôler le régime de fonctionnement de l'électrolyseur et de la pile à combustible peuvent également être utilisées avec la méthode de contrôle par double hystérésis. Ces interfaces ajoutent un degré de liberté au contrôleur puisque la pile à combustible et

l'électrolyseur peuvent alors être opérés dans leur plage de fonctionnement optimal.

2.1.1.3 Contrôle par programmation dynamique

Potter et Prushek ont quant à eux proposé une nouvelle approche de contrôle par état de charge. Cette méthode a été testée sur le banc d'essais PHOEBUS [7]. Cette méthode consiste à utiliser la programmation dynamique pour déterminer quel état de charge maintenir dans les batteries à chaque instant [12]. La programmation dynamique est une méthode d'optimisation utilisée en recherche opérationnelle. Cette méthode consiste à découper un problème en plusieurs étapes, ou décisions, puis à déterminer la série de décisions qui minimise un certain critère prédéterminé. Pour Potter et Prushek, le critère à minimiser était les pertes énergétiques dans le système. Ils ont de plus ajouté un critère d'état de charge minimal des batteries afin d'éviter une décharge complète de celles-ci, ce qui pourrait les endommager. Quoique cette méthode semble donner des résultats positifs, soit une efficacité d'à peine 1 % de plus que celle obtenue avec un contrôle classique, elle comporte une faiblesse. En effet, la consigne d'état de charge utilisée par Potter et Prushek pour leur banc d'essai a été déterminée par simulation à l'aide d'un scénario de charge et d'ensoleillement connu à l'avance. Ce qui ne correspond pas à une situation réelle. Il est ainsi difficile de prévoir les vraies performances de l'algorithme.

Finalement, cette méthode comporte un désavantage marqué soit celui d'offrir un niveau de complexité élevé.

2.1.2 Contrôle par réseaux de neurones

Une approche complètement différente a également été proposée par Vosen et Keller [3]. Leur approche consiste à utiliser des réseaux de neurones pour contrôler le système à énergies renouvelables. L'objectif de leur algorithme est de conserver un bilan énergétique nul sur un an. Pour y arriver, ils ont entraîné les réseaux de neurones à conserver un bilan énergétique nul dans les batteries à chaque jour et à minimiser l'utilisation du cycle hydrogène. Ainsi, sur une période de 24 h, tout surplus d'énergie est stocké sous forme d'hydrogène et tout déficit est compensé par l'hydrogène stocké. Vosen et Keller ont déterminé, en simulation, que cette méthode qui privilégie l'utilisation des batteries, permettait de réduire la taille des composantes du cycle hydrogène et de réduire ainsi le coût de l'électricité produite par le système.

2.2 Méthode proposée

La revue des méthodes de contrôle existantes a permis de cibler certaines améliorations qui pourraient être apportées au système à énergies

renouvelables. Ces améliorations comportent deux volets : introduire une gestion dynamique de l'énergie dans le système et réduire au minimum la contribution des batteries. Ces améliorations visent l'augmentation de l'efficacité du système et la diminution du coût de revient de l'énergie produite.

2.2.1 Gestion dynamique de l'énergie

Les recherches de Vosen et Keller [3] montrent des résultats très encourageants concernant l'utilisation de méthodes de contrôle dites « intelligentes ». Ce travail propose donc de remplacer la gestion statique du système par une gestion entièrement dynamique de l'énergie. L'utilisation de seuils statiques de démarrage/arrêt pour l'électrolyseur et la pile à combustible limite la flexibilité du système de contrôle. Ce mode de gestion ne tient pas directement compte de la contribution des sources d'énergie renouvelable et de la demande de la charge.

Le système de contrôle proposé corrige cette faiblesse en utilisant deux variables d'entrée. La première est la puissance nette dans le système, qui est la différence entre la puissance fournie par les sources et celle consommée par les charges. Cette variable reflète donc la quantité d'énergie disponible pour le stockage à long terme ou manquante pour alimenter les charges sans interruption. La deuxième variable est l'état de charge des batteries. Cette

donnée n'est utilisée que pour s'assurer que les batteries ne sont pas déchargées trop profondément, ce qui pourrait réduire significativement leur durée de vie.

L'ajout d'un asservissement local autour des deux interfaces de puissance, soit le hacheur élévateur et le hacheur abaisseur est également proposé. Cet asservissement permettra de contrôler l'écoulement de puissance en provenance de la pile à combustible ainsi que l'écoulement de puissance vers l'électrolyseur. Il sera ainsi possible de faire fonctionner ces appareils dans leur régime le plus efficace.

2.2.2 Réduction de l'utilisation des batteries

Le second objectif concernant l'amélioration de la méthode de contrôle du système consiste à minimiser l'utilisation des batteries. Le nombre de batteries peut être diminué en adoptant une stratégie de contrôle plus efficace et en envisageant l'utilisation de « supercondensateurs » pour emmagasiner l'énergie à court terme. Les batteries présentent en effet une faiblesse dans le système pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elles ajoutent un coût important au système, autant au niveau du coût initial que du coût de remplacement [8, 13]. Elles imposent ensuite plusieurs contraintes sur le fonctionnement du système

puisque'une utilisation inadéquate peut réduire de beaucoup leur durée de vie [1, 13]. Finalement, leur toxicité élevée rend leur remplacement plus compliqué et présente des risques pour l'environnement [14].

2.3 Conclusion

Le chapitre 2 présentait les méthodes qui ont été développées par différentes équipes de recherche pour contrôler l'énergie dans des systèmes à énergies renouvelables. Certaines méthodes s'appuient uniquement sur l'état de charge des batteries pour gérer l'énergie alors que d'autre utilisent plusieurs variables d'entrée. La méthode proposée utilise quant à elle l'état de charge des batteries combiné avec la puissance nette du système pour améliorer les performances du système, notamment pour faire une meilleure utilisation des batteries.

Chapitre 3 : Contrôle local des convertisseurs de puissance

Ce chapitre présente la conception d'un contrôleur de puissance servant à gérer la puissance de sortie des convertisseurs. Le contrôle de la puissance des convertisseurs est utilisé pour réguler l'utilisation de la pile à combustible et de l'électrolyseur en fonction des conditions du système à énergies renouvelables. De cette façon, le stockage sous forme d'hydrogène pourra être utilisé plus efficacement.

Deux méthodes ont été comparées pour implanter le contrôle de la puissance, soit un contrôleur à logique floue et un contrôleur classique de type PID. Les deux méthodes ont été modélisées puis simulées afin d'en comparer les performances.

3.1 Méthodes comparées

Cette section présente la méthode de conception de chacun des deux contrôleurs locaux des convertisseurs abaisseur et élévateur. La boucle

d'asservissement représentée à la figure 3 résume bien le modèle développé. Elle renferme le contrôleur, le procédé à commander et le système de mesure. Il est à noter que la boucle d'asservissement est la même pour chacun des contrôleurs, seul le contrôleur lui-même change. Le modèle de la structure de régulation tient compte du filtrage des mesures ainsi que de l'effet de la quantification provoqué par la conversion analogique/numérique.

La seule contrainte est l'obtention d'une erreur stationnaire nulle. Le temps de stabilisation et le dépassement ont été minimisés pour chacun des contrôleurs.

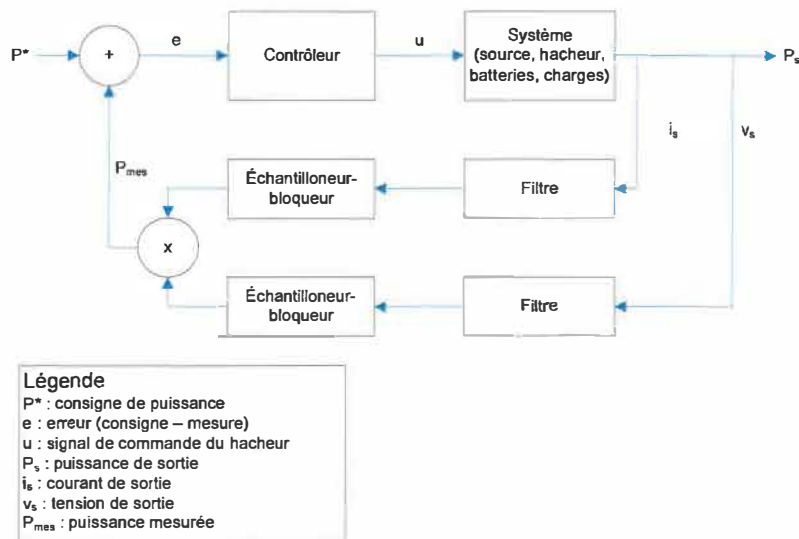


Figure 3 : Boucle d'asservissement du système

3.1.1 Contrôleur à logique floue

Le contrôleur à logique floue adopté est celui qui est le plus largement utilisé [15]. Cette structure de contrôleur à logique floue, qui représente le cas classique de cette famille de contrôleurs, consiste à utiliser l'erreur entre la consigne et la mesure ainsi que la dérivée de cette erreur pour générer une variation du signal de commande. Cette variation est ensuite intégrée pour générer le signal de commande qui est appliqué à la grille des interrupteurs de puissance.

Le comportement du contrôleur peut être représenté par l'équation 1. L'étude de cette équation montre que cette structure de contrôleur possède un comportement qui s'apparente à celui d'un contrôleur PI classique. Ainsi, cette structure élimine toute erreur stationnaire. De plus, un choix judicieux des fonctions d'appartenance et des règles permet de rendre le contrôleur non-linéaire.

$$u = \int \left[f \left(e, \frac{de}{dt} \right) \right] dt \quad (1)$$

u : signal de commande envoyé au convertisseur;

e : erreur sur la puissance de sortie;

$f()$: fonction non-linéaire représentant le comportement du système de décision à logique floue.

Puisqu'il n'existe pas de règles bien définies quant au choix des fonctions d'appartenance et des règles exactes du contrôleur, celles-ci ont été choisies en se basant sur le comportement désiré du système. Les règles et les fonctions d'appartenance ont ensuite été raffinées en simulant le comportement du contrôleur à l'aide du modèle du système présenté plus haut. À chaque simulation, les performances du contrôleur ont été analysées puis les paramètres ont été modifiés dans le but de les améliorer.

Le contrôleur a été raffiné jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'améliorer son comportement de façon significative. Évidemment, cette méthode ne donne pas les gains optimaux qu'il serait possible de calculer en modélisant le système avec beaucoup de précision, mais ils sont suffisamment performants pour bien représenter les résultats qu'il est possible d'espérer avec ce type de contrôleur. La structure finale du contrôleur est bien définie par sa surface de contrôle (figure 4) qui montre la sortie du contrôleur (variation du signal de commande, u) en fonction de ses entrées (erreur, e , et dérivée de l'erreur, de). Il est possible d'observer sur la surface de contrôle que le contrôleur pose une action forte lorsque l'erreur et sa dérivée sont de même signe (l'erreur augmente) et il agit plus doucement lorsque l'erreur diminue. De plus, lorsque la dérivée de l'erreur s'approche de zéro, l'action du contrôleur est très réduite dans le but de

minimiser le dépassement. La structure finale n'utilise que cinq règles, ce qui est avantageux au niveau de la puissance de calcul requise.

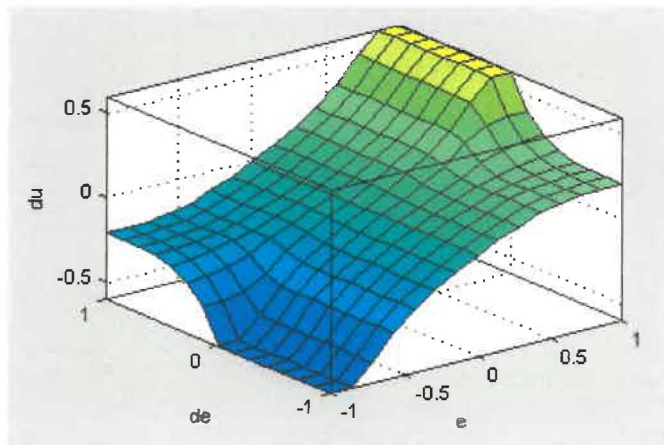


Figure 4 : Surface de contrôle du contrôleur logique floue

3.1.2 Contrôle proportionnel, intégral et dérivatif

La topologie du contrôleur proportionnel-intégral (PI) utilisée est la forme classique sans aucune variante, où un signal de commande est généré par la somme d'un gain proportionnel multiplié par l'erreur et d'un gain intégral multiplié par l'intégrale de l'erreur. Ce type de contrôleur permet d'obtenir de bonnes performances et une erreur stationnaire nulle. La fonction de transfert du contrôleur est décrite par l'équation 2.

$$u = K_p e + K_i \int e dt \quad (2)$$

u : signal de commande envoyé au convertisseur;

K_p : est le gain proportionnel;

K_i : est le gain intégral;

e : est l'erreur sur la puissance de sortie.

Dans ce cas, la conception du contrôleur se limite à déterminer les gains K_i et K_p appropriés pour obtenir une réponse dynamique correcte. Il existe plusieurs méthodes de conception utilisant un modèle mathématique du système à contrôler. Cependant, le modèle mathématique précis de ce système est difficile à établir étant donné son comportement fortement non-linéaire. Il est toujours possible d'utiliser un modèle moyenné, mais ce type de modèle néglige plusieurs phénomènes présents dans un hacheur élévateur et il ne peut donc pas garantir l'obtention des gains optimaux. Ainsi, les gains ont été déterminés d'une façon comparable au contrôleur logique floue. Des gains initiaux ont été fixés puis ils ont été raffinés à l'aide de la simulation jusqu'à ce que la réponse dynamique du système soit adéquate. Ceci signifie que les gains ne sont pas optimaux mais que la réponse a été améliorée jusqu'à ce que les gains de performance soient minimales d'une itération à l'autre.

3.2 Modélisation

Le système à modéliser se divise en quatre éléments principaux, soit la pile à combustible, le convertisseur CC-CC, les batteries et les charges (figure 5). Le modèle a été développé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink et de la boîte à outils SimPowerSystems.

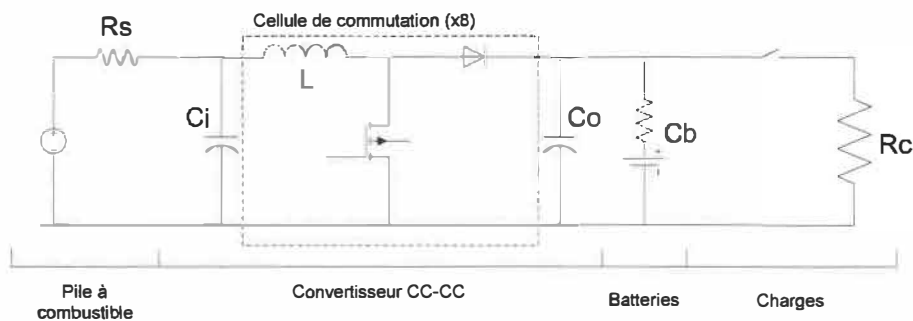


Figure 5 : Modèle du système à énergies renouvelables

3.2.1 Pile à combustible

La pile à combustible utilisée à l'IRH est de type PEM (Proton Exchange Membrane). Ce type de pile à combustible possède l'avantage de fonctionner à basse température [16]. Le modèle utilisé peut délivrer une puissance maximale de 5 kW à une tension de sortie nominale de 24 V. De plus, puisque les pertes parasites de cette pile à combustible sont évaluées à près de 250 W [17], la

puissance minimale sera fixée à 500 W. Sous ce seuil, l'efficacité de la pile à combustible est inintéressante.

Cette pile à combustible possède un système de contrôle qui gère son fonctionnement dynamique, c'est-à-dire le débit des gaz (oxygène et hydrogène), la stoechiométrie (le ratio entre les gaz), la puissance maximale disponible en fonction de la température, etc. Ainsi, le convertisseur CC-CC voit la pile comme une source de tension variable avec une résistance de source. Cette résistance peut être déterminée à partir de la courbe de polarisation de la pile [16]. Cette représentation ne tient compte que du régime permanent de la pile, c'est-à-dire de son fonctionnement à la température nominale où la puissance maximale est disponible. Lorsque la température nominale n'est pas atteinte, le programme de contrôle de la pile limite la consigne de puissance du convertisseur CC-CC.

L'équation 3 démontre que la tension de la pile à combustible dépend de quatre facteurs, soit son potentiel théorique, sa surtension d'activation, sa surtension ohmique et sa surtension de concentration [16].

$$V_{\text{Cell}} = E_{\text{Nerst}} + \sigma_{\text{act}} + \sigma_{\text{ohm}} + \sigma_{\text{conc}} \quad (3)$$

E_{Nerst} : potentiel théorique de la cellule;

σ_{act} : surtension d'activation;

σ_{ohm} : surtension ohmique;

σ_{conc} : surtension de concentration.

Il est démontré que le potentiel théorique et la surtension d'activation dépendent principalement de la pression des réactifs dans la pile et de la température de celle-ci. Ces facteurs sont donc constants en régime permanent. La surtension de concentration intervient quant à elle lorsque la pile fournit un fort courant, c'est-à-dire en régime de saturation. Par contre, la surtension ohmique varie linéairement avec le courant de sortie de la pile. Les pertes sont donc représentées par la résistance interne de la pile.

En posant l'hypothèse que la pile fonctionne en régime permanent, il est possible de considérer uniquement les pertes ohmiques dans le modèle. Ainsi, la pile est représentée comme une source de tension correspondant à la somme du potentiel théorique et des surtensions d'activation et de concentration suivie d'une résistance représentant les pertes ohmiques.

3.2.2 Convertisseur CC-CC

Le convertisseur CC-CC utilisé est un hacheur élévateur de 5 kW qui élève la tension de 24 V de la pile à combustible à la tension de 48 V du bus CC. La

topologie classique du hacheur élévateur commandé par largeur d'impulsions a été utilisée à l'exception qu'il s'agit d'un convertisseur multiphasé [18]. Ce convertisseur possède huit phases, ce qui implique que la commande est déphasée de 45° entre chaque phase. Cette caractéristique apporte l'avantage de réduire l'ondulation de la tension de sortie en plus de réduire les contraintes sur les interrupteurs de puissance.

Afin de bien représenter le comportement du convertisseur, le modèle (Figure 8) contient tous les éléments du convertisseur. Ainsi, les huit phases sont présentes dans le modèle. Il est possible d'utiliser un modèle aussi précis grâce à l'utilisation de la boîte à outils SimPowerSystems de Simulink. En effet, l'élaboration d'un modèle mathématique aussi détaillé aurait été très complexe.

3.2.3 Batteries

Les batteries utilisées sont de type plomb-acide ventilées à décharge profonde. Ces batteries permettent l'atteinte d'un faible état de charge sans réduire significativement leur durée de vie. Des rangées de huit batteries d'une tension nominale de 6 V chacune ont été utilisées afin d'atteindre une tension de bus de 48 V, où chaque rangée a une capacité de stockage de 220 Ah. Pour les trois

rangées connectées au bus CC, la capacité totale est de 660 Ah (environ 31,7 kWh).

Le modèle utilisé pour représenter les batteries est une source de tension en série avec une résistance. Ce modèle simplifié néglige l'effet de l'état de charge sur la tension des batteries. L'état de charge varie cependant très lentement et il n'affectera donc pas le comportement dynamique du contrôleur. Il est possible de vérifier le comportement du contrôleur pour différents états de charge en faisant varier la tension de la source qui représente les batteries. De plus, le modèle tient compte de la variation de la tension du bus lorsque les batteries se chargent ou se déchargent puisque c'est la résistance interne des batteries qui crée cette variation.

3.2.4 Charges

Les charges connectées au bus CC contiennent plusieurs sous-systèmes de contrôle de différents dispositifs. Puisque ces sous-systèmes sont alimentés en permanence et qu'ils consomment une puissance négligeable, ils ne sont pas modélisés. Par contre, un onduleur d'une puissance de 5 kW est connecté au bus CC et il représente une charge importante. Cet onduleur alimente des charges en courant alternatif et la puissance qu'elles consomment peuvent

passer de zéro au maximum instantanément. Ainsi, le modèle représente les charges par une résistance qui, lorsqu'elle est connectée, consomme 5 kW. Le comportement des contrôleurs pourra donc être validé pour la perturbation apportée par la connexion et la déconnexion de cette résistance.

3.3 Résultats et discussions

Cette section décrit les résultats recueillis à la suite de tests réalisés à l'aide du modèle. Elle établit également une comparaison entre les résultats obtenus avec le contrôleur PI et ceux obtenus avec le contrôleur à logique floue.

Le premier test consiste à appliquer une consigne échelon ayant la puissance maximale de la pile à combustible, soit 2 kW (à 0 ms). La consigne est ensuite ramenée à zéro (à 10 ms), puis une consigne échelon de la puissance minimale (500 W) est appliquée (à 20 ms).

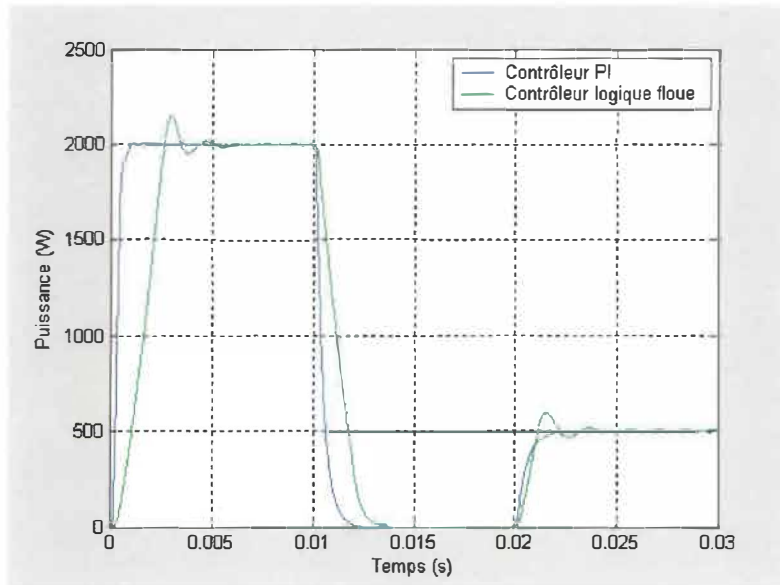


Figure 6 : Réponse des deux contrôleurs pour différentes consignes échelon

Cette première comparaison (figure 6) permet de remarquer que le contrôleur PI offre une meilleure réponse dynamique car le temps de stabilisation est plus court et il n'y a pas de dépassement. Le résultat montre aussi qu'il n'y a aucune erreur stationnaire pour les deux contrôleurs, ce qui pouvait être prédit étant donné que chacun des contrôleurs possède un terme intégral qui annule cette erreur.

Le deuxième test consiste à valider le comportement des contrôleurs pour les deux types de perturbations pouvant être appliquées au système, soit la

connexion (à 10 ms) et la déconnexion (à 20 ms) de la charge ainsi que l'augmentation brusque de la tension d'alimentation lors d'une purge (à 15 ms).

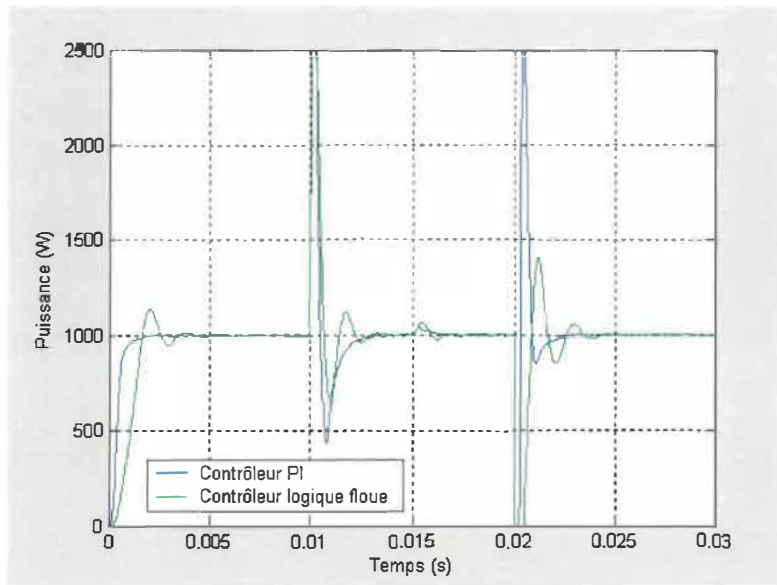


Figure 7 : Réponse des deux contrôleurs aux différentes perturbations

Ce test montre que la réponse aux perturbations est similaire pour les deux contrôleurs (Figure 7). L'augmentation de la tension d'entrée crée un impact négligeable alors que la connexion/déconnexion de la charge affecte la réponse de façon évidente. Les pics sont provoqués par la variation brusque du signal de commande entraînée par la perturbation. Le contrôleur PI stabilise la puissance plus rapidement, mais le temps de réaction des deux contrôleurs est comparable.

Il est aussi important de noter que pour des résultats similaires, le contrôleur PI demeure beaucoup plus simple à concevoir et à implanter. Il n'exige en effet que très peu de puissance de calcul et les algorithmes nécessaires à sa mise en place sont disponibles. La conception est aussi beaucoup plus simple puisque ce contrôleur n'a que deux termes qui varient. Le contrôleur à logique floue offre beaucoup de souplesse par ses nombreux paramètres, mais cette caractéristique rend la conception considérablement plus complexe. Étant donné ces conclusions, le contrôleur PI a été retenu.

Chapitre 4 : Conception d'un convertisseur élévateur

La stratégie utilisée pour contrôler le flux d'énergie dans le système à énergies renouvelables implique l'ajout de convertisseurs de puissance entre le bus CC et les éléments de la boucle de stockage sous forme d'hydrogène. Ces convertisseurs de puissance sont utilisés pour adapter les niveaux de tension d'opération de la pile à combustible et de l'électrolyseur (24 V) avec le niveau de tension du bus CC (48 V). De plus, ces interfaces de puissance sont essentielles pour contrôler la puissance d'opération de l'électrolyseur ainsi que celle de la pile à combustible. Le système installé à l'IRH renfermait déjà un convertisseur abaisseur et un convertisseur élévateur qui raccordaient respectivement l'électrolyseur et la pile à combustible au bus CC. La puissance de sortie des deux convertisseurs était contrôlée à l'aide de modules externes [19].

Ce chapitre présente la conception d'un hacheur élévateur qui a été développé dans le but d'améliorer le convertisseur existant. Dans un premier temps, cette révision a pour objectif de réduire les émissions d'interférence électromagnétiques du convertisseur en améliorant la disposition physique du

circuit. Dans un deuxième temps, l'emploi d'un contrôleur de puissance intégré dans le convertisseur permettra d'améliorer la précision du contrôle.

Le nouveau convertisseur peut se diviser en quatre parties principales : le module d'alimentation, les modules de puissance, le système de mesure et le système de contrôle (figure 8).

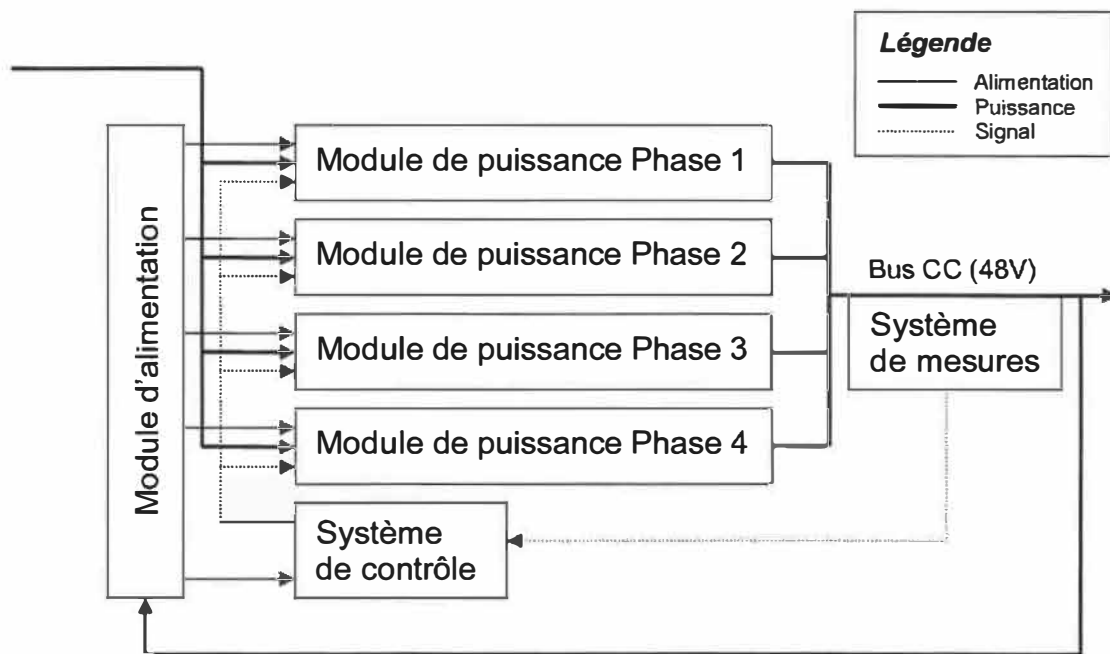


Figure 8 : Schéma-bloc du convertisseur élévateur

4.1 Module d'alimentation

Le module d'alimentation du convertisseur élévateur est essentiel puisque c'est lui qui produit la tension de +12 V nécessaire au fonctionnement de tous les autres sous-systèmes. Cette tension est effectivement utilisée pour alimenter les pilotes des modules de puissance, le système de contrôle et les capteurs du système de mesure. Afin que le système soit opérationnel en tout temps, et non seulement lorsque la pile à combustible est en opération, le module d'alimentation utilise la tension de 48 V du bus CC et l'abaisse à 12 V.

Puisque le module d'alimentation n'exige aucune caractéristique particulière et qu'il existe une grande variété de modules commerciaux pouvant convenir aux besoins du convertisseur élévateur, il a été déterminé qu'il serait préférable de choisir un module existant. Ainsi, il sera possible de concentrer les efforts de développement sur les parties les plus critiques du prototype. Le module d'alimentation de modèle PTK15-Q48-S12 fabriqué par V-Infinity a donc été choisi. Celui-ci accepte une tension allant de 20 V à 72 V en entrée et il fournit une tension de 12 V ainsi qu'un courant maximal de 1,25 A en sortie.

4.2 Modules de puissance

Le principe utilisé pour l'étage de puissance du nouveau convertisseur s'inspire de celui du premier prototype qui a été implanté au système à énergies renouvelables de l'IRH [18]. En effet, le convertisseur de puissance est composé de huit hacheurs élévateurs, dont la figure 9 représente un module, connectés en parallèle et dont la commande par modulation de largeur d'impulsion est déphasée de 45 degrés pour chacun. L'inductance L1, le MOSFET Q3 et la diode double D5 représentent une cellule de commutation du hacheur. Le condensateur C18 est quant à lui le condensateur de sortie de la cellule et les résistances R9 et R10 ainsi que les condensateurs C16 et C17 sont utilisés comme « snubbers » afin de réduire les pics de tension sur le drain de Q3. Cette topologie présente des avantages importants puisqu'elle permet de réduire la taille des semi-conducteurs de puissance utilisés pour chaque étage en plus de réduire la puissance des émissions d'interférence à la fréquence de commutation. Chaque cellule de commutation est commandée par un circuit de commande individuel. L'optocoupleur ISO3 sert à isoler la carte de commande du circuit de puissance et le pilote U4 est utilisé pour assurer une commutation rapide du MOSFET afin de réduire les pertes par commutation.

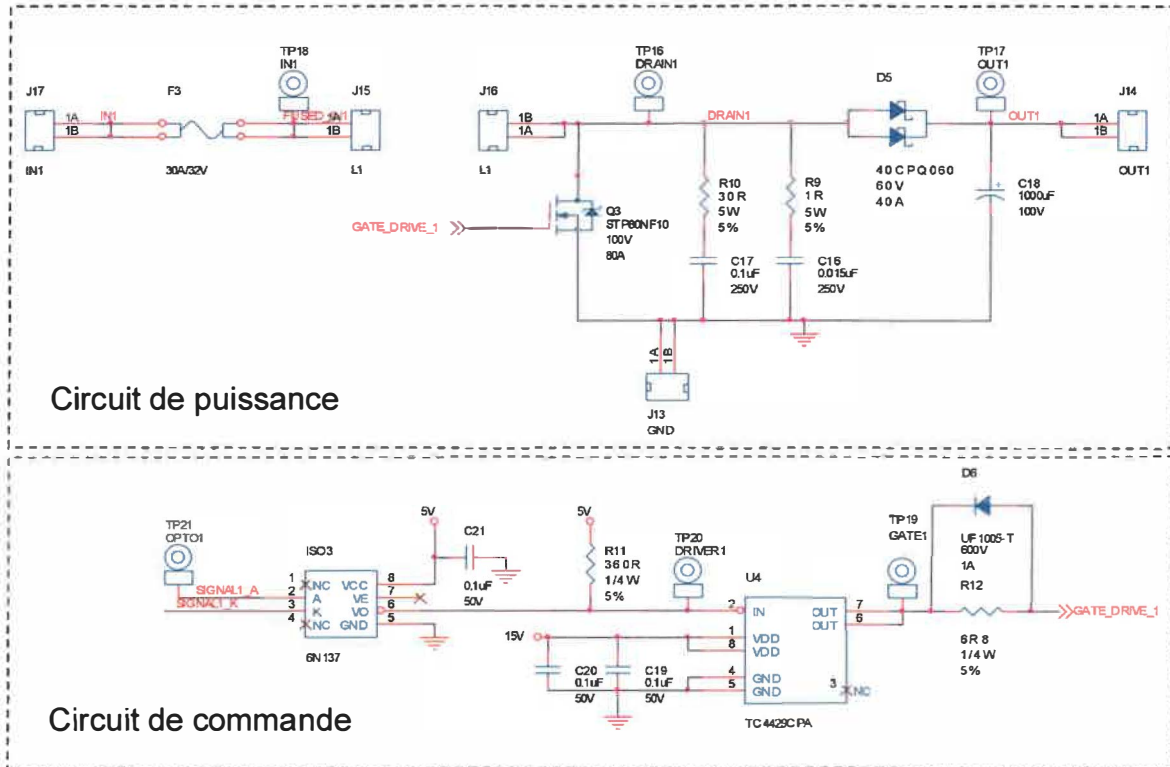


Figure 9 : Circuit d'un hacheur élévateur constituant un module de puissance

Cependant, plusieurs améliorations ont été apportées par rapport au premier prototype du convertisseur élévateur. Dans un premier temps, les huit hacheurs élévateurs ont été répartis sur quatre circuits complètement indépendants (Figure 10). Cette approche modulaire facilite la réparation du hacheur élévateur en cas de bris puisqu'il est possible de remplacer le module défectueux directement sans affecter les modules fonctionnels. De plus, cette méthode offre plus de flexibilité au niveau du positionnement des circuits dans le boîtier. Ainsi, il est possible de positionner les différents éléments de puissance plus près les uns

des autres et ainsi de réduire la longueur des fils pouvant émettre des interférences.

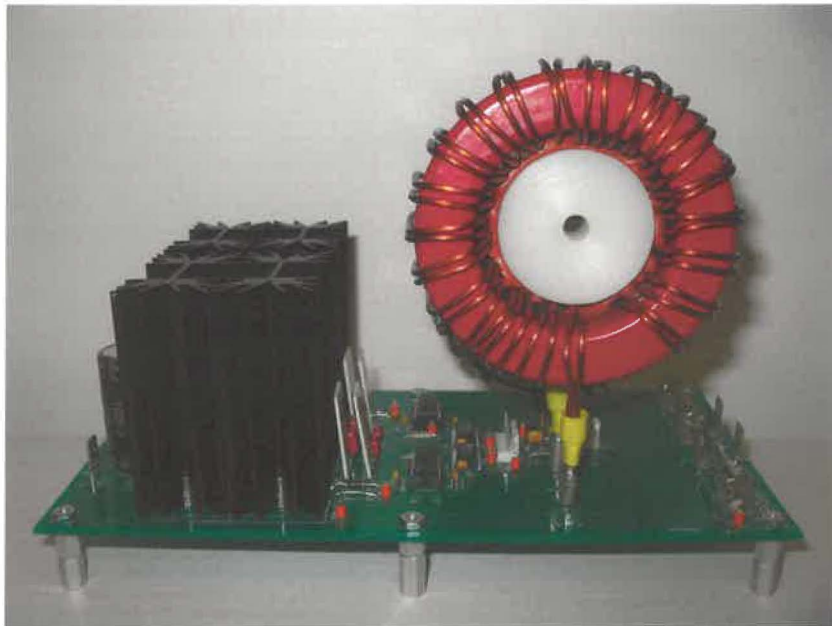


Figure 10 : Photos d'un module de puissance

Dans un deuxième temps, les pilotes des MOSFET ont été intégrés aux modules de puissance, toujours dans l'objectif de réduire les émissions d'interférence. Une attention particulière a été portée à leur emplacement, ceci dans le but de réduire la longueur de la trace du circuit imprimé qui relie le pilote au MOSFET correspondant. Pour la même raison, les condensateurs de sortie des hacheurs élévateurs ont été incorporés à chacun des modules de puissance. Puisque ces condensateurs portent des courants importants qui varient rapidement (di/dt

élevés), il est fortement conseillé des les placer très près de la sortie des hacheurs afin de réduire, encore une fois, les émissions possibles.

Finalement, la dernière amélioration consiste à ajouter des optocoupleurs sur les signaux de commande des hacheurs. Ces optocoupleurs (ISO3 sur la figure 9) ont deux fonctions importantes : dans un premier temps, ils permettent de protéger le circuit de commande contre les fautes qui pourraient survenir dans les étages de puissance et, dans un deuxième temps, ils réduisent la propagation du bruit de l'étage de puissance vers le circuit de commande.

4.3 *Système de mesure*

Le système de contrôle ne nécessite qu'un seul paramètre pour être opérationnel, soit la puissance de sortie du convertisseur. La méthode la plus simple pour obtenir la puissance est de mesurer le courant et la tension à la sortie du convertisseur élévateur et de multiplier les mesures ensemble (équation 4). Puisque cette mesure est cruciale pour la performance de l'asservissement, la multiplication est effectuée de façon analogique à l'aide d'un circuit intégré. De plus, afin de prévenir une surchauffe éventuelle du convertisseur, la température du boîtier est également mesurée.

$$P_o = U_o I_o \quad (4)$$

P_o : puissance de sortie du convertisseur (W);

U_o : tension de sortie du convertisseur (V);

I_o : courant de sortie du convertisseur (A).

La tension de sortie est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension qui fait passer la plage de tension mesurée de 0 V – 65 V à 0 V – 5 V. Afin de réduire le bruit mesuré, une entrée différentielle a été utilisée. Cette mesure est ensuite filtrée à l'aide d'un filtre passe-bas qui coupe les fréquences supérieures à 2 kHz avec une pente de 40 dB / déc (figure 11). Ce filtre permet d'atténuer fortement les composantes de la tension qui sont produites par la commutation du convertisseur à 20 kHz et ainsi de mesurer la valeur moyenne de la tension de sortie. Finalement, le signal présent à la sortie des filtres est divisé par 2 afin de le ramener dans une plage acceptable par le microcontrôleur, soit une plage variant de 0 V à 2,5 V.

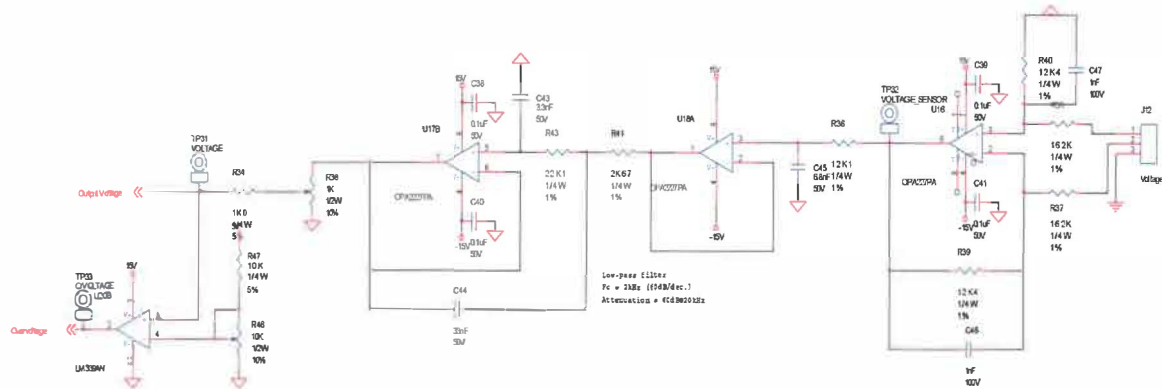


Figure 11 : Circuit de filtrage et de mise à l'échelle de la mesure de tension

Tel que le montre la figure 12, le courant de sortie est mesuré d'une façon très similaire à celle de la tension de sortie. Un capteur de courant à effet Hall de type HTB-50 TP fabriqué par LEM a été utilisé. Ce capteur convertit un courant de sortie de 0 A – 150 A en une tension de 0 V – 5 V. Cette tension traverse ensuite un filtre identique à celui utilisé pour la mesure de tension puis le signal de sortie du filtre est, encore une fois, divisé pour obtenir une tension de 0 V – 2,5 V.

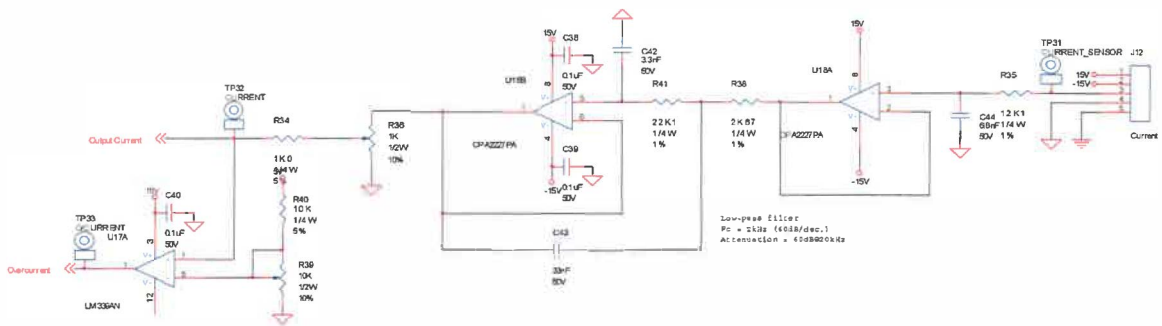


Figure 12 : Circuit de filtrage et de mise à l'échelle de la mesure de courant

La température à l'intérieur du boîtier est quant à elle obtenue à l'aide d'un capteur de type LM35 fabriqué par National Semiconductors qui présente une tension de sortie de 0 V – 1,5 V pour une température de 0 °C – 150 °C. Puisque la température du boîtier varie très lentement, cette mesure traverse un filtre possédant une fréquence de coupure de 20 Hz et une pente de 20 dB / déc. Ceci permet d'utiliser un filtre plus simple sans perdre d'information et ainsi permettre l'arrêt du système dans le cas où cette température dépasserait la limite permise. Le signal de sortie du filtre est également divisé pour répondre aux spécifications du microcontrôleur (figure 13).

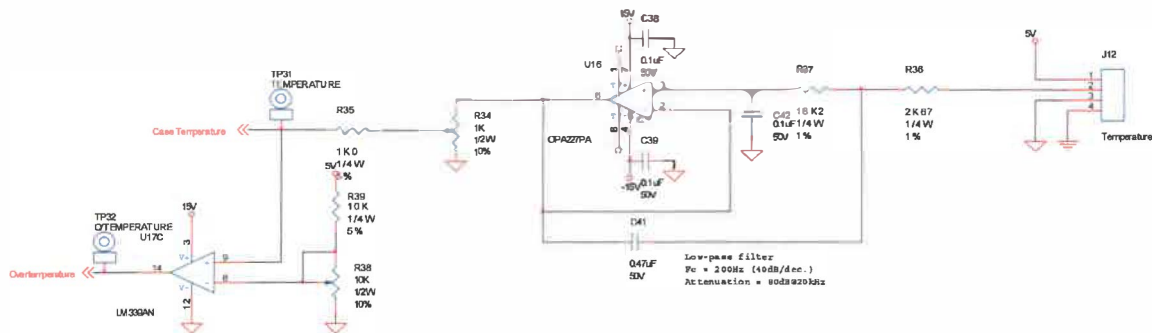


Figure 13 : Circuit de filtrage et de mise à l'échelle de la mesure de température

Finalement, la puissance de sortie est obtenue à l'aide de la multiplication de la tension de sortie avec le courant de sortie, tel que mentionné précédemment. Cependant, afin de libérer le microcontrôleur de cette opération exigeante, un multiplicateur analogique a été utilisé (figure 14). La sortie du multiplicateur

donne donc une tension de sortie de 0 V – 2,5 V correspondant à une puissance de 0 W – 5000 W.

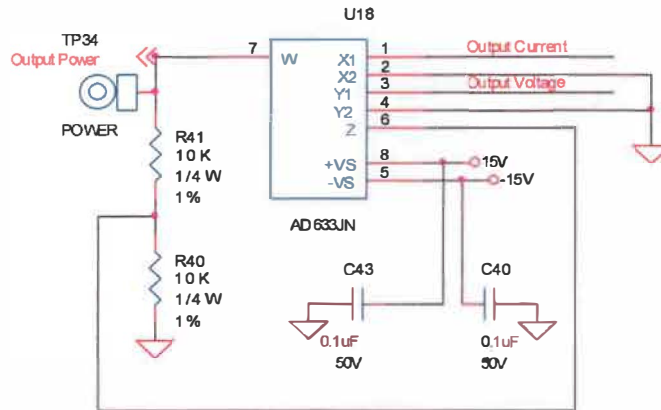


Figure 14 : Circuit de multiplication pour la mesure de puissance

4.4 Système de contrôle

Le système de contrôle se divise en deux parties. La première partie est constituée du microcontrôleur et des éléments nécessaires à son fonctionnement (figure 15). Le microcontrôleur utilisé est un PIC18F452, et il sert principalement à gérer l'algorithme d'asservissement et veiller à la protection du système. Ce microcontrôleur est bien adapté puisqu'il possède cinq entrées analogiques et une bonne puissance de calcul (10 millions instructions par seconde – MIPS). Le microcontrôleur convertit donc chacune des mesures en valeur numérique puis il vérifie que les différentes valeurs obtenues ne dépassent pas un seuil

prédéterminé. Si l'une des mesures dépasse son seuil, le système est arrêté immédiatement. Dans le cas contraire, la sortie qui est calculée par l'algorithme d'asservissement est présentée sur un port de sortie du microcontrôleur. Le port possédant 8 bits, la sortie peut donc varier entre 0 et 255.

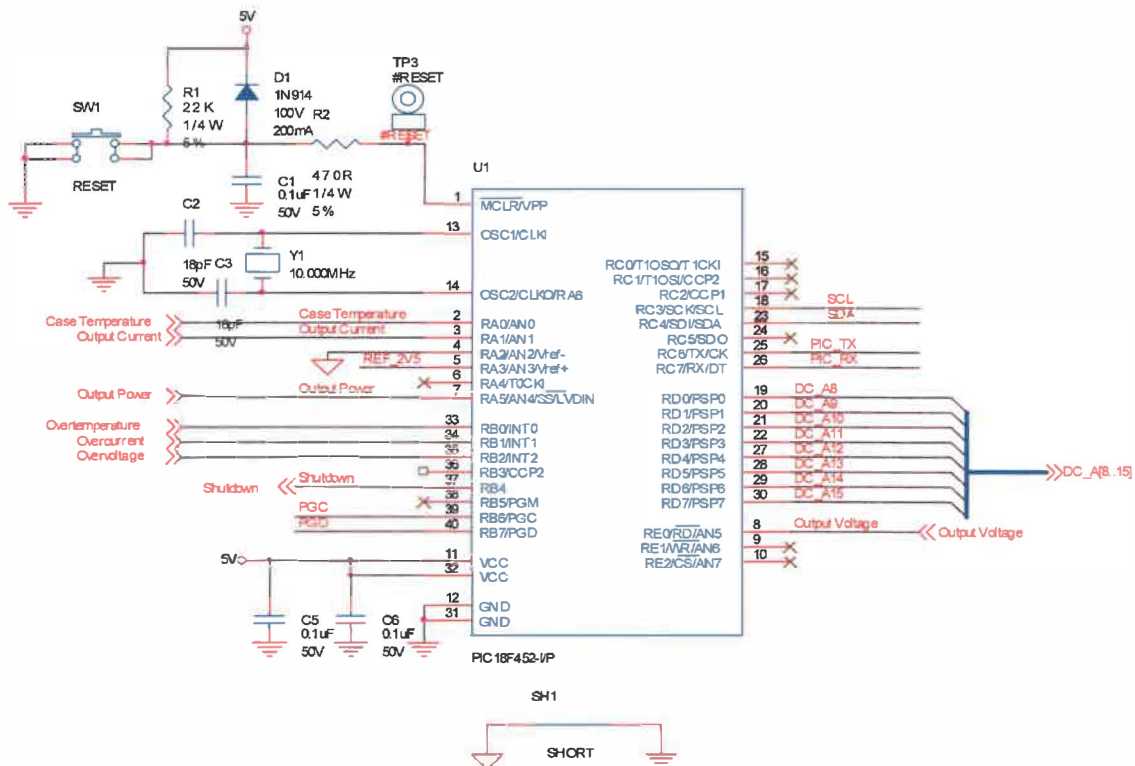


Figure 15 : Circuit du microcontrôleur

La deuxième partie du système de contrôle (figure 16) a pour rôle de convertir la valeur présente sur le port de sortie du microcontrôleur en un signal de modulation par largeur d'impulsion et d'envoyer ce dernier à chacun des modules

de puissance. Cette tâche est effectuée à l'aide d'un compteur (SN74HC393N) et d'une mémoire (AT49F512), soit U11 et U12, respectivement (Figure 16). Le circuit à verrouillage (SN74ACT273E), soit U14, est utilisé pour s'assurer que le changement de largeur d'impulsion soit toujours effectué au début d'un cycle. La mémoire comporte 16 lignes d'adresse et elle peut être interprétée comme étant un tableau de 256 colonnes par 256 lignes. Les 256 colonnes sont continuellement balayées par le compteur de 8 bits à une fréquence de 5,12 MHz. Étant donné qu'une ligne contient 256 cellules, celle-ci sera balayée au complet en 50 μ s, ce qui produira une fréquence équivalente à 20 kHz. Le microcontrôleur choisit la ligne qui sera balayée à l'aide de son port de 8 bits. Chaque ligne contient une largeur d'impulsion différente, il est donc possible de choisir la largeur d'impulsion désirée en sélectionnant la ligne appropriée. De plus, puisque chaque cellule de mémoire contient 8 bits, il est possible de stocker 8 patrons différents d'impulsion pour chaque ligne. C'est de cette façon que les huit signaux de modulation par largeur d'impulsion déphasés chacun de 45° peuvent être stockés dans une seule ligne. Finalement, les huit signaux correspondants à la ligne sélectionnée sont envoyés aux modules de puissance.

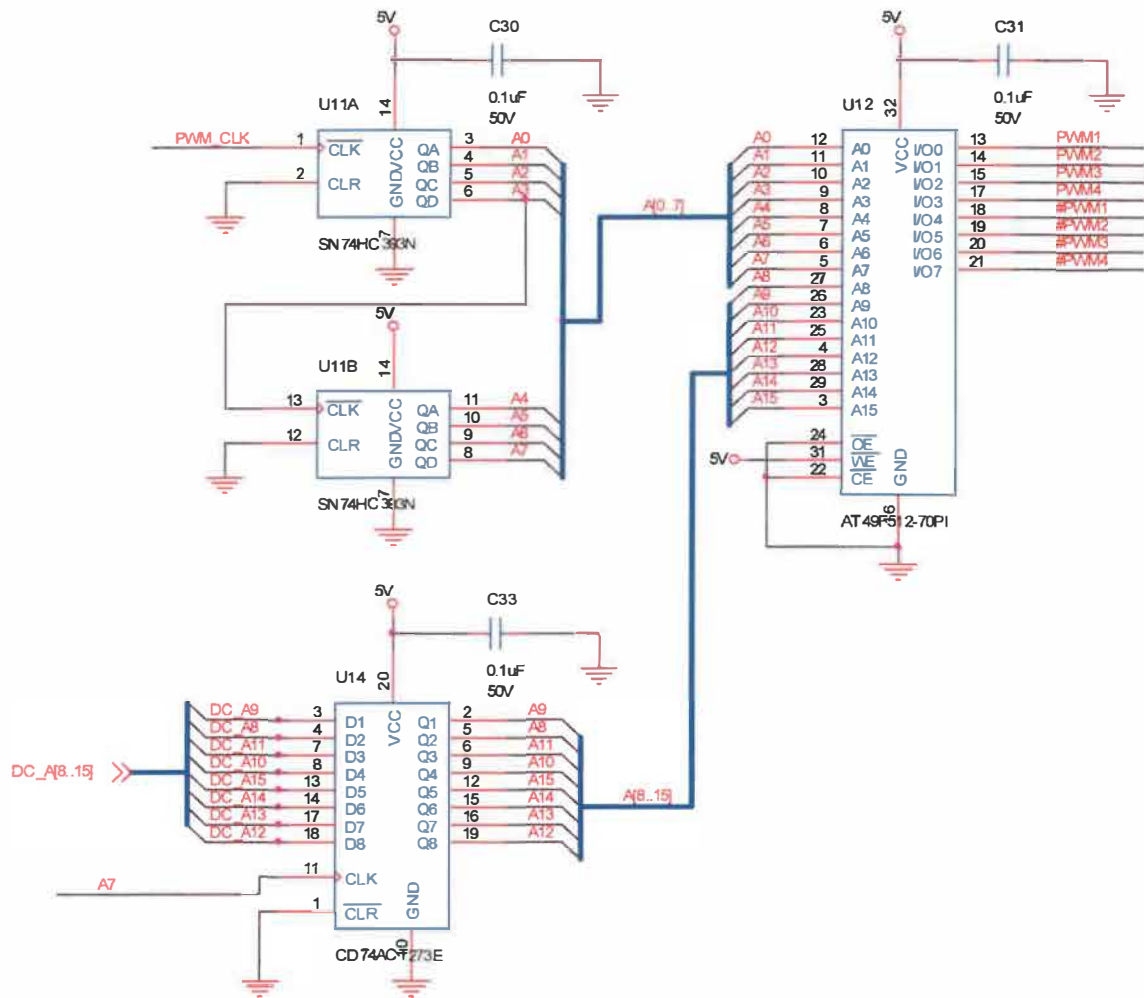


Figure 16 : Circuit de génération des signaux de modulation par largeur d'impulsion

4.5 Résultats et discussions

Un prototype du hacheur élévateur a été construit afin de valider les performances du système décrit précédemment. Le prototype actuel regroupe un

module de puissance et le circuit de commande qui permet de contrôler les quatre modules.

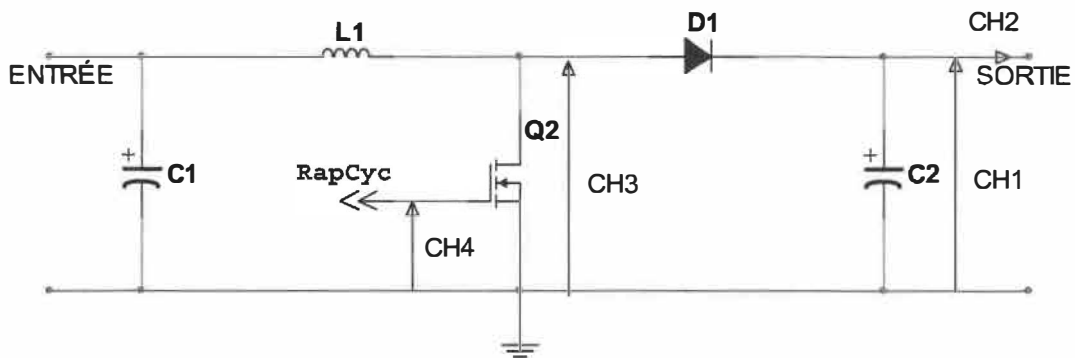


Figure 17 : Schéma d'un hacheur élévateur

Le module de puissance a d'abord été testé sans l'algorithme d'asservissement de la puissance de sortie. Puisque le rapport cyclique appliqué sur le transistor de la cellule de commutation détermine le courant de sortie, et par le fait même la puissance de sortie, le circuit de commande a donc été programmé de façon à appliquer un rapport constant au convertisseur. Cela a permis de mesurer les tensions et courants d'entrée et de sortie du module (Figure 17) et ainsi de vérifier l'efficacité et le bon fonctionnement de ce dernier. La figure 18 montre les principales formes d'onde du convertisseur mesurées à la puissance de sortie maximale, soit à 1250 W. Le canal un (CH1) montre la tension de sortie, le canal deux (CH2) montre le courant de sortie, le canal trois (CH3) montre la tension de

drain du MOSFET de puissance et le canal quatre (CH4) montre le rapport cyclique appliqué à l'une des phases du module. Il est possible de constater que les formes d'onde correspondent à celles attendues pour cette topologie de convertisseur et qu'elles ne contiennent que très peu de bruit. Effectivement, la tension de drain présente des pics de 20 V lors des commutations, ce qui est une excellente performance. L'efficacité mesurée à 1250 W en sortie est de 91,4 %. Par contre, l'efficacité mesurée était de 97,8% à la moitié de la puissance maximale, soit 625 W. Ces résultats démontrent que le module est très efficace de façon intrinsèque, mais que son efficacité diminue avec l'augmentation de la température d'opération. Pour améliorer les performances dans la version finale du prototype, un système de refroidissement par air forcé sera utilisé. Ceci permettra d'abaisser la température d'opération et ainsi de diminuer les pertes lorsque la puissance de sortie est plus élevée.

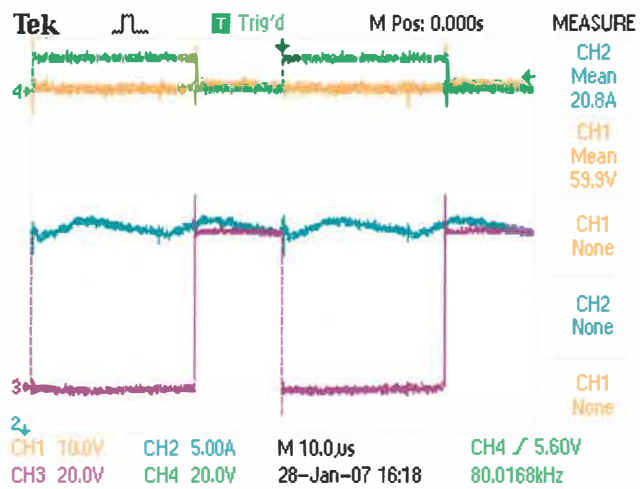


Figure 18: Formes d'onde du hacheur élévateur à la puissance de sortie maximale

Chapitre 5 : Contrôle global du système à énergies renouvelables

Ce chapitre présente le modèle complet du système à énergies renouvelables ainsi que celui du contrôleur global à logique floue qui ont été développés. Le contrôleur global sert à déterminer la puissance d'opération désirée pour l'électrolyseur ou la pile à combustible en fonction de l'état du système. Les résultats des simulations qui ont été faites pour valider le bon fonctionnement du contrôleur sont ensuite présentés.

5.1 *Modélisation du système*

Un modèle complet du système à énergies renouvelables a été développé dans le but de concevoir et de valider le bon fonctionnement du contrôleur global. Le modèle a été construit à l'aide de sous-modèles pour chacune des parties du système. Le modèle décrit en [20] a été utilisé comme base, mais quelques modifications ont été effectuées. La modification la plus significative a été l'ajout des contrôleurs de puissance locaux pour l'électrolyseur et la pile à combustible. Ainsi, les rapports cycliques des convertisseurs de puissance, qui représentaient

des variables du modèle du système, ont été remplacés par les puissances de sortie de ces mêmes convertisseurs. De plus, la dynamique des contrôleurs de puissance locaux a été négligée étant donné qu'elle est beaucoup plus rapide que celle du système entier. Les convertisseurs de puissance sont donc considérés comme étant capables de fournir instantanément une puissance de sortie donnée. Cette puissance de sortie est déterminée par le contrôleur global à logique floue.

5.1.1 Modèle des batteries

L'empilement de batteries représente le noyau central du modèle permettant de relier entre elles toutes les composantes du système à énergies renouvelables. Étant donné qu'il est connecté en parallèle avec le bus CC et qu'il agit comme un élément d'accumulation d'énergie, le courant qui circule dans les batteries peut être défini par l'équation 5 :

$$I_B(t) = I_{PV}(t) + I_{Wind}(t) + I_{Bo}(t) - I_{Bu}(t) - I_{Load}(t) \quad (5)$$

$I_B(t)$: courant des batteries (A);

$I_{PV}(t)$: courant des panneaux solaires (A);

$I_{Wind}(t)$: courant de l'éolienne (A);

$I_{Bo}(t)$: courant du convertisseur élévateur (A);

$I_{Bu}(t)$: courant du convertisseur abaisseur (A);

$I_{Load}(t)$: courant de la charge (A).

Ce courant est positif lors de la recharge des batteries et négatif dans le cas contraire. Connaissant le courant, il est possible de déduire la tension à l'aide de l'équation 6 :

$$U_B(t) = (1 + \alpha t) U_{B,0} + R_i I_B(t) + K_i Q_R(t) \quad (6)$$

$U_B(t)$: tension des batteries (V);

α : taux d'auto-décharge (Hz);

$U_{B,0}$: tension en circuit ouvert au temps 0 (V);

R_i : résistance interne (Ω);

K_i : coefficient de polarisation ($\Omega \text{ h}^{-1}$);

$Q_R(t)$: taux d'accumulation des charges.

L'énergie totale emmagasinée dans les batteries est donnée par :

$$E_B(t) = E_{B,0} + \frac{1}{3600} \int I_B(t) dt \quad (7)$$

$E_B(t)$: énergie totale emmagasinée dans les batteries (Ah);

$E_{B,0}$: énergie initiale dans les batteries (Ah).

En remplaçant (5) dans (7), il est possible d'exprimer l'énergie des batteries dans le domaine de Laplace par l'équation suivante :

$$E_B = E_{B,0} + \frac{I_{PV} + I_{Wind} + I_{Bo} - I_{Bu} - I_{Load}}{3600s} \quad (8)$$

E_B : énergie des batteries (Ah);

Finalement, cette énergie peut être exprimée sous forme d'état de charge à l'aide de l'équation suivante :

$$SOC_B = 100 \times \frac{E_B}{E_{B,Max}} \quad (9)$$

SOC_B : état de charge des batteries (%);

$E_{B,Max}$: capacité totale des batteries (Ah).

5.1.2 Modèle de l'électrolyseur et du convertisseur abaisseur

Cette partie du système peut être représentée comme étant une source de puissance (le convertisseur abaisseur) qui alimente un électrolyseur. Tel que mentionné précédemment, la dynamique du convertisseur abaisseur est négligeable par rapport celle de l'électrolyseur. Le convertisseur a donc été modélisé comme une source de puissance idéale dont le rapport entre la

puissance de sortie et la puissance d'entrée est dicté par l'efficacité du convertisseur.

$$P_{EI} = \eta_{Bu} P_{Bu} \quad (10)$$

P_{EI} : puissance de sortie du convertisseur abaisseur (puissance de l'électrolyseur) (W);

η_{Bu} : efficacité du convertisseur abaisseur;

P_{Bu} puissance d'entrée du convertisseur abaisseur (W).

La tension et le courant de sortie du convertisseur abaisseur sont dictés par l'électrolyseur. Ainsi, la tension est définie par :

$$U_{EI} = \frac{P_{EI}}{I_{EI}} \quad (11)$$

U_{EI} : tension de sortie du convertisseur abaisseur (V);

I_{EI} : courant circulant dans l'électrolyseur (A).

Cette tension peut aussi être exprimée par (12) et elle est reliée au courant circulant dans l'électrolyseur et à sa température d'opération.

$$U_{EI} = U_{EI,0} + C_{1EI} T_{EI}(t) + C_{2EI} \ln \left(\frac{I_{EI}(t)}{I_{EI,0}} \right) + \frac{R_{EI} I_{EI}(t)}{T_{EI}(t)} \quad (12)$$

U_{EI} : tension de sortie du convertisseur abaisseur (V);

$U_{EI,0}$ (V), C_{1EI} ($V^{\circ}C^{-1}$), C_{2EI} (V), R_{EI} ($\Omega^{\circ}C$), $I_{EI,0}$ (A) : constantes déterminées expérimentalement;

$T_{EI}(t)$: température d'opération des cellules de l'électrolyseur ($^{\circ}C$).

En substituant (11) dans (12), il est possible d'obtenir une équation qui relie le courant circulant dans l'électrolyseur à la puissance de sortie du convertisseur. Puisque le taux de production d'hydrogène est directement proportionnel au courant qui circule (13), il est possible de contrôler ce taux en variant la consigne de puissance du convertisseur abaisseur.

$$\dot{V}_{EI} = N_{Cell,EI} \frac{\eta_{i,EI} I_{EI}(t)}{C_{H_2}} \quad (13)$$

$\dot{V}_{EI}$: taux de production d'hydrogène ($l\ s^{-1}$);

$N_{Cell,EI}$: nombre de cellules;

$\eta_{i,EI}$: facteur d'utilisation de l'électrolyseur;

C_{H_2} : coefficient de conversion ($Ah\ l^{-1}$).

5.1.3 Modèle de la pile à combustible et du convertisseur élévateur

Cette partie du système est très similaire au groupe électrolyseur/convertisseur abaisseur. De la même façon, le convertisseur élévateur est représenté comme une source de puissance idéale qui transfère vers le bus CC une puissance

déterminée par sa consigne. De plus, le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée est directement reliée à l'efficacité du convertisseur (14).

$$P_{Bo} = \eta_{Bo} P_{FC} \quad (14)$$

P_{Bo} : puissance de sortie du convertisseur élévateur (W);

η_{Bo} : efficacité du convertisseur élévateur;

P_{FC} : puissance d'entrée du convertisseur élévateur (puissance de la pile à combustible) (W).

Ainsi, la tension d'entrée du convertisseur est fixée par la pile à combustible et est déterminée par (15) et (16).

$$U_{FC} = \frac{P_{FC}}{I_{FC}} \quad (15)$$

U_{FC} : tension de la pile à combustible (V);

I_{FC} est le courant circulant dans la pile à combustible (A).

$$U_{FC} = U_{FC,0} + C_{1FC} T_{FC}(t) + C_{2FC} \ln \left(\frac{I_{FC}(t)}{I_{FC,0}} \right) + \frac{R_{FC} I_{FC}(t)}{T_{FC}(t)} \quad (16)$$

U_{FC} : tension de la pile à combustible (V);

$U_{FC,0}$ (V), C_{1FC} ($V \cdot ^\circ C^{-1}$), C_{2FC} (V), R_{FC} ($\Omega^\circ C$), $I_{FC,0}$ (A) : constantes déterminées expérimentalement;

$T_{FC}(t)$: température d'opération de la pile à combustible ($^{\circ}\text{C}$).

La substitution de (15) dans (16) donne une expression qui lie le courant circulant dans la pile à combustible à la puissance d'entrée du convertisseur élévateur. Cette expression est utile pour déterminer le taux de consommation en hydrogène de la pile à combustible (17).

$$\dot{V}_{FC} = N_{\text{Cell,FC}} \frac{\eta_{l,FC} I_{FC}(t)}{C_{H_2}} \quad (17)$$

$\dot{V}_{FC}$: taux de consommation d'hydrogène (l s^{-1});

$N_{\text{Cell,FC}}$: nombre de cellules;

$\eta_{l,FC}$: facteur d'utilisation de la pile à combustible;

C_{H_2} : coefficient de conversion (Ah l^{-1}).

À l'aide de l'équation 17, il est possible de relier la puissance de sortie du convertisseur élévateur à sa puissance d'entrée, et donc de contrôler la consommation en hydrogène de la pile à combustible à l'aide de la consigne du convertisseur.

5.1.4 Modèle du système de stockage de l'hydrogène

Les modèles décrivant les taux de consommation et de production d'hydrogène permettent de déduire une expression qui présente l'énergie stockée sous forme d'hydrogène dans le système :

$$E_{H_2} = E_{H_2,0} + \int (P_{EI} - P_{FC}) dt \quad (18)$$

E_{H_2} : énergie stockée sous forme d'hydrogène (kJ);

$E_{H_2,0}$: énergie initiale stockée sous forme d'hydrogène (kJ);

P_{EI} : puissance de l'électrolyseur, en termes du taux de production d'hydrogène (W);

P_{FC} : puissance de la pile à combustible, en termes du taux de consommation d'hydrogène (W).

L'équation suivante relie la puissance de l'électrolyseur et celle de la pile à combustible à leurs taux de production et de consommation d'hydrogène :

$$P_{EI} = \frac{\dot{V}_{EI} \Delta H}{V_T} \quad (19)$$

$$P_{FC} = \frac{\dot{V}_{FC} \Delta H}{V_T} \quad (20)$$

P_{EI} : puissance de l'électrolyseur (kJ s⁻¹);

P_{FC} : puissance de la pile à combustible (kJ s^{-1});

ΔH : enthalpie de l'hydrogène (kJ mol^{-1});

V_T : constante de conversion (l mol^{-1}).

La combinaison de (18), (19) et (20) dans le domaine de Laplace permet de déduire l'expression de la production nette d'hydrogène :

$$E_{H_2} = E_{H_2,0} + \frac{1}{s} \left(\frac{\dot{V}_{EI} \Delta H}{V_T} - \frac{\dot{V}_{FC} \Delta H}{V_T} \right) \quad (21)$$

E_{H_2} : énergie stockée sous forme d'hydrogène (kJ);

Le niveau du stockage sous forme d'hydrogène est donc défini par :

$$HL = 100 \times \frac{E_{H_2}}{E_{H_2,Max}} \quad (22)$$

HL : niveau du stockage sous forme d'hydrogène (%).

5.2 Contrôleur global à logique floue

Le contrôleur global du système à énergies renouvelables est critique pour gérer efficacement le flot d'énergie dans le système. Il y a deux objectifs principaux qui doivent être considérés lors de la conception du contrôleur. Le premier objectif

est de réduire le plus possible les transferts d'énergie entre le système de stockage à court terme (batteries) et le système de stockage à long terme (hydrogène). En effet, emmagasiner l'énergie sous forme d'hydrogène s'avère généralement très coûteux en terme d'efficacité. Il est ainsi préférable d'utiliser le stockage à long terme uniquement lorsqu'une grande quantité d'énergie excédentaire est disponible et que les batteries sont suffisamment chargées pour fournir la demande en énergie à court terme. D'autre part, il est préférable de restreindre l'utilisation de la pile à combustible qu'aux situations où la demande en énergie dépasse de beaucoup la puissance fournie par les sources afin de conserver une plus grande efficacité. Le deuxième objectif poursuivi est de prévenir une utilisation abusive des batteries. En effet, même si les batteries utilisées sont à décharge profonde, il est préférable de ne pas les décharger en profondeur pour de longues périodes afin de préserver leur durée de vie. Le contrôleur doit donc tenir compte de l'état de charge des batteries afin d'éviter cette situation.

Le choix d'un contrôleur à logique floue semble approprié pour le contrôle global du système à énergies renouvelables étant donné que le comportement désiré du contrôleur est bien connu et qu'il peut être décrit en utilisant des variables linguistiques (voir section 5.2.2). Ce type de contrôleur possède plusieurs avantages pour ce système. En premier lieu, il permet l'utilisation de plusieurs

variables d'entrée sans augmenter la complexité du contrôleur. Il est aussi plus simple à concevoir puisque le comportement voulu est facile à décrire en mots, mais il serait difficile à modéliser mathématiquement. Il est aussi plus avantageux qu'un système expert classique puisque le comportement pour toute la plage des valeurs d'entrée possibles peut être décrit à l'aide de quelques règles seulement. Finalement, il ne requiert pas de données historiques, ce qui représente un avantage important sur les autres types de contrôleurs intelligents tels que les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

5.2.1 Structure du contrôleur à logique floue

Le comportement du contrôleur a été implanté à l'aide de deux variables d'entrée : l'écoulement de puissance net et l'état de charge des batteries. L'écoulement de puissance net est simplement la différence entre la puissance fournie par les sources et celle consommée par les charges. Cette information est utile pour savoir s'il y a de l'énergie excédentaire disponible et s'il y en a beaucoup. L'état de charge des batteries est quant à lui utilisé pour éviter une décharge profonde des batteries ainsi que pour savoir s'il y a suffisamment d'énergie emmagasinée pour répondre aux besoins à court terme. Les deux variables d'entrée sont normalisées pour faciliter leur représentation dans le contrôleur à logique floue. La mesure de l'écoulement de puissance net est aussi filtrée par un filtre passe-bas ayant une fréquence de coupure très basse. Ce

filtre évite le démarrage de la pile à combustible ou de l'électrolyseur pour de très courtes périodes de temps. Il est effectivement plus efficace d'utiliser ces éléments pour plusieurs minutes à la fois puisque leur efficacité augmente avec leur température d'opération, et que cette température grimpe lentement lorsqu'ils sont en opération [16, 21]. De plus, l'électrolyseur entrepose l'hydrogène qu'il produit dans un réservoir tampon qui n'est transféré au réservoir principal que lorsqu'il est plein. Puisque ce réservoir tampon est purgé dans l'air extérieur au démarrage de l'électrolyseur, une grande partie de l'hydrogène produit pourrait être perdue si l'électrolyseur était démarré souvent pour de très courtes périodes.

La variable de sortie du contrôleur à logique floue est une consigne de puissance. Lorsque cette consigne est positive, elle est transmise au convertisseur élévateur et la pile à combustible est démarrée. À l'opposé, lorsque la consigne est négative, elle est envoyée au convertisseur abaisseur et l'électrolyseur est démarré. Il est important de remarquer que la consigne de puissance minimale a été fixée à 500 W puisque l'efficacité de la pile à combustible et de l'électrolyseur est très faible sous ce seuil [16, 21]. Lorsque la consigne est inférieure à 500 W, la pile à combustible et l'électrolyseur sont arrêtés.

5.2.2 Fonctions d'appartenance

Afin que le contrôleur demeure le plus simple possible, seulement trois fonctions d'appartenance ont été employées. Les variables linguistiques *Positif* (P), *Zéro* (Z) et *Négatif* (N) ont été utilisées avec des fonctions triangulaires pour décrire l'écoulement de puissance net et la consigne de puissance (figure 19).

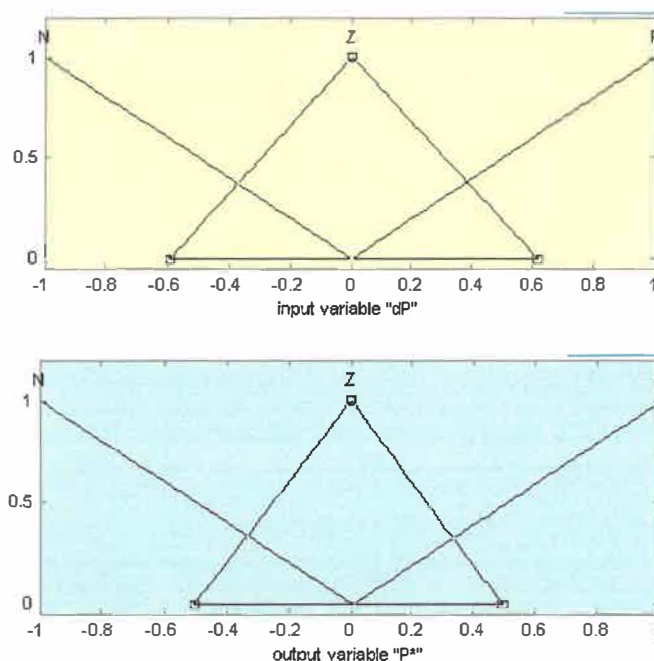


Figure 19 : Fonctions d'appartenance pour l'écoulement de puissance net (dP) et la consigne de puissance (P*)

L'état de charge des batteries a quant à lui été exprimé à l'aide des variables *Bas* (B), *Normal* (N) et *Haut* (H), tel qu'illustré sur la figure 20. Dans ce cas, des

fonctions trapézoïdales ont été utilisées à la place des fonctions triangulaires puisqu'elles étaient plus appropriées pour définir le comportement voulu. Par exemple, le contrôleur doit démarrer la pile à combustible à haute puissance lorsque les batteries sont déchargées. Il faut donc que l'état de charge des batteries soit considéré comme étant « complètement bas » lorsqu'il est sous un seuil prédéterminé. Ce comportement peut être reproduit plus facilement à l'aide des fonctions trapézoïdales.

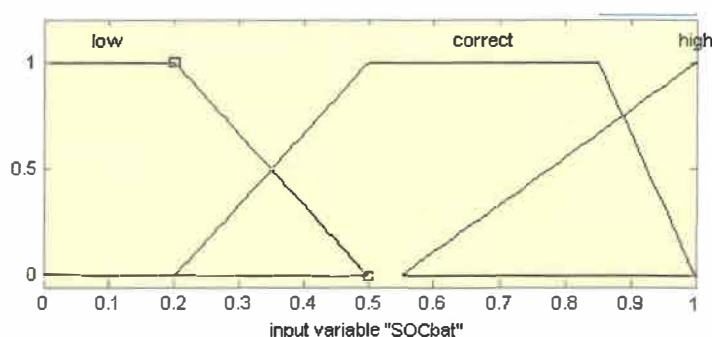


Figure 20: Fonctions d'appartenance pour l'état de charge des batteries

La surface de chacune des fonctions d'appartenance a été déterminée en utilisant la surface de contrôle (figure 21) pour reproduire le comportement désiré. La surface de contrôle montre que la consigne de puissance sera positive (la pile à combustible sera démarrée) lorsque l'état de charge des batteries est très bas et/ou que l'écoulement de puissance net tend à être négatif. À l'inverse, la consigne sera négative (l'électrolyseur sera démarré) lorsque l'état de charge

des batteries est suffisamment élevé et que l'écoulement de puissance net tend à être positif.

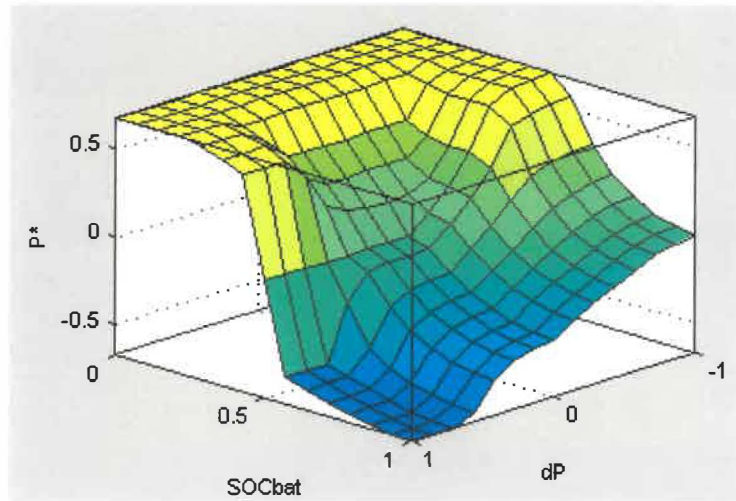


Figure 21: Surface de contrôle pour le contrôleur à logique floue

5.2.3 Règles

Le comportement du contrôleur est aussi défini par des règles. Toujours dans le but de conserver la simplicité de celui-ci, le nombre de règles utilisées a été minimisé le plus possible. Les règles ont été choisies de façon intuitive pour respecter les principes énoncés plus haut :

- Si l'écoulement de puissance net est *Négatif* alors la consigne est *Positive*

- Si l'écoulement de puissance net est *Zéro* alors la consigne est *Zéro*
- Si l'écoulement de puissance net est *Positif* et l'état de charge des batteries est *Élevé* alors la consigne est *Négative*
- Si l'état de charge des batteries est *Bas* alors la consigne est *Positive*
- Si l'état de charge des batteries est *Haut* alors la consigne est *Négative*

Les opérateurs qui ont été utilisés pour calculer la sortie sont MIN pour l'implication, MAX pour l'agrégation et la méthode du centroïde pour déterminer la sortie [22].

5.3 Simulations

Afin de simuler le système à énergies renouvelables, le modèle décrit précédemment a été implanté dans Matlab/Simulink (figure 22) et le contrôleur à logique floue a été défini à l'aide de la boîte à outils de logique floue. L'objectif de la simulation est d'obtenir une représentation du comportement à long terme du système. Pour y parvenir, le système a été simulé pour une semaine typique en utilisant un pas d'intégration de 60 secondes. Puisque le modèle ne contient que

des éléments dont les constantes de temps sont très longues, ce pas d'intégration élevé a un impact négligeable sur les résultats de la simulation.

Le modèle nécessite trois entrées : la puissance délivrée par l'éolienne, la puissance délivrée par les panneaux solaires et la puissance consommée par les charges. Afin d'obtenir des résultats réalistes, des données réelles ont été utilisées. En effet, des données provenant d'une base de mesures de l'éolienne et des panneaux solaires installés à l'IRH ont été utilisées pour les sources. Les données sur la consommation sont, quant à elles, une gracieuseté d'Hydro-Québec. Elles représentent la consommation d'une résidence unifamiliale typique. Toutes les séries de données ont été recueillies lors d'une semaine de juillet.

Puisque le contrôleur s'assure de faire fonctionner l'électrolyseur et la pile à combustible pour plusieurs minutes à chaque démarrage, l'effet de la température a été négligé. La température d'opération nominale de chacun des éléments a été utilisée.

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 277: 1001-1005.

Tableau 1 : Paramètres mesurés et connus

Section	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Batteries	α (Hz)	~ 0	R_i (Ω)	0.076
	$U_{B,0}$ (V)	48	K_i	~ 0
Électrolyseur	$U_{EI,0}$ (V)	22.25	R_{EI} ($\Omega^\circ\text{C}$)	-3.3189
	C_{1EI} ($\text{V }^\circ\text{C}^{-1}$)	-0.1765	C_{2EI} (V)	5.5015
	$I_{EI,0}$ (A)	0.1341	$N_{\text{Cell},EI}$	24
	$\eta_{I,EI}$	0.7	C_{H_2} (Ah l^{-1})	8604
	η_{Bu}	0.95		
Pile à combustible	$U_{FC,0}$ (V)	33.18	R_{FC} ($\Omega^\circ\text{C}$)	-2.04
	C_{1FC} ($\text{V }^\circ\text{C}^{-1}$)	-0.013	C_{2FC} (V)	-1.57
	$I_{FC,0}$ (A)	8.798	$N_{\text{Cell},FC}$	35
	$\eta_{I,FC}$	0.45	C_{H_2} (Ah l^{-1})	8604
	η_{Bo}	0.95		
Stockage d'hydrogène	ΔH (kJ mol^{-1})	286	V_T (l mol^{-1})	22.4

5.4 *Implantation*

Le contrôleur à logique floue exposé dans les sections précédentes a aussi été implanté dans le système à énergies renouvelables installé à l'IRH.

Le contrôleur a été développé à l'aide du logiciel Labview de National Instruments. Celui-ci offre en effet toutes les fonctionnalités nécessaires pour le contrôle du système puisqu'il permet facilement de faire l'acquisition des mesures et de communiquer avec les interfaces de puissance. La boîte à outils « PID Control » a aussi été utilisée puisqu'elle contient des fonctions permettant d'implanter un contrôleur à logique floue.

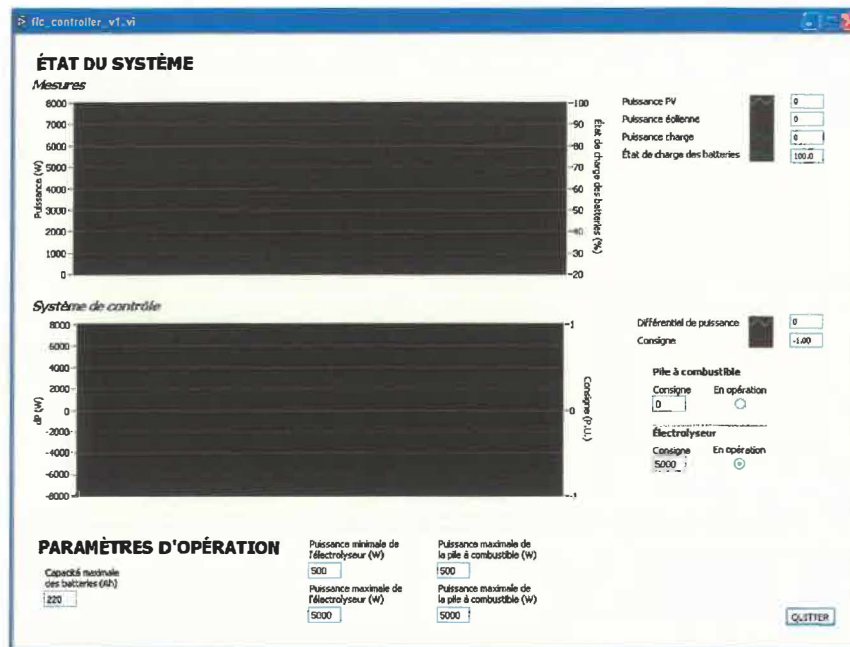


Figure 23 : Interface du contrôleur à logique floue

La figure 23 montre l'interface du contrôleur à logique floue. L'interface utilisateur permet de consulter toutes les mesures nécessaires au fonctionnement du système, soit la puissance fournie par chacune des sources d'énergie, la puissance de sortie et l'état de charge des batteries. Il est aussi possible de configurer certains paramètres d'opération. Par exemple, il est possible de modifier la capacité d'emmagasiner totale des batteries si le nombre de batteries du système est changé. Il est aussi possible de spécifier les consignes minimales et maximales d'opération de la pile à combustible et de l'électrolyseur. Les consignes minimales sont utiles pour empêcher l'un ou l'autre de ces

entrées. La sortie du contrôleur est ensuite convertie en consignes pour le hacheur élévateur et le hacheur abaisseur.

5.5 Résultats et discussions

Le modèle a été simulé dans les conditions décrites à la section précédente. La figure 25 montre l'écoulement de puissance net dans le système et les échanges d'énergie avec le sous-système de stockage sous forme d'hydrogène. La figure 26 montre l'état des sous-systèmes de stockage d'énergie (à court et à long terme) pendant la simulation avec le contrôleur à logique floue proposé. La figure 27 montre, quant à elle, les mêmes données lorsque le modèle est simulé avec un contrôleur à double hystérésis tel que celui actuellement implanté dans le système à énergies renouvelables.

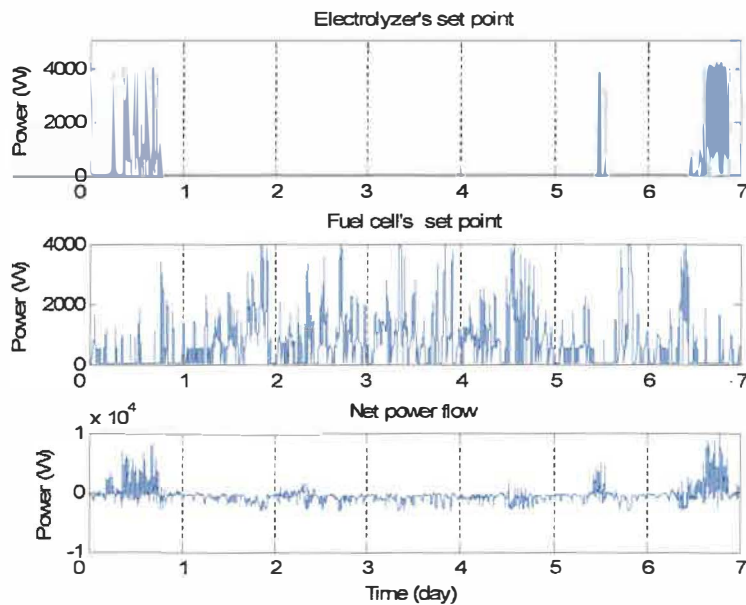


Figure 25: Écoulement de puissance dans le système

La figure 25 montre clairement que, lorsque l'écoulement de puissance net est positif, l'électrolyseur est démarré pour produire de l'hydrogène. À l'opposé, la pile à combustible est démarrée lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'énergie disponible pour alimenter les charges. Il est donc possible d'observer que le niveau du stockage sous forme d'hydrogène augmente lors du premier et du septième jour et qu'il diminue pour les autres jours. Ces résultats ne sont pas surprenants puisque le site choisi pour l'installation de l'éolienne n'est pas très propice pour de forts vents. Ces résultats peuvent donc être améliorés en choisissant un site plus approprié pour l'éolienne ou en ajoutant des panneaux solaires pour augmenter la puissance des sources. Cependant, ces résultats

illustrent très clairement l'utilité du stockage sous forme d'hydrogène. En effet, 66 kWh ont été requis pour alimenter les charges entre le deuxième et le sixième jour. Pour emmagasiner cette énergie dans des batteries, il aurait fallu ajouter 7 empilements (56 batteries) au système. Ceci aurait augmenté de façon significative l'espace occupé par le système, son coût initial et son coût d'entretien. De plus, l'extrapolation de ces résultats pour un mois entier démontre que les batteries sont inadéquates pour le stockage d'énergie à long terme. En effet, il aurait alors fallu ajouter 224 batteries, alors qu'une légère augmentation du volume du réservoir d'hydrogène aurait été suffisante.

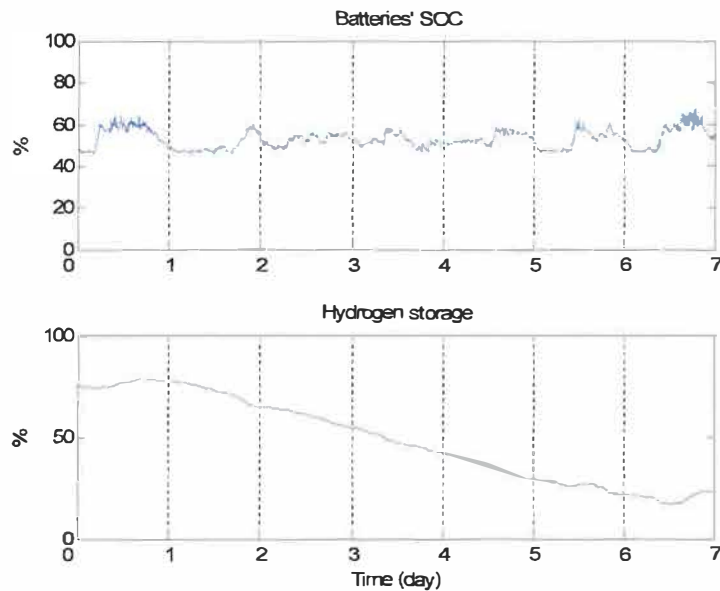


Figure 26: Stockage d'énergie dans le système avec le contrôleur à logique floue

La figure 26 montre que le contrôleur à logique floue a été en mesure de conserver l'état de charge des batteries à une valeur supérieure à 50 % pendant la semaine entière, ce qui permet d'augmenter leur durée de vie. Il a effectivement déjà été démontré que la décharge profonde des batteries est néfaste pour celles-ci [14]. De plus, il est possible de constater que les batteries agissent réellement comme un réservoir d'énergie tampon pour la demande à court terme, puisque leur état de charge varie lentement. Ceci évite des cycles de charge/décharge et prolonge également leur durée de vie.

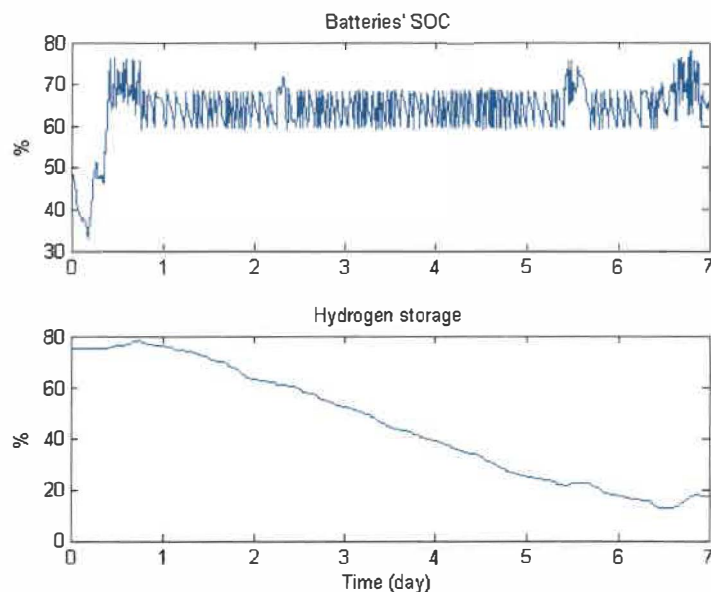


Figure 27 : Stockage d'énergie dans le système avec le contrôleur à double hystérésis

Le même système a été simulé en remplaçant le contrôleur à logique floue par un contrôleur à double hystérésis tel que proposé par Kelouwani [23]. La figure 27 montre que ce contrôleur donne des résultats très similaires. Cependant, il est possible d'observer que l'état de charge des batteries varie beaucoup plus, ce qui peut contribuer à réduire leur durée de vie. De plus, la quantité d'énergie restante après une semaine d'opération pour les deux systèmes diffère considérablement. En effet, elle est de 32 kWh pour le contrôleur à logique floue alors qu'elle est de 29 kWh pour le contrôleur à double hystérésis (tableau 2). Cette comparaison montre clairement que le système proposé est plus efficace, puisqu'il a alimenté les mêmes charges avec la même quantité d'énergie en entrée tout en maintenant des réserves d'énergie plus élevées après une semaine d'opération.

Tableau 2 : Énergie restante après une semaine d'opération pour chaque contrôleur

	Contrôleur à double hystérésis		Contrôleur à logique floue	
	%	kWh	%	kWh
Batteries	66	7	55	3
Réservoir d'hydrogène	17,6	22	23	29
TOTAL		29		32

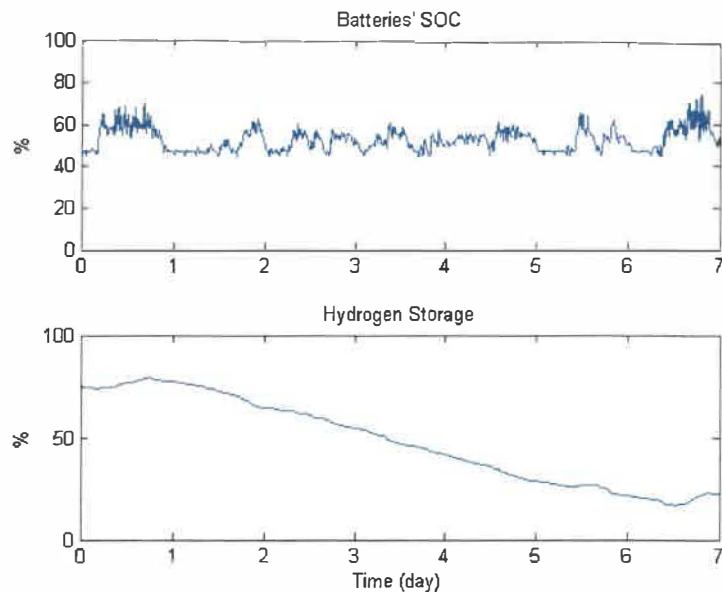


Figure 28 : Stockage d'énergie dans le système avec le contrôleur à logique floue en divisant le nombre de batteries par deux

Le système a aussi été simulé avec un nombre réduit de batteries afin de vérifier s'il est possible de réduire leur nombre. La figure 28 montre clairement que le contrôleur à logique floue proposé offre d'excellentes performances même lorsque le nombre de batteries a été réduit par un facteur de deux. Il est en effet possible de voir que la quantité d'énergie emmagasinée à la fin de la semaine d'opération est équivalente et que l'état de charge des batteries demeure près de 50 % tout au long de la simulation.

L'analyse de ces résultats montre donc que le contrôleur à logique floue se comporte tel qu'attendu. Il est en mesure d'empêcher une décharge trop

profonde des batteries, il permet d'alimenter les charges en permanence et il emmagasine l'énergie sous forme d'hydrogène au moment opportun. De plus, la pile à combustible et l'électrolyseur sont toujours démarrés pour plusieurs minutes à la fois, ce qui augmente leur efficacité. Il est aussi possible de constater que les performances du contrôleur à logique floue sont supérieures à celles du contrôleur à double hystérésis déjà implanté dans le système. Finalement, les résultats de simulation montrent clairement qu'il est possible de réduire le nombre de batteries sans nuire au fonctionnement du système.

Chapitre 6 : Conclusions et recommandations

6.1 Conclusions

La croissance constante de la demande en électricité et la non-disponibilité de cette ressource pour un pourcentage élevé de la population mondiale forcent la recherche de nouvelles solutions énergétiques pour répondre à ces problématiques. Parmi les méthodes proposées par les chercheurs se trouve la production décentralisée, qui consiste à construire des unités de production d'électricité de petite taille situées près des charges qu'elles doivent alimenter. Cette forme de production est encore plus intéressante lorsqu'elle utilise des énergies renouvelables telles que le vent et le soleil puisqu'elle évite ainsi les conséquences environnementales négatives souvent associées à l'utilisation de combustibles fossiles. Les systèmes de production distribuée utilisant des sources d'énergie renouvelable nécessitent toutefois un mode de stockage d'énergie pour compenser les variations de la puissance disponible. L'hydrogène a donc été retenu par l'IRH comme mode de stockage principal pour leur système à énergies renouvelables.

Quoique ce type de système soit très prometteur pour l'avenir, il existe encore plusieurs problématiques à résoudre pour en faciliter l'utilisation à grande échelle, dont son efficacité peu élevée et sa grande dépendance aux batteries comme mode de stockage à court terme. L'IRH travaille donc à améliorer ces deux aspects.

Dans cette optique, le présent travail de recherche avait pour objectif principal la mise au point d'une nouvelle méthode globale de contrôle du flux d'énergie dans le système à énergies renouvelables de l'IRH. Les objectifs secondaires consistaient à augmenter l'efficacité de ce système et à réduire l'utilisation des batteries qu'il renferme.

Le chapitre deux présentait une brève revue des méthodes de contrôle qui ont été développées dans le passé ainsi que celle proposée dans le présent travail. Ainsi, ce travail propose un nouveau système de gestion qui se divise en deux niveaux, soit deux contrôleurs locaux permettant de fixer la puissance d'opération de la pile à combustible et de l'électrolyseur ainsi qu'un contrôleur global qui utilise la logique floue pour déterminer ces puissances d'opération en fonction de l'état du système.

Le chapitre trois présentait quant à lui une comparaison entre deux méthodes de contrôle pouvant être utilisées pour réguler la puissance d'opération de la pile à combustible, soit un contrôleur à logique floue ou un contrôleur classique proportionnel-intégral. La pile à combustible, les batteries ainsi que les deux contrôleurs ont été modélisés puis simulés pour en évaluer les performances. La comparaison entre les deux méthodes a permis de constater que les résultats étaient similaires pour les deux contrôleurs. Cependant, puisque le contrôleur choisi doit être implanté dans un système embarqué disposant d'une puissance de calcul limitée, le contrôleur proportionnel-intégral a été déterminé comme étant plus avantageux. De plus, ce type de contrôleur est plus facile à syntoniser.

La conception du convertisseur de puissance permettant de contrôler la puissance d'opération de la pile à combustible a été présentée au chapitre 4. L'étage de puissance du convertisseur a été conçu selon le concept de hacheur élévateur multi-phasé déjà développé à l'IRH. Cependant, la topologie des circuits a été revue afin de réduire les interférences électromagnétiques émises. De plus, l'étage de puissance a été divisé en quatre modules identiques contenant deux phases chacun afin de rendre l'entretien du convertisseur plus facile et d'améliorer le positionnement des éléments de puissance. Les tests effectués sur un module de puissance ont permis de constater que l'efficacité est excellente (97,8 %) à moyenne puissance mais qu'elle baisse légèrement

(91,4 %) à haute puissance. Un système de refroidissement sera ajouté à la version finale pour améliorer les performances. Un circuit de contrôle a aussi été développé afin d'implanter le régulateur proportionnel-intégral qui permet de contrôler la puissance de sortie du convertisseur. Ce circuit inclut aussi un système de mesure qui permet d'obtenir les valeurs de courant, de tension et de température nécessaires au fonctionnement du système.

Finalement, le chapitre cinq présentait un modèle global du système à énergies renouvelables ainsi que du système de contrôle qui est proposé dans ce travail. Le modèle a été entièrement implanté à l'aide de Matlab/Simulink. Ce chapitre présente aussi la conception du contrôleur global à logique floue. La complexité du contrôleur a été minimisée afin de faciliter sa syntonisation. La simulation du modèle complet pour une semaine d'opération a démontré qu'il n'y a eu aucune interruption dans l'alimentation de la charge et que l'état de charge des batteries est toujours demeuré à un niveau suffisant pour préserver leur durée de vie. De plus, il a été démontré que l'efficacité de ce système de contrôle est supérieure à celle du contrôleur à double hystérésis déjà implanté dans le système à énergies renouvelables. La simulation du système a aussi démontré qu'il est possible de réduire le nombre de batteries par un facteur de deux, tout en maintenant la même efficacité. La diminution du niveau du stockage sous forme d'hydrogène à la fin de la semaine dans toutes les simulations montre cependant qu'à long

terme, la puissance disponible des sources n'est pas tout à fait suffisante pour alimenter la charge. Il faudrait donc choisir un site plus favorable ou utiliser des sources de plus grande puissance. Finalement, l'implantation dans le système réel en utilisant le logiciel Labview de National Instruments a été exposée.

6.2 *Recommandations*

Les résultats obtenus dans cette recherche sont très encourageants. Effectivement, le système de contrôle mis en place offre beaucoup plus de souplesse pour la gestion du flux d'énergie entre le stockage à court terme et le stockage à long terme. Cependant, un gain en efficacité dans chacune des parties du système peut se traduire par des réductions significatives du coût initial d'un tel système et peut donc faciliter sa transition vers un produit commercial. Ainsi, il serait sûrement utile de poursuivre la recherche pour augmenter l'efficacité des transitions entre l'énergie électrique et l'énergie sous forme d'hydrogène. Il serait aussi bénéfique de pouvoir obtenir plus de puissance pour une même surface de panneaux solaires ou pour une même grandeur d'éolienne.

Bibliographie

- 1 NEWNHAM, R.H. and W.G.A. BALDSING (2002). "Benefits of Partial-state-of-charge Operation in Remote-area Power-supply Systems", *Journal of Power Sources*, Vol. 107, pp. 273-279.
- 2 DIENHART, H. and A. SIEGEL (1994). "Hydrogen Storage in Isolated Electrical Energy Systems with Photovoltaic and Wind Energy", *International Journal on Hydrogen Energy*, Vol. 19, No. 1, pp. 61-66.
- 3 VOSEN, S.R. and J.O. KELLER (1999). "Hybrid energy storage for stand-alone electric power systems: optimisation of system performance and cost through control strategies", *International Journal on Hydrogen Energy*, Vol. 24, pp.1139-1156.
- 4 HOLLMULLER, P., J.-M. JOUBERT, B. LACHAL and Y. KLAUS (1998). "Evaluation of a 5kW Photovoltaic Hydrogen Production and Storage Installation for a Residential Home in Switzerland", *Conference on Hydrogen Energy Progress*, Vol. 12, pp. 423-443.
- 5 KAURANEN, P.S., P.D. LUND and J.P. VANHANEN (1993). "Control of Battery Backed Photovoltaic Hydrogen Production", *International Journal on Hydrogen Energy*, Vol. 18, No. 5, pp. 383-390.
- 6 GALLI, S. and M. STEFANONI (1997). "Development of a Solar-hydrogen Cycle in Italy", *International Journal on Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 5, pp. 453-458.
- 7 BARTHEL, H., W.A. BROCKE, K. BONHOFF *and al.* (1998). "An Autonomous Energy Supply System Comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell", *International Journal on Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 4, pp. 295-301.
- 8 VOSEN, S.R. (1997). "A Design Tool for the Optimization of Stand-alone Electric Power Systems with Combined Hydrogen-Battery Energy Storage", *Sandia Report*, Sandia National Laboratories.
- 9 MENZL, F. and E. SPINADEL (1998). "An Autonomous Wind-hydrogen System for Electricity Services to Isolate Locations", *Conference on Hydrogen Energy Progress*, Vol. 12, pp. 777-782.

- 10 AGBOSSOU, K., R. CHAHINE, J. HAMELIN, F. LAURENCELLE *and al.* (2001). "Renewable Energy Systems Based on Hydrogen for Remote Applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 96, pp. 168-172.
- 11 AGBOSSOU, K., M.L. KOHLE, J. HAMELIN *and al.* (2003). "Integrated Stand-alone Renewable Energy System Based on Energy Storage in the Form of Hydrogen", *IEEE Canadian Review*, Vol. 44, pp. 17-20.
- 12 PÖTTER, R. and R. PRUSCHEK (1996). "Examination of the Design of the Energy Management for the PV Plant PHOEBUS Jülich by Dynamic Programming", *HYDROGEN '96*.
- 13 DURYEA, S., S. ISLAM and W. LAWRENCE (2001). "A Battery Management System for Stand-alone Photovoltaic Energy Systems", *IEEE Industry Applications Magazine*, May-June.
- 14 DUNLOP, J.P. (1997). "Batteries and Charge Control in Stand-alone Photovoltaic Systems : Fundamentals and Application", *Sandia Report*, Sandia National Laboratories.
- 15 GABRIEL, P. Introduction à la logique floue et à la commande floue, Université de Liège, [En ligne], 2001. [www.gpa.etsmtl.ca/cours/sys843/pdf/Intro_Flou.pdf] (18 mars 2004).
- 16 FOURNIER, M. (2003). « Utilisation rationnelle de la pile à combustible dans un système de production autonome d'électricité », *Mémoire (M. ès Sc.)*, Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 177 p.
- 17 FOURNIER, F., J. HAMELIN, K. AGBOSSOU and T. K. BOSE (2002). "Fuel Cell Operation with Oxygen Enrichment", *Fuel Cells*, Vol. 2, pp. 117-122.
- 18 AGBOSSOU, K., R. SIMARD, S. KELOUWANI et T.K. BOSE (2001). « Commande multiphasée d'un survolteur pour un système d'énergies renouvelables », *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Toronto, Canada.
- 19 BILODEAU, A. et M. ROBITAILLE (2002). « Cartes de contrôle du convertisseur survolteur et du convertisseur dévolteur », *Rapport technique*, Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières.

- 20 KELOUWANI, S., K. AGBOSSOU and R. CHAHINE (2005). "Model for an Energy Conversion in Renewable Energy System with Hydrogen Storage", *Journal of Power Sources*, Vol. 140, No. 2, pp. 392–399.
- 21 ANOUAR, A. (2003). « Évaluation et contrôle d'un système hybride à énergie renouvelable pour un site isolé », *Mémoire (M. ès Sc.)*, Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 115 p.
- 22 KAEHLER, S. D. Fuzzy Logic Tutorial, Seattle Robotics Society, [Online], 1998. [<http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/flindex.html>] (January 19th 2007).
- 23 KELOUWANI, S. (2002). « Stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène », *Mémoire (M. ès Sc.)*, Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 148 p.

ANNEXE A : Articles publiés

Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications

A. Bilodeau, K. Agbossou *

Hydrogen Research Institute, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 boul. Des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières, Que., Canada G9A 5H7

Received 19 January 2005; accepted 7 April 2005

Available online 24 August 2005

Abstract

The combination of an electrolyzer and a fuel cell can provide peak power control in a decentralized/distributed power system. The electrolyzer produces hydrogen and oxygen from off-peak electricity generated by the renewable energy sources (wind turbine and photovoltaic array), for later use in the fuel cell to produce on-peak electricity. An issue related to this system is the control of the hydrogen loop (electrolyzer, tank, fuel cell). A number of control algorithms were developed to decide when to produce hydrogen and when to convert it back to electricity, most of them assuming that the electrolyzer and the fuel cell run alternatively to provide nominal power (full power). This paper presents a complete model of a stand-alone renewable energy system with hydrogen storage controlled by a dynamic fuzzy logic controller (FLC). In this system, batteries are used as energy buffers and for short time storage. To study the behavior of such a system, a complete model is developed by integrating the individual sub-models of the fuel cell, the electrolyzer, the power conditioning units, the hydrogen storage system, and the batteries. An analysis of the performances of the dynamic fuzzy logic controller is then presented. This model is useful for building efficient peak power control.

© 2005 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Renewable energy; Fuel cell; Fuzzy logic; Electrolyzer; Hydrogen; Energy conversion

1. Introduction

The global energy situation tends to become more complex as the demand grows faster than the offer. With many developing countries lacking the resources to build power plants and distribution networks and the industrialized countries that face insufficient power generation and greenhouse gas emission problems, new solutions to the energy issue are needed. Distributed generation system that use renewable energy resources could be a part of the solution [1–12]. These systems address both the economical and environmental issues of the problem. The Hydrogen Research Institute (HRI) has developed and implemented an autonomous renewable energy systems (RES) that uses wind and solar energy to power a load autonomously (Fig. 1). This is done by

storing the excess energy produced by the sources in hydrogen by using an electrolyser and to provide on-peak energy by reconverting this hydrogen into electricity with a fuel cell when the weather is bad. There is also a battery stack that is used to maintain a constant the DC bus voltage and to store short-term energy. A control system was developed to determine when to produce hydrogen and when to convert it back to electricity. The control algorithm is based on the batteries' state-of-charge (SOC) and it relies on fixed SOC limits to determine when to start the electrolyzer or the fuel cell [2,6,12,13]. However, this method presents two important shortcomings: it does not take into account the system's state except for the batteries' SOC and it does not allow for the control of the hydrogen's rate of production or consumption, which could help manage the energy in the system. Vosen and Keller [12] also presented a control method based on neural networks. This controller uses the system's state to control the hydrogen storage loop but it presents an important weakness: the controller must be provided with high quality

* Corresponding author. Tel.: +1 819 376 5108; fax: +1 819 376 5164.

E-mail address: kodjo_agbossou@uqtr.ca (K. Agbossou).

URL: <http://www.irh.uqtr.ca/>.

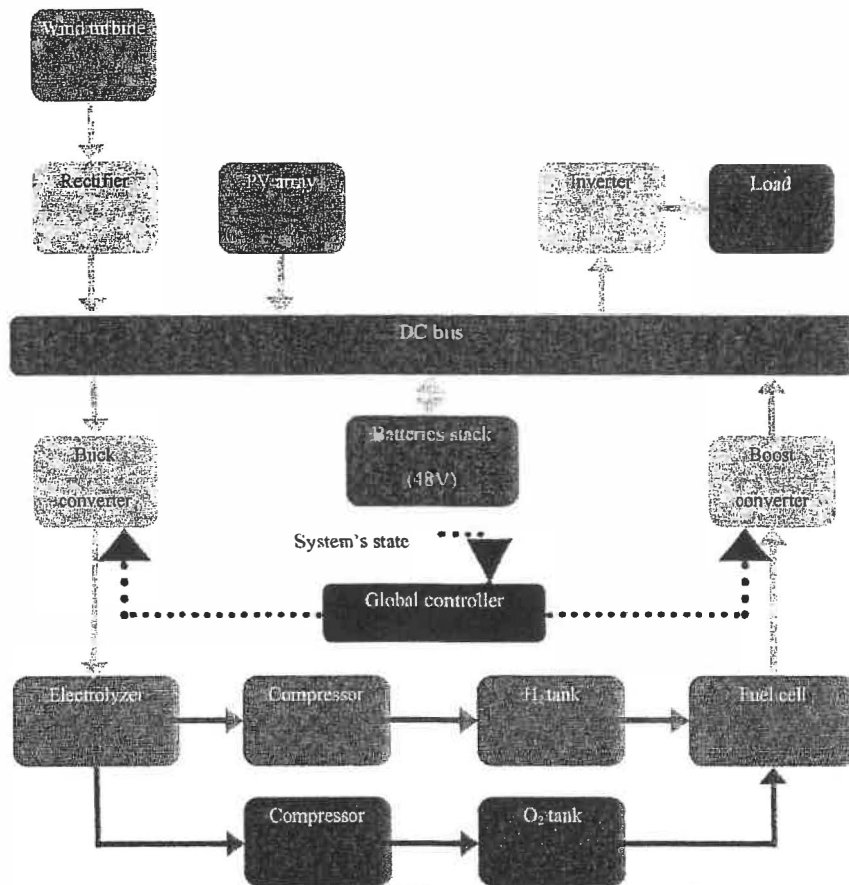


Fig. 1. Renewable energy system.

historical data to be efficient. This paper presents a dynamic controller that overcomes these issues by using fuzzy logic. The proposed fuzzy logic controller (FLC) determines the appropriate hydrogen's rate of production/consumption as a function of the system's power inputs and outputs and the batteries' SOC. The chosen rate is then applied to the electrolyzer or the fuel cell by using local power control loops around these devices. A model of the RES used to design and validate the proposed controller is first presented. The design of the FLC itself is then presented. The simulation parameters that were chosen to test the controller and the results analysis are finally given.

2. System's model

A complete model of the RES was developed in order to design and validate an adequate controller. The model was built using sub-models for each individual component. The model described in [14] was used as a base but a few modifications were made to include the new control system. Among them, the most important is the addition of local power controllers for the electrolyzer and the fuel cell. These controllers

are implemented using the buck converter for the electrolyzer and the boost converter for the fuel cell. The power converters' duty cycle were thus eliminated as a variable in the system and then replaced by their output power. Moreover, since the converters' dynamic is considered to be much faster than that of the system, it was neglected and the converters are treated as devices providing a fixed output power (this output power is determined by the set point decided by the FLC).

2.1. Batteries model

The batteries stack is the element linking together each component of the RES. Since it is connected in parallel with the DC bus and it acts as an energy buffer, the current flowing into or from the batteries is defined by (1):

$$I_B(t) = I_{PV}(t) + I_{Wind}(t) + I_{Bo}(t) - I_{Bu}(t) - I_{Load}(t) \quad (1)$$

where $I_{PV}(t)$ is the photovoltaic array's current (A), $I_{Wind}(t)$ is the wind turbine's current (A), $I_{Bo}(t)$ is the boost converter's current (A), $I_{Bu}(t)$ is the buck converter's current (A), and $I_{Load}(t)$ is the load current (A).

This current is positive when the batteries are charging and negative otherwise. Knowing the current, it is possible to

deduce the voltage by:

$$U_B(t) = (1 + \alpha t)U_{B,0} + R_i I_B(t) + K_i Q_R(t) \quad (\text{V}) \quad (2)$$

where α is the self-discharge rate (Hz), $U_{B,0}$ is the open-circuit voltage at time 0 (V), R_i is the internal resistance (Ω), K_i is the polarization coefficient ($\Omega \text{ h}^{-1}$), and $Q_R(t)$ is the rate of accumulated charge.

The total energy stored in the batteries is given by:

$$E_B(t) = E_{B,0} + \frac{1}{3600} \int I_B(t) dt \quad (\text{Ah}) \quad (3)$$

where $E_{B,0}$ is the batteries' initial energy (Ah).

Substituting (1) into (3), it is possible to express the batteries' energy in the Laplace domain using this equation:

$$E_B = E_{B,0} + \frac{I_{PV} + I_{Wind} + I_{Bo} - I_{Bu} - I_{Load}}{3600s} \quad (\text{Ah}) \quad (4)$$

Finally, this energy can be expressed as a state-of-charge using the following equation:

$$\text{SOC}_B = 100 \times \frac{E_B}{E_{B,\max}} \quad (\%) \quad (5)$$

where $E_{B,\max}$ is the total capacity of the batteries (Ah).

2.2. Electrolyzer's and buck converter's model

This part of the system can be represented by a power source (the buck converter) feeding the power needed by the electrolyzer. As previously stated, the buck converter dynamic is negligible compared to the electrolyser one. The converter was thus modeled as an ideal power source where the ratio from its output power to its input power is dictated by its efficiency.

$$P_{El} = \eta_{Bu} P_{Bu} \quad (\text{W}) \quad (6)$$

where η_{Bu} is the efficiency of the buck converter and P_{Bu} is the buck converter's input power (W).

The converter's output voltage and current are dictated by the electrolyzer. The voltage is first defined by:

$$U_{El} = \frac{P_{El}}{I_{El}} \quad (\text{V}) \quad (7)$$

where I_{El} is the electrolyzer's current (A).

This voltage can also be expressed by (8) and is related to the electrolyzer's current and temperature.

$$U_{El} = U_{El,0} + C_{1El} T_{El}(t) + C_{2El} \ln \left(\frac{I_{El}(t)}{I_{El,0}} \right) + \frac{R_{El} I_{El}(t)}{T_{El}(t)} \quad (\text{V}) \quad (8)$$

where $U_{El,0}$ (V), C_{1El} ($\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_{2El} (V), R_{El} ($\Omega ^\circ\text{C}$) and $I_{El,0}$ (A) are constants that were determined experimentally; and $T_{El}(t)$ is the cells' operating temperature ($^\circ\text{C}$).

Substituting (7) into (8), it is possible to obtain an equation linking the electrolyzer's current to the converter's output

power. Since the hydrogen's rate of production is directly proportional to the electrolyzer's current (9), it is possible to control it by varying the buck converter's set point.

$$\dot{V}_{El} = N_{\text{Cell},El} \frac{\eta_{L,El} I_{El}(t)}{C_{H_2}} \quad (\text{l s}^{-1}) \quad (9)$$

where $\dot{V}_{El}$ is the hydrogen production rate, $N_{\text{Cell},El}$ is the number of cells, $\eta_{L,El}$ is the electrolyzer's utilisation factor, and C_{H_2} is a conversion coefficient (Ah l^{-1}).

2.3. Fuel cell's and boost converter's model

This part of the RES is very similar to the buck converter/electrolyzer group. In the same way, the boost converter is represented as an ideal power source that delivers a chosen power to the dc bus. The ratio from its output power to its input power is also directly related to its efficiency (10).

$$P_{Bo} = \eta_{Bo} P_{FC} \quad (\text{W}) \quad (10)$$

where η_{Bo} is the boost converter's efficiency and P_{FC} is the boost converter's input power (W).

Again, the converter's input voltage is fixed by the fuel cell and is described by (11) and (12).

$$U_{FC} = \frac{P_{FC}}{I_{FC}} \quad (\text{V}) \quad (11)$$

where I_{FC} is the fuel cell's current (A).

$$U_{FC} = U_{FC,0} + C_{1FC} T_{FC}(t) + C_{2FC} \ln \left(\frac{I_{FC}(t)}{I_{FC,0}} \right) + \frac{R_{FC} I_{FC}(t)}{T_{FC}(t)} \quad (\text{V}) \quad (12)$$

where $U_{FC,0}$ (V), C_{1FC} ($\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_{2FC} (V), R_{FC} ($\Omega ^\circ\text{C}$) and $I_{FC,0}$ (A) are constants that were determined experimentally, and $T_{FC}(t)$ is the fuel cell's operating temperature ($^\circ\text{C}$).

The substitution of (11) in (12) gives an expression linking the fuel cell's current to the boost converter's input power. This expression is useful to determine the hydrogen's rate of consumption by the fuel cell (13).

$$\dot{V}_{FC} = N_{\text{Cell},FC} \frac{\eta_{L,FC} I_{FC}(t)}{C_{H_2}} \quad (\text{l s}^{-1}) \quad (13)$$

where $\dot{V}_{FC}$ is the hydrogen consumption rate, $N_{\text{Cell},FC}$ is the number of cells, $\eta_{L,FC}$ is the fuel cell's utilisation factor, and C_{H_2} is a conversion coefficient (Ah l^{-1}).

Using (10) to relate the boost converter's output power to its input power, it is then possible to vary the hydrogen's rate of consumption by changing the converter's set point.

2.4. Hydrogen storage's model

The model for the hydrogen's production and consumption rate allows for the derivation of an expression giving the

energy stored as hydrogen:

$$E_{H_2} = E_{H_2,0} + \int (P_{EI} - P_{FC}) dt \quad (\text{kJ}) \quad (14)$$

where $E_{H_2,0}$ is the initial energy stored as hydrogen (kJ), P_{EI} is the electrolyzer's power production rate (as hydrogen), and P_{FC} is the fuel cell's power consumption rate (as hydrogen).

The following equations relate power production and consumption rates to the hydrogen's production and consumption rates of the electrolyzer and the fuel cells:

$$P_{EI} = \frac{\dot{V}_{EI} \Delta H}{V_T} \quad (\text{kJ s}^{-1}) \quad (15)$$

$$P_{FC} = \frac{\dot{V}_{FC} \Delta H}{V_T} \quad (\text{kJ s}^{-1}) \quad (16)$$

where ΔH is the hydrogen's enthalpy (kJ mol^{-1}) and V_T is a conversion constant (1 mol^{-1}).

Combining (14), (15) and (16) in the Laplace domain, the net hydrogen's production can be derived:

$$E_{H_2} = E_{H_2,0} + \frac{1}{s} \left(\frac{\dot{V}_{EI} \Delta H}{V_T} - \frac{\dot{V}_{FC} \Delta H}{V_T} \right) \quad (\text{kJ}) \quad (17)$$

The hydrogen's storage level is therefore:

$$HL = 100 \times \frac{E_{H_2}}{E_{H_2,\max}} \quad (\%) \quad (18)$$

3. Fuzzy logic controller

The RES' global controller is critical to manage efficiently the energy flow in the system. There are two main objectives that must be considered when designing the controller. The first objective is to reduce the energy transfers from the short-term storage to the long-term storage and vice-versa when possible. Storing energy as hydrogen is very costly in terms of efficiency, it is then preferable to use the long-term storage only when there's a large quantity of excess energy and there's sufficient energy in the batteries to provide for the short-term demand. On the other hand, the fuel cell must be started only when the load consumption is much higher than the power produced by the sources. The second objective is to prevent abusive use of the batteries. Although the batteries are of "deep-cycle" type, they must not be discharged too deeply and for a long time in order to lengthen their lifetime. The controller must then control the batteries' state-of-charge to avoid these situations.

Since, the wanted behaviour is well known and can be described using linguistic variables, the use of a FLC seems appropriate. This type of controllers presents many advantages for this system. First of all, it allows us the use of multiple input variables without increasing the controller's complexity. It also simplifies the controller's design since the wanted behaviour can be described easily in words but it would be difficult to express mathematically. It is more con-

venient than a classical expert system because the behaviour for the entire range of inputs can be defined by using only a few rules. Finally, there's no need for historical data, which is an important advantage over other types of "intelligent" controllers such as neural networks and genetic algorithms.

3.1. FLC's structure

The wanted behaviour, as described above, was implemented with the help of two input variables: the net power flow (dP) and the batteries' SOC. The net power flow is simply the difference between the power provided by the sources and the power consumed by the loads. This information is useful to determine whether there is excess energy available or not and how much. The batteries' SOC is used to prevent a deep discharge of the batteries and to know how much short-term energy is available. Both values are normalized to simplify their representation in the FLC. The net power flow is also filtered by a low-pass filter with a very low time constant. This filtering is important to avoid running the electrolyzer and the fuel cell for very short period of time. It is effectively more efficient to use these devices for at least a few minutes at a time since they operate more efficiently at high temperatures and their temperature rise only when they are in operation [15,16]. Moreover, the electrolyzer stores its hydrogen production in a small buffer tank and it transfers this hydrogen in the main tank only once it is full. Since this buffer tank is emptied in the atmosphere when the electrolyzer starts up, it is easy to figure that most of the production would be lost if the electrolyzer is started up frequently for very short period of time.

The FLC output variable is a power set point. When the output is positive, the set point is sent to the boost converter and the fuel cell is started. On the other hand, when the output is negative the set point is sent to the buck converter and the electrolyzer is started. It is important to note that the minimum set point was fixed to 500 W since their efficiency is too low below this threshold [15,16]. If the FLC's output is below this value, both the electrolyzer and the fuel cell are stopped.

3.2. Membership functions

In order to keep the controller simple, only three membership functions for each input were used. The linguistic variables positive (P), zero (Z) and negative (N) along with triangular functions were used for the net power flow and the power set point (Fig. 2).

The batteries' SOC input was divided using the variables low (L), normal (N) and high (H), as shown on Fig. 3. In this case, trapezoidal functions were preferred to triangular functions because these functions are more appropriate to obtain the wanted behaviour. It is desirable, per example, that the controller starts the fuel cell at high power when the batteries are mostly discharged. The SOC must then be considered as "fully" low when it is below a minimum threshold.

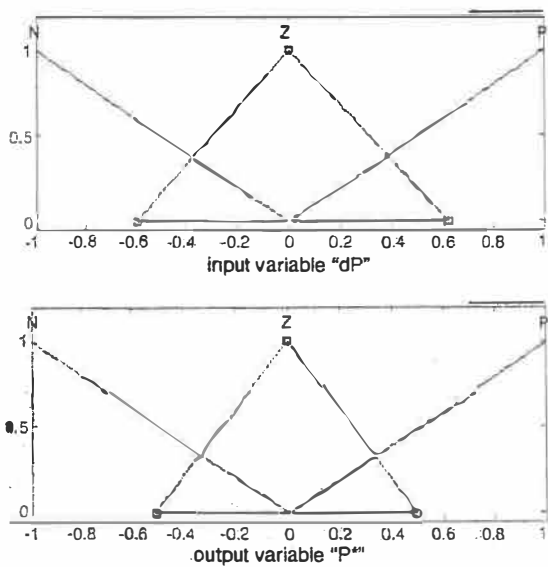


Fig. 2. Membership functions for the net power flow (dP) and the power set point (P^*).

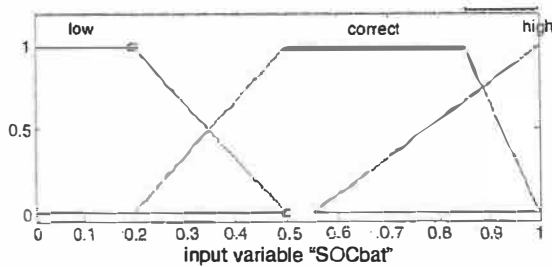


Fig. 3. Membership function for the batteries' SOC.

This behaviour is easily obtained with the use of trapezoidal functions.

The exact shape of each membership function was determined using the control surface (Fig. 4) to produce the wanted

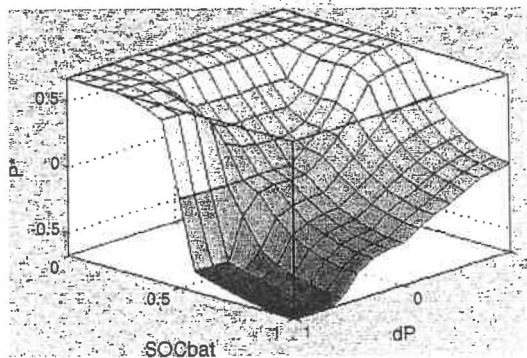


Fig. 4. Control surface.

behaviour. The control surface shows that the power set point will be more positive (the fuel cell will be started) if the SOC is lower and/or the net power flow is more negative. On the other hand, the power set point will be negative (the electrolyzer will be started) if the SOC is sufficiently high and the net power flow is more positive.

3.3. Rules

The controller's behaviour is also defined by the FLC's rules. Always in the sake of simplicity, the number was minimized. The rules were chosen very intuitively following the guidelines previously enounced:

- if the net power flow is negative then the power set point is positive;
- if the net power flow is zero then the power set point is zero;
- if the net power flow is positive and the SOC is high then the power set point is negative;
- if the SOC is low, then the power set point is positive;
- if the SOC is high, then the power set point is negative.

It is important to specify that the implication operator is MIN and the aggregation operator is MAX. The output is defuzzified using the centroid method.

4. Simulation

In order to simulate the system, the model described in Section 2 was implemented in Matlab/Simulink (Fig. 5) and the designed fuzzy logic controller was defined using the Fuzzy Logic Toolbox. What was wanted is an overview of the system's behaviour over a long period of time. To achieve this, the system was simulated for a complete week using an integration step of 60 s. While this value is high, this has no significant impact on the precision of the results because there's no fast dynamics in the model. Moreover, the real controller will be implemented using similar time constants. The model needs three inputs: the wind turbine power, the photovoltaic array (PV) power and the loads power. Real data was used to represent the reality more closely. The wind turbine and PV array power data come from a database containing measures from the HRI's wind turbine and PV array. The data for a typical July week was used. The load data was kindly provided by Hydro-Québec and it represents power consumption data for a typical residence, also for a week in July.

Since the controller makes sure that the electrolyzer and the fuel cell are not used for less than a few minutes at a time, the effect of the temperature was neglected. The temperatures were assumed to be the nominal values.

Finally, all the model's parameters were determined experimentally by Kélouani et al. [14]. They are presented in the Table 1.

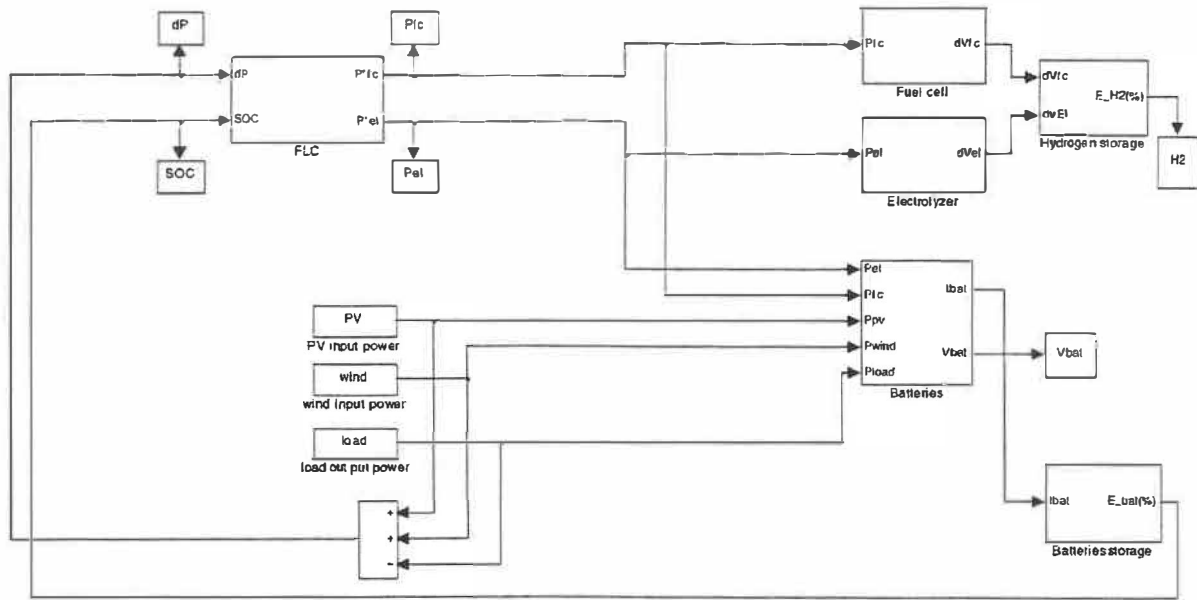


Fig. 5. System's Simulink model.

Table 1
Measured and known parameters

Section	Parameter	Value	Parameter	Value
Batteries	α (Hz)	~ 0	R_i (Ω)	0.076
	$U_{B,0}$ (V)	48	K_i	~ 0
Electrolyzer	$U_{E,0}$ (V)	22.25	$R_{E,1}$ ($\Omega^\circ\text{C}$)	-3.3189
	$C_{1E,1}$ ($\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$)	-0.1765	$C_{2E,1}$ (V)	5.5015
	$I_{E,0}$ (A)	0.1341	$N_{\text{Cell},E}$	24
	$\eta_{1,E}$	0.7	C_{H_2} (Ah l^{-1})	8604
	$\eta_{B,u}$	0.95		
Fuel cell	$U_{FC,0}$ (V)	33.18	R_{FC} ($\Omega^\circ\text{C}$)	-2.04
	C_{1FC} ($\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$)	-0.013	C_{2FC} (V)	-1.57
	$I_{FC,0}$ (A)	8.798	$N_{\text{Cell},FC}$	35
	$\eta_{1,FC}$	0.45	C_{H_2} (Ah l^{-1})	8604
	$\eta_{B,o}$	0.95		
Hydrogen storage	ΔH (kJ mol^{-1})	286	VT (l mol^{-1})	22.4

5. Results

The model was simulated under the conditions described above. Fig. 6 shows the net power flow in the system and the power exchanges with the hydrogen storage sub-system and Fig. 7 shows the energy storage's state during the entire simulation.

The first remarkable characteristic is that the FLC is able to keep the batteries' SOC above 50% during the entire week, thus helping to increase the batteries' lifetime. It is effectively known that deep discharges of the batteries could be very damageable [17]. The second characteristic is that the batteries really act as a short-term energy buffer and their SOC varies very slowly. This avoids many charge-discharge

cycles to the batteries, thus again contributing to extend their lifetime.

Fig. 6 clearly shows that when the net power flow is positive in the system, the electrolyzer is started to store hydrogen. On the other hand, the fuel cell is started when there is not enough energy available to power the load. This way, the energy stored as hydrogen increases on the first and the seventh days and it decreases on the other days. These results are not surprising since the chosen site for the wind turbine is not very windy. However, this situation could be improved

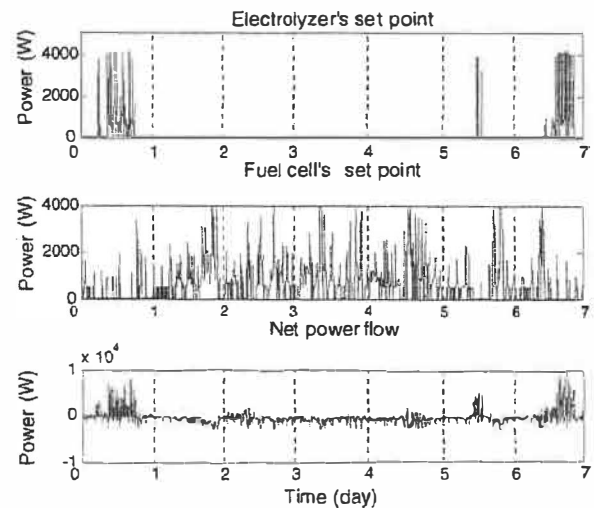


Fig. 6. System's power flow.

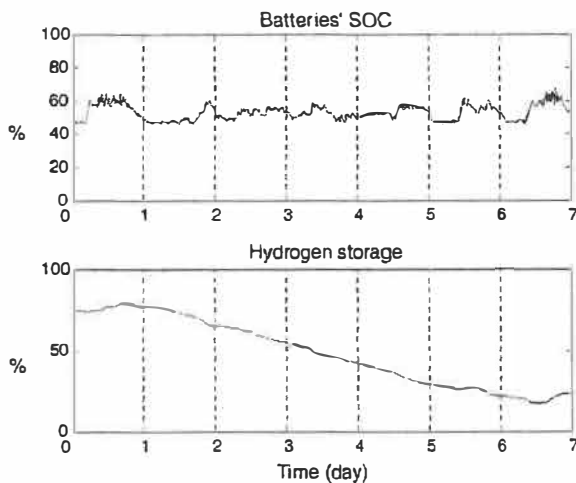


Fig. 7. System's energy storage.

by installing the system on a better site or by adding PV arrays to the system. However, these results illustrate very well the usefulness of the hydrogen storage system. Powering the load continuously from the second day to the sixth day required about 66 kWh of energy storage. Stored in batteries, this means seven supplementary batteries stacks (56 batteries), thus increasing substantially the storage space, the initial cost of the system and the required maintenance. Moreover, the extrapolation of these results for a complete month demonstrates clearly that the batteries are inadequate to store long-term energy. Providing sufficient power for a similar month would effectively require the addition of 224 batteries, whereas a slight increase of the hydrogen tank size would be sufficient.

The analysis of these results thus shows that the fuzzy logic controller behaves as expected. It is able to keep the batteries from being discharged too deeply, to keep the load powered continuously and to store energy as hydrogen when possible. Moreover, the fuel cell and the electrolyzer are always started for a few minutes each time, thus increasing their efficiency.

6. Conclusion

This paper presented a dynamic controller for a renewable energy system that uses a wind turbine and a PV array to feed power to a load, store excess energy in batteries or in hydrogen via an electrolyser. The stored hydrogen is used for electricity generation by using a fuel cell. The proposed controller uses fuzzy logic to decide when to produce hydrogen or convert it back to electricity and at what rate. The use of fuzzy logic is interesting for this application since it allows to easily use multiple inputs and to describe the controller's behaviour with only a few rules defined by a few linguistic variables. This way, the designed controller uses the net power flow (the difference between the power provided by the sources and

the power consumed by the loads) and the batteries' state-of-charge as inputs to determine a power set point for the electrolyzer and a power set point for the fuel cell.

In order to design and validate the controller, a complete model of the renewable energy system was elaborated. This model is composed of a sub-model for each individual component of the system. All the model's parameters were determined experimentally to obtain results that are closer to the real system.

The system was simulated for a complete week with real sources power data collected at the HRI and load data provided by Hydro-Québec to observe the controller's behaviour. It was possible to determine that the controller effectively behaves as expected, meaning that it was able to maintain an adequate SOC while powering the load continuously and storing hydrogen when possible. Although this simulation results showed that the system would not provide enough input energy to power a typical residential load in July for a very long time, this situation illustrated very well the need for the hydrogen storage sub-system. Storing 1 week of energy only in batteries would be very costly and would imply a lot of maintenance.

Acknowledgements

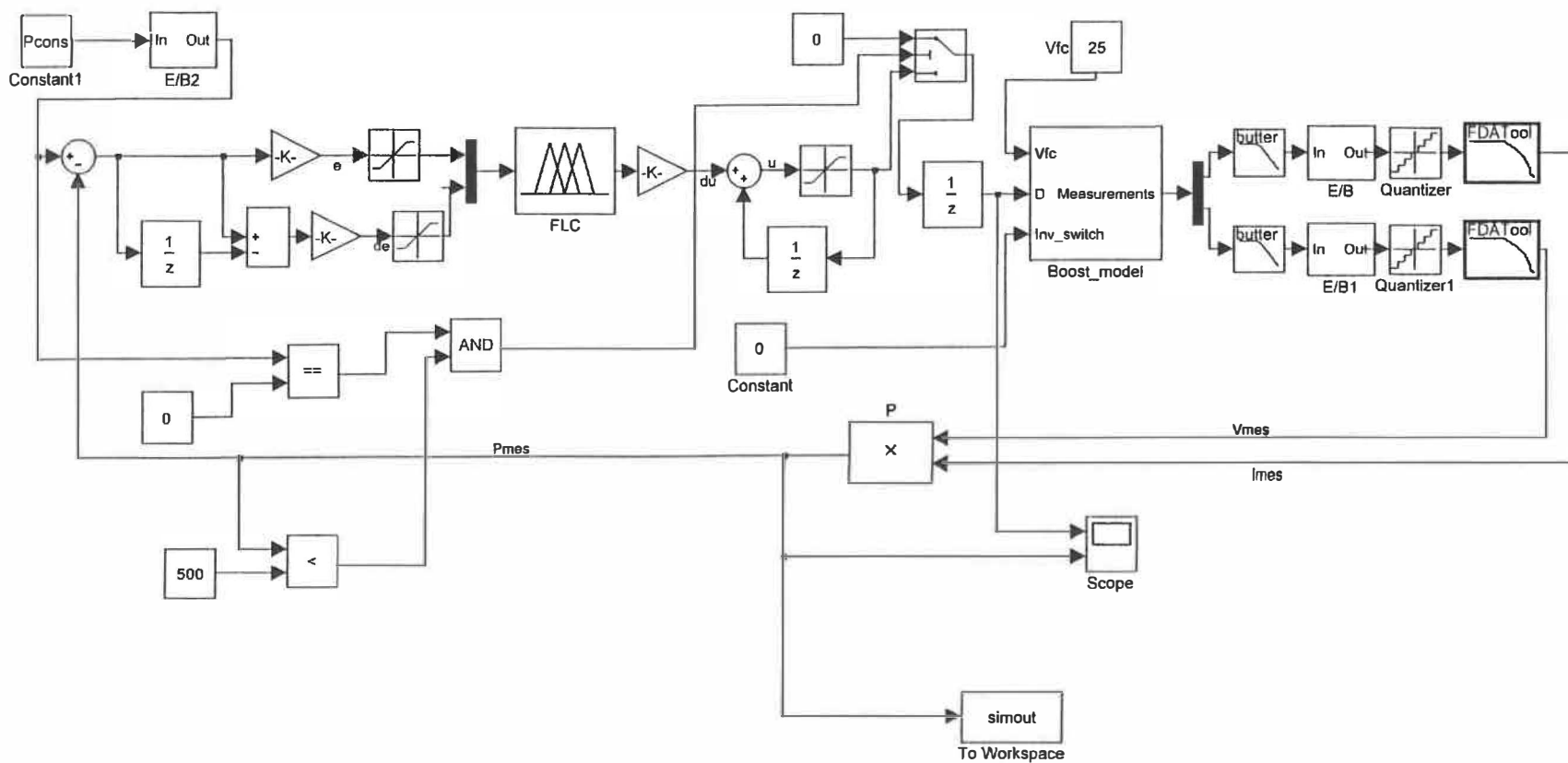
This work has been supported by the LTE Hydro-Québec, the Natural Resources Canada and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

References

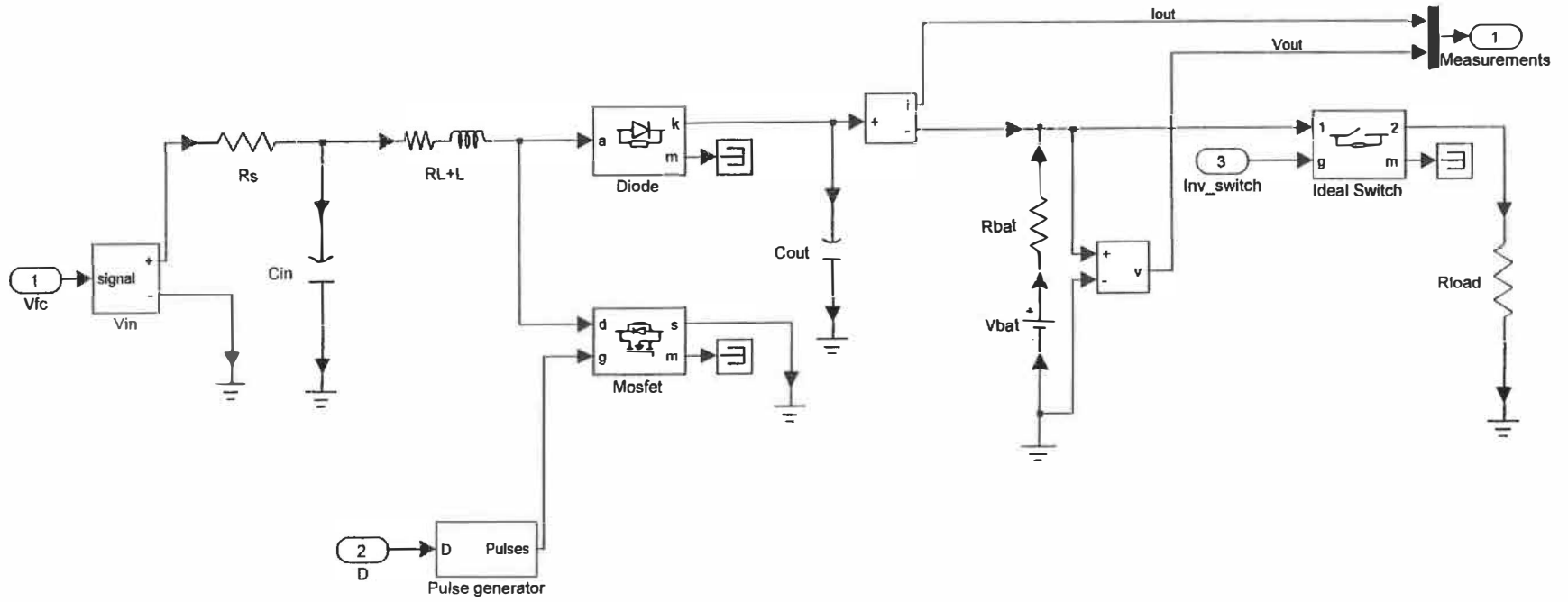
- [1] K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin, F. Laurencelle, A. Anouar, J.M. St-Arnaud, T.K. Bose, *J. Power Sources* 96 (2001) 168–172.
- [2] H. Barthels, W.A. Brocke, K. Bonhoff, H.G. Groehn, G. Heuts, M. Lennartz, H. Mai, J. Mergel, L. Schmid, P. Ritzenhoff, *Int. J. Hydrog. Energy* 23 (1998) 295–301.
- [3] H. Dienhart, A. Siegel, *Int. J. Hydrog. Energy* 19 (1994) 61–66.
- [4] S. Galli, M. Stefanoni, *Int. J. Hydrog. Energy* 22 (1997) 453–458.
- [5] P. Hollmuller, J.M. Joubert, B. Lachal, K. Yvon, *Int. J. Hydrog. Energy* 25 (2000) 97–109.
- [6] P.S. Kauranen, P.D. Lund, J.P. Vanhanen, *Int. J. Hydrog. Energy* 18 (1993) 383–390.
- [7] F. Menzel, E. Spinadel, An autonomous wind-hydrogen system for electricity services to isolate locations, in: *Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference*, Buenos Aires, Argentina, June 1998.
- [8] R.H. Newnham, W.G.A. Balasing, *J. Power Sources* 107 (2002) 273–279.
- [9] R. Pötter, R. Pruschek, W.A. Brocke, H. Barthels, Examination of the design of the energy management for the PV plant PHOEBUS Jülich by dynamic programming, in: *Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference Hydrogen '96*, Stuttgart, Germany, June 1996.
- [10] J.P. Vanhanen, P.D. Lund, *Int. J. Hydrog. Energy* 20 (1995) 575–585.
- [11] S.R. Vosen, A design tool for the optimization of stand-alone electric power systems with combined hydrogen-battery energy storage, Sandia Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, Sandia National Laboratories, 1997.

- [12] S.R. Vosen, J.O. Keller, *Int. J. Hydrog. Energy* 24 (1999) 1139–1156.
- [13] K. Agbossou, M.L. Kohle, J. Hamelin, T.K. Bose, *IEEE Can. Rev.* 44 (2003) 17–20.
- [14] S. Kelouwani, K. Agbossou, R. Chahine, Model for an energy conversion in renewable energy system with hydrogen storage, *J. Power Sources* 140 (2) (2005) 392–399.
- [15] A. Anouar, Évaluation et contrôle d'un système hybride à énergie renouvelable pour un site isolé, Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2003, p. 115.
- [16] M. Fournier, Utilisation rationnelle de la pile à combustible dans un système de production autonome d'électricité, Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2003, p. 177.
- [17] J.P. Duniop, Batteries and charge control in stand-alone photovoltaic systems fundamentals and application, Cocoa, Sandia National Laboratories, 1997.

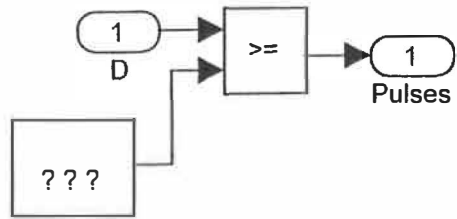
ANNEXE B : Modèles Matlab des contrôleurs locaux PI et à logique floue



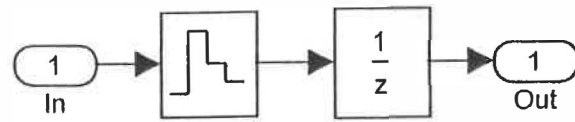
pi_fl



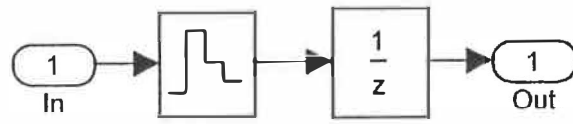
pi_fl/Boost_model



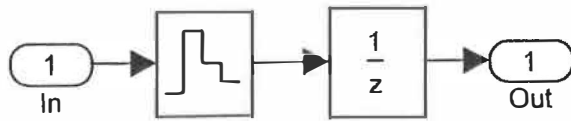
pi_fl/Boost_model/Pulse generator



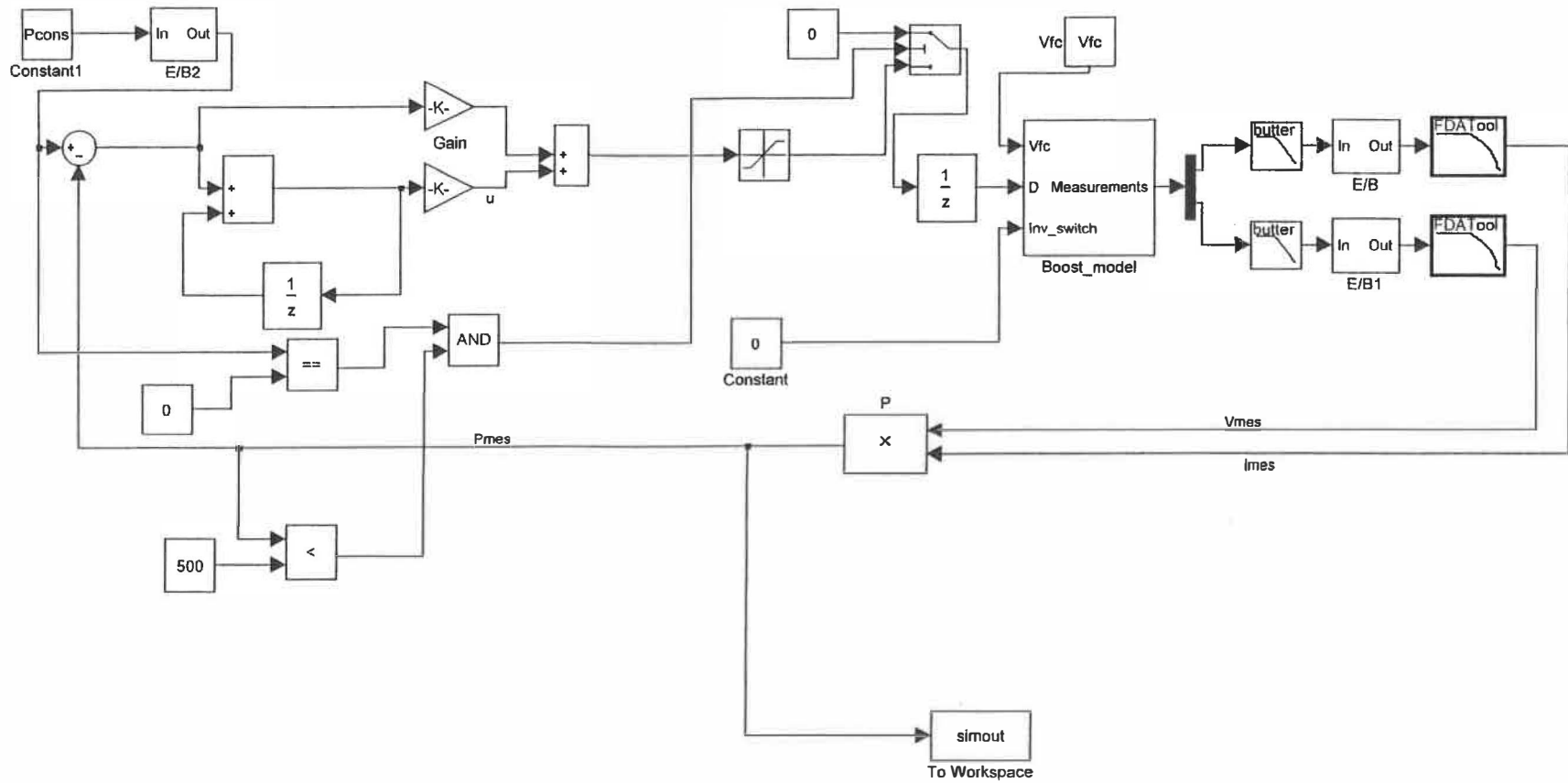
pi_f/E//B



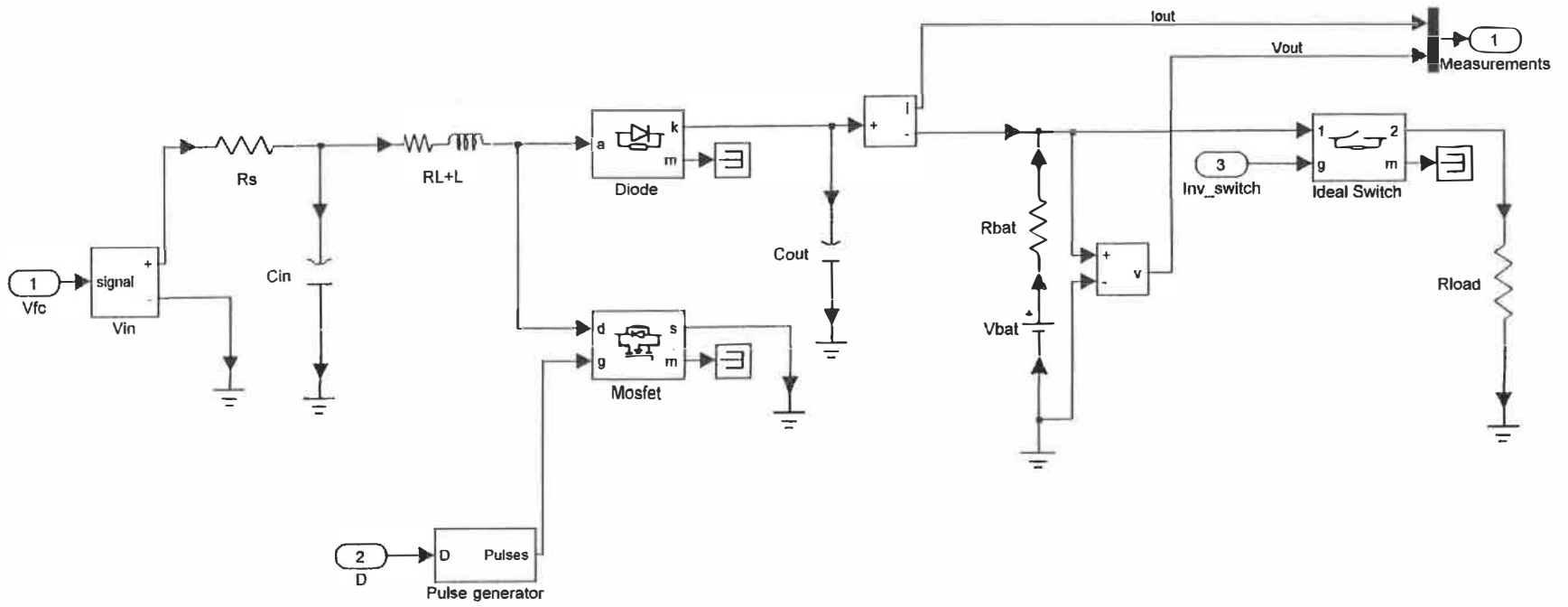
pi_f/E//B1



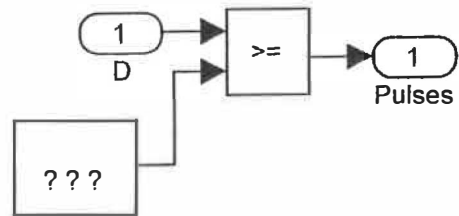
pi_f/E//B2



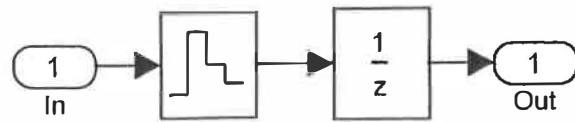
pi_classique



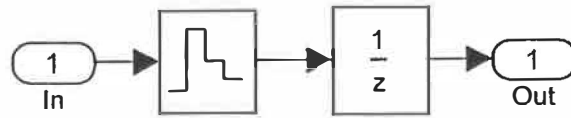
pi_classique/Boost_model



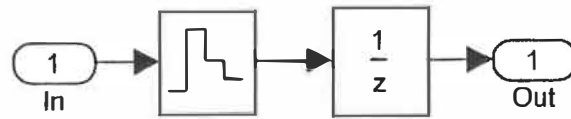
pi_classique/Boost_model/Pulse generator



pi_classique/E//B



pi_classique/E//B1



pi_classique/E//B2

ANNEXE C : Code du contrôleur local du hacheur élevateur

```

/*****
*
* FILE: main.c
*
* DESCRIPTION: Main loop, initialization and interrupt handler for the Boost
*              Converter Controller Firmware v3.0 Project.
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/18
*
* LAST MODIFIED: 2006/08/19
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/18-
*   Original Version.
*
*****/

/*****
*
* BOOST CONVERTER CONTROLLER FIRMWARE v3.0
*
* -----
*
* Pins Description
*
*   - Port A -
*
*   RA0: Analog Input, Temperature Input, 0V-2.5V -> 0°C-150°C
*   RA1: Analog Input, Current Input, 0V-2.5V -> 0A-150A
*   RA2: Analog Input, Vref-
*   RA3: Analog Input, Vref+
*   RA4: Unused
*   RA5: Analog Input, Power input, 0V-2.5V -> 0W-5000W
*   RA6: Special Function, Crystal Oscillator Output
*
*   - Port B -
*
*   RB0: Special Function, Over-temperature Interrupt
*   RB1: Special Function, Over-voltage Interrupt
*   RB2: Special Function, Over-current Interrupt
*   RB3: Unused
*   RB4: Digital Output, Emergency System Shutdown
*   RB5: Unused
*   RB6-RB7: Program/Debug Port
*
*   - Port C -
*
*   RC0-RC2: Unused
*   RC3: Special Function, I2C Clock Line
*   RC4: Special Function, I2C Data Line
*   RC5: Unused
*   RC6: Special Function, UART TX
*   RC7: Special Function, UART RX
*
*   - Port D -
*
*   RD0-RD7: Digital Output, Duty Cycle, 0-255 -> 0%-100%
*
*   - Port E -
*
*   RE0: Analog Input, Voltage Input, 0V-2.5V -> 0V-65V
*   RE1-RE2: Unused
*
*****/

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

```

```
#include <pl8f452.h>
#include <main.h>
#include <adc.h>
#include <timers.h>
#include <protections.h>
#include <acquisition.h>
#include <control.h>

//-----
// GLOBAL VARIABLES
//-----

// Indicates that a 200 us period elapsed
BOOL bControlPeriodElapsed = FALSE;
// Current output power setpoint
UINT16 un16CurrentPowerSetpoint = 0;
// Actual measured output power
UINT16 un16MeasuredPower = 0;
// Actual measured output temperature
UINT16 un16MeasuredTemperature = 0;
// Actual measured output current
UINT16 un16MeasuredCurrent = 0;
// Actual measured output voltage
UINT16 un16MeasuredVoltage = 0;

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES
//-----

// Interrupt Vector
#pragma code HighVector=0x08
void InterruptAtHighVector(void)
{
    _asm
        GOTO HighPriorityISR
    _endasm
}

#pragma code LowVector=0x18
void InterruptAtLowVector(void)
{
    _asm
        GOTO LowPriorityISR
    _endasm
}

// Interrupt Service Routines
#pragma code
#pragma interrupt LowPriorityISR
void LowPriorityISR(void)
{
    // Get the interrupt source
    // Timer2 Period Match?
    if(PIR1bits.TMR2IF)
    {
        PIR1bits.TMR2IF = 0;
        bControlPeriodElapsed = TRUE;
    }
}

#pragma code
#pragma interrupt HighPriorityISR
void HighPriorityISR(void)
{
    // Got a fault condition, turn the system off
    SHUTDOWN();
    // Get the interrupt source
    // Over-voltage?
    if(INTCON3bits.INT2IF)
    {
```

```

    // Clear the flag
    INTCON3bits.INT2IF = 0;
    Nop();
}
// Over-current?
else if(INTCON3bits.INT1IF)
{
    // Clear the flag
    INTCON3bits.INT1IF = 0;
    Nop();
}
// Over-temperature?
else if(INTCONbits.INT0IF)
{
    // Clear the flag
    INTCONbits.INT0IF = 0;
    Nop();
}
}

//-----
// FUNCTION DEFINITIONS
//-----

void main(void)
{
    // Counts the number of control cycles
    UINT8 un8SystemPeriodCounter = 0;
    // Current command
    UINT8 un8CurrentCommand = 0;

    // Initialization
    SystemInit();

    // Main loop
    while(1)
    {
        // 200 us elapsed, start a new control cycle
        if(bControlPeriodElapsed)
        {
            // Reset the period flag
            bControlPeriodElapsed = FALSE;

            // Get the actual output power
            un16MeasuredPower = AdcGetChannel(CHANNEL_POWER);
            // Calculate the new command signal
            //un8CurrentCommand = (UINT8)CalculatePID(un16CurrentPowerSetpoint,
            // un16MeasuredPower);
            // Apply the signal command
            SET_PWM(~un8CurrentCommand);
            // 5 ms (25 x 200 us) elapsed, do some housekeeping
            if(++un8SystemPeriodCounter == 25)
            {
                // Reset the system period counter
                un8SystemPeriodCounter = 0;
                // Get the temperature, current and voltage measures
                un16MeasuredTemperature = AdcGetChannel(CHANNEL_TEMPERATURE);
                un16MeasuredCurrent = AdcGetChannel(CHANNEL_CURRENT);
                un16MeasuredVoltage = AdcGetChannel(CHANNEL_VOLTAGE);
                Nop();
            }
            Nop();
        }
    }
}

void SystemInit(void)
{
    // Configure the ADC subsystem
    // Tad=Tcl*64 (40 MHz), right justified, 6 analog channels + 2 external
    // references, no interrupts

```

```

OpenADC(ADC_FOSC_64 & ADC_RIGHT_JUST & ADC_6ANA_2REF,
        ADC_CH0 & ADC_INT_OFF);
// Configure Timer2 (System Main Timebase)
//   Interrupts enabled, 1/16 prescaler, 1/5 postscaler
OpenTimer2(TIMER_INT_ON & T2_PS_1_16 & T2_POST_1_5);
//   1 period match = 200 us
PR2 = 24;
// Configure Port D as output (standard I/O)
TRISD = 0x00;
// Configure Port B bit 4 as output (shutdown)
TRISBbits.TRISB4 = 0;
// Enable the PWM
SET_PWM(0xFF);
ENABLE();
// Configure the external interrupts
//   INT1-INT2 high priority, interrupts enabled
INTCON3 = 0xD8;
//   INT0-INT2 interrupt on falling edge
INTCON2 = 0x80;
//   INT0 interrupt enabled
INTCONbits.INT0IE = 1;
// Set all peripheral interrupts to low priority
IPR1 = 0x00;
IPR2 = 0x00;
// Enable the interrupts priority
RCONbits.IPEN = 1;
// Enable the interrupts
INTCONbits.GIEH = 1;
INTCONbits.GIEL = 1;

```

```

/*****
*
* FILE: acquisition.c
*
* DESCRIPTION: Acquisition routines source code
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/26
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/26
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/26-
*   Original Version.
*
*****/

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

#include <acquisition.h>
#include <delays.h>
#include <adc.h>

//-----
// GLOBAL VARIABLES
//-----

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES
//-----

//-----
// FUNCTION DEFINITIONS
//-----

UINT16 AdcGetChannel(UINT8 Channel)
{
    // Memorize the last used channel
    static UINT8 LastChannel=0;

    // Change the channel, if necessary
    if(Channel != LastChannel) {
        // Set the channel
        SetChanADC(Channel);
        // Wait the minimum acquisition time (15 us = 150 instruction cycles)
        Delay10TCYx(15);
        // Memorize the new channel
        LastChannel = Channel;
    }
    // Start the conversion
    ConvertADC();
    // Wait for completion and get the result
    while(BusyADC());
    return ReadADC();
}

```



```

/*****
*
* FILE: control.c
*
* DESCRIPTION: Control routines source code
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/26
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/26
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/26-
*   Original Version.
*
*****/

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

#include <control.h>

//-----
// GLOBAL VARIABLES
//-----

// Proportional gain
UINT8 un8KpMult=1,un8KpDiv=1;
// Integral gain
UINT8 un8KiMult=1,un8KiDiv=1;

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES
//-----

//-----
// FUNCTION DEFINITIONS
//-----

UINT16 CalculatePID(UINT16 un16Setpoint, UINT16 un16Measure)
{
    // Error term
    INT16 n16Error;
    // Command signal
    INT16 n16OutputSignal;
    // Integral term (error sum)
    static INT16 n16IntegralTerm=0;

    // Calculate the error
    n16Error = (INT16)un16Setpoint - (INT16)un16Measure;
    // Offset the value in order to get more precision
    n16Error <=<= CALCULATION_OFFSET;
    // Update the integrator
    n16IntegralTerm += n16Error * (INT16)un8KiMult / (INT16)un8KiDiv;
    // Saturate the integrator
    if(n16IntegralTerm > MAX_INTEGRAL) n16IntegralTerm = MAX_INTEGRAL;
    else if(n16IntegralTerm < MIN_INTEGRAL) n16IntegralTerm = MIN_INTEGRAL;
    // Calculate the output signal
    n16OutputSignal = n16IntegralTerm + n16Error * (INT16)un8KpMult / (INT16)un8KpDiv;
    // Saturate the output signal
    if(n16OutputSignal > MAX_OUTPUT) n16OutputSignal = MAX_OUTPUT;
    else if(n16OutputSignal < MIN_OUTPUT) n16OutputSignal = MIN_OUTPUT;
    // Remove the offset from the value
    n16OutputSignal >>= CALCULATION_OFFSET;
    return n16OutputSignal;
}

```

```

/*****
*
* FILE: acquisition.h
*
* DESCRIPTION: Acquisition routines header file
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/26
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/26
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/26-
*   Original Version.
*
*****/

```

```

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

#include <stdtypes.h>

//-----
// DEFINES
//-----

#define CHANNEL_TEMPERATURE ADC_CH0
#define CHANNEL_VOLTAGE     ADC_CH5
#define CHANNEL_CURRENT     ADC_CH1
#define CHANNEL_POWER       ADC_CH4

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES DECLARATIONS
//-----

//-----
// FUNCTION DECLARATIONS
//-----

UINT16 AdcGetChannel(UINT8 Channel);

```

```

/*****
*
* FILE: control.h
*
* DESCRIPTION: Control routines header file
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/26
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/26
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/26-
*   Original Version.
*
*****/

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

#include <stdtypes.h>

//-----
// DEFINES
//-----

#define CALCULATION_OFFSET 2
#define MAX_INTEGRAL 1023*2^CALCULATION_OFFSET
#define MIN_INTEGRAL 0*2^CALCULATION_OFFSET
#define MAX_OUTPUT 1023*2^CALCULATION_OFFSET
#define MIN_OUTPUT 0*2^CALCULATION_OFFSET

#define SET_PWM(x) PORTD = x

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES DECLARATIONS
//-----

//-----
// FUNCTION DECLARATIONS
//-----

UINT16 CalculatePID(UINT16 un16Setpoint, UINT16 un16Measure);

```

```

/*****
*
* FILE: main.h
*
* DESCRIPTION: Main loop, initialization and interrupt handler header file
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/18
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/18
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/18-
*   Original Version.
*
*****/

```

```

//-----
// MICROCONTROLLER CONFIGURATION
//-----

```

```

#pragma config OSC=HSPLL, PWRT=ON
#pragma config WDT=OFF, WDTPS=1
#pragma config BOR=OFF, BORV=42
#pragma config LVP=OFF

```

```

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

```

```

#include <stdtypes.h>

```

```

//-----
// DEFINES
//-----

```

```

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES DECLARATIONS
//-----

```

```

void LowPriorityISR(void);
void HighPriorityISR(void);

```

```

//-----
// FUNCTION DECLARATIONS
//-----

```

```

void SystemInit(void);

```

```

/*****
*
* FILE: protections.h
*
* DESCRIPTION: Protection routines header file
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/18
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/18
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/18-
*   Original Version.
*
*****/

```

```

//-----
// FILE INCLUDES
//-----

#include <stdtypes.h>

//-----
// DEFINES
//-----

#define SHUTDOWN() {PORTBbits.RB4 = 0; PORTD = 0;}
#define ENABLE() PORTBbits.RB4 = 1

//-----
// INTERRUPT SERVICE ROUTINES DECLARATIONS
//-----

//-----
// FUNCTION DECLARATIONS
//-----

```

```

/*****
*
* FILE: stdtypes.h
*
* DESCRIPTION: Standard data types nomenclature definitions
*
* AUTHOR: Alexis Bilodeau
*
* DATE CREATED: 2006/07/18
*
* LAST MODIFIED: 2006/07/18
*
* REVISION HISTORY:
*
*   -2006/07/18-
*   Original Version.
*
*****/

```

```

//-----
// DEFINES
//-----

```

```

typedef unsigned char UCHAR, UINT8;
typedef unsigned char * PCHAR, PUINT8;
typedef signed char CHAR, INT8;
typedef signed char * PCHAR, PINT8;
typedef unsigned int UINT16;
typedef unsigned int * PUINT16;
typedef signed int INT16;
typedef signed int * PINT16;
typedef unsigned long UINT32;
typedef unsigned long * PUINT32;
typedef signed long INT32;
typedef signed long * PINT32;
typedef UINT8 BOOL;
typedef float FLOAT;

```

```

#define FALSE 0
#define TRUE 1

```

ANNEXE D : Code Labview du contrôleur global à logique floue

flc_controller_v1.vi
D:\NRJ\global control\flc_controller_v1.vi
Last modified on 2005-10-24 at 21:43
Printed on 2007-04-15 at 12:41



Connector Pane



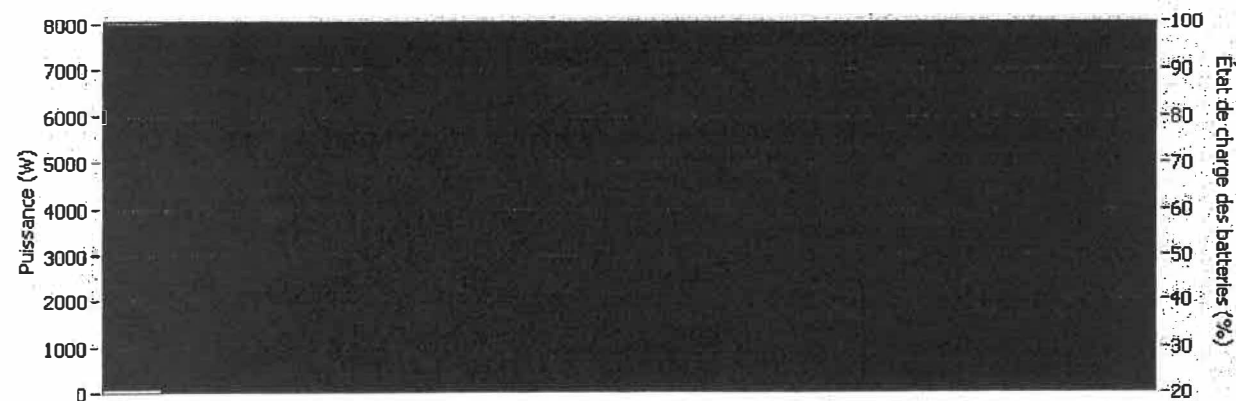
flc_controller_v1.vi



Front Panel

ÉTAT DU SYSTÈME

Mesures



Puissance PV

0

Puissance éolienne

0

Puissance charge

0

État de charge des batteries

100.0

Système de contrôle



Différentiel de puissance

0

Consigne

-1.00

Pile à combustible

Consigne

0

En opération



Électrolyseur

Consigne

5000

En opération



PARAMÈTRES D'OPÉRATION

Capacité maximale
des batteries (Ah)

220

Puissance minimale de
l'électrolyseur (W)

500

Puissance maximale de
l'électrolyseur (W)

5000

Puissance maximale de
la pile à combustible (W)

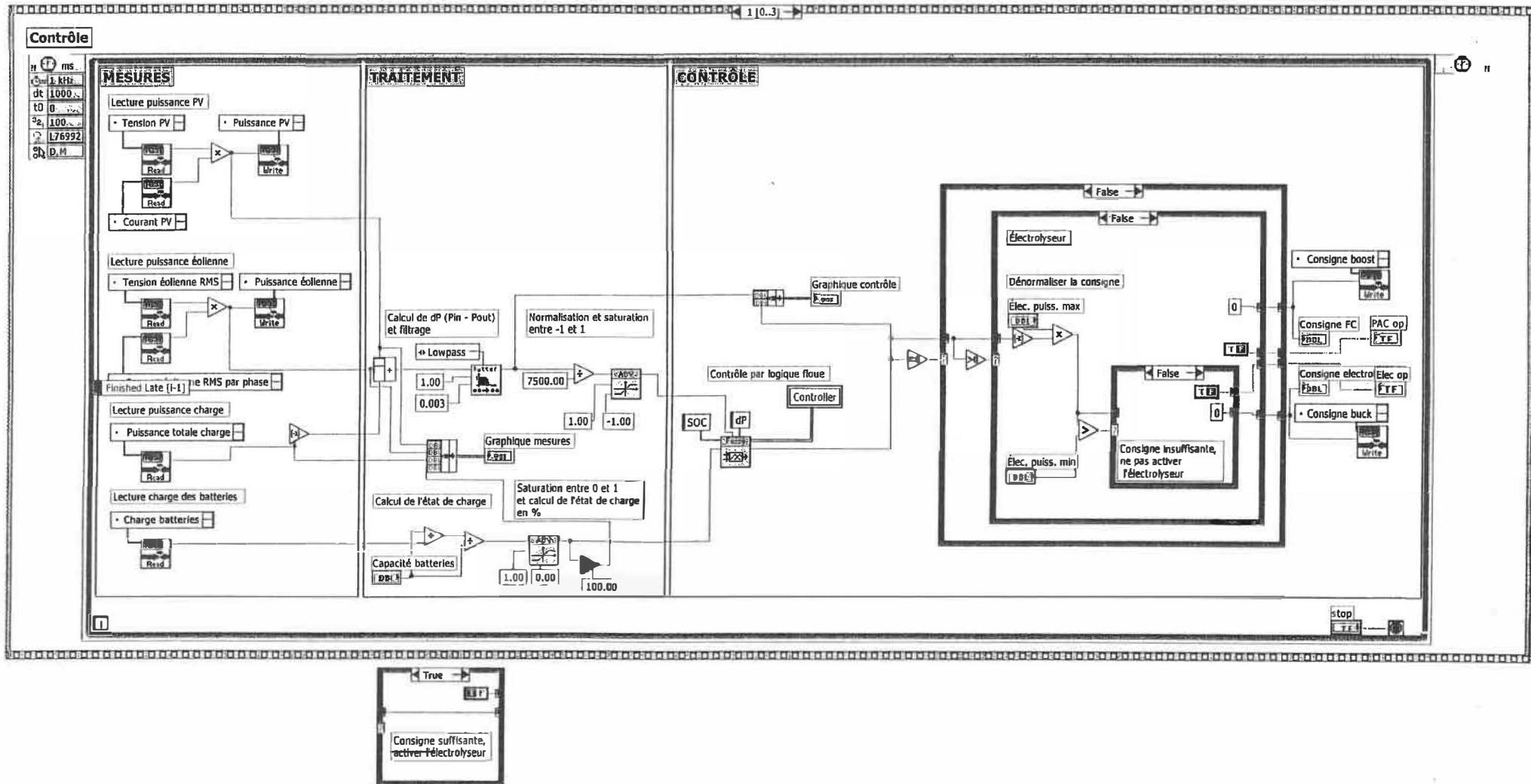
500

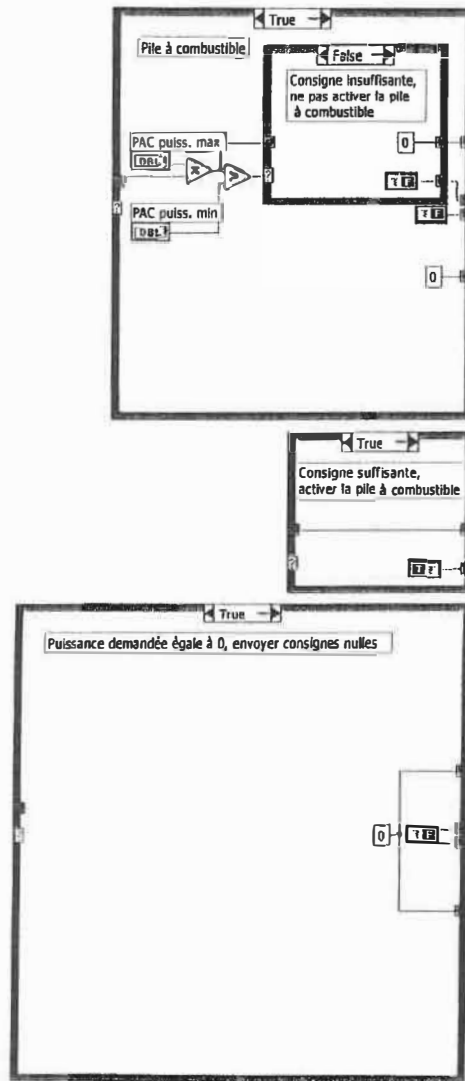
Puissance maximale de
la pile à combustible (W)

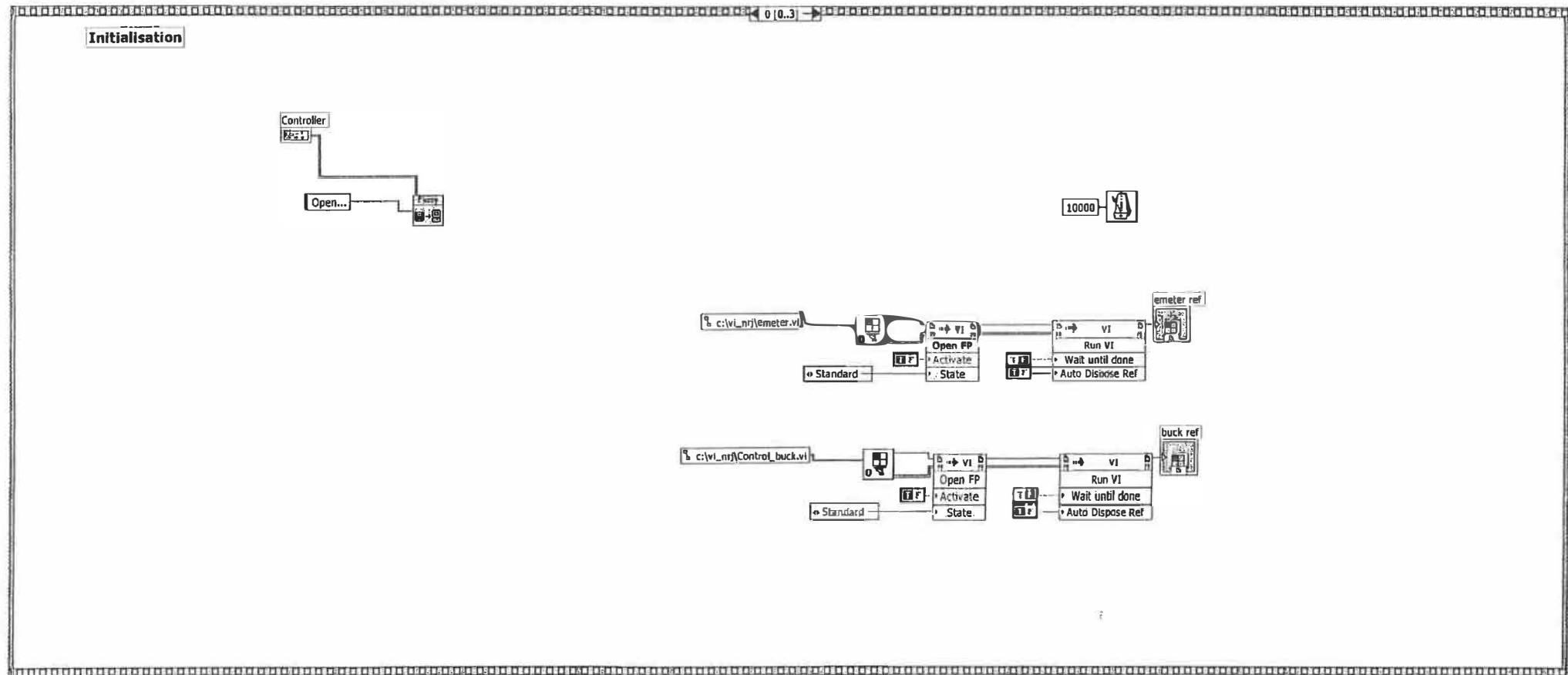
5000

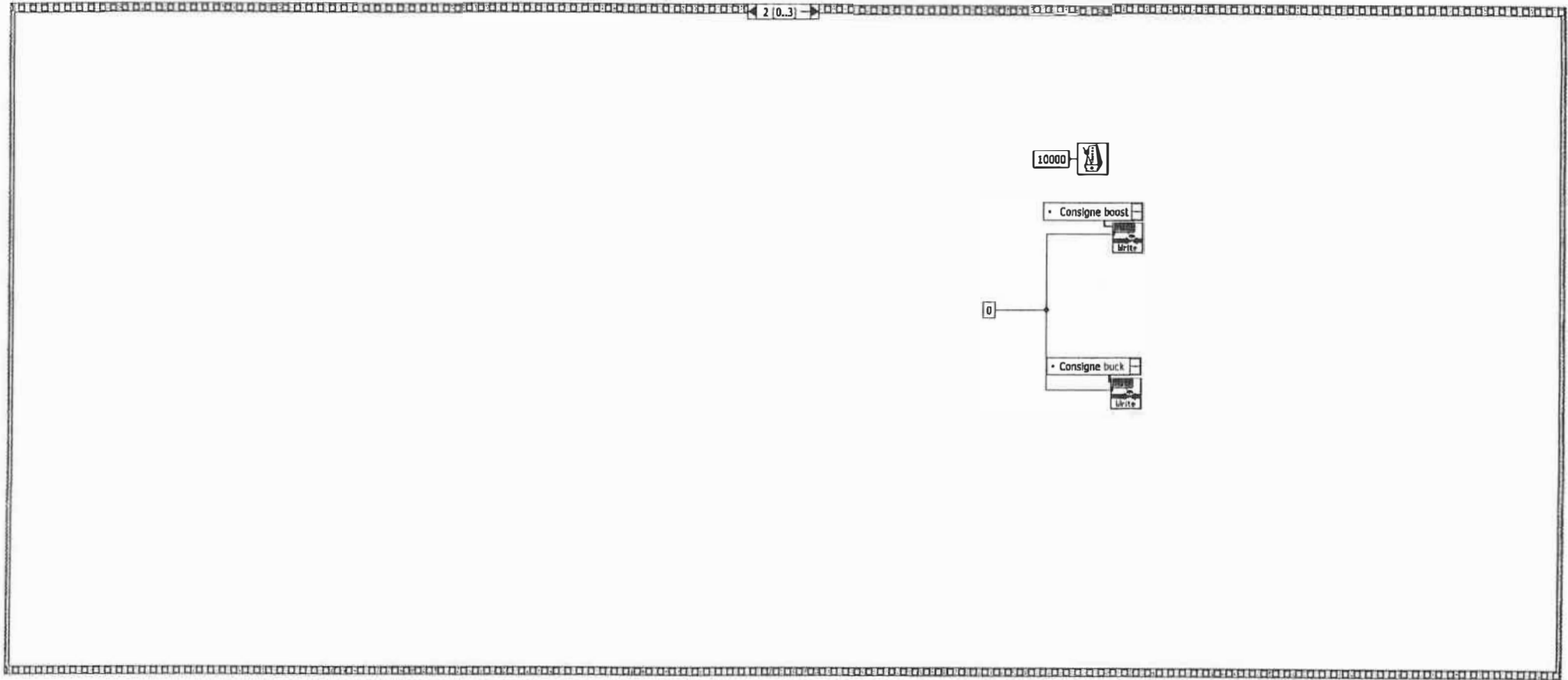
QUITTER

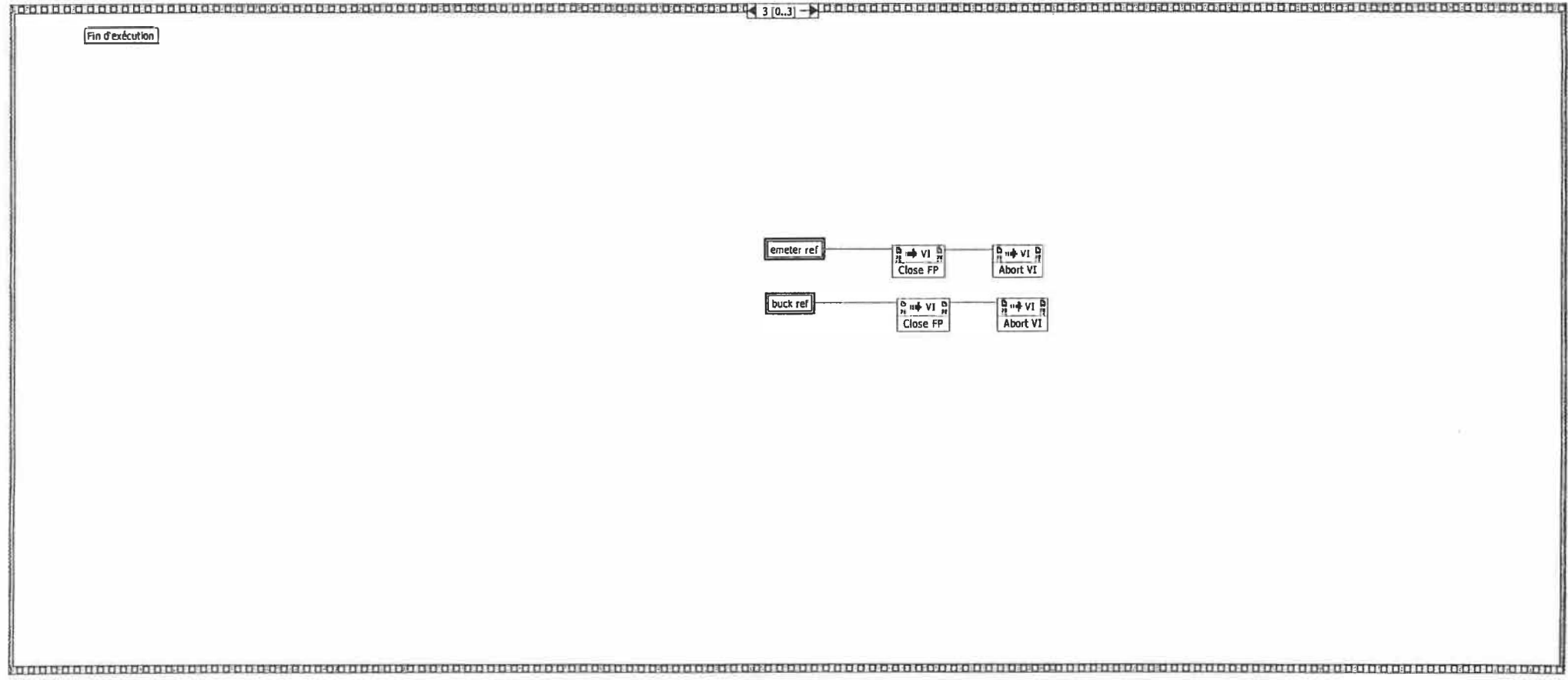
Block Diagram



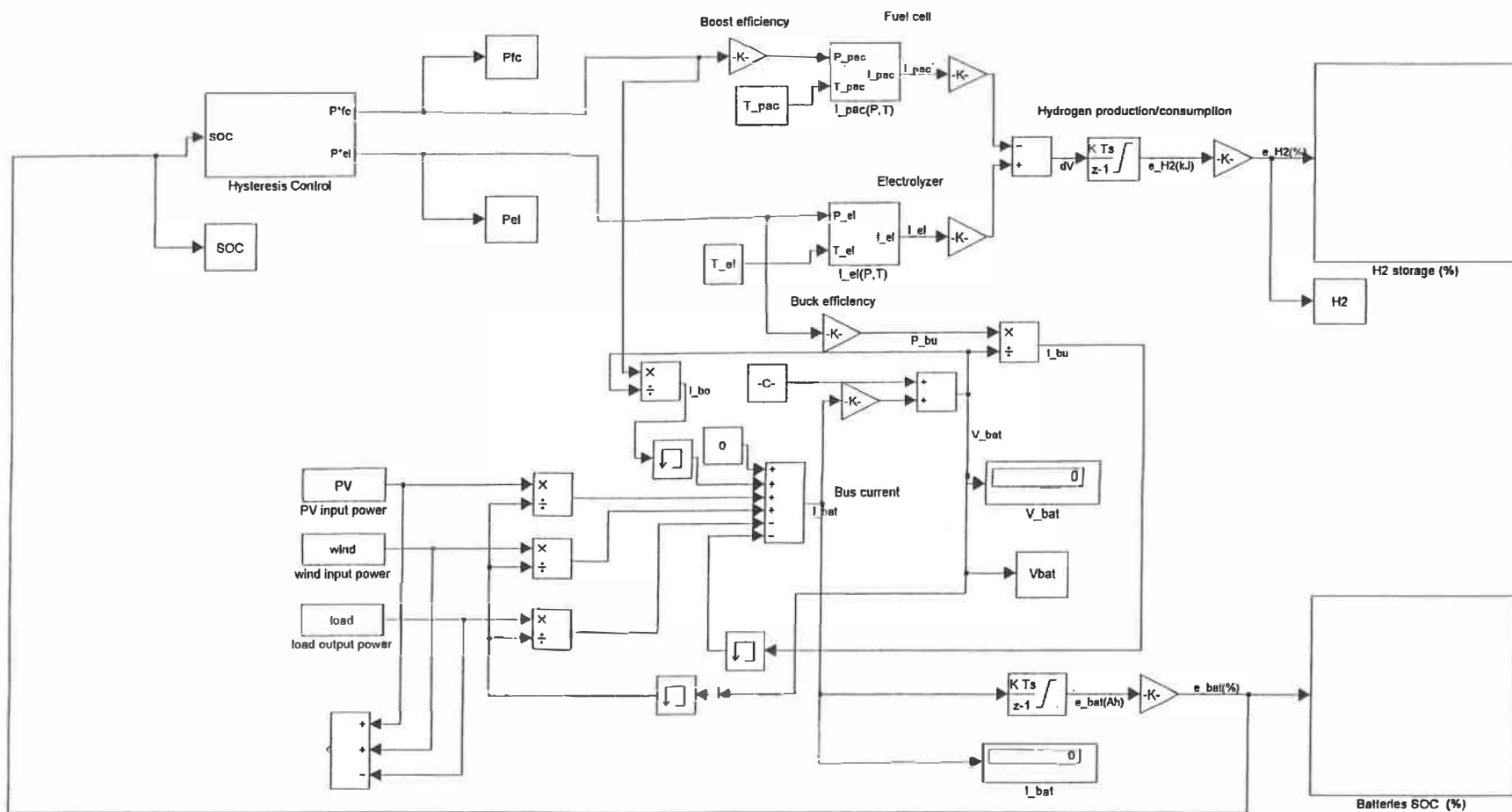




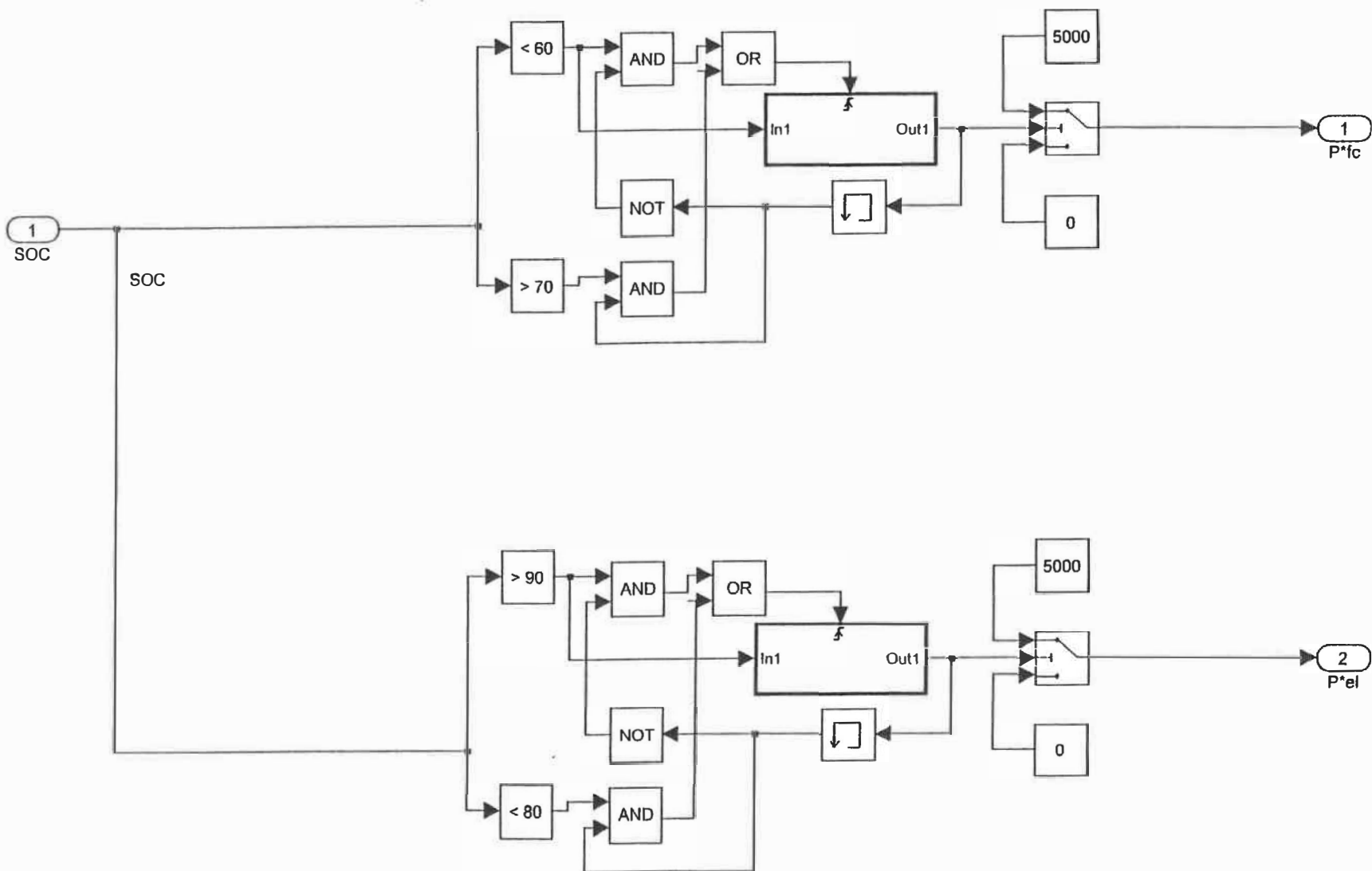




ANNEXE E : Modèles Matlab du système à énergies renouvelables



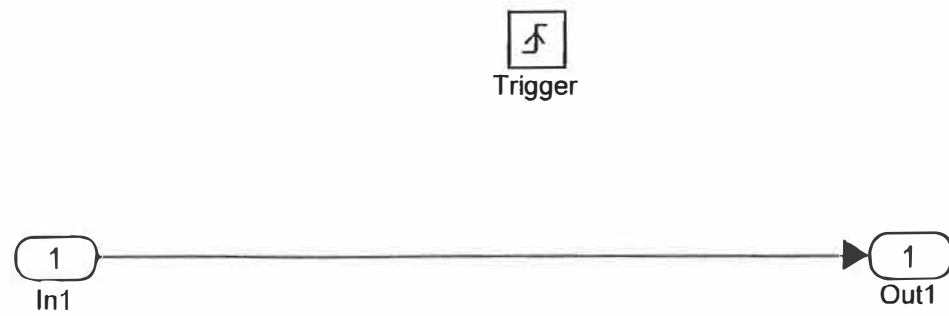
batteries_electrolyzer_pac_hysteresis



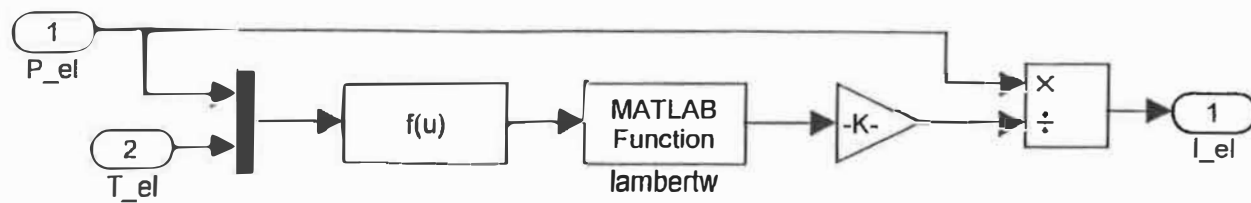
batteries_electrolyzer_pac_hysteresis/Hysteresis Control



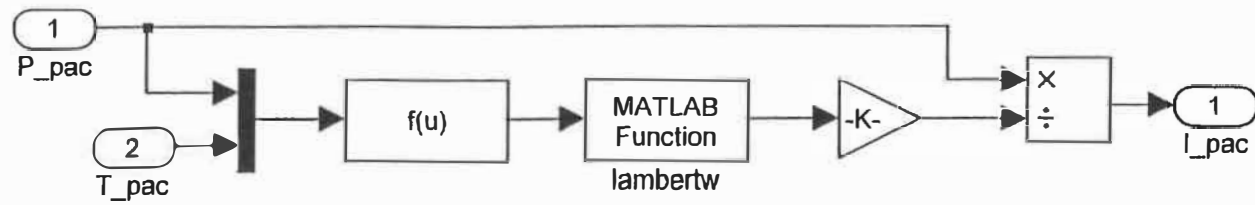
batteries_electrolyzer_pac_hysteresis/Hysteresis Control/Triggered Subsystem



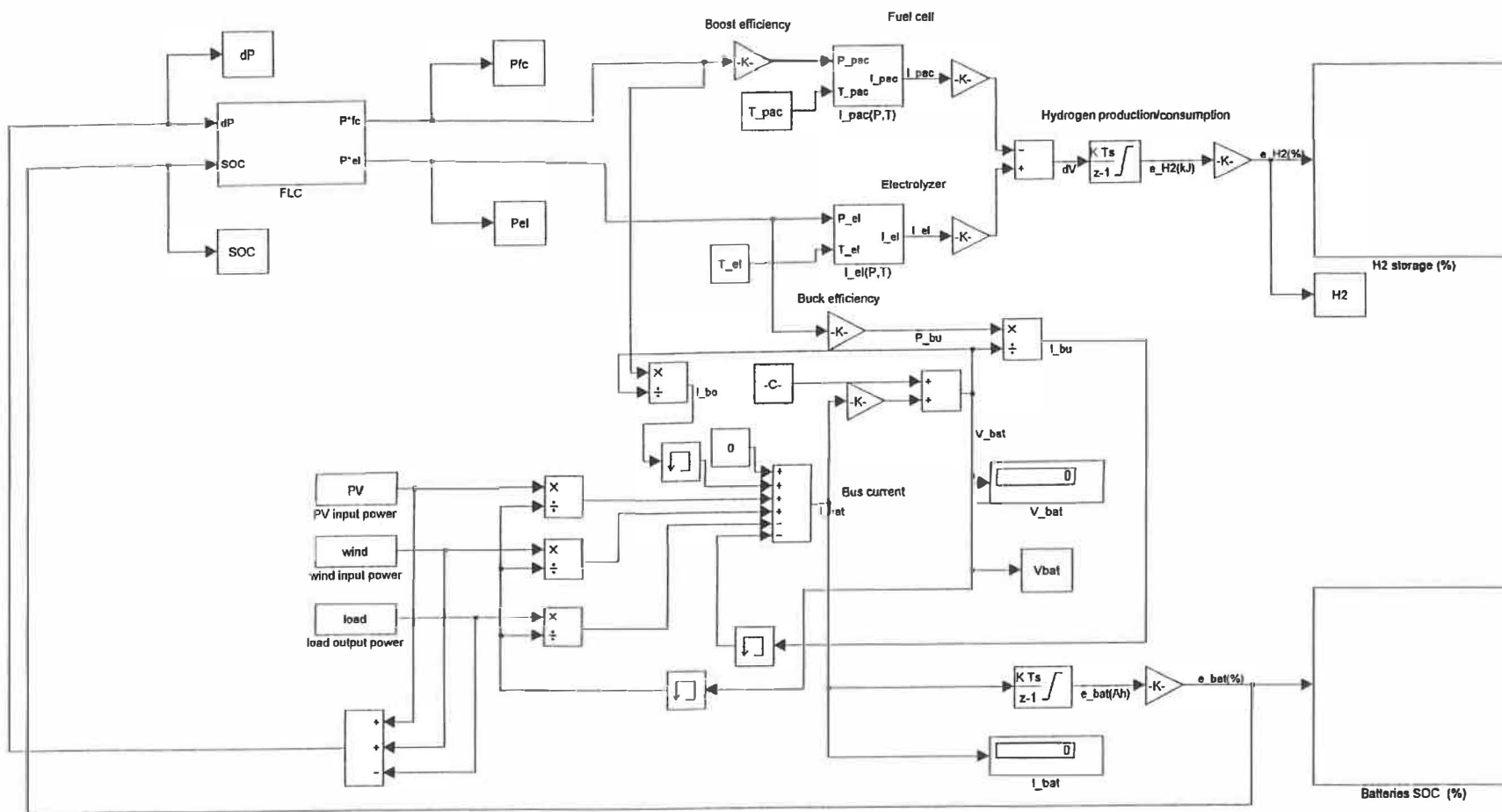
batteries_electrolyzer_pac_hysteresis/Hysteresis Control/Triggered Subsystem1



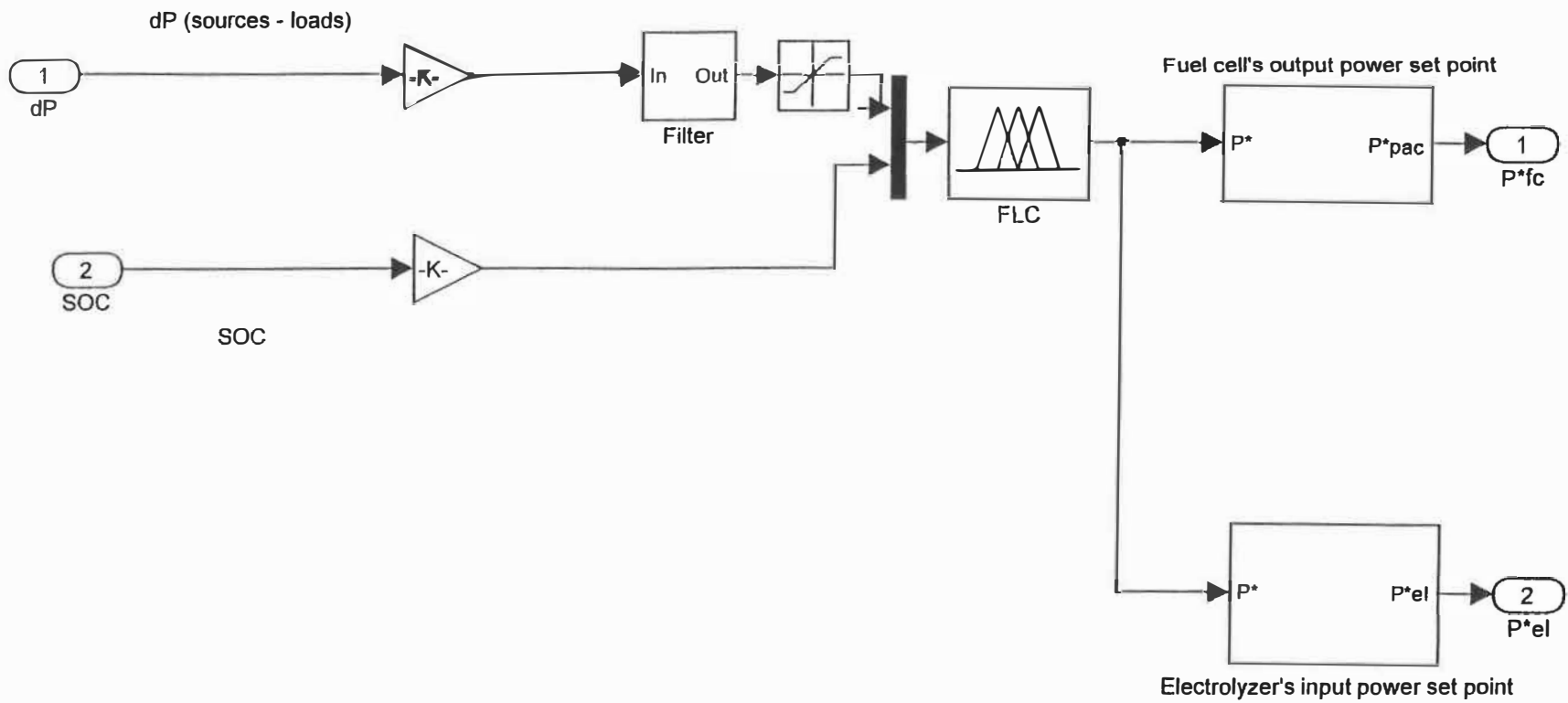
batteries_electrolyzer_pac_hysteresis/I_el(P,T)



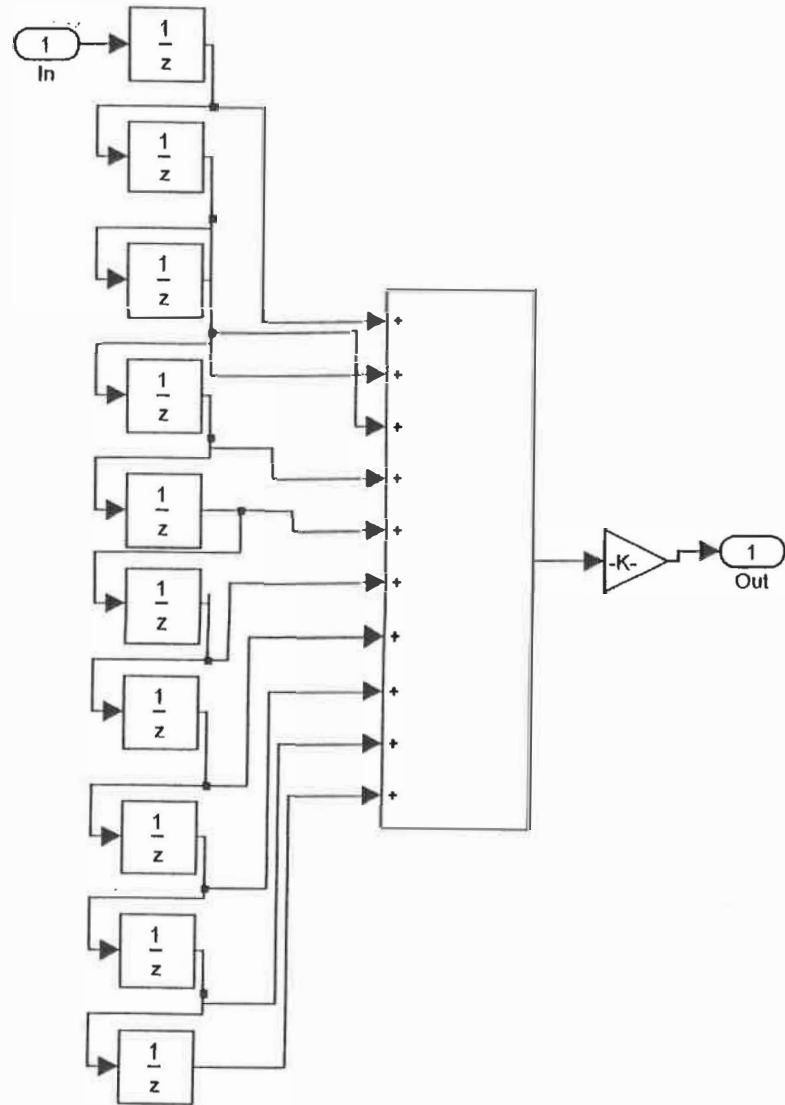
batteries_electrolyzer_pac_hysteresis/I_pac(P,T)



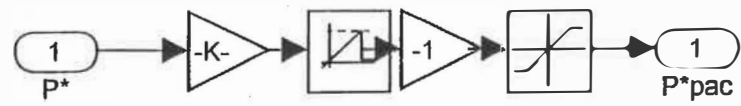
batteries_electrolyzer_pac_flc



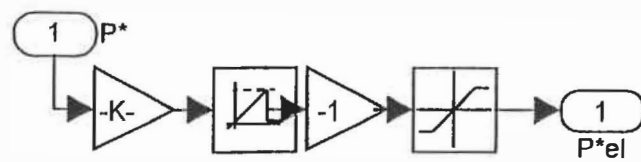
batteries_electrolyzer_pac FLC/FLC



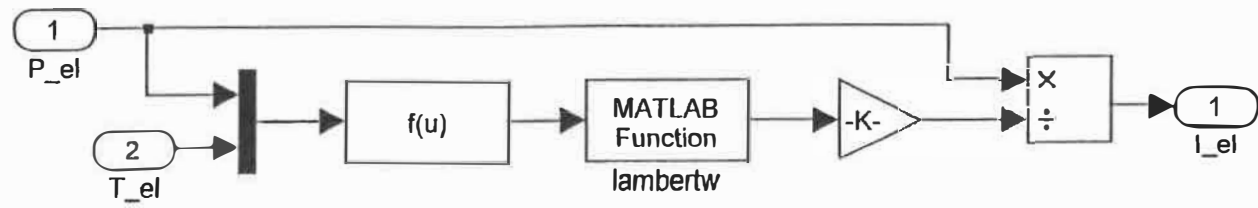
batteries_electrolyzer_pac_flc/FLC/Filter



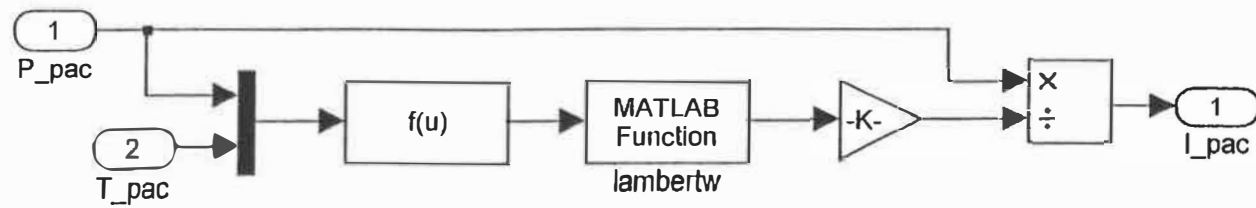
batteries_electrolyzer_pac_flc/FLC/Subsystem



batteries_electrolyzer_pac_flc/FLC/Subsystem1



batteries_electrolyzer_pac_flc/I_el(P,T)



batteries_electrolyzer_pac_flc/I_pac(P,T)