

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

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

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE  
EN GÉNIE ÉLECTRIQUE**

**PAR  
ADIL ANOUAR**

**ÉVALUATION ET CONTRÔLE D'UN SYSTÈME HYBRIDE À ÉNERGIE  
RENOUVELABLE POUR UN SITE ISOLÉ**

Avril 2003

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.

# Table des matières

<u>TABLE DES MATIÈRES</u> .....	I
<u>REMERCIEMENTS</u> .....	IV
<u>LISTE DES FIGURES</u> .....	V
<u>LISTE DES SYMBOLES</u> .....	VII
<u>RÉSUMÉ</u> .....	IX
 <u>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</u> .....	1
<u>1.1 GÉNÉRALITÉS</u> .....	1
<u>1.2 PROBLÉMATIQUE</u> .....	3
<u>1.3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE</u> .....	5
<u>1.4 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE</u> .....	7
1.4.1 PROJETS DANS LE DOMAINE .....	7
1.4.2 SYSTÈME DE CONTRÔLE .....	8
1.4.3 INTERFACES DE PUISSANCE .....	9
1.4.4 MODULE DE STOCKAGE D'HYDROGÈNE .....	10
1.4.4.1 Courant et tension de l'électrolyseur .....	13
1.4.4.2 Efficacité électrique de l'électrolyseur .....	15
<u>1.5 CONCLUSION</u> .....	16
 <u>CHAPITRE 2 : LES ÉOLIENNES</u> .....	17
<u>2.1 INTRODUCTION</u> .....	17
<u>2.2 CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉOLIENNES</u> .....	18
2.2.1 LES ÉOLIENNES À AXE HORIZONTAL .....	21
2.2.2 LES ÉOLIENNES À AXE VERTICAL .....	21
<u>2.3 CONVERSION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE</u> .....	22
2.3.1 MACHINES ASYNCHRONES .....	22
2.3.2 MACHINES SYNCHRONES .....	24
<u>2.4 CONCLUSION</u> .....	27

<b>CHAPITRE 3 : ÉTUDE DE L'ÉLECTROLYSEUR</b> .....	28
<b>3.1 INTRODUCTION</b> .....	28
<b>3.2 OBJECTIFS</b> .....	29
<b>3.3 EXPÉRIMENTATION</b> .....	29
3.3.1 L'ÉLECTROLYSEUR ALCALIN DE STUART ENERGY .....	29
3.3.2 ALARMES ET DIAGNOSTIQUES .....	32
<b>3.4 RÉSULTATS</b> .....	33
3.4.1 COURBE DE POLARISATION .....	33
3.4.2 MESURE DU COURANT, DE LA TENSION ET DE LA TEMPÉRATURE .....	34
3.4.3 MESURE DE L'EFFICACITÉ DES CELLULES.....	35
3.4.4 MESURE DE LA PURETÉ DE L'HYDROGÈNE.....	36
<b>3.5 CONCLUSION</b> .....	37
<b>CHAPITRE 4 : DÉVOLTEUR À COMMANDE MULTIPHASÉE</b> .....	39
<b>4.1 INTRODUCTION</b> .....	39
<b>4.2 LA TECHNIQUE MULTIPHASÉE</b> .....	40
4.2.1 DÉVOLTEUR À UNE CELLULE .....	41
2.1.1 Principe .....	42
4.2.1.3 Expression du courant.....	44
4.2.2 DÉVOLTEUR À N UNITÉS .....	48
4.2.2.1 Courant dans la charge .....	51
4.2.2.2 Courant au primaire.....	51
<b>4.3 SIMULATION ET EXPÉRIMENTATION</b> .....	52
<b>4.4 LA CARTE DE COMMANDE</b> .....	55
4.4.1 TECHNIQUE DE COMMANDE VIA UNE TABLE PRÉCALCULÉE.....	55
4.4.2 ORGANISATION DE LA MÉMOIRE .....	56
<b>4.5 CONCLUSION</b> .....	58
<b>CHAPITRE 5 : INTÉGRATION ET PERFORMANCE DU SYSTÈME</b> .....	59
<b>5.1 INTRODUCTION</b> .....	59
<b>5.2 DESCRIPTION DU MODULE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE</b> .....	59
<b>5.3 ASSERVISSEMENT DU DÉVOLTEUR</b> .....	66
5.3.1 DESCRIPTION ET OBJECTIF DE L'ASSERVISSEMENT .....	66
5.3.3 ALGORITHME DE CONTRÔLE .....	67
<b>5.4 STRATÉGIES DE GESTION D'ÉNERGIE ET RENDEMENT GLOBAL DU SYSTÈME</b> .....	70
<b>5.5 CONCLUSION</b> .....	72

<u>CHAPITRE 6 : DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS</u> .....	74
<u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	80
<u>ARTICLES PUBLIÉS</u> .....	83
<u>ANNEXES</u> .....	84

# Remerciements

Je voudrais remercier mon directeur, Kodjo Agbossou, professeur au département de génie électrique à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), d'avoir accepté de diriger ce travail et participé activement dans toutes les phases de développement du sujet. Je le remercie également pour son soutien financier, intellectuel et moral.

Je remercie également Alain Tessier, professionnel à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) pour sa précieuse aide, son sérieux et son soutien.

Je tiens aussi à remercier aussi Monsieur Ahmed Chériti, professeur au département de génie électrique à l'UQTR pour son aide et son soutien.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues de l'IRH en particulier Souso Kelouwani, Michael Fournier et François Laurentielle.

Mes remerciements vont également à toute ma famille, à ma future femme Isabelle et à sa famille, la famille Cherraoui, Badr, Salim, Hicham, Mohamed Hassania, Jamila Hind, Rabie et Isabelle.

# Liste des figures

**Figure 1.1 : diagramme schématique d'un système à énergie renouvelable basé sur le stockage de l'hydrogène**

**Figure 1.2 : diagramme des seuils d'énergie suivant l'état de charge des batteries**

**Figure 1.3 : schéma (simplifié) d'un électrolyseur**

**Figure 2.1 : effet de lissage de l'augmentation du glissement des machines asynchrones**

**Figure 2.2 : composantes d'une éolienne**

**Figure 3.1 : courbe de polarisation**

**Figure 3.2 : courant ,tension et température de l'électrolyseur**

**Figure 3.3 : efficacité totale, efficacité en courant et en tension de l'électrolyseur**

**Figure 3.4 : pureté d'hydrogène en pourcentage**

**Figure 4.1 : dévolteur à une unité**

**Figure 4.2 : schéma du dévolteur pendant la fermeture de l'interrupteur statique**

**Figure 4.3 : schéma du dévolteur pendant l'ouverture de l'interrupteur statique**

**Figure 4.4 : dévolteur à commande multiphasée**

**Figure 4.5 : courant simulé d' une unité du dévolteur**

**Figure 4.6 : courant total simulé du dévolteur**

**Figure 4.7 : courant mesuré dans une inductance du dévolteur à 4 unités**

**Figure 4.8 : courant total mesuré au secondaire du dévolteur à 4 unités**

**Figure 4.9 : rendement de puissance en fonction de la puissance**

**Figure 4.10 : architecture du circuit de commande pour les montages multiphasés**

**Figure 4.11 : organisation de la mémoire de l'EPROM**

**Figure 5.1 : éolienne-panneaux solaires-batteries**

**Figure 5.2 : redresseur mixte**

**Figure 5.3 : puissance mesurée et simulée de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent**

**Figure 5.4 : puissance mesurée des panneaux solaires**

**Figure 5.5 : évolution de la quantité d'énergie du bus CC suivant la variation de la charge**

**Figure 5.6 : configuration finale du module de production et de stockage d'hydrogène**

**Figure 5.7 : boucle d'asservissement du courant**

**Figure 5.8 : hystérésis autour d'un point de fonctionnement**

**Figure 5.9 : organigramme de l'asservissement**

**Figure 5.10 : résultats du test 1**

**Figure 5.11 : résultats du test 2**

**Figure 5.12 : tension du bus CC, quantité d'hydrogène**

**Figure 5.13 : puissance de l'éolienne**



# Liste des symboles

<b>D:</b>	<b>Diode</b>
<b>F :</b>	<b>Constante de Faraday</b>
<b>G :</b>	<b>Énergie libre de la réaction</b>
<b>I :</b>	<b>Courant de l'électrolyseur</b>
<b>i:</b>	<b>Courant de l'électrolyseur</b>
<b>L:</b>	<b>Inductance</b>
<b>Q:</b>	<b>Commutateur statique</b>
<b>R:</b>	<b>Résistance</b>
<b>r:</b>	<b>Rayon des pôles</b>
<b>S:</b>	<b>Surface balayée</b>
<b>T :</b>	<b>Période de commutation</b>
<b>U :</b>	<b>Tension de l'électrolyseur</b>
<b>V:</b>	<b>Vitesse du vent</b>
<b>W:</b>	<b>Vitesse angulaire</b>
<b>Z :</b>	<b>Nombre d'électron transféré à la demi réaction</b>
<b>C<sub>c</sub>:</b>	<b>Coefficient de conversion</b>
<b>C<sub>p</sub>:</b>	<b>Coefficient de performance</b>
<b>C<sub>a</sub>:</b>	<b>Couple aérodynamique</b>
<b>C<sub>m</sub>:</b>	<b>Couple moteur</b>
<b>C<sub>ce</sub>:</b>	<b>Coefficient du couple moteur sur le couple aérodynamique</b>

$i_c$ :	Courant de charge
$i_d$ :	Courant de décharge
$N_s$ :	Nombre des cellules de l'électrolyseur
$P_m$ :	Puissance recueillie sur l'arbre du moteur de l'éolienne
$R_e$ :	Résistance chimique de l'électrolyseur
$T_e$ :	Température des cellules de l'électrolyseur
$T_{on}$ :	Temps de fermeture de l'interrupteur statique
$T_{off}$ :	Temps d'ouverture de l'interrupteur statique
$U_0$ :	Potentiel d'équilibre thermodynamique
$V_{el}$ :	Hydrogène produit
$V_{in}$ :	Tension d'entrée
$V_{out}$ :	Tension de sortie
$V_L$ :	Tension aux bornes de l'inductance
$\eta_e$ :	efficacité électrique de l'électrolyseur
$\eta_c$ :	Efficacité au courant de l'électrolyseur
$\eta_v$ :	Efficacité en tension de l'électrolyseur
$\lambda$ :	Paramètre de rapidité ou vitesse spécifique $U_p$ : Vitesse au bout des pâles
$\rho$ :	Densité de l'air
$\alpha$ :	Rapport cyclique
$\tau$ :	Constante de temps

# Résumé

Un système de gestion des énergies renouvelables (éolienne et photovoltaïque) est mis au point pour répondre aux besoins énergétiques dans les régions éloignées non reliées aux réseaux électriques. L'excédent d'énergie électrique est stocké sous forme d'hydrogène via un électrolyseur. L'hydrogène, produit à partir des énergies renouvelables, représente une forme écologique, fixe ou transportable de stockage de l'énergie électrique.

Le présent travail consiste principalement à la caractérisation et à l'étude des performances des modules de production (éolienne et panneaux solaires) et de stockage d'énergie (électrolyseur et réservoir). Le couplage entre les deux modules dépend essentiellement du mode de fonctionnement de l'électrolyseur. L'inadéquation entre la production d'électricité et le stockage d'excédent d'énergie sous forme d'hydrogène peut réduire l'efficacité globale du système. Afin d'assurer un transfert optimum, flexible et efficace de l'énergie excédentaire, une interface de puissance (dévolteur de 5 kW) est réalisée. La technique de commande multiphasée du dévolteur adaptée à l'électrolyseur est présentée. La détermination de la meilleure stratégie de gestion d'énergie dans le but d'opérer l'électrolyseur dans une zone de fonctionnement optimale est mis au point. Les performances globales du système et le rendement du module de stockage sont également présentés.

## Chapitre1

# INTRODUCTION

### 1.1 Généralités

L'énergie électrique est nécessaire pour le chauffage, l'éclairage, l'industrie, la construction et le transport. Depuis que l'industrialisation a commencé, la richesse économique a été immédiatement liée avec l'accès aux fossiles combustibles pour la production énergétique, en premier lieu le charbon, mais plus récemment le pétrole et le gaz. Le problème sur la consommation d'énergie est devenu de plus en plus important à cause de la croissance continue de la population mondiale. Des inquiétudes concernant les effets de la croissance économique sur la consommation excessive des ressources naturelles et l'impact sur l'environnement, en particulier l'atmosphère, ont été notées [1].

La protection de l'environnement devient une contrainte majeure face aux risques liés à la production et à la consommation d'énergie, caractérisés par la déforestation, la

dégradation des sites naturels, la pollution de l'air et surtout par l'aggravation de l'effet de serre.

Le soleil émet des rayons qui se transforment en chaleur à la surface de la terre. Cette chaleur devrait se diffuser et repartir vers l'espace. Mais l'atmosphère contient des gaz « à effet de serre » qui agissent comme les vitres d'une serre et retiennent la chaleur. Ces gaz sont : vapeur d'eau, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (méthane), N<sub>2</sub>O (oxyde nitreux), O<sub>3</sub> (ozone), les CFC. Ces gaz, produits pour la plupart naturellement, proviennent aussi des activités humaines (émissions résultant des transports, de l'agriculture, du secteur industriel, mais également des activités de chacun d'entre nous)[2]. Depuis la révolution industrielle, leur concentration dans l'atmosphère ne cesse d'augmenter, jusqu'à devenir critique. Les effets prévisibles sont très inquiétants:

- déplacement des zones de pluie, sécheresse et inondations entraînant de graves problèmes agricoles,
- disparition et migration d'espèces animales et végétales qui ne s'adapteront pas aux modifications du climat,
- fonte des glaces aux pôles, entraînant l'augmentation du niveau des mers et la submersion de nombreux deltas et de petites îles du Pacifique,
- accroissement de l'intensité des grands phénomènes météorologiques (pluies torrentielles, orages...)

Ce sont les raisons pour lesquelles il devient nécessaire de limiter nos émissions, afin de minimiser les chances que ces risques ne se multiplient.

Le développement durable devrait maintenant tenir compte du fait que certains carburants non-renouvelables doivent être préservés pour l'avenir. En outre, l'énergie renouvelable et l'hydrogène, avec réduction des gaz à effet de serre et d'autres émissions de polluant d'air, devront former la fondation principale de n'importe quelle politique énergétique durable[3].

## **1.2 Problématique**

L'énergie renouvelable se rapporte à l'énergie développée par une source renouvelable dont la ressource première est naturellement reconstituée et contrôlée de sorte qu'elle dure pour toujours. À la différence des autres sources d'énergie, la plupart des sources d'énergies renouvelables ne libèrent pas de dioxyde de carbone ou d'autres polluants atmosphériques comme sous-produits dans l'atmosphère. Les ressources hydrauliques, bien que renouvelables, ne sont pas disponibles partout (zones désertiques). L'eau (turbine et génératrice ou alternateur), le vent (éolienne) et le soleil (cellules photovoltaïques) sont considérés comme des énergies renouvelables. Ce travail portera essentiellement sur les deux dernières formes d'énergie renouvelable.

Le seul problème de ces sources d'énergies est qu'elles sont diffuses et pour la plupart irrégulières, ce qui pose un défi technique majeur au niveau du stockage[4], c'est particulièrement le cas de la production autonome d'électricité éolienne qui constitue un moyen de production rentable [5]. Présentement, les batteries sont les plus utilisées pour le stockage à faible capacité des surplus d'énergie électrique produits par ces sources [5,6]. Pour des capacités plus substantielles et pour le stockage à long terme, on envisage l'option hydrogène [6,7,8].

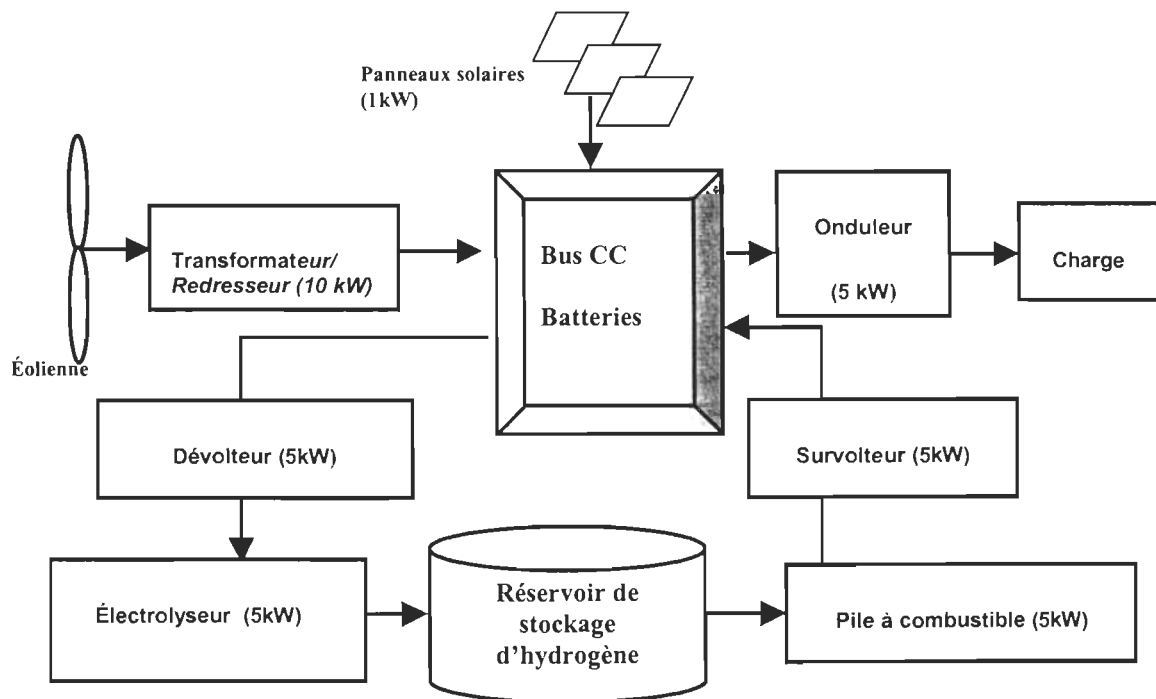
L'hydrogène, produit à partir d'énergie renouvelable, représente une forme écologique, fixe ou transportable, de stockage de l'énergie électrique. Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène permet un approvisionnement variable en réponse à une demande énergétique variable. L'option hydrogène est la plus conviviale pour l'environnement tout en étant la plus versatile pour emmagasiner l'énergie électrique produite par le vent et le soleil [5,7,8].

Actuellement, l'emploi de l'hydrogène comme milieu de stockage dans des systèmes d'énergie renouvelable est à ses débuts. Les systèmes de stockage d'hydrogène peuvent s'avérer avantageux dans les marchés existants. Par exemple, comparativement à l'emmagasinage en batterie, le stockage sous forme d'hydrogène offre une amélioration de la densité de stockage, des économies d'échelle, des caractéristiques d'adaptation à la température et la durée commerciale [5,6]. L'hydrogène peut être produit à n'importe quel endroit à partir de ressources énergétiques locales renouvelables, ce qui évite le transport de carburant au site d'utilisation. Des efforts en recherche et développement (R&D) sont requis pour exploiter efficacement le plein potentiel des énergies intermittentes. Jusqu'à présent, la recherche expérimentale dans ce domaine se limitait principalement à l'énergie solaire [6,9,10]. Par contre, le stockage de l'énergie éolienne via l'hydrogène a surtout été traité théoriquement[5,7].

La problématique de production autonome et de stockage du surplus d'énergie sous forme d'hydrogène est à la base de ce projet de recherche. Il s'agit d'analyser et de développer un système de gestion de la demande des charges (électrolyseur et charges résidentielles) en fonction de la production d'électricité.

### 1.3 Objectifs et méthodologie

Le premier objectif de ce travail est l'intégration d'un système hybride à énergie renouvelable (qui comprend une éolienne, des panneaux solaires et un bus courant continu (bus CC )) en un seul module (figure 1). Le principe de fonctionnement de ce genre de système est comme suit: lorsque la demande en énergie des charges est inférieure à la production de l'éolienne et des panneaux solaires, l'excédent d'énergie est envoyé vers l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène et ensuite l'emmagasiner. Tandis que lorsque la demande en énergie des charges dépasse la capacité énergétique



**Figure1.1 : diagramme schématique d'un système à énergie renouvelable basé sur le stockage de l'hydrogène.**



disponible, l'hydrogène stocké est régénéré sous forme d'électricité via la pile à combustible. Les batteries sont utilisées pour un stockage à court terme et aussi pour stabiliser le système contre les fluctuations des sources d'énergies en particulier les pics de puissance [5,11,12,13]. Pour un stockage à long terme, un électrolyseur couplé à un réservoir de stockage d'hydrogène est utilisé.

La nature intermittente des énergies renouvelables, la fluctuation de la charge ainsi que la sécurité du système nécessitent un contrôle assez complexe afin de gérer les flux énergétiques entre les différentes parties du système. Ceci nous conduit à un deuxième objectif qui est de concevoir un système de contrôle et de gestion de la demande des charges ( l'électrolyseur et les charges résidentielles) en fonction de la production. En d'autres termes, la deuxième partie consiste à contrôler le fonctionnement du module de stockage lorsqu'un excédent d'énergie est disponible.

Le domaine de recherche sur le stockage d'excédent d' énergies renouvelables étant très récent, une méthodologie axée sur les centres d'intérêts de chaque partie du projet de recherche sera utilisée. Ainsi une étude sur les éoliennes sera donnée afin de mieux comprendre tous les aspects de ces éléments. Ensuite une caractérisation théorique et expérimentale de l'électrolyseur sera présentée dans le but de son intégration au système. Pour le contrôle et la gestion du module de stockage lorsqu'un excédent d'énergie est disponible, la puissance absorbée par l'électrolyseur peut être modulée suivant un algorithme de décision. Cet algorithme doit prendre en compte plusieurs paramètres à savoir la température de l'électrolyseur, la tension du bus CC, l'énergie produite par les sources du système et la puissance absorbée par les charges. Ce processus est en pratique facile à réaliser à cause de la flexibilité de commande de l'électrolyseur à travers le

dévolteur multiphasé. Une étude théorique de la nouvelle technique de commande multiphasée sera présentée. L'architecture du dévolteur sera donnée afin de faire ressortir l'importance et la précision de la génération numérique des signaux de modulation de largeurs d'impulsions (MLI).

Des mesures réelles de courant et de tension seront faites sur le dévolteur afin de les comparer à l'étude théorique faite avec le logiciel Matlab-Simulink. Ceci nous amènera à évaluer le rendement global du dévolteur. Un algorithme de gestion de l'excès d'énergie sera développé et implanté dans un processeur numérique.

Enfin un test du bon fonctionnement de tout le système sera fait, le logiciel BridgeVIEW de National Instruments servira pour les différentes acquisitions de données que nous allons faire. Les performances et le rendement du système seront évalués.

## **1.4 Recherches bibliographiques**

### **1.4.1 Projets dans le domaine de recherche**

La majorité des projets dans le domaine [3,5-16] sont encore à l'étape de développement et de démonstration. Plusieurs recherches sont principalement orientées vers l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques comme source d'énergie renouvelable avec l'hydrogène comme alternative de stockage d'énergie et comme complément des systèmes autonomes d'énergie renouvelables [7-15].

D'autres études ont montré l'intérêt de combiner les sources d'énergie renouvelable (éolienne / panneaux solaires) avec l'hydrogène [15-17]. Ces recherches se limitent principalement à la modélisation et à la simulation de l'évolution du système. Jusqu'à présent aucun projet n'a traité pratiquement et d'une façon complète la combinaison de l'éolienne et des panneaux solaires dans un système à énergie renouvelable.

### 1.4.2 Système de contrôle

L'objectif du système de contrôle est de gérer les flux d'énergie de la source d'énergie vers l'électrolyseur et de la pile à combustible vers l'utilisation selon des règles de contrôle établies à partir de l'état de charge des batteries [5,17,18,19]. L'état de charge des batteries est la variable de commande du processus. Sa valeur est estimée et continuellement mise à jour par la mesure de la tension et du courant de la batterie. Le principe est simple, il faut développer un système qui mesure continuellement l'énergie accumulée dans les batteries, ensuite fixer des seuils suivant l'État De Charge des batteries (ÉDC) pour démarrer et arrêter l'électrolyseur ainsi que la pile à combustible figure(1.2).

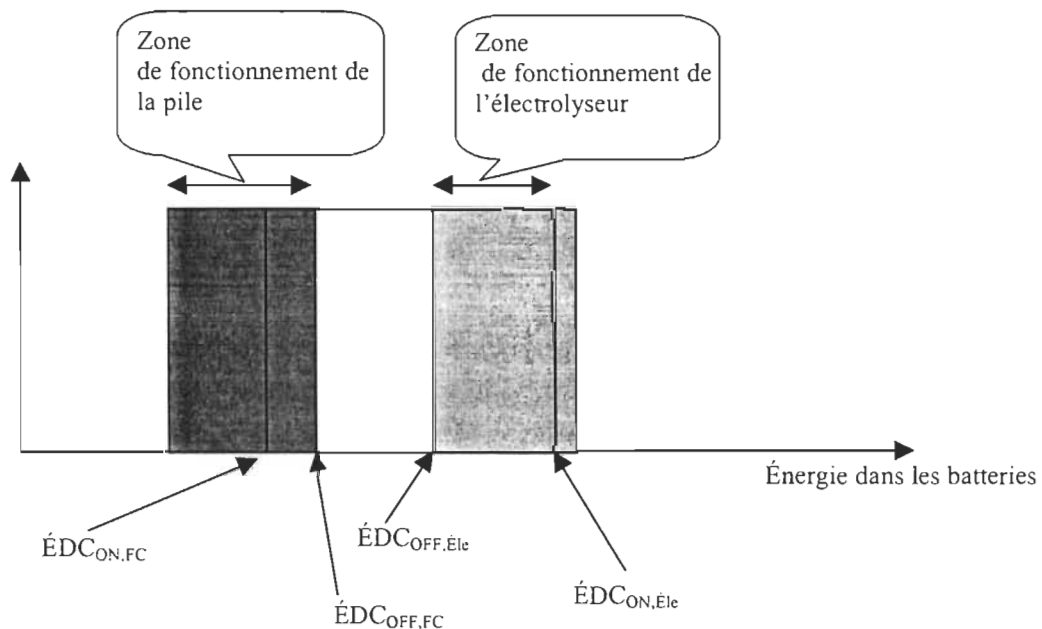


Figure1.2 : diagramme des seuils d'énergie suivant l'état de charge des batteries

Avec :

$\dot{E}DC_{ON,Éle}$  : seuil pour démarrer l'électrolyseur

$\dot{E}DC_{ON,FC}$  : seuil pour démarrer la pile à combustible

$\dot{E}DC_{OFF,Éle}$  : seuil pour arrêter l'électrolyseur

$\dot{E}DC_{OFF,FC}$  : seuil pour arrêter la pile à combustible

### **1.4.3 Interfaces de puissance**

L'optimisation du transfert de puissance entre le bus CC et l'électrolyseur nécessite l'utilisation d'une interface de puissance de haut rendement. Ces interfaces sont communément appelées des convertisseurs de puissance.

Dans le but d'améliorer l'efficacité d'un convertisseur, la fréquence de commutation est augmentée. Cette solution conduit habituellement à la génération de bruits nuisibles au bon fonctionnement des circuits, en plus d'augmenter l'échauffement des transistors de puissance [20]. Le transistor de commutation introduit deux types de pertes:

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

De nouveaux développements dans la technologie des semi-conducteurs permettent actuellement d'avoir des transistors de puissance avec  $R_{DS,ON}$  très faible [21]. Si on augmente la fréquence de commutation, les pertes par commutation deviennent grandes.

Afin de réduire le taux d'harmoniques sur les réseaux d'alimentation et d'améliorer le rendement, un nouveau prototype de convertisseur été introduit [22]. La technique consiste à utiliser des circuits de convertisseurs identiques mais à commutation déphasée pour obtenir la puissance désirée. Cette technique sera appliquée au convertisseur CC-CC utilisé entre le bus CC et l'électrolyseur.

#### **1.4.4 Module de stockage d'hydrogène**

D'autres chercheurs se sont intéressés à la caractérisation des différentes composantes du stockage d'énergie sous forme d'hydrogène destinées à être utilisées dans les systèmes autonomes à énergies renouvelables. Ces études sont axées sur l'évaluation des rendements énergétiques des différentes composantes à partir des données expérimentales notamment le couplage de l'électrolyseur aux sources d'énergies renouvelables [23,24]. En effet, la nature intermittente et les fluctuations rapides des énergies renouvelables soumettent l'électrolyseur à des conditions de fonctionnement assez sévères affectant son efficacité et la pureté de l'hydrogène produit. En général la quantité d'hydrogène produite reflète essentiellement le courant fourni par la source d'énergie renouvelable [24,25].

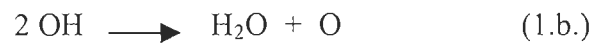
Des diverses procédures de production de l'hydrogène à partir de l'eau, l'électrolyse est actuellement la seule méthode d'importance pratique. La décomposition de l'eau par électrolyse consiste en deux réactions partielles qui ont lieu aux deux électrodes de la cellule de l'électrolyseur. Les électrodes sont séparées par un électrolyte (de l'hydroxyde de potassium KOH par exemple). La décomposition de l'eau est effectuée par application de l'énergie électrique aux électrodes. L'hydrogène est produit à l'électrode négative

(cathode) et l'oxygène à l'électrode positive (anode). Afin de maintenir l'isolement du gaz produit, les deux zones de réaction sont séparées par un diaphragme[26].

La demi-réaction à la cathode :  $2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \longrightarrow 2 \text{H} + 2 \text{OH}^-$



La demi-réaction à l'anode :  $2 \text{OH}^- \longrightarrow 2 \text{OH} + 2 \text{e}^-$



La réaction globale :  $2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \quad (1.c.)$

En plus du système de génération du gaz (hydrogène) constitué par les cellules d'électrolyse, l'électrolyseur intègre généralement d'autres éléments nécessaires à son fonctionnement [24,27,28,29 ]:

- Un système de déminéralisation (distillation) de l'eau
- Un système d'assèchement (pour éliminer  $\text{H}_2\text{O}$ )
- Un système de compression de l'hydrogène produit
- Un système de purification et de filtrage permettant d'avoir une pureté adéquate de l'hydrogène produit .

Une fois purifié, l'hydrogène sous pression est ensuite acheminé vers un réservoir pour une utilisation ultérieure. Un schéma simplifié du processus de production d'hydrogène est présenté sur la figure (1.3).

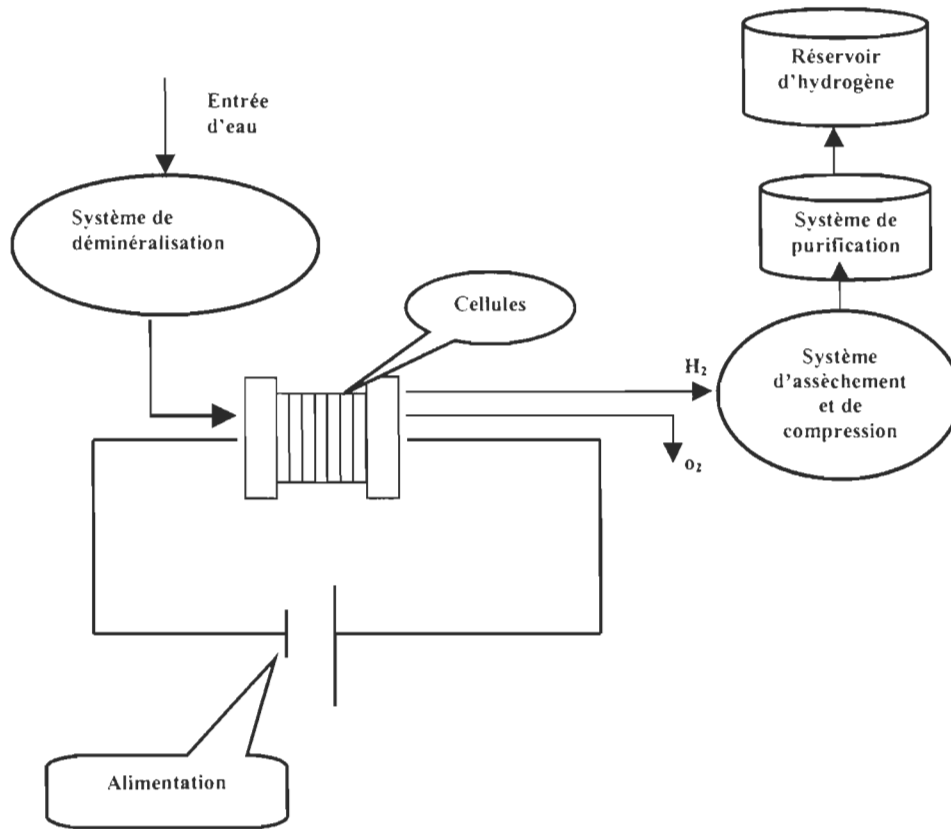


Figure1.3 : schéma (simplifié) d'un électrolyseur

#### 1.4.4.1 Courant et tension de l'électrolyseur

Afin de pouvoir intégrer un électrolyseur dans un système à énergie renouvelable, il est nécessaire de le caractériser. Ainsi il est nécessaire de trouver la relation qui lie le courant, la tension et la température.

Le potentiel d'équilibre thermodynamique  $U_0$  aux bornes d'une cellule est associé au passage du courant électrique. Il peut être calculé en utilisant la relation suivante[30] :

$$U_0 = \frac{G}{zF} \quad (1.d.)$$

Avec :  $G$  = l'énergie libre de la réaction

$F$  = la constante de Faraday

$z$  = le nombre d'électron transféré à la demi-réaction

En faisant une analyse électrochimique d'un électrolyseur, l'équation suivante de tension  $U$  aux bornes d'une cellule peut être déduite [31] :

$$U = U_0 + B \ln\left(\frac{i}{C}\right) + D \ln\left(\frac{E}{E-i}\right) + R_e i \quad (1.e.)$$

Avec  $B \ln\left(\frac{i}{C}\right)$  qui représente le processus de transfert de charge aux électrodes

$$B = B_0 T$$

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-C_1}{T}\right)$$

$D \ln\left(\frac{E}{E-i}\right)$  représente le processus de diffusion



$R_e$	représente la résistance ohmique
$i$	courant de l'électrolyseur
$T_e$	température de l'électrolyseur
$B_0, C_0, C_1, E$	constantes

Le second terme de l'équation (1.e.) peut être modifié comme suit :

$$B \ln\left(\frac{i}{C}\right) = B_0 T \ln\left(\frac{i}{C_0 \exp(-C_1/T)}\right) ; \quad I = A_c i$$

$$= B_0 T \ln(I) - B_0 [\ln(A_c) + \ln(C_0)] T + B_0 C_1 \quad (1.f.)$$

En supposant que la résistance est inversement proportionnelle à la température (car les cellules de l'électrolyseur se comportent comme une résistance variable), le dernier terme de l'équation (1.e.) devient :

$$R_e i = R_e' \frac{i}{T} = \frac{R_e'}{A_c T} I \quad (1.g.)$$

En supposant que le terme de diffusion n'a aucune contribution significative dans l'équation (1.e.) [32], il peut être supprimé. Donc l'équation (1.e.) peut être exprimée sous la forme paramétrique suivante:

$$U = a_0 + a_1 T + b \ln(T) - \left(\frac{r_0}{T}\right) I \quad (1.h.)$$

$$\text{Avec} \quad a_0 = U_0 + B_0 C_1$$

$$a_1 = -B_0 [\ln(A_c) + \ln(C_0)]$$

$$b = B_0 T$$

$$r_0 = \frac{R_e'}{A_c}$$

Enfin, dans le cas d'un électrolyseur à  $N_s$  cellules l'équation (1.h.) devient :

$$U = [a_0 + a_1 T + b \ln(T) - (r_0 / T) I] N_s \quad (1.i.)$$

Donc, l'électrolyseur est caractérisé par quatre paramètres  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b$  et  $r_0$ .

#### 1.4.4.2 Efficacité électrique de l'électrolyseur

L'efficacité électrique d'une cellule de l'électrolyseur  $\eta_e$  est définie comme étant le produit de l'efficacité en courant  $\eta_I$  et l'efficacité en tension  $\eta_V$  [24,27] :

$$\eta_e = \eta_I \cdot \eta_V \quad (1.j)$$

Avec

$$\eta_V = \frac{U_0}{U} \quad (1.k)$$

Et

$$\eta_I = \frac{C_c V_{el}}{I} \quad (1.l)$$

$V_{el}$  étant l'hydrogène produit,  $C_c$  est le coefficient de conversion.

Les équations (1.k) et (1.l) dans (1.j) nous donnent:

$$\eta_e = \frac{C_c V_{el}}{I} \cdot \frac{U_0}{U} \quad (1.m)$$

Dans le cas où le nombre de cellules est  $N_s$  l'efficacité en courant deviendrait :

$$\eta_I = \frac{C_c V_{el}}{N_s I} \quad (1.n)$$

Alors que l'efficacité électrique devient :

$$\eta_e = \frac{C_c V_{el}}{N_s I} \cdot \frac{U_\theta}{U} \quad (1.p)$$

## 1.5 Conclusion

Le besoin de sources d'énergies abondantes, propres, efficaces à coût abordable devient un enjeu social de première importance. Les énergies renouvelables pourraient répondre à ce besoin, mais leurs attraits sont limités par leur nature irrégularités et par l'absence d'un moyen de stockage efficace et adéquat de l'énergie. Les batteries ne sont pas adaptées au stockage à long terme d'énergie. Toutes ces contraintes ainsi que la fluctuation des charges les problèmes de sécurité nécessitent un contrôle assez complexe, afin de gérer les flux énergétiques entre les différentes parties du système. Pour contrôler la gestion du module de stockage lorsqu'un excédent d'énergie est disponible, la puissance absorbée par l'électrolyseur peut être modulée suivant un algorithme qui doit prendre en compte plusieurs paramètres, à savoir la température de l'électrolyseur, la tension du bus CC, l'énergie produite par les sources du système et la puissance absorbée par les charges. Ce processus sera facile à réaliser en pratique à cause de la flexibilité de commande de l'électrolyseur à travers le dévolteur multiphasé.

## Chapitre 2

# LES ÉOLIENNES

### 2.1 Introduction

L'énergie contenue dans le vent est une énergie très importante mais difficile à récupérer.

C'est le potentiel énorme que représente cette énergie qui a poussé à trouver un moyen toujours plus perfectionné pour sa transformation en énergie mécanique ou électrique.

Ainsi, dès le V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, on voyait déjà des éoliennes à axe vertical également appelées panémons dans les îles grecques. Le premier moulin à vent a été fabriqué en Perse en 134 avant J.-C. et fonctionnait grâce à un mur protégeant les pales du vent au cours de leur retour [4]. Puis on a beaucoup utilisé l'énergie éolienne pour le pompage et l'irrigation des cultures. L'éolienne a poursuivi sa lente évolution au cours

des siècles, et les éoliennes à axe horizontal n'ont fait leur apparition qu'au XIII<sup>e</sup> siècle [4]. Là, les constructeurs et les utilisateurs se préoccupaient plus des effets aérodynamiques liés à la forme des pales et à leur nombre pour ne citer que ces deux facteurs. Les premiers aérogénérateurs ont vu le jour en 1850, mais l'idée de l'aérogénérateur date de 1802 où Lord Kelvin, un physicien anglais, associa une génératrice d'électricité à un moteur éolien. Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. Parallèlement, les recherches dans le domaine de l'aérodynamique faites par l'aéronautique ont permis une évolution des moteurs éoliens [4].

Dans quels cas est-il préférable d'opter pour l'énergie éolienne? Principalement lorsqu'on se situe dans une région éloignée, à l'écart du réseau électrique, ou bien encore lorsque l'on n'a besoin que d'une relativement faible quantité d'énergie et d'une puissance fournie non régulière et bien sûr lorsqu'on est dans une région où les moyennes des vitesses du vent sont assez élevées.

Il existe une multitude d'éoliennes dont beaucoup ont été mises de côté du fait qu'elles ne satisfaisaient pas aux besoins demandés, et leur usage est aussi varié que leur forme.

Nous allons donc voir quels sont les différents types d'éoliennes, quel est leur fonctionnement, comment tirer profit de l'énergie éolienne.

## **2.2 Caractéristiques des différents types d'éoliennes**

Une classification méthodique, universellement adoptée, fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs de vent.

On distingue trois principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser une éolienne et son efficacité.

Le premier paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique  $U_p$  (ou vitesse en bout de pale) [33] :

$$U_p = \omega R \quad (2.a)$$

Avec

$\omega$  : la vitesse de rotation de l'éolienne

$R$  : le rayon d'extrémité de la pale

Le paramètre de rapidité ou vitesse spécifique notée  $\lambda$  est le rapport de la vitesse  $U_p$  à la vitesse  $V$  du vent:

$$\lambda = U_p / V = (\omega R) / V \quad (2.b)$$

Les éoliennes peuvent être classées en fonction de ce paramètre: si  $\lambda$  est inférieur à 3, l'éolienne est dite *lente*; au-delà, l'éolienne est dite *rapide*. A titre d'exemple, des éoliennes bipales peuvent avoir un paramètre  $\lambda$  égal à 20. Cependant, une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances telles que le bruit.

Le second paramètre qui caractérise les éoliennes est le coefficient de performance noté  $C_p$ . Il est défini par le rapport de la puissance  $P_m$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor[34,35]:

$$C_p = P_m / (0.5 \rho S V^3) \quad (3.c)$$

La valeur maximale du  $C_p$  définie par Betz, est égale à 0.592.

Le troisième paramètre important est le coefficient du couple  $C_{ce}$ : c'est le rapport du couple moteur  $C_m$  qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien ( $C_m = P_m / \omega$ ) au couple aérodynamique  $C_a$ .

$$C_{ce} = C_m / C_a = C_p / \lambda \quad (3.d)$$

Les paramètres  $C_p$  et  $C_{ce}$  caractérisent les performances de l'éolienne et sont habituellement représentés en fonction de  $\lambda$ .

Cependant plus généralement, on classifie les éoliennes par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière:

- les éoliennes à axe horizontal
- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes qui utilisent le déplacement d'un mobile (peu exploitable)
- les dispositifs statiques de récupération de l'énergie éolienne

Faisons donc l'inventaire des différents types de capteurs éoliens selon leur catégorie et intéressons-nous à leurs caractéristiques générales.

Il faut cependant savoir que la plupart de ces éoliennes comme le rotor Savonius ou encore les machines à clapets battants par exemple n'ont pas vraiment d'ouvertures sur l'avenir et qu'aujourd'hui seuls les éoliennes à axe horizontal bi- et tripales sont utilisés pour la production d'électricité à échelle internationale.

### **2.2.1 Les éoliennes à axe horizontal**

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent des hélices multipales généralement à deux ou trois pales.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « *hélice au vent* », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « *hélice sous le vent* ».

### **2.2.2 Les éoliennes à axe vertical**

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrius et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants.



## **2.3 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique**

De multiples installations peuvent être utilisées pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Bien sûr, l'électricité produite doit correspondre à certaines normes (Fréquence...etc).

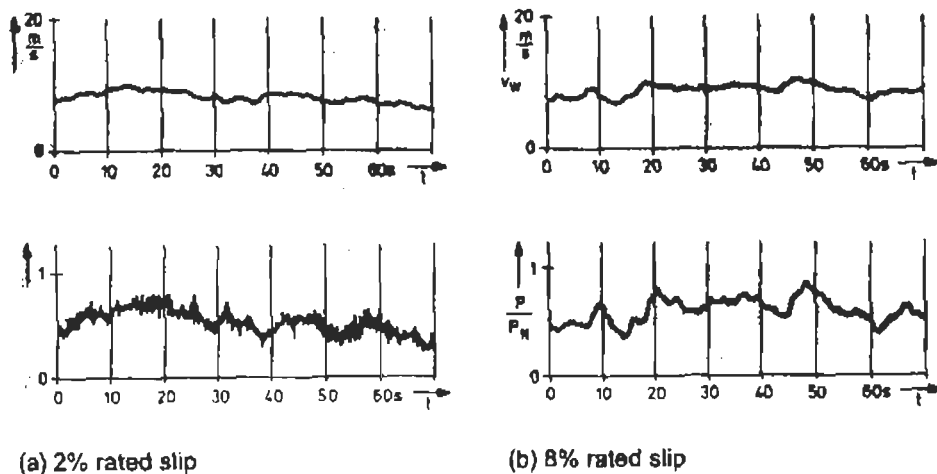
De plus, pour être rentables, les installations doivent être simples à utiliser, avoir une longue durée de vie, requérir peu de maintenance et avoir un coût initial faible. Pour y arriver, le générateur doit être choisi avec soin. Jusqu'à maintenant, les générateurs triphasés synchrones et asynchrones avec un couplage direct ou par le biais d'un onduleur ont été utilisés presque exclusivement. C'est pour cette raison que nous ne nous attarderons pas aux autres systèmes possibles (ex. générateur à champ modulé).

### **2.3.1 Machines asynchrones**

L'installation la plus commune et la plus simple consiste en un générateur asynchrone relié via une transmission à l'arbre des pales. Les générateurs à cage d'écureuil occupent la plus grande place dans ce créneau. Leur premier avantage est leur faible coût dû à leur simplicité de fabrication. Cette simplicité leur est également favorable puisque les éoliennes sont soumises à des conditions difficiles (présence de sable et d'humidité).

Comme elles consomment toujours une certaine puissance réactive, les machines asynchrones doivent être munies d'éléments de compensation, qui apportent un risque supplémentaire de résonance.

Lorsque l'éolienne est connectée de façon rigide, l'arbre est soumis à de fortes contraintes. Même dans les meilleures conditions, les effets de turbulence due à la tour ne peuvent jamais être éliminés complètement. Il est alors avantageux, en dépit d'un plus grand volume, d'une masse et de pertes plus importantes, d'utiliser un générateur ayant un glissement élevé. Les générateurs à six pôles ont un glissement bien supérieur aux machines à deux pôles. Les contraintes sur l'arbre sont alors moindres puisque la correspondance entre la vitesse de rotation du générateur et la vitesse de rotation à la sortie de la transmission est moins stricte, ce qui a pour effet de réduire les fluctuations de la puissance.



**Figure 2.1 : effet de lissage de l'augmentation du glissement des machines asynchrones**

Le couple développé et le glissement des machines asynchrones dépendent des composants de fuites et ohmiques des enroulements du rotor. Pour les machines à rotor bobiné, ceux-ci peuvent être modifiés en utilisant des résistances supplémentaires en série. On obtient donc un contrôle dynamique du glissement.

Les harmoniques de courant statorique et rotorique des machines asynchrones n'ont d'importance qu'au démarrage et peuvent être négligées dans les conditions de génération normales.

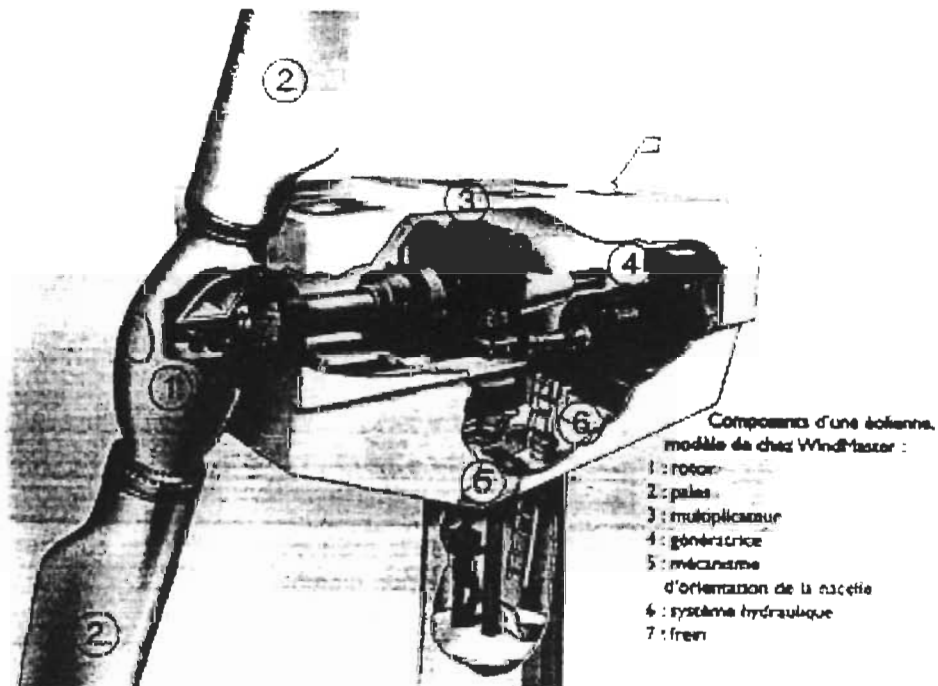
### **2.3.2 Machines synchrones**

Les machines synchrones sont plus chères et demandent plus d'entretien que les machines asynchrones. Toutefois, pour une même puissance, si celle-ci est imposante, elles occupent moins d'espace. Elles requièrent également la présence d'un moteur leur permettant d'atteindre la vitesse de synchronisme. Elles sont donc surtout utilisées pour la gamme d'éolienne s'approchant des mégawatts et au-delà.

Pour la production d'électricité, on utilise généralement des turbogénérateurs. Cependant, pour obtenir la fréquence désirée à partir de la relativement faible vitesse de rotation des éoliennes, il faut utiliser plus de pôles qu'il n'est possible d'en faire dans un turbogénérateur. On utilise donc des machines à pôles saillants.

De par leur nature, les machines synchrones permettent de contrôler la puissance réactive, ce qui peut être un avantage intéressant. Elles peuvent être reliées au réseau soit par un convertisseur de fréquence, soit par un lien à courant continu. Les essais réalisés avec une connexion directe n'ont pas donné de résultats intéressants. En effet, la connexion est si rigide que les moindres variations de vitesse du vent se traduisent par de fortes contraintes sur les arbres et en de brusques variations de la puissance produite. Deux choix s'offrent pour la transmission des courants d'excitation à la machine synchrone.

On favorise généralement la transmission, sans brosses, par l'entrefer de l'excitatrice. La régulation de la tension doit donc se faire via les enroulements, ce qui entraîne un délai d'environ 100 ms. Une régulation beaucoup plus rapide, d'environ 20 ms, peut être effectuée en utilisant des brosses glissant sur des anneaux. Toutefois, le gain en caractéristiques dynamiques s'effectue au dépit de plus grandes pertes par frottement et de coûts d'entretien largement majorés.



**Figure 2.2: composantes d'une éolienne**

## **2.4 Conclusion**

Bien qu'il existe de nombreuses sortes d'éoliennes, seules les éoliennes à axe horizontal de type « éolienne rapide » sont vouées à un avenir pour la production d'énergie électrique à grande échelle. Les recherches effectuées par l'aéronautique dans le domaine de l'aérodynamique et les systèmes de régulation automatique des pâles pour obtenir une vitesse de rotation des pales à peu près constante quelle que soit la vitesse du vent supérieure à la vitesse de démarrage principalement ont permis d'accroître considérablement le rendement des éoliennes à tel point que l'on atteint aujourd'hui des rendements approchant les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc de dépasser le fameux 59 % défini par Betz.

## Chapitre 3

# Étude de l'électrolyseur

### 3.1 Introduction

Il existe plusieurs types d'électrolyseurs. Les électrolyseurs à électrolyte solide peuvent faire l'électrolyse soit d'eau liquide ou de vapeur selon leur température d'opération. Les électrolyseurs à haute température (jusqu' à 1000 °C) sont les plus efficaces (jusqu'à 93%) [24]. Ils sont utilisés surtout pour des productions à grande échelle puisqu'ils utilisent l'énergie électrique et thermique à la fois. On trouve aussi les électrolyseurs dits conventionnels qui ont un électrolyte alcalin en solution aqueuse. Ces électrolyseurs utilisent une technologie très bien connue, assez ancienne et relativement moins chère comparativement aux autres types d'électrolyseurs cités précédemment. Ils sont très utilisés à cause de leur basse température d'opération (<100°C).

## **3.2 Objectifs**

L'objectif principal est de caractériser un électrolyseur de 5 kW en vue de son intégration dans le système à énergie renouvelable. Pour cela nous avons tracé des objectifs spécifiques afin de déterminer ses performances dans le but d'une meilleure exploitation:

1. Tracer la courbe de polarisation des cellules de l'électrolyseur
2. Mesurer la pureté de l'hydrogène produit par les cellules :
  - Pureté à 25% du courant nominal
  - Pureté à 50% du courant nominal
  - Pureté au courant nominal
3. Mesurer la tension, le courant et le débit (avec et sans compresseur) des cellules de l'électrolyseur.
4. Calculer l'efficacité en puissance des cellules et de l'électrolyseur (section 1.4.4.2).

## **3.3 Expérimentation**

### **3.3.1 L'électrolyseur alcalin de Stuart Energy**

L'expérimentation se fait à partir d'un prototype d'électrolyseur alcalin de la compagnie Stuart Energy (voir annexe A). Cet électrolyseur produit jusqu'à 1 m<sup>3</sup> standard d'hydrogène par heure qu'il comprime à 100 psi. La puissance électrique maximale consommée est 5.5 kW.

L'appareil utilise la technologie de pile de cellules d'électrolyse CST de Stuart. Il y a 24 cellules différentes connectées électriquement en série pour une tension nominale de 48 volts continu. Les en-têtes communs rassemblent les gaz d'utilisation, l'hydrogène et l'oxygène, des différentes cellules. Lorsque les cellules sont alimentées en électricité, des bulles d'hydrogène se forment à la surface de la cathode et des bulles d'oxygène se forment à l'anode. Une membrane poreuse empêche l'hydrogène et l'oxygène de se mélanger dans les cellules (**Voir annexe A**).

L'oxygène va directement au côté oxygène du joint d'eau, il passe ensuite par un antibrouillard pour éliminer les gouttelettes d'eau et puis à l'atmosphère. L'hydrogène va au côté hydrogène du joint d'eau et est bouillonné à travers un antibrouillard qui retire les gouttelettes d'eau en suspension, qui sont chargées d'électrolyte KOH, puis il s'accumule dans un réservoir tampon. Le joint d'eau sert à équilibrer les pressions d'hydrogène et d'oxygène sur les cellules, ce qui améliore les performances énergétiques et la pureté des gaz produits (d'après le guide d'utilisation fourni par la compagnie Stuart Energy). Le réservoir temporaire emmagasine temporairement le gaz d'hydrogène prêt pour le compactage.

L'appareil inclut, en plus des cellules d'électrolyse, l'ensemble des équipements nécessaires à la régulation, au contrôle thermique, à la sécurité, à la purification de l'hydrogène et à sa compression.

Le réservoir tampon peut recevoir un volume variable d'hydrogène avec une pression interne variable. Cette pression est nécessaire pour pousser l'hydrogène vers le



compresseur. Le réservoir tampon est doté de deux détecteurs de niveaux LSL2 et LSH1 qui contrôlent le compresseur d'hydrogène : le compresseur démarre quand le niveau dans le joint d'eau atteint LSH1 et il arrête quand le niveau dans le joint d'eau descend à LSL2.

Le compresseur situé à la sortie du réservoir tampon (après l'antibrouillard) comprime l'hydrogène à une pression de 7 bars (compresseur à un seul niveau). Il fonctionne de façon intermittente et comprime à débit fixe. Il est refroidi à l'air, lubrifié à l'huile et consomme approximativement 0.5 kW lorsqu'il est en marche.

Après la compression, l'hydrogène passe à travers une série de filtres destinés à éliminer les impuretés qu'il contient. Un premier filtre coalescent retire d'abord l'humidité, les gouttelettes et la vapeur d'huile (venant du compresseur). Ensuite, l'hydrogène passe par un épurateur catalytique où l'oxygène gazeux est éliminé à moins de 2 ppmv. L'hydrogène passe par un deuxième filtre qui élimine les impuretés et l'humidité (condensé). Il est ensuite asséché jusqu'à un point de condensation de  $(-40\text{ }^{\circ}\text{C})$  en traversant une cartouche dessiccateur. Enfin, l'hydrogène est emmagasiné dans un réservoir situé à l'extérieur de la bâtisse. Le réservoir extérieur fabriqué par East Fabricators a un volume interne de  $3.8\text{ m}^3$ . Il peut donc recevoir  $26.6\text{ m}^3$  standards d'hydrogène comprimé à 7 bars. Un capteur de pression indique la pression du réservoir.

La sécurité est un facteur très important dans l'exploitation d'un gaz inflammable, surtout si celui-ci est emmagasiné à haute pression. Pour cela, un détecteur de fuite d'hydrogène

est installé dans l'électrolyseur. Si une fuite d'hydrogène s'y produit, l'électrolyseur arrête automatiquement dès que 2% d'hydrogène est détecté (le seuil d'inflammabilité est de 4 %). Des détecteurs d'hydrogène situés au plafond du laboratoire déclenchent l'ouverture de trappes d'évacuation et interrompent l'alimentation en électricité du laboratoire.

### **3.3.2 Alarmes et diagnostics**

L'électrolyseur est muni d'un système de contrôle nommé Scadapack qui peut mesurer jusqu'à 8 entrées analogiques. Ces dernières sont utilisées pour le processus de contrôle et peuvent être affichées à l'aide du logiciel Telecomm fourni avec l'électrolyseur. Ces entrées sont : la tension du bus CC, la tension de la batterie (alimentant le système de contrôle), le courant à l'entrée des cellules, la température des cellules, la pression à la sortie des cellules et le pourcentage d'hydrogène dans l'air.

Les indicateurs d'alarmes du logiciel Telecomm sont verts quand il n'y a aucun signal d'alarme et ils deviennent rouges dans le cas contraire. L'électrolyseur s'arrête automatiquement s'il y a un signal d'alarme.

Pour plus d'information sur les séquences de démarrage de l'électrolyseur voir annexe A.

### 3.4 Résultats

#### 3.4.1 Courbe de polarisation

Nous avons effectué plusieurs mesures afin de déterminer la courbe de tension en fonction du courant de l'électrolyseur appelé courbe de polarisation. La figure (3.1) montre cette courbe à deux températures différentes 23 °C et 55 °C.

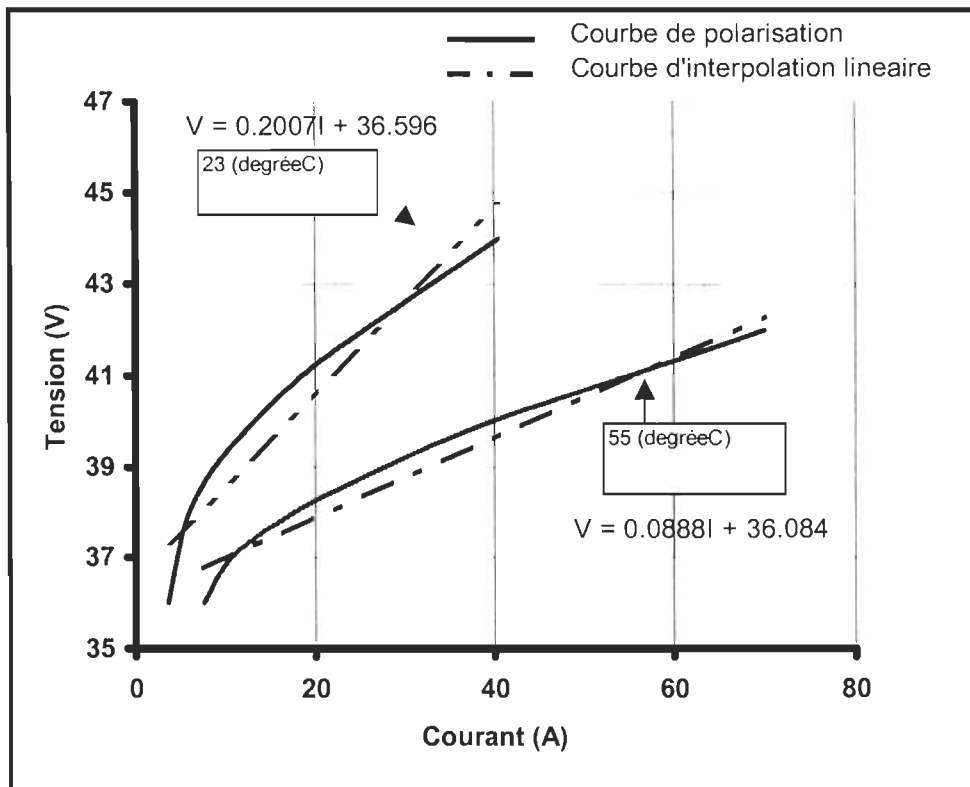


Figure 3.1 : courbe de polarisation

Afin de déterminer le comportement de l'électrolyseur une analyse de la figure (3.1) a été effectuée. Cette courbe nous donne une idée sur la résistance ohmique des cellules de

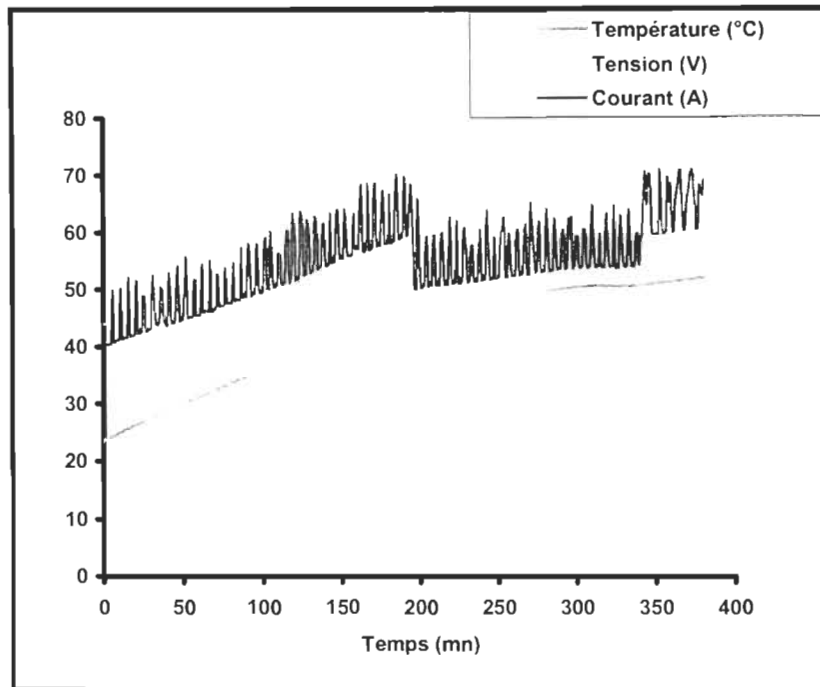


Figure 3.2 : courant ,tension et température de l'électrolyseur

### 3.4.3 Mesure de l'efficacité des cellules

Afin de calculer l'efficacité, on mesure la puissance à l'entrée et le débit d'hydrogène produit. Les trois efficacités  $\eta_e$ ,  $\eta_t$  et  $\eta_p$  sont présentées dans la figure (3.3).

On observe que l'efficacité en tension décroît de 85% à 75% à mesure que le courant augmente. L'efficacité en courant est faible (environ 70%) pour des courants faibles et augmente progressivement jusqu'à 93% pour un courant supérieur à 70 A. Ceci s'explique par le fait qu'il y a une grande fuite de courants parasites le long des tuyaux de gaz et dans l'électrolyte pour les courants faibles. Cette fuite devient négligeable pour des courants forts. L'efficacité globale des cellules atteint son maximum qui est de 70 % pour

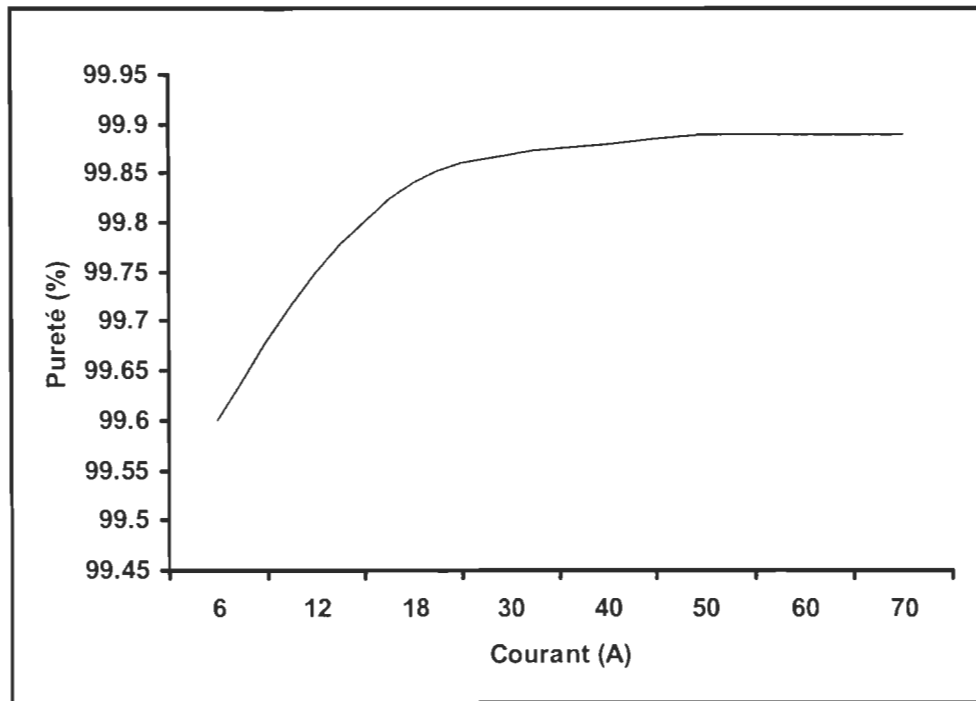


Figure 3.4: la pureté d'hydrogène en pourcentage

### 3.5 Conclusion

Les cellules de l'électrolyseur alcalin que nous avons opéré ont une efficacité électrique de 65% à faible courant, et une efficacité de 70% à des courant forts (de l'ordre de 70 A et plus). L'efficacité de courant des cellules qui est le rapport entre le courant fourni et le volume de l'hydrogène produit est de 92% à des courants de 70 A et plus. Elle diminue à 70% pour des courants faibles. La température des cellules joue un rôle très important puisque au cours du temps, pour une tension fixe, la température augmente ainsi le courant absorbé augmente et par conséquent l'efficacité aussi.

La pureté de l'hydrogène produit varie entre 99.6% pour courants faibles et 99.91% pour des courants de 50A et plus.

Pour calculer l'efficacité totale de l'électrolyseur il faut prendre en compte la puissance absorbée par le système de contrôle de l'électrolyseur ainsi que le système de compression qui est de 0.55 kW. Pour des courants supérieurs à 70A l'efficacité totale de l'électrolyseur est de 65%.

## Chapitre 4

# Dévolteur à commande multiphasée

### 4.1 Introduction

Dans un système à énergies renouvelables, la gestion de l'énergie est un paramètre très important à cause des fluctuations du bus CC entraînent des perturbations importantes au niveau de la puissance absorbée par les cellules de l'électrolyseur. Donc, il faut contrôler et asservir efficacement le courant. Pour ce, on peut avoir recours aux montages classiques des convertisseurs de puissance. Cependant, les montages classiques de convertisseur génèrent un courant haute fréquence (HF) non désirable dans ce genre d'application. Pour minimiser les inconvénients de ces convertisseurs, des filtres L-C sont conçus en amont et en aval du circuit commuté. Lorsque de fortes puissances sont mises en jeu, il s'ensuit des courants de courtes durées dont l'intensité peut parfois atteindre des valeurs beaucoup plus grandes que le courant moyen prévu [36]. Les éléments constitutifs

de pareils filtres sont généralement encombrant et coûteux que l'inductance de découplage (ceci est dû aux fortes puissances mises en jeu). Augmenter la fréquence de commutation n'est pas une solution idéale car les pertes par commutation augmentent proportionnellement. Grâce à l'introduction des composants micro-programmés dans les cartes de commande de circuits de puissance, la technique de commutation multiphasée des interrupteurs de commande (CMI) s'avère être un compromis raisonnable pour améliorer la qualité de courant des convertisseurs à découpage modernes. De plus cette technique procure aux composants une certaine flexibilité de commande car aucune synchronisation externe n'est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement du montage [22,37].

## **4.2 La technique multiphasée**

Pour contrôler efficacement la production d'hydrogène, un dévolteur a été conçu pour asservir le courant. En effet, c'est un abaisseur de tension à courant continu dont le rôle principal est de contrôler le flux d'énergie du bus CC vers l'électrolyseur. Ainsi avec la commande numérique multiphasée on peut gérer le flux d'énergie.

La technique multiphasée consiste à utiliser plusieurs unités fonctionnelles mises en parallèle pour obtenir la puissance désirée [20,22,37]. Elles sont toutes identiques et commutent à la même fréquence, avec le même rapport cyclique. Une unité fonctionnelle est constituée d'une inductance  $L$ , d'une diode  $D$ , d'un interrupteur commandé  $Q$ . Chaque unité est identifiable par un numéro spécifiant l'ordre de début de commutation. Ainsi, la cellule  $i$  commute ( $Q_i$  fermé) avant la cellule  $i+1$ . Les signaux de commande des interrupteurs statiques sont déphasés de façon équidistante. Un circuit à  $N$  unités en



parallèle aura un déphasage de  $2\pi/N$  rad entre deux cellules consécutives. Ceci correspond à un retard de  $T/N$  ( $T$  étant la période de commutation) entre les débuts de fermeture de deux cellules successives.

#### **4.2.1 Dévolteur à une cellule**

Le dévolteur (ou le hacheur série) commande le débit d'un générateur de tension dans un récepteur de courant.

On l'appelle hacheur série (BUCK converter), car le semi-conducteur commandé est en série entre l'entrée et la sortie, ou dévolteur (STEP DOWN converter), car la tension de sortie a une valeur moyenne inférieure ou égale à la tension d'entrée.

#### **Hypothèses**

Nous supposons que :

- La tension de sortie est suffisamment bien filtrée pour pouvoir être considérée comme une tension continue, malgré la présence d'une légère ondulation résiduelle à haute fréquence;
- La tension d'alimentation à l'entrée est parfaitement continue et constante;
- Les interrupteurs ( semi-conducteurs ) sont idéaux;
- L'interrupteur est fermé durant  $T_{on}$  et ouvert durant  $T_{off}$ ;
- La période de commutation est  $T$ ;
- L'inductance de filtrage est suffisamment élevée pour assurer une conduction continue;

### 2.1.1 Principe

Il s'agit de convertisseurs dans lesquels l'inductance se trouve du côté sortie. Le convertisseur comporte un interrupteur  $Q$  commandé à l'amorçage et au blocage (MOSFET) et un interrupteur  $D$  à blocage et amorçage spontané (diode) figure 4.1.

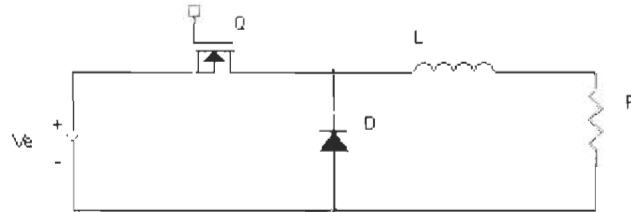


Figure 4.1 : dévolteur à une unité

Pendant le temps  $T_{on}$ , temps de conduction de  $Q$ , la source  $V_e$  (ou  $V_{in}$ ) alimente l'inductance et la charge, figure 4.2 .

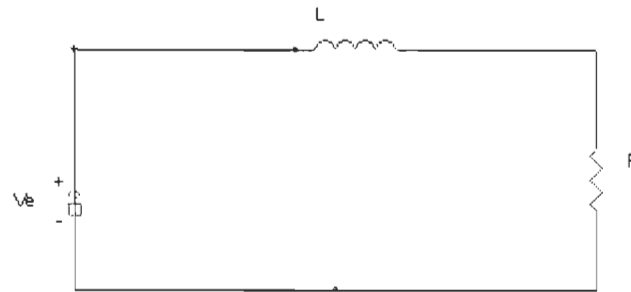


Figure 4.2 : schéma du dévolteur pendant la fermeture de l'interrupteur statique

Au bout du temps  $T_{off}$ , on bloque  $Q$  et c'est alors la diode  $D$  qui conduit le courant.

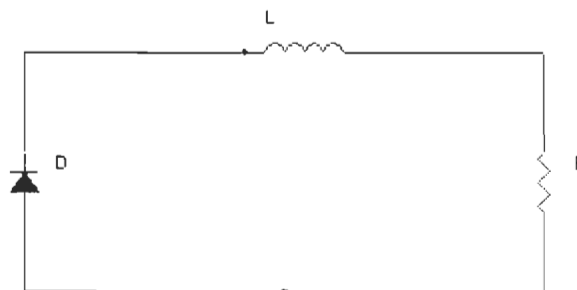


Figure 4.3 : schéma du dévolteur pendant l'ouverture de l'interrupteur statique

L'élément Q est conducteur pendant le temps  $T_{on}$ , durant cette séquence, puisque la tension aux bornes de la charge est constante et égale à  $V_{out}$ , la tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (4.1)$$

Au blocage de Q, la diode devient conductrice et on a :

$$V_{in} = -V_{out} \quad (4.2)$$

### Calcul de $V_{out}$

On sait que la tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle, ce qui s'écrit ici :

$$\frac{1}{T} \int_{T_0}^T V_L dt = 0 \quad (4.3)$$

soit

$$\int_{T_0}^{T_1} (V_{in} - V_{out}) dt + \int_{T_1}^{T_2} (-V_{out}) dt = 0$$

alors

$$(V_{in} - V_{out}) \cdot (T_1 - T_0) = V_{out} \cdot (T_2 - T_1)$$

Donc

$$V_{in} [T_1 - T_0] = V_{out} [T_2 - T_0] = V_{out} \cdot T$$

Alors

$$V_{out} = \frac{T_l - T_0}{T} V_{in} \quad (4.4)$$

Soit

$$V_{out} = \alpha V_{in} \quad (4.5)$$

Avec

$$\alpha = \frac{T_l - T_0}{T} \text{ ( rapport cyclique )} \quad (4.6)$$

puisque  $\alpha < 1$ , on a  $V_{out} < V_{in}$  d'où le nom de montage dévolteur.

#### 4.2.1.3 Formules du courant

Durant la séquence de conduction de Q on a :

$$L \frac{di_c(t)}{dt} + Ri_c(t) = V_{in} \quad (4.7)$$

La solution de cette équation différentielle nous donne :

$$i_c(t) = i_{min} e^{-\left(\frac{t-T_0}{\tau}\right)} + \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\left(\frac{t-T_0}{\tau}\right)}\right) \quad (4.8)$$

Avec  $\tau = \frac{L}{R}$  la constante de temps

Et  $i = i_{min(j)}$  à  $t = T_0$

Et

$$B = e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)} \quad (4.15)$$

Alors on peut écrire que:

$$i_{\min(j+1)} = A + B.i_{\min(j)} \quad (4.16)$$

Pour  $j = 1$  ( le premier cycle),  $i_{\min(j)} = 0$ , donc

$$i_{\min(1)} = 0$$

$$i_{\min(2)} = A$$

$$i_{\min(3)} = A.(1 + B)$$

$$i_{\min(4)} = A.(1 + B + B^2)$$

•

•

•

$$i_{\min(j+1)} = A.(1 + B + B^2 + \dots + B^{j-1})$$

Ce qui nous donne

$$i_{\min(j+1)} = A.\left(\frac{1 - B^j}{1 - B}\right) \quad (4.17)$$

En remplaçant A et B par leurs valeurs :

$$i_{min(j+1)} = \frac{V_{in}}{R} \left( \frac{e^{-\frac{T-T_l}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) (1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \quad (4.18)$$

Quand  $n$  tend vers l'infini  $e^{-jT/\tau} \ll 1$  ceci nous donne la valeur répétitive du courant  $i_{min}$  :

$$I_{min} = \frac{V_{in}}{R} \left( \frac{e^{-\frac{T-T_l}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \quad (4.19)$$

Et par la suite

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{R} \left( \frac{1 - e^{-\frac{T_l-T_0}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \quad (4.20)$$

Le moment  $T_2$  où le courant de décharge  $i_d(t)$  atteint  $i_{min}$  est calculé de la façon suivante :

$$i_d(T_2) = I_{min}$$

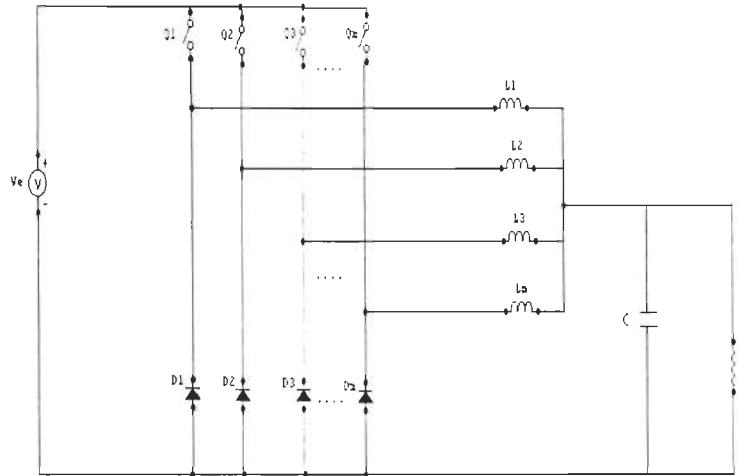
$$T_2 = T_l - \tau \ln \left( \frac{I_{min}}{I_{max}} \right) \quad (4.21)$$

Avec

$$T_l = T_0 + \alpha T$$

#### 4.2.2 Dévolteur à N unités

Soit un dévolteur avec N unités identiques  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_N$  voir figure 4.4.



**Figure 4.4 : dévolteur à commande multiphasée**

À partir de l'analyse faite pour une unité, les équations peuvent être généralisées à la commutation multiphasée. Toutefois la description des signaux de courants de chaque unité ne peut être complète qu'à l'intérieur de la première période. Nous allons procéder à une analyse en régime permanent.

Soit  $n$ , le numéro de l'unité dans la topologie du circuit à commande multiphasée:

Soient  $i_{c,n}(t)$  et  $i_{d,n}(t)$  les courants dans l'inductance  $L$  de l'unité  $n$ , respectivement pour la phase de charge et de décharge.

On a

$$T_{0,n} - T_{0,n-1} = \frac{T}{N} \quad (4.22)$$

$$T_{\theta,n} = (n - l) \frac{T}{N} \quad (4.23)$$

$$T_{l,n} = T_{\theta,n} - \alpha T \Rightarrow T_{l,n} = (n - l) \frac{T}{N} + \alpha T \quad (4.24)$$

Durant la séquence de chargement:

$$(n - l) \frac{T}{N} < t < (n - l) \frac{T}{N} + \alpha T$$

$$i_{c,n}(t) = I_{min} e^{-\left(\frac{t - (n-l)\frac{T}{N}}{\tau}\right)} + \frac{V_{in}}{R} \left(1 - e^{-\left(\frac{t - (n-l)\frac{T}{N}}{\tau}\right)}\right) \quad (4.25)$$

Durant la séquence de déchargement :

$$(n - l) \frac{T}{N} + \alpha T < t < T_{2,n}$$

$$i_{d,n}(t) = I_{max} e^{-\left(\frac{t - (n-l)\frac{T}{N} - \alpha T}{\tau}\right)} \quad (4.26)$$

Dans le cas où la décharge de l'inductance L se termine dans le cycle suivant :

Si  $\tau_{2,n} > \tau$  et  $\tau_{1,n} < \tau$  on a  $\tau_{p2,n} = \tau_{2,n} - \tau$ . Nous obtenons les équations suivantes :

$$0 < t < \tau_{p2,n} :$$



$$i_{d,n}(t) = I_{max} e^{-\left(\frac{t+T-(n-1)\frac{T}{N}-\alpha T}{\tau}\right)} \quad (4.27)$$

Décharge translatée de L

$T_{0,n} < t < T_{1,n}$  :

$$i_{c,n}(t) = I_{min} e^{-\left(\frac{t-T_0}{\tau}\right)} + \frac{V_{in}}{R} (1 - e^{-\left(\frac{t-T_0}{\tau}\right)}) \quad (4.28)$$

Charge normale de L

$T_{1,n} < t < T$

$$i_{d,n}(t) = I_{max} e^{-\left(\frac{t-(n-1)\frac{T}{N}-\alpha T}{\tau}\right)} \quad (4.29)$$

Décharge normale de L.

Dans le cas où la charge de L se termine dans le cycle suivant :

Si  $T_{1,n} > T$  on a  $T_{p1,n} = T_{1,n} - T$

$0 < t < T_{p1,n}$

$$i_{c,n}(t) = I_{min} e^{-\left(\frac{t+T-(n-1)\frac{T}{N}}{\tau}\right)} + \frac{V_{in}}{R} (1 - e^{-\left(\frac{t+T-(n-1)\frac{T}{N}}{\tau}\right)}) \quad (4.30)$$

Charge translatée de L.

$$T_{p1,n} < t < T_{p2,n}$$

$$i_{d,n}(t) = I_{max} e^{-\left(\frac{t-(n-1)\frac{T}{N}-\alpha T}{\tau}\right)} \quad (4.31)$$

Décharge normale de L.

$$T_{p2,n} < t < T$$

$$i_{c,n}(t) = I_{min} e^{-\left(\frac{t-(n-1)\frac{T}{N}}{\tau}\right)} + \frac{V_{in}}{R} (1 - e^{-\left(\frac{t-(n-1)\frac{T}{N}}{\tau}\right)}) \quad (4.32)$$

Charge normale de L.

#### 4.2.2.1 Courant dans la charge

Le courant dans la charge est la somme de tous les courants des unités:

$$i_s(t) = \sum_{n=1}^N i_{d,n}(t) \quad (4.33)$$

#### 4.2.2.2 Courant au primaire

Le courant au primaire est la somme de tous les courants des unités:

$$i_p(t) = \sum_{n=1}^N i_{c,n}(t) \quad (4.34)$$

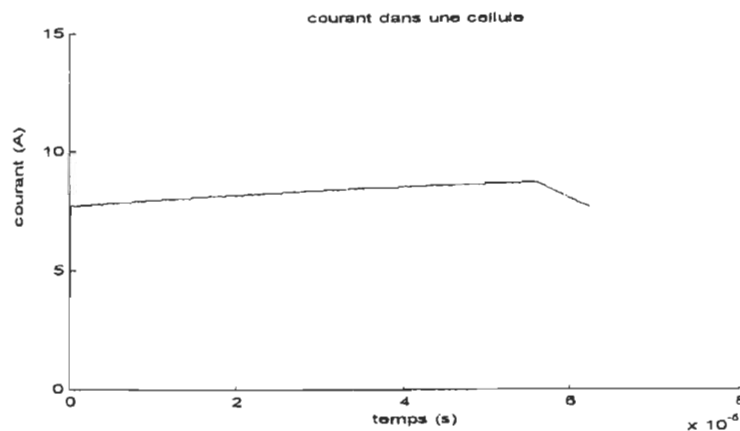
### 4.3 Simulation et expérimentation

Pour le dévolteur multiphasé, les conditions d'expérimentation sont similaires à celles utilisées pour la simulation (Voir les programmes Matlab en annexe B). Il est à noter que les équations descriptives des courants ne tiennent pas compte des filtres qui, en pratique, sont toujours utilisés afin de réduire fortement les taux d'ondulations. Les mesures prises sur le dévolteur réalisé à partir du concept de la commande multiphasée des interrupteurs statiques comportent des composantes dues aux différents éléments de filtrage.

#### Paramètres utilisés lors de la simulation

Tension au primaire : 50V ; inductance d'une cellule: 300  $\mu$ H; résistance 1.4 ohm ;

Les figures 4.5 et 4.6 représentent respectivement le courant simulé dans une cellule et le courant total du dévolteur multiphasé.



**Figure 4.5: courant simulé dans une unité pour le dévolteur multiphasé**

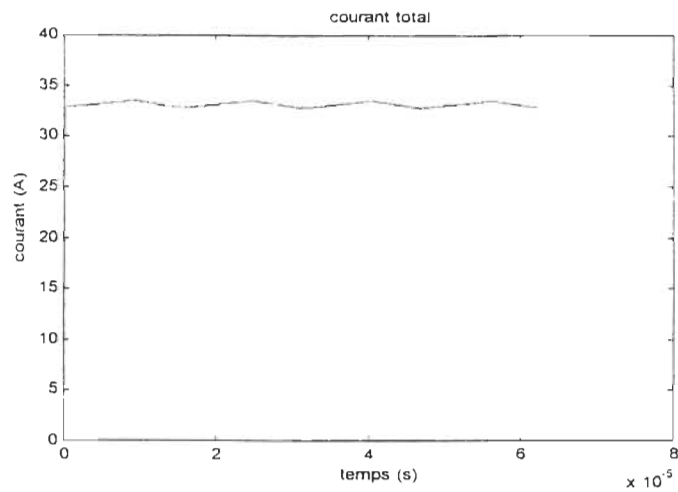


Figure 4.6 : courant total simulé pour le dévolteur multiphasé.

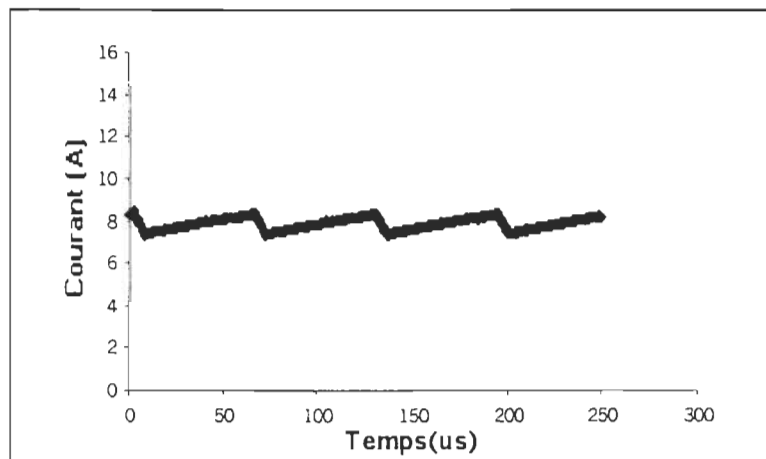
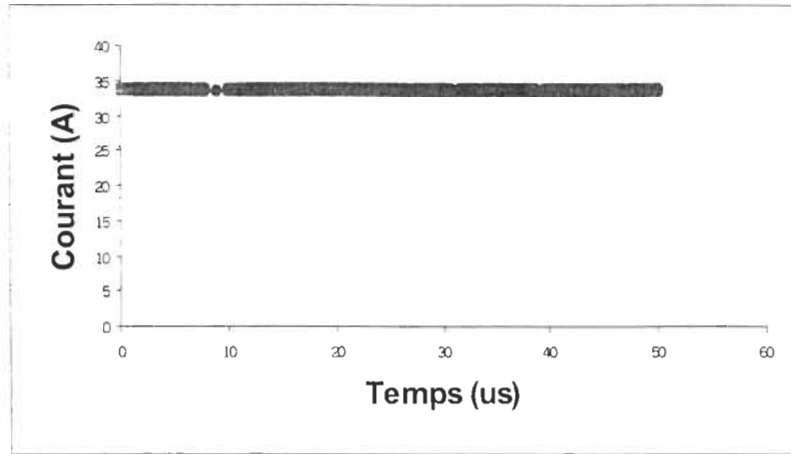


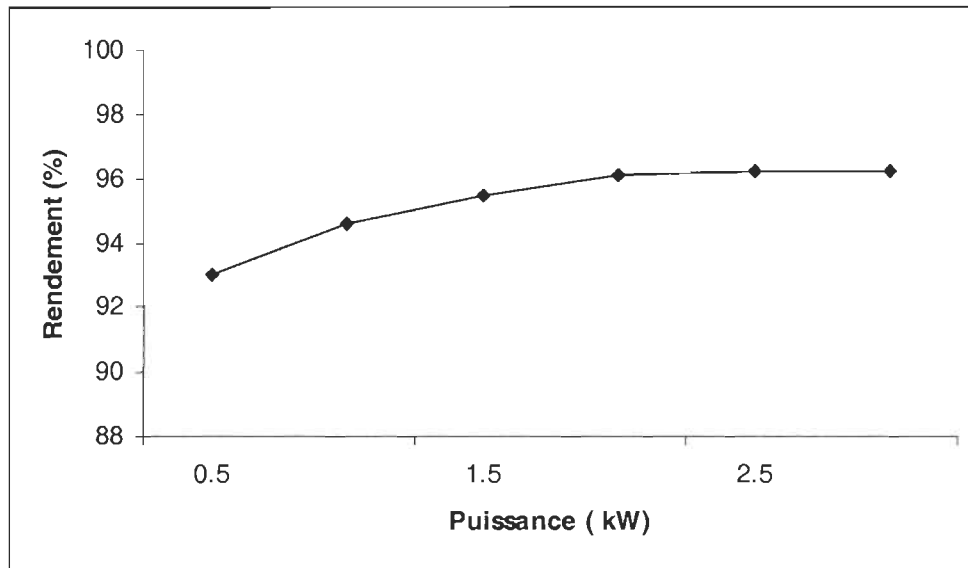
Figure 4.7 : courant mesuré dans une inductance du dévolteur à 4 unités.



**Figure 4.8 : courant total mesuré à la sortie du dévolteur à 4 unités.**

Les figures 4.7 et 4.8 représentent respectivement le courant mesuré dans une unité et le courant total du dévolteur multiphasé.

Lorsque nous comparons les figures 4.6 et 4.8, nous remarquons l'effet du filtrage utilisé en pratique. Le courant réel présente moins d'ondulation ce qui améliore sa qualité. L'effet du filtrage est marqué (ce qui introduit une certaine différence entre la simulation et la pratique) à cause de la fréquence réelle des signaux filtrés qui est 4 fois celle de la commutation. Les composants de filtrage sont par conséquent de faibles valeurs ce qui permet d'obtenir un gain supplémentaire au niveau de la réduction de l'encombrement.



**Figure 4.9 : rendement de puissance du dévolteur**

La figure 4.9 montre le rendement du dévolteur en fonction de la puissance. Nous observons que le rendement atteint son maximum pour des puissances de l'ordre de 2kW.

#### **4.4 La carte de commande**

##### **4.4.1 Technique de commande à l'aide d'une table précalculée**

La génération des signaux de commande des interrupteurs statiques requiert une attention particulière compte tenu de son impact direct sur l'ensemble du processus multiphasé. Mais la complexité apparente dans la séquence de commutation dépend de la technologie utilisée pour l'implanter. Nous proposons une approche entièrement numérique pour générer les signaux de commande.

Cette approche nécessite l'utilisation d'une EPROM dans laquelle les signaux de modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les délais sont stockés. Les adresses de la

mémoire sont sélectionnées par un compteur binaire et une interface numérique indépendante et asynchrone. De cette manière la mémoire est configurée sous forme matricielle. Chaque ligne représente un patron; les colonnes constituent les séquences de commutation des interrupteurs. L'architecture de l'ensemble de la commande est présentée sur la figure 4.10, a été implantée sur le dévolteur multiphasé.

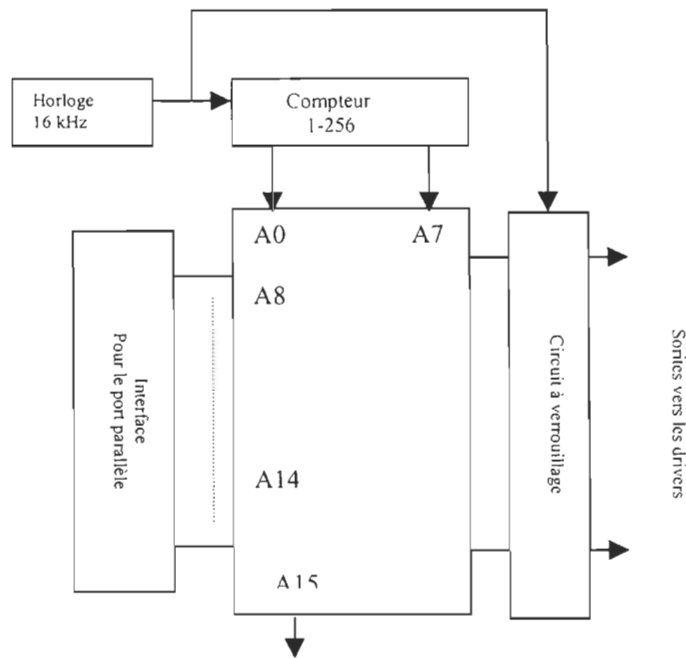
#### **4.4.2 Organisation de la mémoire**

La mémoire est organisée en patrons. Un patron est une séquence pré-programmée permettant de faire commuter les N unités du circuit pendant une période complète du signal commutation. Il est caractérisé par un rapport cyclique identique pour toutes les sorties utilisées. Les signaux de commande des unités sont déphasés les uns par rapport aux autres de  $T/N$ .

La partie haute de l'adresse (A8, A9,...,A14) est la première à être sélectionnée. Elle correspond au numéro du patron. À l'aide du compteur, la partie basse de l'adresse est continuellement balayée. Le bit A15 est utilisé pour activer les circuits pilotes des transistors de puissance. La fréquence de l'horloge est fixée de telle sorte qu'un cycle de comptage complet correspond à une période de commutation. Le circuit à verrouillage en sortie permet d'assurer une stabilité pendant les phases de changement d'adresses.

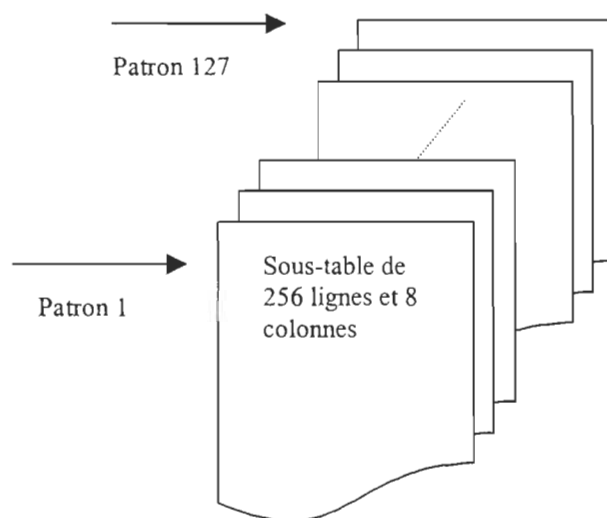
Les courants dans les unités sont fonction du rapport cyclique du signal de commande des interrupteurs, donc du MLI.

Le bus d'adresse de la mémoire comporte 16 bits dont 8 proviennent du compteur pour assurer le cycle de commande qui est de  $62.5 \mu s$  ( $f=16kHz$ ). Les équations descriptives présentées plus haut permettent de générer automatiquement les séquences des signaux de commandes.



**Figure 4.10 : architecture du circuit de commande pour les montages multiphasés**

Les 8 bits de poids fort sont sélectionnés grâce à un port parallèle implanté sur la carte de commande. Une unité externe utilise ce port pour sélectionner une adresse de patron. Cette stratégie permet de rendre le convertisseur versatile car n'importe quel appareil communiquant par le port parallèle pourrait être utilisé pour piloter le circuit multiphasé. L'organisation schématique de la mémoire est présentée sur la figure 4.11.



**Figure 4.11 : Organisation de la mémoire de l'EPROM**



## **4.5 Conclusion**

L'avantage principal de la technique multiphasée réside dans son aptitude à réduire considérablement le taux d'ondulation du courant. Et par conséquent, une réduction du contenu harmonique des signaux , ce qui minimise les effets de perturbation des circuits en amont du dévolteur.

La technique numérique de commande comporte plusieurs avantages: la taille réduite des composants diminue l'encombrement; la précision de calcul du contenu de chaque patron permet de faire un asservissement d'ensemble à pas fins, ce qui simplifie énormément la conception des algorithmes de régulation.

Avec le dévolteur à commande multiphasée et la technique de commande via une EPROM nous avons pu contrôler le courant de l'électrolyseur d'une manière flexible et efficace.

## Chapitre 5

# Intégration et performance du système

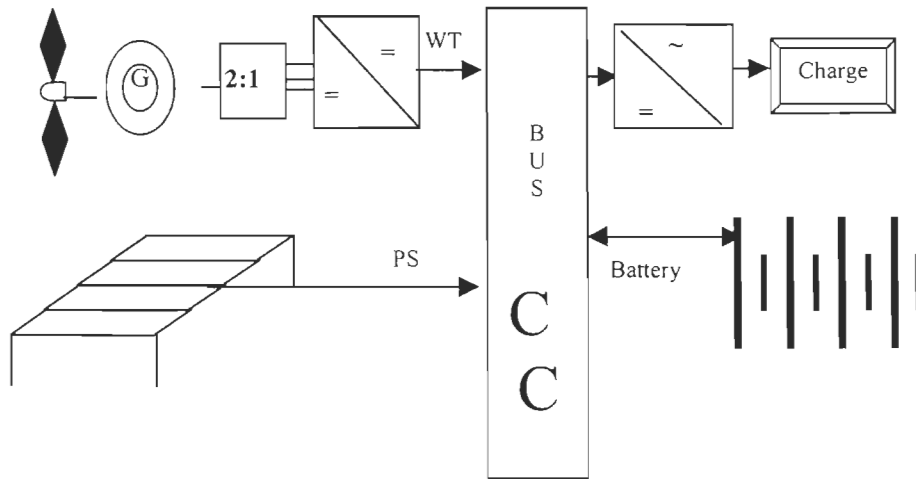
### 5.1 Introduction

Ce chapitre portera sur la description du module d'énergie renouvelable qui contient une éolienne, des panneaux solaires, un bus CC et des batteries. Aussi nous allons exposer les résultats et les performances du module.

### 5.2 Description du module d'énergie renouvelable

L'éolienne de 10kW et les panneaux solaires sont connectés à un banc de 40 batteries à décharge profonde (Trojan 24 EV deep discharge 6-volt Lead-acid) composé de 5 rangées en parallèle, chaque rangée est constituée de 8 batteries branchées en série, ce qui

impose une tension de 48 volts au niveau du bus CC, voir figure(5.1). La capacité de chaque batterie est d'un taux de charge de 220 Ah.



**Figure 5.1 : éolienne-panneaux solaires-batteries**

L'éolienne en question est une BWC EXCEL de la compagnie Bergey Windpower Co. Elle a des pales de 7 mètres de longueur avec un alternateur constitué d'un rotor à aimant permanent à 38 pôles.

L'éolienne commence à fournir de la puissance pour une vitesse de vent d'un minimum de 3.4 m/s et atteint sa puissance de sortie maximum qui est à peu près de 7.5 kW (quand les batteries sont utilisées) pour des vitesses de vent de l'ordre de 13m/s. À une vitesse de vent de 13m/s l'éolienne commence à freiner et elle s'arrête complètement pour des vitesses de l'ordre de 16 m/s.

Un transformateur abaisseur triphasé (2 :1) de 30 kVA est utilisé pour réduire la tension de sortie du générateur.

Ensuite, la tension est redressée via un pont redresseur mixte. Voir figure5.2.

Le système de contrôle de tension (VCS) est utilisé pour protéger les batteries contre les conditions de surtensions. Quand la tension des batteries atteint la tension pré-réglée de 56V le VCS limite le courant du bus CC, ceci permet d'éviter une surcharge des batteries.

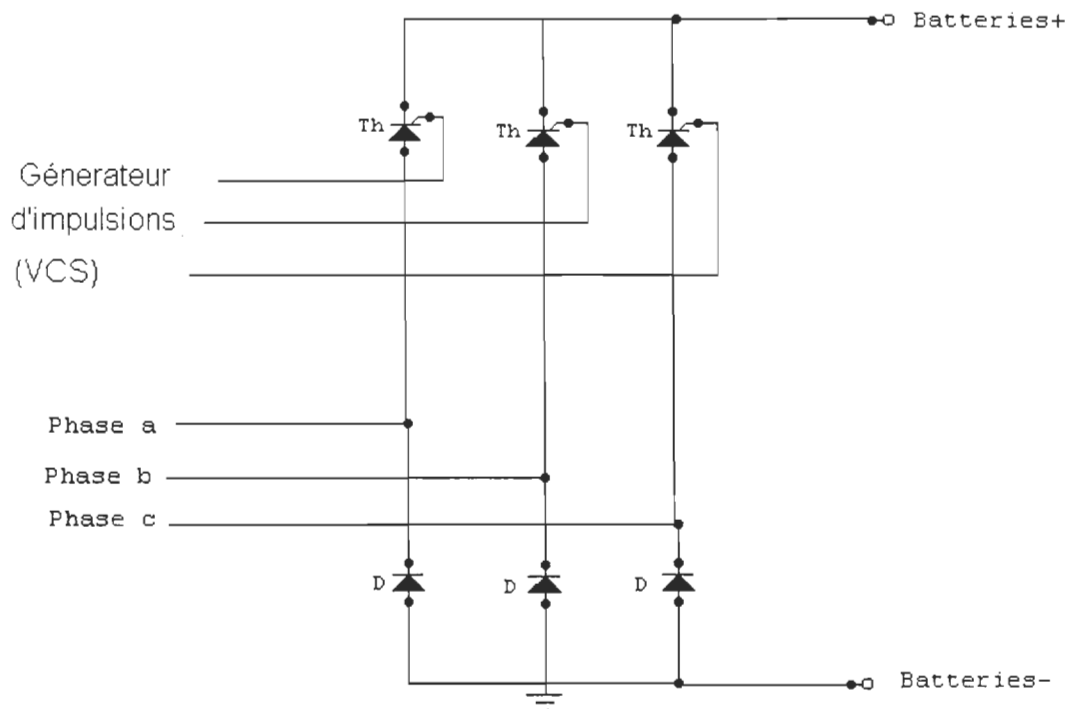


Figure 5.2 : redresseur mixte

Afin de pouvoir mesurer la puissance fournie par l'éolienne et les panneaux solaires, nous avons installé 4 capteurs : un capteur de courant phase , et un capteur de tension de phase dans le cas de l'éolienne. Pour les panneaux solaires des capteurs de courant et de tension sont également installés. Une idée sur la façon avec laquelle les capteurs ont été installés est présentée en annexe C.

Chaque capteur est muni d'un conditionneur qui ramène la grandeur captée par le capteur en une tension analogique 0-5V.

L'acquisition de ces quatre grandeurs se fait par la carte d'acquisition PCI-6024 série E de National Instruments. Un programme que nous avons développé en BridgeVIEW nous permet de lire les tensions analogiques provenant des transducteurs et de faire une reconstitution des grandeurs mesurées également. Les codes sources ainsi que les explications associées sont à l'annexe D.

Pour valider les résultats du système de mesures de la puissance de l'éolienne développé à l'IRH, une comparaison des résultats mesurés et simulés est nécessaire. La puissance simulée fournie par l'éolienne est déterminée en utilisant les fichiers de données du vent mesurées et la courbe de puissance en fonction du vent fournie par le constructeur.

La modélisation d'une éolienne peut être effectuée à partir de sa courbe de puissance [38]. Cette courbe traduit la relation entre la moyenne de la vitesse du vent et la moyenne de la puissance fournie par l'éolienne ( $P=f(V)$ ). La puissance moyenne  $P$  disponible à la sortie de l'éolienne peut être calculée par interpolation à partir de la courbe de puissance par la formule suivante[38] :

$$P = (P_{i+1} - P_i) \left[ \frac{(V - V_i)}{(V_{i+1} - V_i)} \right] + P_i \quad (5.11)$$

Où  $V$  est la vitesse du vent à l'entrée.  $(V_i, P_i)$  et  $(V_{i+1}, P_{i+1})$  sont les points les plus proches de  $(V, P)$  sur la courbe de puissance tel que  $V_i < V < V_{i+1}$ .

La figure 5.3 montre la puissance mesurée et simulée fournie par l'éolienne en fonction des vitesses du vent mesurées. Nous pouvons juger que la courbe mesurée et la courbe simulée sont équivalentes.

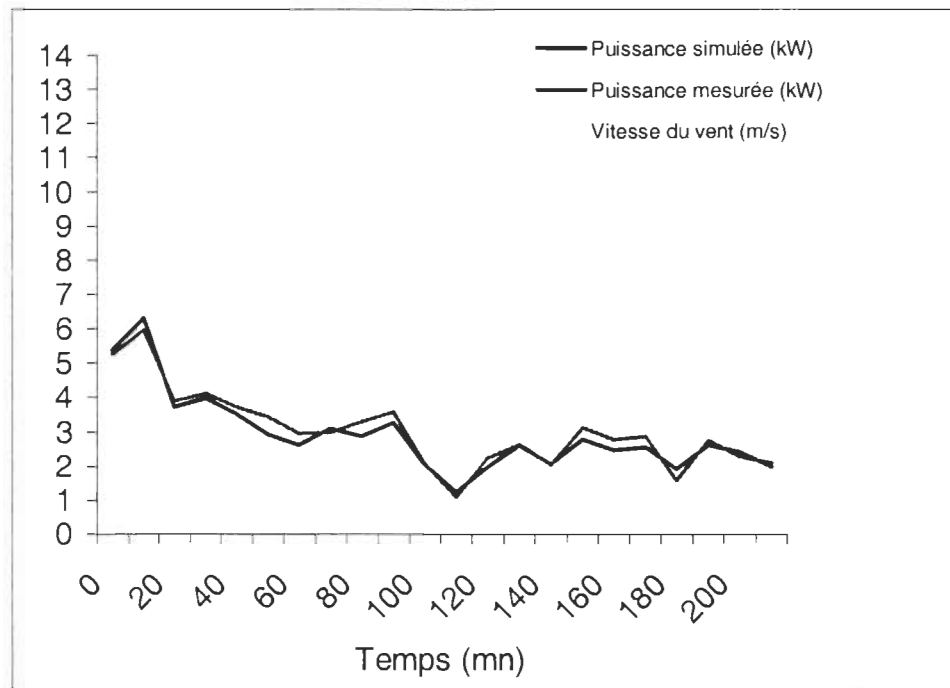


Figure 5.3: puissance de l'éolienne mesurée et simulée en fonction de la vitesse du vent

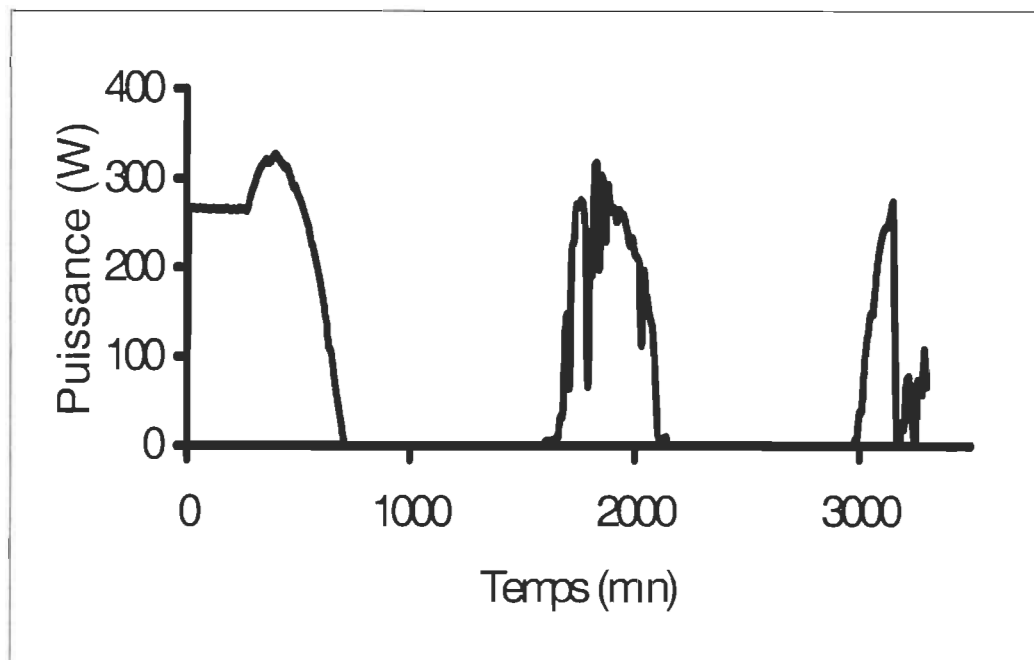
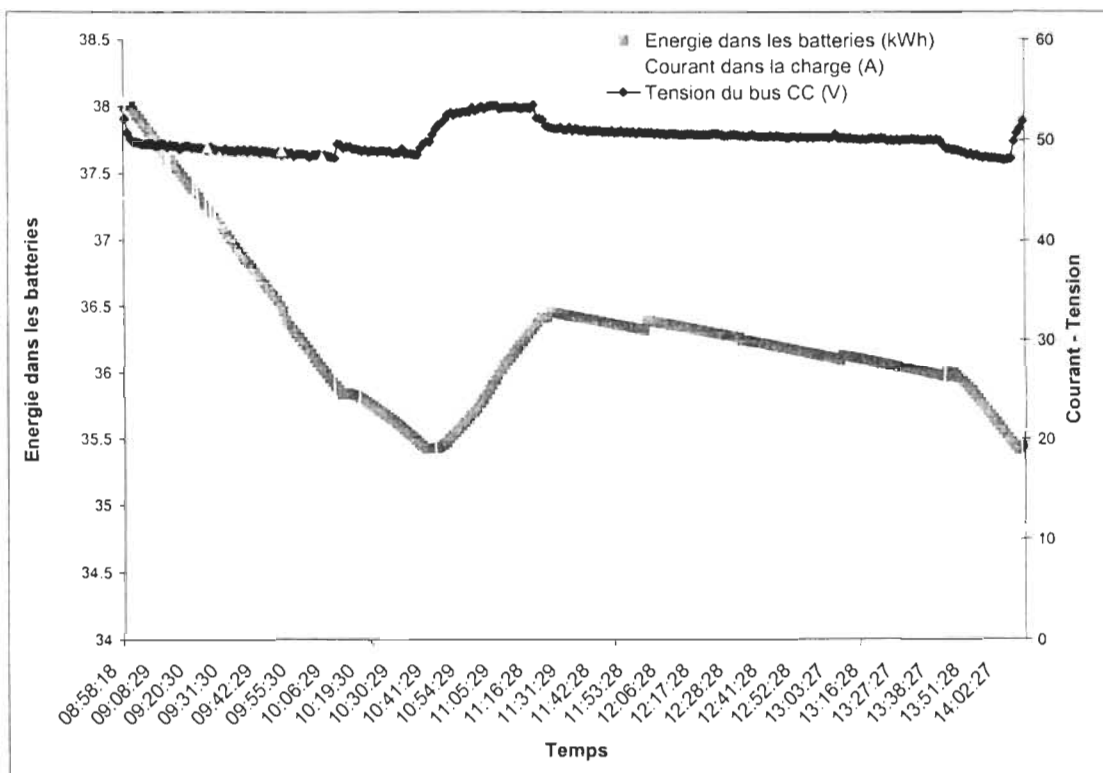


Figure 5.4 : puissance mesurée des panneaux solaires

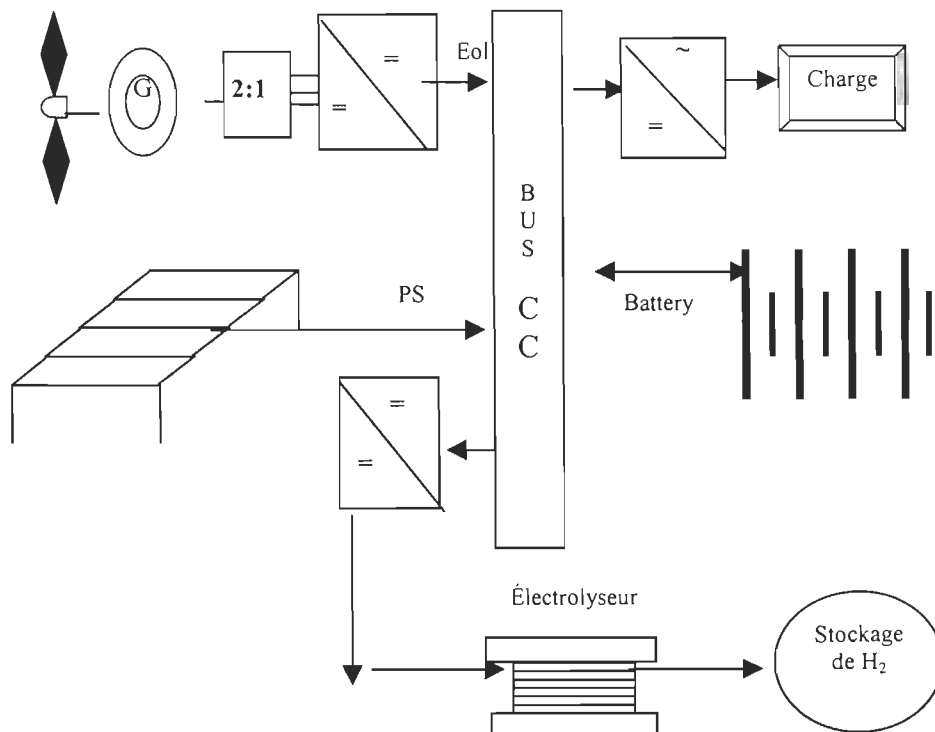
La figure 5.4 montre la puissance mesurée des panneaux solaires.

La figure 5.5 montre l'évolution de la quantité d'énergie du bus CC suivant la variation de l'énergie absorbée par la charge et de la tension du bus CC. L'énergie initiale dans les batteries est de 38 kWh, la tension initiale du bus CC est 51 V, la charge est de type CA variable (on utilise un onduleur pour la transformation CC/CA).



**Figure 5.5 : Évolution de la quantité d'énergie du bus CC suivant la variation de la charge**

Bien sûr notre objectif principal c'est d'intégrer tout un système afin de pouvoir répondre à la demande de la charge et d'emmagasiner l'excès d'énergie sous forme d'hydrogène. Compte tenu des études montrées aux chapitres 3 et 4, et vue la nécessité de stocker efficacement l'excédent d'énergie, la figure 5.1 du système prend la forme de la figure 5.6 :



**Figure 5.6 : configuration finale du module de production et de stockage d'hydrogène**



## 5.3 Asservissement du dévolteur

### 5.3.1 Description et objectif de l'asservissement

Afin de pouvoir contrôler le courant envoyé vers l'électrolyseur nous avons mis un dévolteur à commande multiphasée entre ce dernier est le bus CC. Le principe de fonctionnement du dévolteur ainsi que la carte de génération des séquences des interrupteurs statiques ont été donnés dans le chapitre 4.

L'asservissement autour du dévolteur à commande multiphasée suit la connectivité suivante:

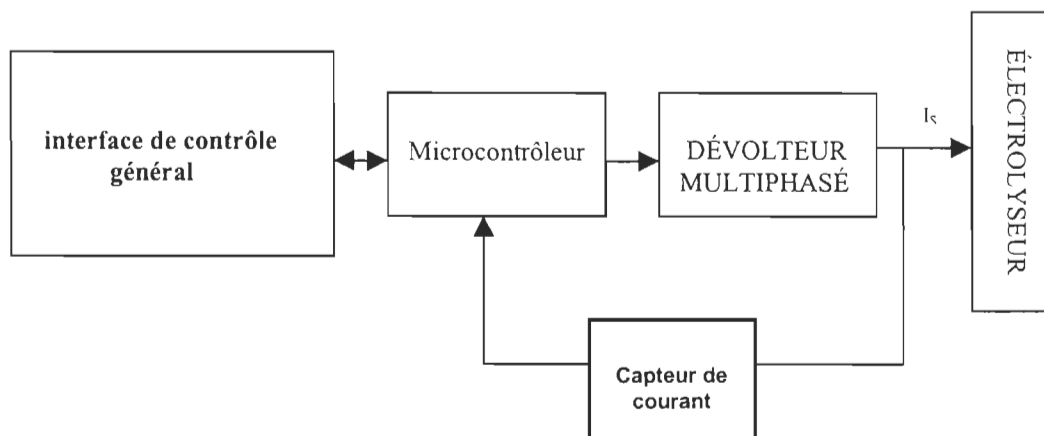


Figure 5.7 : Boucle d'asservissement courant

Vu que notre objectif est de contrôler et de stocker efficacement la quantité d'énergie excédentaire, le courant de sortie du dévolteur est asservi. L'interface de contrôle envoie une consigne de courant. En réalité, c'est un numéro de patron qui est envoyé via son port parallèle. Ce patron correspond à la valeur du courant désiré à la sortie du dévolteur. La charge du dévolteur (l'électrolyseur) se comporte comme une résistance variable. L'objectif de la commande est de contrôler le courant pour qu'il suive la consigne à

l'intérieur des limites imposées par une erreur stationnaire qui peut être fixée. L'algorithme de contrôle est implanté sur une carte avec un microcontrôleur. Pour cela, une attention particulière est accordée à la simplicité d'implantation et aussi à l'efficacité de contrôle.

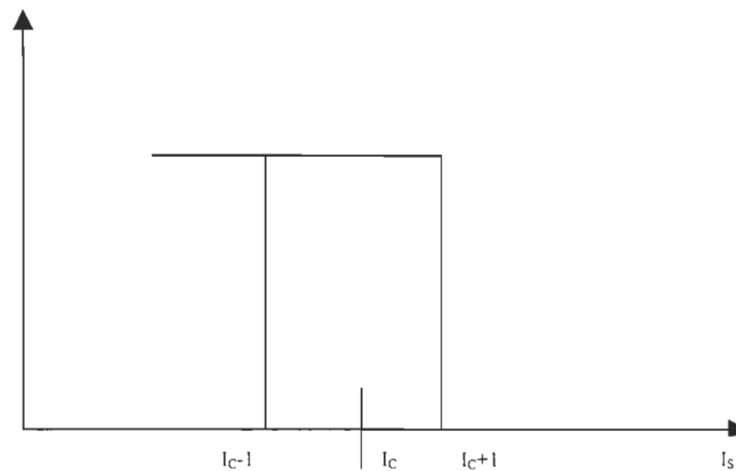
Le système de contrôle général sélectionne d'abord la puissance qu'il désire à la sortie du dévolteur, ensuite il achemine au microcontrôleur deux informations sous forme de tension analogique 0-5V. La première tension représente la puissance à absorber, et la deuxième représente la tension du bus CC. Le microcontrôleur utilise ces deux informations pour sélectionner le courant à appliquer. Une fois que  $I_C$  est sélectionné, il est converti en numéro de patron de consigne  $N_C$  puis appliqué via le port parallèle du dévolteur.

Le courant de retour est mesuré grâce à un capteur de courant fournissant des tensions allant de 0 à 5 VDC.  $I_S$  est converti par le microcontrôleur en courant avant d'être traité par l'algorithme d'asservissement. Le passage de la valeur de la tension lue sur le capteur au courant correspondant se fait grâce à une table de conversion stockée dans la mémoire du microcontrôleur. La tension 0-5 VDC du capteur est numérisée par le convertisseur analogique - numérique du microcontrôleur. Le résultat de la conversion est utilisé comme indice dans la table de conversion tension - courant.

### **5.3.3 Algorithme de contrôle**

Peu de recherches ont été faites pour trouver des méthodes efficaces de contrôle de l'énergie entre le bus CC et l'électrolyseur du bus CC. Comme nous avons vu dans les deux derniers chapitres plusieurs paramètres nous permettent de mettre au point ce contrôle, à savoir, celui du courant, de la tension et la température. Ce dernier paramètre

joue un rôle très important puisque au cours du temps, pour une tension fixe, la température augmente ainsi le courant absorbé augmente. Sauf que l'électrolyseur est muni d'un système de refroidissement automatique qui se met en marche à une température bien déterminée. Ainsi la température est contrôlée automatiquement. Nous avons choisi d'implanter l'algorithme basé sur la commande par hystérésis du courant. Autour d'un point d'opération quelconque, nous avons la situation suivante. Si le courant en sortie  $I_S$  est supérieur à  $I_C + \Delta I_C$  alors le microcontrôleur envoie un patron inférieur au patron initial sur le dévolteur via le port parallèle. Si par contre, le courant en sortie  $I_S$  est inférieur à  $I_C - \Delta I_C$  alors le microcontrôleur envoie un patron supérieur au patron initial sur le dévolteur via le port parallèle. Le processus se répète jusqu'à ce que  $I_S$  soit compris entre  $I_C - \Delta I_C$  et  $I_C + \Delta I_C$ .



**Figure 5.8 : Hystérésis autour d'un point de fonctionnement**

L'organigramme qui suit montre schématiquement comment la méthode d'hystérésis est appliquée, figure (5.9). Il inclut aussi tout l'aspect concernant la communication entre le microcontrôleur et le système de contrôle général. Toutes les routines de l'asservissement sont implantées dans le microcontrôleur (voir programmes en annexe E).

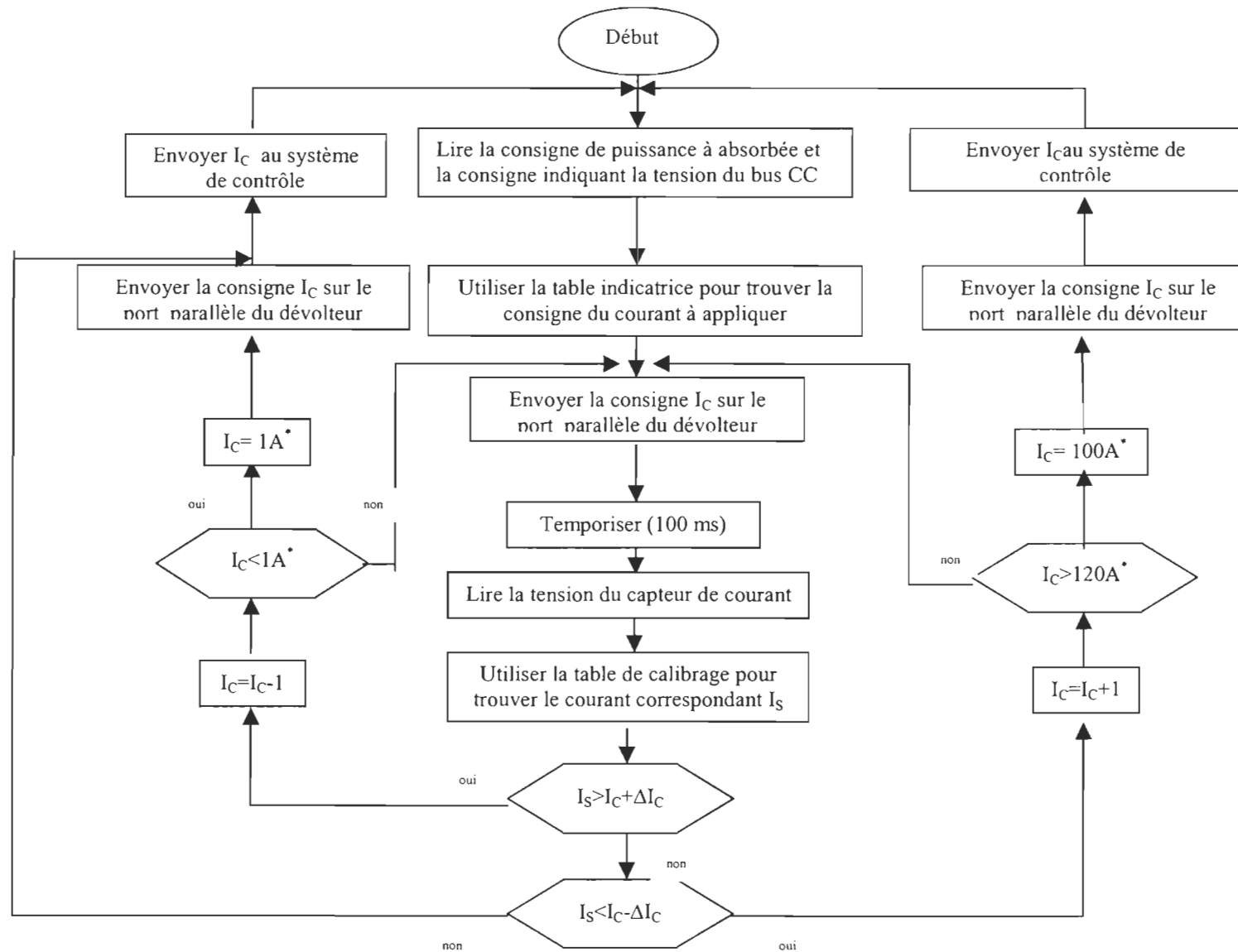


Figure 5.9 : Organigramme de l'asservissement

## **5.4 Stratégies de gestion d'énergie et rendement global du système**

Dans le but d'augmenter le rendement du système de production et de stockage d'énergie sous forme d'hydrogène, il faut opérer l'électrolyseur dans sa zone de fonctionnement optimale. Pour ce, deux tests ont été faits :

test 1: le système de contrôle met l'électrolyseur en marche lorsque les batteries sont chargées au maximum.

test 2: le système de contrôle démarre l'électrolyseur même si la tension du bus CC est faible (inférieure à 50 V), donc lorsque les batteries sont partiellement déchargées.

La figure 5.10 montre les résultats du premier test. Pour une tension de 54 V et une température de 23 °C. Le courant absorbé par l'électrolyseur est supérieur à 50 A dès la mise en marche. Nous pouvons déduire qu'à des fortes tensions, l'électrolyseur peut être dans sa zone optimale même à basse température.

La figure 5.11 montre les résultats du deuxième test. Nous observons que pour des tensions faibles du bus CC le courant de l'électrolyseur atteint 50 A (zone optimale) à une température de 45 °C, après une heure de fonctionnement. Ce qui veut dire que dans ce mode le système aura un rendement moins bon au démarrage pendant la première heure.

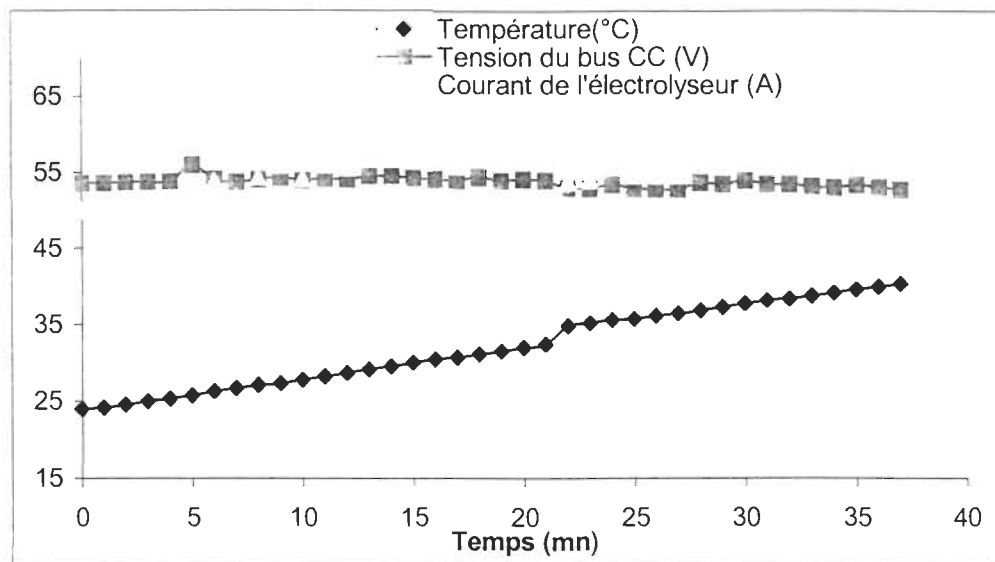


Figure 5.10 : résultats du test 1

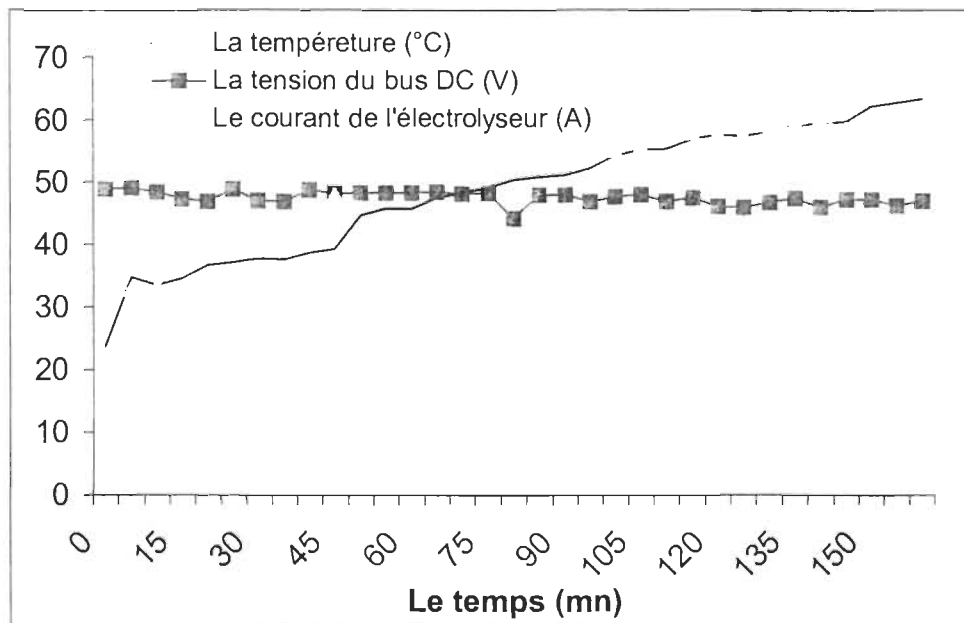


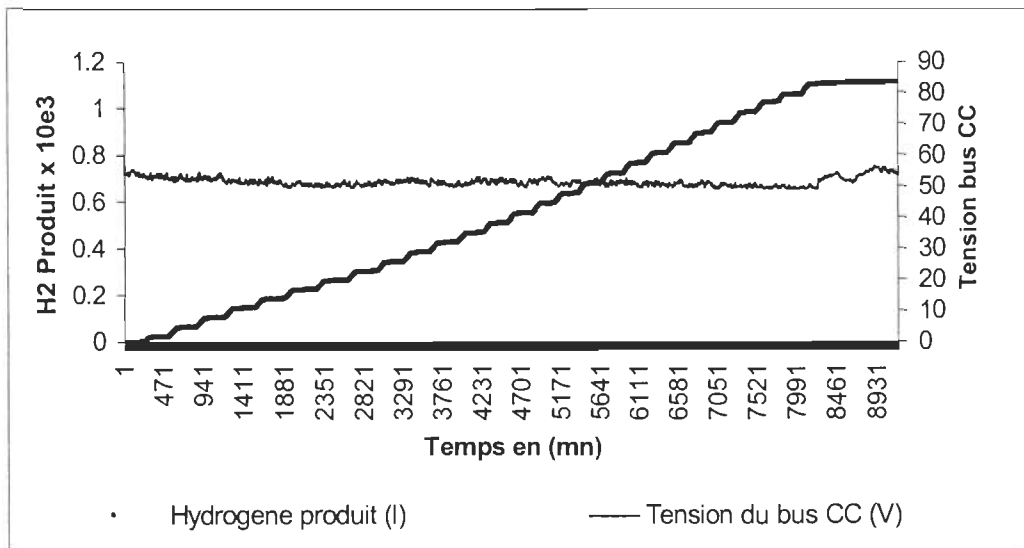
Figure 5.11 : résultats du test 2

Puissance	$P < 1\text{ kW}$	$1\text{ kW} < P < 2\text{ kW}$	$> 2.5\text{ kW}$
Rendement du dévolteur	~94 %	~ 95 %	~ 96 %
Rendement de l'électrolyseur (avec compresseur)	~60 %	~ 62 %	~ 65 %
Rendement global du système de stockage	~ 56.4 %	~ 58.9 %	~ 62.4 %

**Tableau 5.1 : Rendement global du système en fonction de la puissance**

Le rendement de l'ensemble des modules de production et de stockage en fonction de la puissance, est présenté au tableau 5.1. Nous observons que le rendement global du système est meilleur (~62.5%) pour des puissances élevées ( $> 2.5\text{ kW}$ ).

Les figures 5.12 et 5.13 montrent l'évolution du bus CC, la quantité d'hydrogène produite et la puissance fournie par l'éolienne. La forme de la courbe de quantité d'hydrogène produite est due au fait que l'hydrogène produit passe par un réservoir tampon. Une fois ce dernier plein, l'hydrogène est compressé vers le réservoir de stockage.



**Figure 5.12 : tension du bus CC, quantité d'hydrogène**

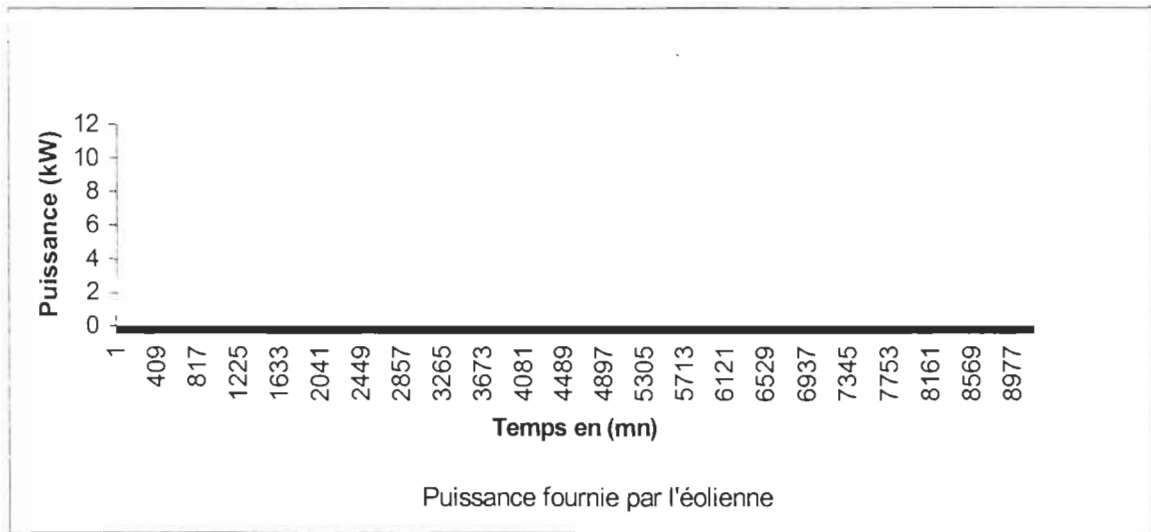


Figure 5.13 : puissance de l'éolienne

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une description détailler du module d'énergiesrenouvelables à savoir l'éolienne , les panneaux solaires, le bus CC et les batteries.

la puissance mesurée et simulée fournie par l'éolienne en fonction des vitesses du vent mesurées sont juger équivalentes.

Un dévolteur à commande multiphasée est mis entre ce dernier est le bus CC afin de pouvoir contrôler le courant envoyé vers l'électrolyseur. Le courant de sortie du dévolteur est asservi pour contrôler stocker efficacement la quantité d'énergie excédentaire.



## Chapitre 6

# Discussions et conclusions

Ce mémoire fait la synthèse de l'intégration et de la gestion d'un système autonome à énergie renouvelable basé sur la production et le stockage de l'hydrogène. L'ensemble du système est opérationnel.

L'étude de quelques composantes clés de ce système était utile pour pouvoir l'intégrer et évidemment pour une bonne gestion efficace et flexible de l'énergie.

Une étude bibliographique sur l'état de la recherche dans le domaine a été donnée. La majorité des projets dans le domaine sont encore à l'étape de développement et de démonstration. Plusieurs recherches sont principalement orientées vers l'utilisation des

panneaux solaires photovoltaïques comme source d'énergie renouvelable avec l'hydrogène comme alternative de stockage d'énergie et comme complément des systèmes autonomes d'énergies renouvelables. D'autres études ont montré l'intérêt de combiner les sources d'énergies renouvelables (éolienne / panneaux solaires). Ces recherches se limitent principalement au design, la taille, les coûts, la modélisation et à la simulation de l'évolution du système.

Une étude sur les différents types d'éoliennes a été faite. On distingue trois principaux paramètres de fonctionnement qui caractérisent une éolienne et notamment son efficacité. Ces paramètres de fonctionnement sont la vitesse du vent, le coefficient de performance et le coefficient du couple. La rentabilité d'une éolienne dépend beaucoup de ces paramètres et du site d'installation.

Les éoliennes étaient attractives car écologiques et autonomes, mais le prix de revient du kilowattheure était cher. Aujourd'hui, les progrès techniques font que l'énergie éolienne est de moins en moins coûteuse et presque aussi compétitive que l'énergie du réseau en prenant en compte le coût d'installation des lignes électriques. On assiste actuellement à de vastes programmes d'implantation d'énergie éolienne Amérique du Nord et en Europe. L'avenir de l'énergie renouvelable est donc prometteuse.

L'efficacité de l'électrolyseur a été décomposée en efficacité de courant et en efficacité de tension.

La tension de l'électrolyseur a un comportement tout à fait normal en fonction de la température et du courant. La variation de la résistance chimique est obtenue à partir de

la courbe de polarisation, et ceci permet d'estimer la puissance absorbée par l'électrolyseur sous différentes conditions d'opération. Il est cependant difficile de comparer la résistance interne à des données d'autres électrolyseurs vu que la compagnie Stuart Energy ne nous a pas fournie d'information sur la superficie des électrodes à l'intérieur des cellules.

L'efficacité totale de l'électrolyseur sans compresseur (65%) est faible comparativement à d'autres types d'électrolyseurs. La puissance nécessaire pour comprimer l'hydrogène est de 0,5kW, ceci diminue le rendement de l'électrolyseur de 5%.

Avec le dévolteur à commande multiphasée et la technique de commande via une table précalculée (EPROM), nous avons pu contrôler le courant de l'électrolyseur d'une manière flexible et efficace, et optimiser ainsi le transfert de puissance.

L'avantage principal de la technique de commande multiphasée réside dans son aptitude à réduire considérablement le taux d'ondulation du courant, et par conséquent, une réduction du contenu harmonique des signaux, qui minimise les effets de perturbation des circuits en amont du dévolteur.

La technique numérique de génération des signaux de commande utilisée comporte plusieurs avantages: la taille réduite des composants diminue l'encombrement, la précision de calcul du contenu de chaque patron permet de faire un asservissement

d'ensemble à pas fins, ce qui simplifie énormément la conception d'algorithmes de régulation.

Pour opérer l'électrolyseur dans sa zone de fonctionnement optimale, deux tests ont été faits. Pour des tensions faibles du bus CC le courant atteint 50 A (zone optimale) à une température de 45 °C, après une heure de fonctionnement. Pour une tension élevée du bus CC (54 V) et une température de 23 °C, le courant absorbé par l'électrolyseur est supérieure à 50 A dès la mise sous tension de l'électrolyseur, ce dernier est dans une zone de fonctionnement optimale dès la mise en marche. Ceci confirme le fait que la résistance interne de l'électrolyseur varie en fonction de la température. D'après ces résultats il est souhaitable que le système de gestion met l'électrolyseur en marche, quand la tension du bus CC est élevée (en d'autres termes quand il y a assez d'énergie).

Le rendement global du système de production et de stockage d'hydrogène (en incluant le rendement de l'interface de puissance) est de 56 % pour des puissances inférieures à 1 kW. Tandis qu'il est égal à 59 % pour des puissances comprises entre 1 et 2 kW. Pour des puissances supérieures à 2.5 kW le rendement est égal à 62.5 % (avec compresseur).

# Recommandations

L'introduction de la prédiction en utilisant les réseaux de neurones dans l'algorithme de gestion peut donner de très bons résultats au niveau de la gestion globale du système. Il sera fort intéressant de diviser le programme de prédiction et gestion du système à énergie renouvelable en cinq blocs. Un bloc de gestion maître, et quatre sous blocs.

Un premier sous bloc pourra être consacré à l'électrolyseur, un apprentissage des réseaux de neurones en ligne ou hors ligne peut être fait avec la quantité de données nécessaire des différents paramètres de l'électrolyseur qui seront mesurés et stockés. Ainsi ce sous bloc de gestion va pouvoir surveiller l'électrolyseur et prédire son évolution. Les résultats d'évolution doivent être communiqués au bloc de gestion maître.

De la même façon, un deuxième sous bloc de gestion s'occupera de la charge, un troisième sous bloc de la pile à combustible, enfin le dernier des sources d'énergies renouvelables (éolienne et panneaux solaires).

Une simulation avec Matlab-Simulink devra être faite avant d'envisager toute implantation pratique. Ensuite une étude économique pour évaluer et comparer le coût de revenu d'une installation d'un système à énergie renouvelable par rapport à d'autres systèmes utilisés pour les sites isolés (systèmes à diesel par exemple). D'après mes connaissances, il y a beaucoup de pays européens qui utilisent d'un manière rationnelle les ressources naturelles (sources renouvelables) pour produire leur énergie. La commercialisation des piles à combustibles devrait modifier considérablement le monde de l'énergie.

## Bibliographie

- [1]- <http://www.mygale.org/voutay/meteo/effetdes.html>
- [2]- <http://www.amisdelaterre.org/publications>
- [3]-H. Barthels, W.A.Brocke, K. Bonhoff, H.G.Groehn, g. Heuts, M. Lennartz, H. Mai,J. Mergel, L. Schmid, and P.Ritzenhoff: *PHOEBUS Jülich , An autonomus Energy Supply System Comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell*. Hydrogen Energy Progress XI, Vol: 2, 1996.
- [4]- *Éoliennes et aérogénérateurs*, guide de l'énergie éolienne. Guide Cuntty, 1979.
- [5]-S.R. Vosen, J.O Keller, *Hybrid energy storage systemes for stand-alone electric power systems: optimization of systems performance and cost through control strategies*, International journal of hydrogen Energy, volume 24, numéro 12 décembre (1999), p. 1139-1156.
- [6] M.I.Ibrahim, A.A.Elmallah, M.H. Badr, A.S.Hanfi: *Investigation of techno-economical performance of using hydrogen storage with integretd renewable energy systems* Hydrogen Energy, volume2, 1996, p. 1005-1015.
- [7] S.P.Cicconardi, E.Jnnelli et G.Spazzafumo: *Hydrogen energy storage: hydrogen and oxygen storage subsystems*, International journal of Hydrogen Energy, volume 22, Numéro 9, septembre 1997, p. 897-902.
- [8] K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin, F. Laurencelle, A. Anouar, J.-M. St-Arnaud and T. K. Bose: *Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications*, *Journal of Power Sources (Special Issue)* , 96 , p.168 – 172, June 2001
- [9] P.A.Lehman, C.E. Chamberlin, G.Pauletto et M.A. Rochelea: *Operating experience with a Photovoltaic- Hydrogen Energy System* Hydrogen Energy, volume 22, numéro 5, Mai 1997, p. 465-470.
- [10] P. Holmuller, J.M Joubert, B. Lachal et K. Yvon: *Evaluation of 5 kw photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland*, Hydrogen Wnergy progress XII, v. 1, 1998, p. 423-443.
- [11] S.Galli, *The solar-hydrogen SAPHYS project: operating results*. HEP,12,V1 (1998).
- [12] Pötter, R., Pruschek, R., Brocke, W.A., Barthels, H.: *Examination of the Design of the Energy Management for the PV Plant PHOEBUS Jülich by Dynamic Programming*, Hydrogen Energy Progress XI, Vol: 2, 1996.

- [13] Szyszka, A.: *Ten years of solar hydrogen demonstration project at Neunburg vorm Wald, Germany*, International Journal Of Hydrogen Energy, Vol: 23, Issue: 10, pp. 849-860, October 1998.
- [14] E. Lopez, F. Rosa, F. Izorna, A., Gonzalez Garcia-Conde: *Evaluation of a solar hydrogen system*, HEP/11/Vol2, 1996.
- [15] J. Ericsen.: *Devopement of data acquisition and control system for a small-scale PV-H<sub>2</sub>system first design phase*. HEP/12/Vol1, 1998.
- [16] R. Jacobson, R. Purcell, D.Wermers: *Renewable Hydrogen Systems Integration and Performance Modelling*, Proceedings of 2001 DOE hydrogen program review.
- [17] S. Galli, M. Stefanoni, K. Havre, P. Borg, W.A. Brocke, and J.Mergel: *SAPHYS: A joule 2 E.C. project for solar hydrogen*, HEP,11,Vol.1 (1996).
- [18] Kauranen, P.S., Lund, P.D., Vanhanen, J.P.: *Control of battery backed photovoltaic hydrogen production*, International Journal of Hydrogen Energy. Vol: 18 Iss: 5 p. 383-90, May 1993.
- [19] Eriksen, J.: *Developement of a Data Acquisition and Control System for Small-Scale PV-H<sub>2</sub> System, First Design Phase*, Hydrogen Energy Progress XII, Vol: 1, 1998.
- [20] *Power electronics principles*, Livre.
- [21] <http://www.IRF.com>
- [22] R. Simard, V. Rajagopalan, *An AC-DC converter with reduced electromagnetic interference*, Canadian Journal of Electrical and Computer engineering, vol. 19, N°3, 1994
- [23] Hug, W.; Bussmann, H.; Brinner, A. Intermittent operation and operation modeling of an alkaline electrolyzer. International Journal of Hydrogen Energy, Vol: 18 Iss: 12 p. 973-977, Dec. 1993.
- [24] F. Laurencelle : « *Étude d'un système d'énergie renouvelable à base d'hydrogène* », mémoire de maîtrise, à l'Université du Québec à Trois-Rivières (département de Physique), 2001.
- [25] Instruction Book for Hydrogen Gas Containerized Plant. The Electrolyser Corporation Ltd, January 1997.
- [26] Kauranen, P.S.; Lund, P.D., Vanhanen, J.P.: Development of a self-sufficient solar-hydrogen energy system. International Journal of Hydrogen Energy, Vol: 19 Iss: 1 p. 99-106, Jan. 1994.



- [27] Hollenberg, J.W.; Chen, E.N.; Lakeram, K.; Modroukas: D. Development of a photovoltaic energy conversion system with hydrogen energy storage. International Journal of Hydrogen Energy. Vol: 20 Iss: 3 p. 239-43, March 1995.
- [28] Vanhanen, J.P.; Lund, P.D.: Computational approaches for improving seasonal storage systems based on hydrogen technologies. International Journal of Hydrogen Energy. Vol: 20, Issue: 7, pp. 575-585, July 1995 Vol: 20 Iss: 3 p. 239-43, March 1995.
- [29] J. Vanhanen.: Mathematical modelling of an electrolyser. Rport TKK-F-C118.
- [30] S. Srinivasan, D. J. Manko, H. Koch, M. A. Enayetullah, A.J. Appleby: Recent advances in solid polymer electroolyte technology with low platinum loading electrodes. Journal of power sources, Vol. 29, 1990.
- [31] G. Schiller. R. Henne, P. Mohr, V. Peinecke.: Intermittently operated 10 kW alkaline water electrolyser of advanced technology. Hydrogen energy progress, pp. 819-825, 1996.
- [32] J. Divisek, B. Steffen, H. Schmitz.: Theorical analisis and evaluation of the operating data of bipolar water electrolyser. International Journal of Hydrogen Energy. Vol:19, pp.579-586, 1994.
- [33] G. Hartnell and L. Landberg: *Wind on the system, grid integretion of wind power*, Renewable energy world, Vol.3 No.2, mars-avril 2000.
- [34] A. Wagner, *Set for the 21<sup>st</sup> century: Germany's New Renewable Energy Law*, Renewable Energy world, vol.3 No.2, mars avril 2000.
- [35] S. Heier: *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [36] J.A.Gow, C.D. Maning: *controller arrangment for Boost converters systems sourced from solar photovoltaic arrays or other Maximum Power Sources*, IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 147. No. 1, 2000.
- [37] R. Simard, H. Le-Huy, A. Jacob, V. Rajagoblan and P. Le-Huy: *A digital PWM circuit for Three-Phase Inveter*, Proceeding IEEE-IAS, Atlanta, 1987.
- [38] Manwell J. F., Rogers A., Hayman G., Avelar C. T., McGowan: A hybrid system simulation model. Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts, November 2, 1998.

## Articles publiés

- [1] **A. Anouar**, K. Agbossou, T. K. Bose, " *Design and modeling of power interfaces for a renewable energy system based on Hydrogen*" (Poster), in Proc. 11<sup>th</sup> Canadian hydrogen conference, Victoria (BC) juin 17-20, 2001.
- [2] **A. Anouar**, K. Agbossou, T. K. Bose, " *Intégration d'un système hybride à énergie renouvelable à la production et au stockage d'hydrogène*", communication scientifique, 69<sup>ème</sup> conférence de l'ACFAS, Sherbrooke, mai 2001.
- [3] **A. Anouar**, K. Agbossou, T.K. Bose, " *Optimal hydrogen production in a stand alone renewable energy system* ", ( à soumettre)

# Annexes

# Annexe A

## Procédure pour le démarrage de l'électrolyseur

### *Pour le démarrage de l'électrolyseur*

- 1 - Inspection visuelle
- 2 - Ouvrir la valve du réservoir d'hydrogène
- 3 - Mettre la valve **V218** sur on
- 4 - Mettre la valve **V216** sur off
- 5 - Vérifier que la valve **V7** est fermé
- 6 - S'assurer que le courant demandé sera 0A (patron 127)
- 7 - Amorcer l'alimentation électrique **CB1**
- 8 - Amorcer le compresseur **CB2**
- 9 - Amorcer le système de ventilation **CB3**
- 10 - Mettre le bouton start / stop sur **start**
- 11 - Appliquer un patron supérieur à 127 sur le dévolteur

### *Pour l'arrêt de l'électrolyseur*

- 1- Attendre que le compresseur arrête s'il est en marche
- 2- Appliquer un patron 127 sur le dévolteur pour diminuer le courant à 0 A
- 3- Mettre le bouton start / stop sur **stop**
- 4 - Couper le disjoncteur **CB1**
- 5- Couper le disjoncteur **CB2**
- 6 - Couper le disjoncteur **CB3**
- 7 - Mettre la valve **V216 (avant la valve 218)** en position verticale

8 - Mettre la valve **V218** en position verticale

9- Fermer la valve du réservoir d'hydrogène

### **Procédure pour l'échantillonnage de l'hydrogène**

1 - Placer le Teledyne et un pècher d'eau près de la sortie d'échantillonnage H<sub>2</sub> (à la sortie des cellules c'est la valve 18)

2- Calibrer le Teledyne à l'air libre

3 - Brancher la sortie d'échantillonnage sur le Teledyne

4 - Placer le tube de sortie de gaz à la surface de l'eau du bûcher

5 - Mettre la sortie d'échantillonnage en mode commun

6 - Ajuster les échelles du Teledyne de plus en plus sensibles

7 - Attendre 15 à 20 mn

8 - Lire la concentration en % d'oxygène

9 - Déduire la concentration d'hydrogène ( $H_2\% = 100\% - O_2\%$ )

10 - Éteindre le Teledyne

11- Mettre la sortie d'échantillonnage en mode arrêt

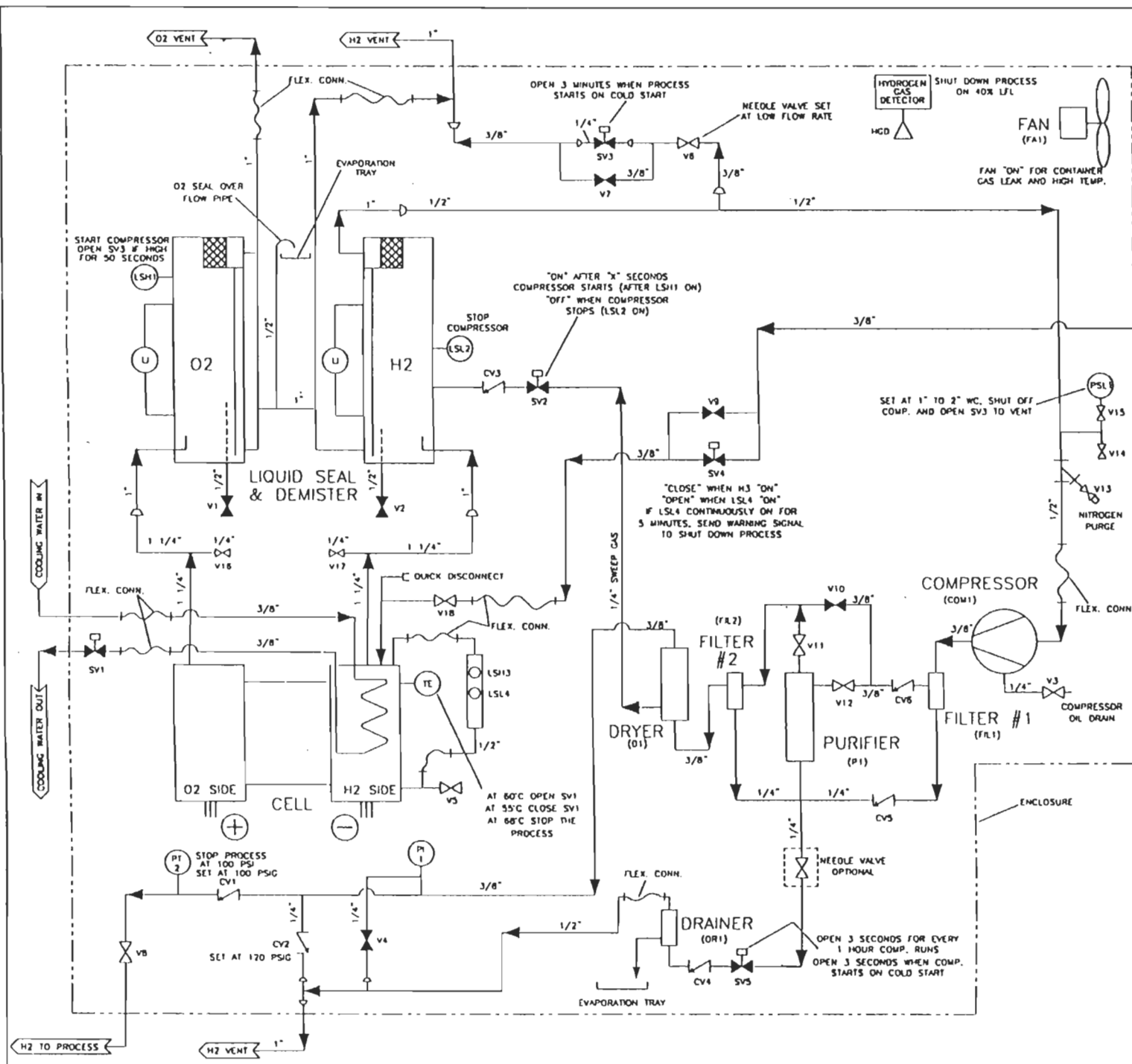
12 - Débrancher les boyaux et fermer la capsule du Teledyne

### **Important**

\* Dans la phase de démarrage augmenter les patrons lentement

\*\* Dans la phase d'arrêt, diminuer les patrons lentement

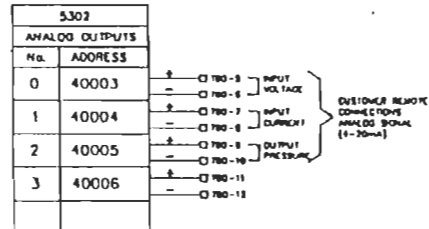
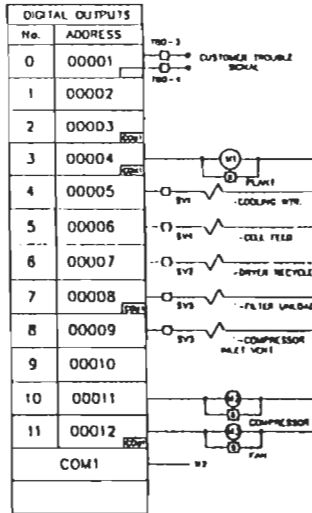
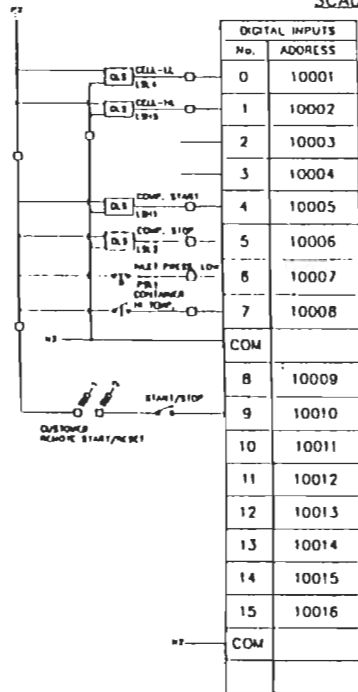
\*\*\* Ne jamais mettre V216 sur vers stockage et vers évent en même temps



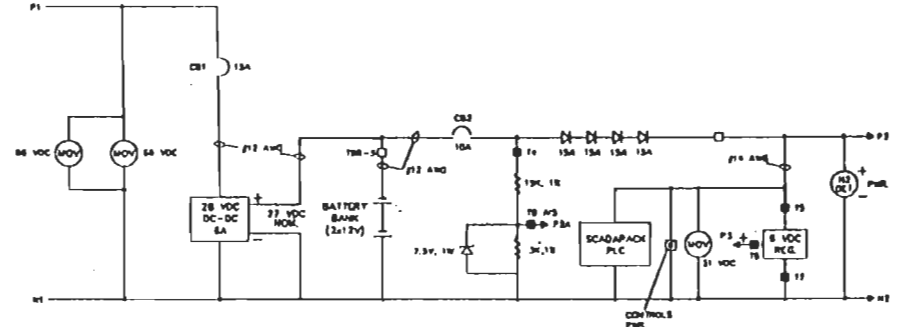
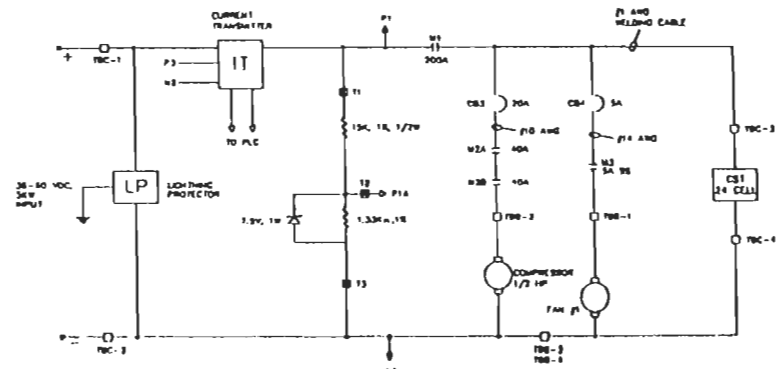
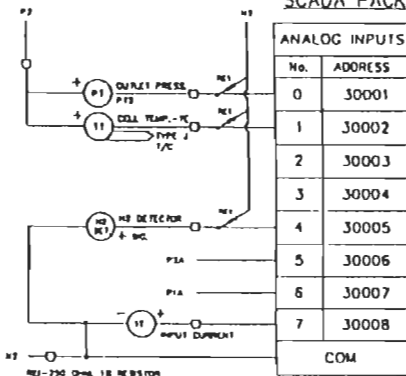
BILL OF MATERIAL	
ITEM	DESCRIPTION
V1	1/2"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) LANCE
V2	1/2"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) LANCE
V3	1/4"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V4	1/4"-150# S.S. BALL VALVE (SHAGELON)
V5	1/2"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) LANCE
V6	3/8"-150# S.S. INTEGRAL BOHMET NEEDLE VALVE (SHAGELON-WHITE-1R56)
V7	3/8"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V8	3/8"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V9	3/8"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) CFF
V10	3/8"-150# S.S. BALL VALVE (SHAGELON)
V11	3/8"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) CFF
V12	3/8"-150# S.S. BALL VALVE (SHAGELON)
V13	3/8"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V14	1/4"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V15	1/4"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V16	1/4"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V17	1/4"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) MED
V18	3/8"-150# S.S. BALL VALVE THRD. (FEMALE) CFF
CV1	3/8" S.S.-4CPM 50 CRACKING PRESS. CPA SERIES SHAGELON
CV2	1/4" S.S.-4CPM 50 CRACKING PRESS. CPA SERIES SHAGELON
CV3	1/4" S.S.-CHS4 1/3 CRACKING PRESS. CA SERIES SHAGELON
CV4	
CV5	
CV6	3/8" S.S.-CHS8 1/3 CRACKING PRESS. CH SERIES SHAGELON
SV1	3/8" SOLENOID VALVE, 24VDC, SS, MC, ASCO CAT. #826G228
SV2	1/4" SOLENOID VALVE, 24VDC, SS, MC, ASCO CAT. #826G286
SV3	1/4" SOLENOID VALVE, 24VDC, SS, MC, ASCO CAT. #826G328
SV4	3/8" SOLENOID VALVE, 24VDC, SS, MC, ASCO CAT. #826G228
SV5	1/4" SOLENOID VALVE, 24VDC, SS, MC, ASCO CAT. #826G286
FA1	MAJOR DC, BRUSHLESS DC TUBULAR FAN, VOLTAGE 48 VDC
COM1	EAGLE COMPRESSOR MODEL PSS0A
FL1	FILTER BY STUART (DWG. 2147-D-418) ELEMENT #100-12-UP80
FL2	BALSTON FILTER WOOL 3158-1/4
P1	CATALYTIC PURIFIER BY STUART (DWG. 8001-A-004)
D1	BALSTON DRYER WOOL
DR1	DRAINER BY STUART (DWG. )

8 WHT 3/16 REV DATE		CONSTRUCTION SET DESCRIPTION		HGT BY/REV
EXHIBIT/CONCEPT CXD		DRAWING/DETAIL ANF		FILE # NAME
CHECKED/REV'D CXD		APPROVED/REV'D W/S		FLOW DIAGRAM FOR MET CST UNIT
SCALE/SCHEDULE NONE		DATE APR. 11/00		IN REVIEW #/DATE H/TI
P.C.-REV 1/10/00 90010003		REVISED NUMBER 1/10/00 9001-D-003		SHEET 1 OF 0

# SCADA PACK CONTROLLER



## SCADA PACK



## LEGEND

- OLS - OPTICAL LEVEL SENSOR
- IT - CURRENT TRANSMITTER
- PT - PRESSURE TRANSMITTER
- TT - TEMPERATURE TRANSMITTER
- SV - SOLENOID VALVE
- - TERMINAL STRIP
- - CIRCUIT BOARD TERMINAL
- - CONTROL PANEL LAMP

## NOTES:

- ALL CONNECTION WIRE STRANDED, MINIMUM #18 AWG FOR PLC OUTPUTS, #18 AWG FOR PLC INPUTS, 2 #20 SHIELDED FOR ANALOG INPUTS.
- PROVIDE #6 AWG GROUND WIRE FROM UNIT FRAME LUG TO GROUND ROD.

REVISION		DESCRIPTION	
0	REV 0/00	SCADA PACK AS BUILT	REV 0/00
1	REV 1/00	SCADA PACK	REV 1/00

<b>STUART ENERGY SYSTEMS</b> <b>RENEWABLE HYDROGEN GENERATOR</b> <b>ELECTRICAL &amp; CONTROLS SCHEMATIC</b>	
<b>STUART ENERGY SYSTEMS</b> 127 The West Way Ipswich, Ontario, Canada M0C 1B8	<b>HYDROGEN RESEARCH INSTITUTE</b> RENEWABLE HYDROGEN GENERATOR ELECTRICAL & CONTROLS SCHEMATIC
DRAWN BY: AAF CHECKED BY: WJS DATE: FEB. 17/00	TITLE: HRI PROJECT NO.: 9001-D-001E



# Annexe B

```

%%%%%%%%%
%          Buck converter          %
%                                %
%%%%%%%%%

```

Menu du programme Matlab de modélisation du buck converter qui est intercalé entre les batteries et l'électrolyseur afin de contrôler le courant fournie a l'électrolyseur. La tension des batteries varie entre 48 et 56 volt, alors que l'électrolyseur est vue comme une résistance qui varie entre 0.5 et 1.5 ohms.

Dans ce menu on choisit la tension des batteries, la résistance de l'électrolyseur ,le rapport cyclique, et la valeur de l'inductance, aussi on choisit le nombre de branches du buck et le nombre de cycle.

```

%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
clear all

```

```

close all
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%

```

```

k=menu('Choisir le nombre de branches du buck','1','2','3','4');

```

```

U=input('tension au primaire=')

```

```

rapp=input('rapport cyclique=')

```

```

R=input('Resistance de charge=')

```

```
L=input('valeur de l''inductance=')
```

```
ff=input('fréquence de hachage=')
```

```
G=menu('Choisir le nombre de cycles','1','10','20','50','100','200');
```

```
if G==1;
```

```
    nc=1*(1/ff);
```

```
elseif G==2;
```

```
    nc=10*(1/ff);
```

```
elseif G==3;
```

```
    nc=20*(1/ff);
```

```
elseif G==4;
```

```
    nc=50*(1/ff);
```

```
elseif G==5;
```

```
    nc=100*(1/ff);
```

```
else
```

```
    nc=200*(1/ff);
```

```
end
```

```
if k==1
```

```
    open('kirch1')
```

```
    sim('kirch1')
```

```
    figure(1)
```

```
    plot(t,ir)
```

```
title('Le courant dans la charge')  
  
figure(2)  
  
plot(t,vrs1)  
  
title('tension de commande de l"interrupteur')
```

```
figure(3)  
  
subplot(3,1,1),plot(t,im)  
  
title('Le courant dans l"interrupteur')  
  
subplot(3,1,2),plot(t,id)  
  
title('Le courant dans la diode')  
  
subplot(3,1,3),plot(t,ir)  
  
title('Le courant dans la charge')
```

```
figure(4)  
  
subplot(2,1,1),plot(t,vm)  
  
title('La tension de l"interrupteur')  
  
subplot(2,1,2),plot(t,vd)  
  
title('La tension dans la diode')
```

```
elseif k==2  
  
sim('kirch2')  
  
figure(1)
```

```
plot(t,ir)

title('courant dans la charge')

figure(2)

subplot(2,1,1), plot(t,irs1)

title('tension de commande de l"interrupteur 1')

subplot(2,1,2), plot(t,irs2)

title('tension de commande de l"interrupteur 2')
```

```
elseif k==3

    sim('kirch3')

    figure(1)

    plot(t,ir)

    title('courant dans la charge')

    figure(2)

    subplot(4,1,1), plot(t,irs1)
    title('tension de commande de l"interrupteur 1')

    subplot(4,1,2), plot(t,irs2)
    title('tension de commande de l"interrupteur 2')

    subplot(4,1,3), plot(t,irs3)
    title('tension de commande de l"interrupteur 3')

else
    sim('kirch4')

    figure(1)
```

```
plot(t,ir)
```

```
title('courant dans la charge')
```

```
figure(2)
```

```
subplot(4,1,1), plot(t,vrs1)
```

```
title('tension de commande de l"interrupteur 1')
```

```
subplot(4,1,2), plot(t,vrs2)
```

```
title('tension de commande de l"interrupteur 2')
```

```
subplot(4,1,3), plot(t,vrs3)
```

```
title('tension de commande de l"interrupteur 3')
```

```
subplot(4,1,4), plot(t,vrs4)
```

```
title('tension de commande de l"interrupteur 4')
```

```
end
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Buck converter
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Programme(Matlab) de modélisation du buck converter qui est intercalé entre les batteries et l'électrolyseur afin de contrôler le courant fourni à l'électrolyseur. La tension des batteries varie entre 48 et 56 volt, alors que l'électrolyseur est vue comme une résistance qui varie entre 0.5 et 1.5 ohms. Dans ce programme on choisit la tension des batteries(Vin), La résistance de l'électrolyseur(R), le rapport cyclique, et la valeur de l'inductance(L), la fréquence de hachage(fh) aussi on choisit le nombre de branches(N) du buck .

```

%function courant12()

```

```

fh=20000; %fréquence de hachage
T=1/fh; %periode
R=1; %Resistance de charge (Resistance de l'electrolyseur)
L=0.5e-3; %valeur de l'inductance
N=2; %Nombre de branche
pas=T/511; %le pas de calcul
alpha=0.5; %rapport cyclique
Vin=50; %tension au primaire (des batteries)
t=[0:pas:2*T];

```

```

%calcul de Imin et Imax

```

```

Imin=(Vin/R)*(exp(-R*(T-alpha*T)/L)-exp(-R*T/L))/(1-exp(-R*T/L))
Imax=(Vin/R)*(1-exp(-R*(alpha*T)/L))/(1-exp(-R*T/L))
close all

```

```

for i=1:512
    for j=1:N+1
        I(i,j)=0;
    end
end

```

```

%calcul de To et T1

```

```

for n=1 : N+1

```

```

T0=(n-1)*T/N;
T1=T0+alpha*T;
i=1;

```

```

% calcul de T2

```

```

T2=T1-(L/R)*log(Imin/Imax);

```

```

%calcul de Tp1 et Tp2

```

```

if T1>=T,
    Tp1=T1-T;
end
if T2>=T,
    Tp2=T2-T ;
end

```

```

%Les equations du courant suivant les cas possibles

```

```

while t(i)<=T+pas,
    if T1<T+pas, % charge normale
        if (t(i)>T0) & (t(i)<=T1)
            I(i,n+1)=Imin*exp(-R*(t(i)-T0)/L)+(Vin/R)*(1-exp(-R*(t(i)-T0)/L));
            I(i,1)=t(i);
        end
    end
    if (T2<=T+pas) & (T1<=T) %décharge normale
        if (t(i)>T1) & (t(i)<=T2)
            I(i,n+1)=Imax*exp(-R*(t(i)-T1)/L);
            I(i,1)=t(i);
        end
    end
    if (T2>=T+pas) & (T1<=T) %charge normale mais décharge tradatée
        if (t(i)>0) & (t(i)<=Tp2)%décharge tradatée
            I(i,n+1)=Imax*exp(-R*(t(i)+T-T1)/L);
            I(i,1)=t(i);
        end
        if (t(i)>Tp2) & (t(i)<=T1)%charge normale
            I(i,n+1)=Imin*exp(-R*(t(i)-T0)/L)+(Vin/R)*(1-exp(-R*(t(i)-T0)/L));
            I(i,1)=t(i);
        end
        if (t(i)>T1) & (t(i)<=T+pas)%décharge normale
            I(i,n+1)=Imax*exp(-R*(t(i)-T1)/L);
            I(i,1)=t(i);
        end
    end
end

```



```

if (T2>=T+pas) & (T1>=T+pas) %charge translatée et décharge translatée
    if (t(i)>=0) & (t(i)<=Tp1) %charge translatée
        I(i,n+1)=Imin*exp(-R*(t(i)+T-T0)/L)+(Vin/R)*(1-exp(-R*(t(i)+T-T0)/L));
        I(i,1)=t(i);
    end
    if (t(i)>=Tp1) & (t(i)<=Tp2)%décharge translatée
        I(i,n+1)=Imax*exp(-R*(t(i)+T-T1)/L);
        I(i,1)=t(i);
    end
    if (t(i)>Tp2) & (t(i)<=T+pas)%charge normal
        I(i,n+1)=Imin*exp(-R*(t(i)-T0)/L)+(Vin/R)*(1-exp(-R*(t(i)-T0)/L));
        I(i,1)=t(i);
    end
end
end
i=i+1;
end
hold on;
plot(I(1:511,1), I(1:511,n));
title('le courant dans chaque branche')

```

end

%calcul du courant total

m=size(I);

for i=1:m(1)-1

    It(i)=0;

    for j=2:N+1

        It(i)=It(i)+I(i,j);

    end

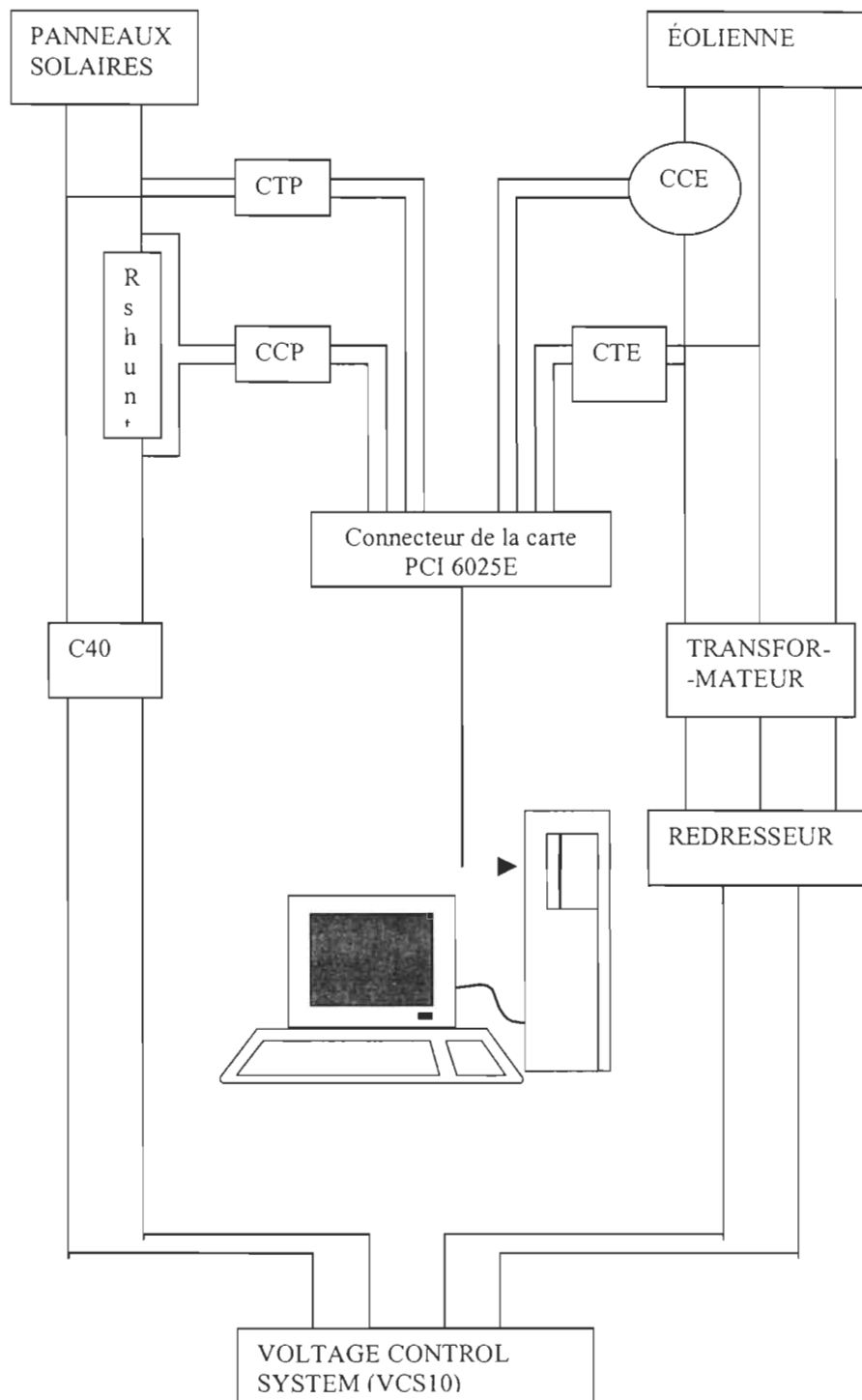
end

figure

plot(I(1:511,1), It(1:511));

title('Le courant total dans la charge')

# Annexe C



**Schéma de connexion des capteurs de tension et de courant de l'éolienne et des panneaux solaires**

### Caractéristiques des capteurs

CTP : Capteur de Tension pour les Panneaux solaires

input : 0-100V

output: 0-5VDC

couleur des fils de sortie: jaune, bleu

CCP : Capteur de Courant pour les Panneaux solaires

input : 0-100 mv représentant 0-30A

output : 0-5 VDC

couleur des fils de sortie: orange, marron

CTE : Capteur de Tension pour l'Éolienne

input : 0-300V

output: 0-5VDC

couleur des fils de sortie: vert, noir

CCE : Capteur de Courant pour l'Éolienne

input : 0-100 A

output : 0-5 VDC

couleur des fils de sortie: rouge, blanc



CCEL : Capteur de courant à l'entrée des cellules de l'électrolyseur

input : 0-150 A

output: 0-5VDC

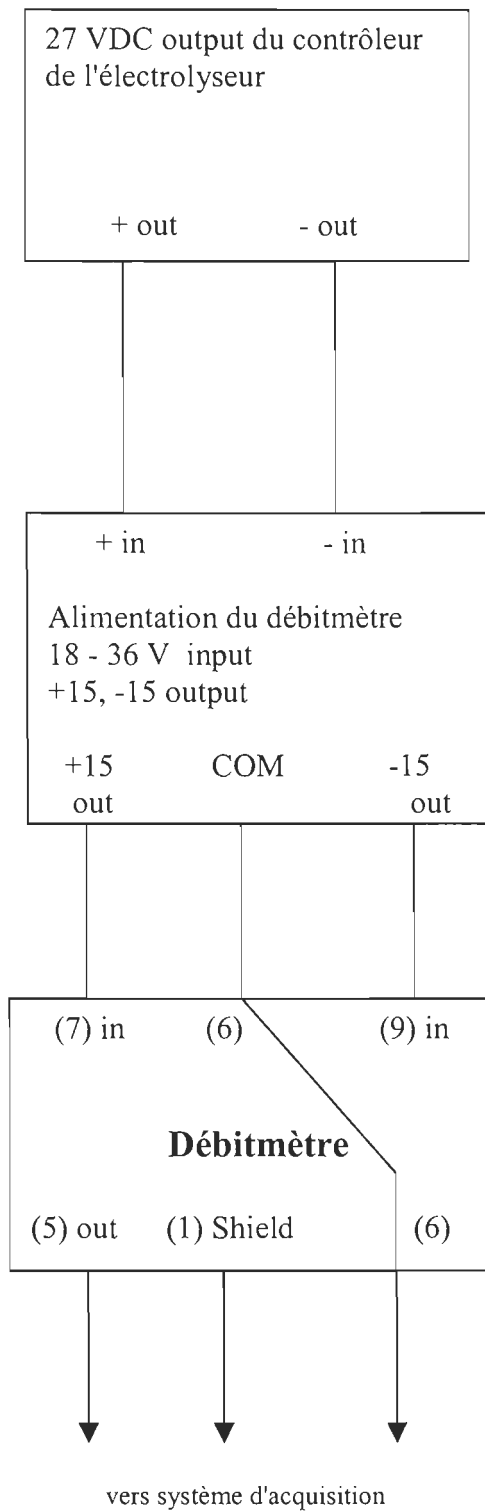
couleur des fils de sortie: rouge, noir

CDH : Capteur du Débit de l'Hydrogène à la sortie de l'électrolyseur

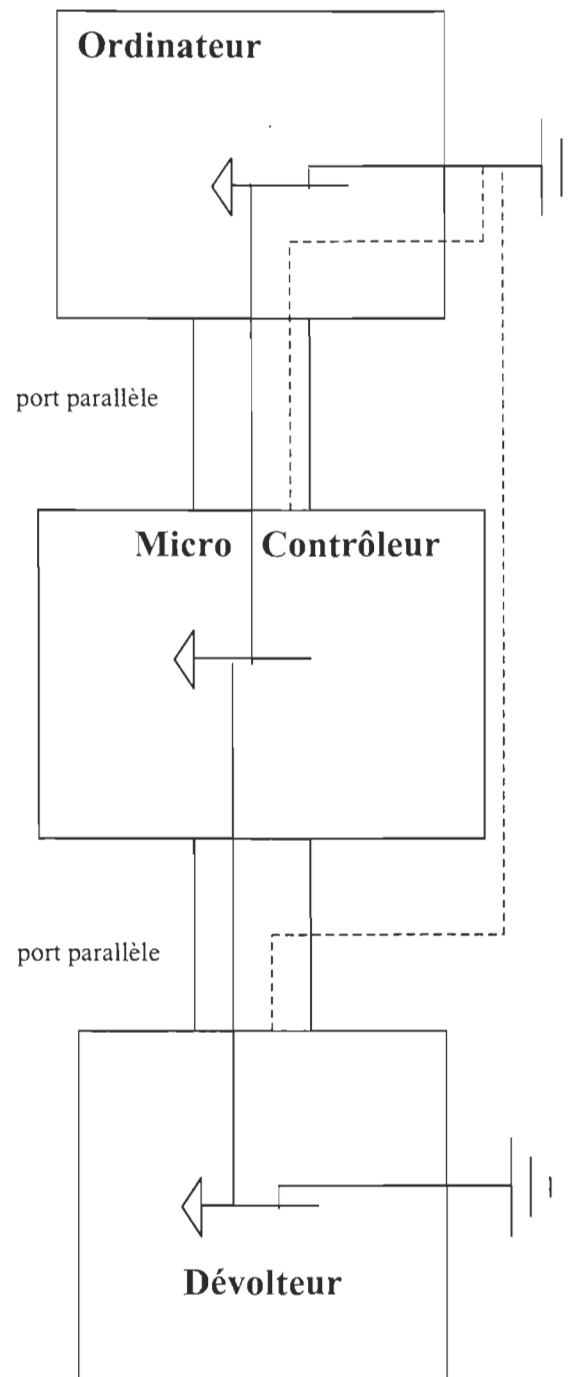
input : 0-100 psi

output: 0-5VDC

couleur des fils de sortie: noir, blanc



### Installation de l'alimentation du débitmètre



**Connexion entre l'ordinateur, le microcontrôleur et le dévolteur**



# Annexe D

programme\_4\_capteur.vi

E:\Bureau\adil\programme\_4\_capteur.vi

Last modified on 01-10-30 at 11:22

Printed on 03-04-04 at 15:05

Front Panel

programme d'acquisition de données des 4 capteurs

▶ spécification de la voie de lecture:

▶ temps d'acquisition:

▶ fichier d'enregistrement (pour les 4 capteurs):

Fichier d'enregistrement pour le débit de l'hydrogene:

délai entre enregistrement (pour le débit de l'hydrogene):

Valeur Iu

Valeur Iu

Puissance des PS

Puissance des panneaux solaires

Courant PS

Tension PS

Valeur Iu

Valeur Iu

Puissance E

Puissance de l'éolienne

Courant E

Tension E

Debit d'hydrogene:

valeur enregistrement (hydrogene):

Arrêt du programme

STOP



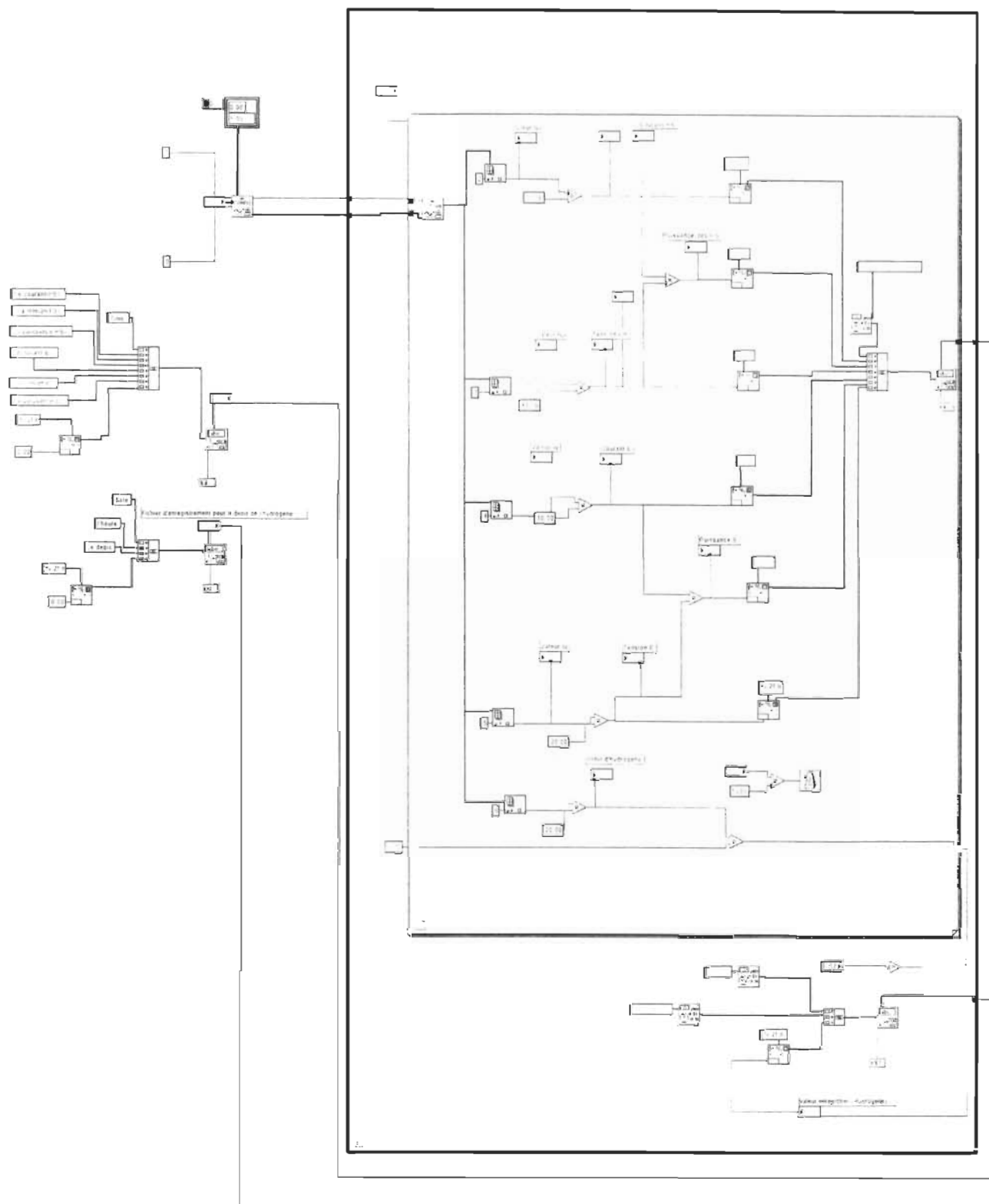
programme\_4\_capteur.vi

E:\Bureau\adil\programme\_4\_capteur.vi

Last modified on 01-10-30 at 11:22

Printed on 03-04-04 at 15:06

# Block Diagram



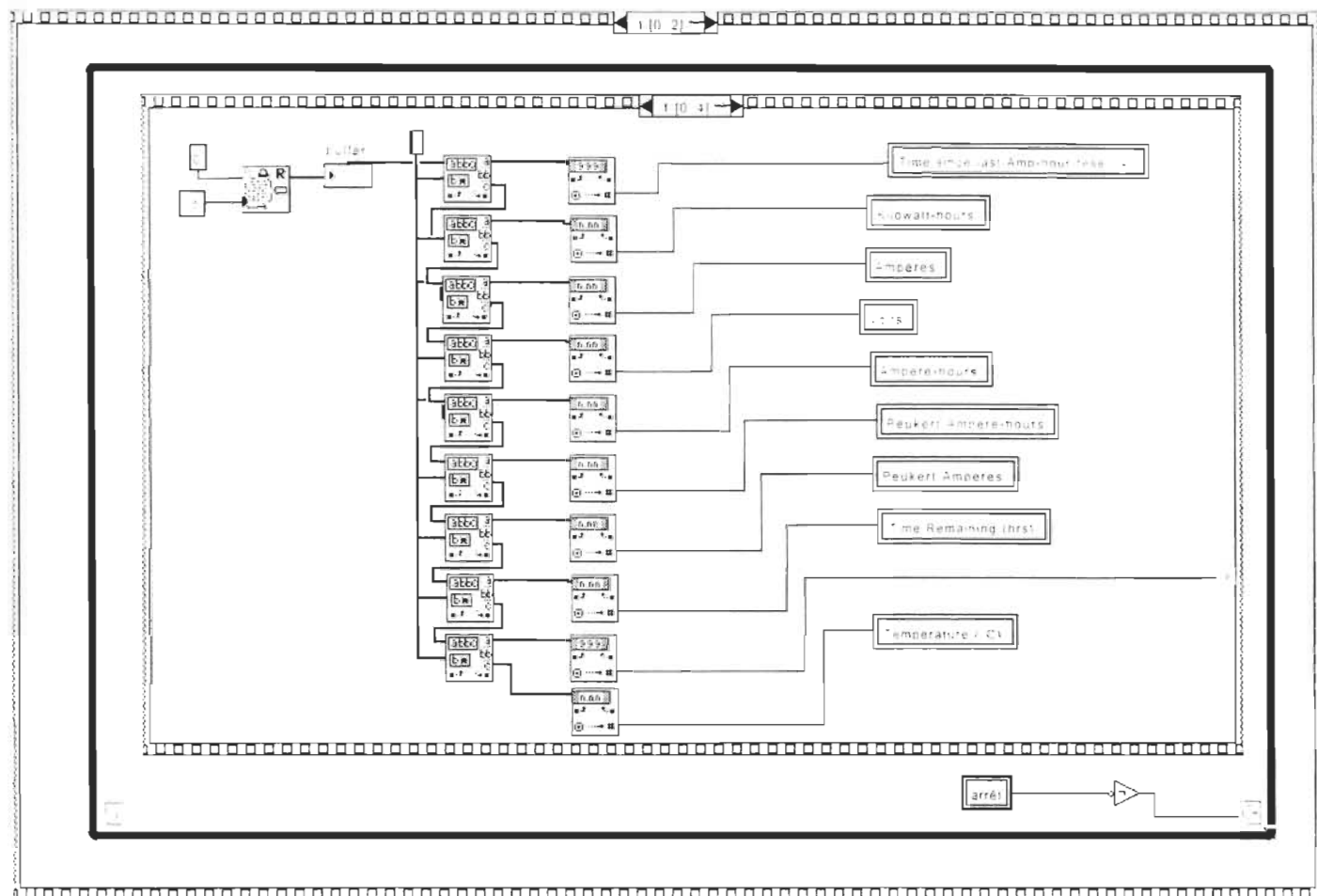
Emeter\_1.vi

E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:27

# Block Diagram



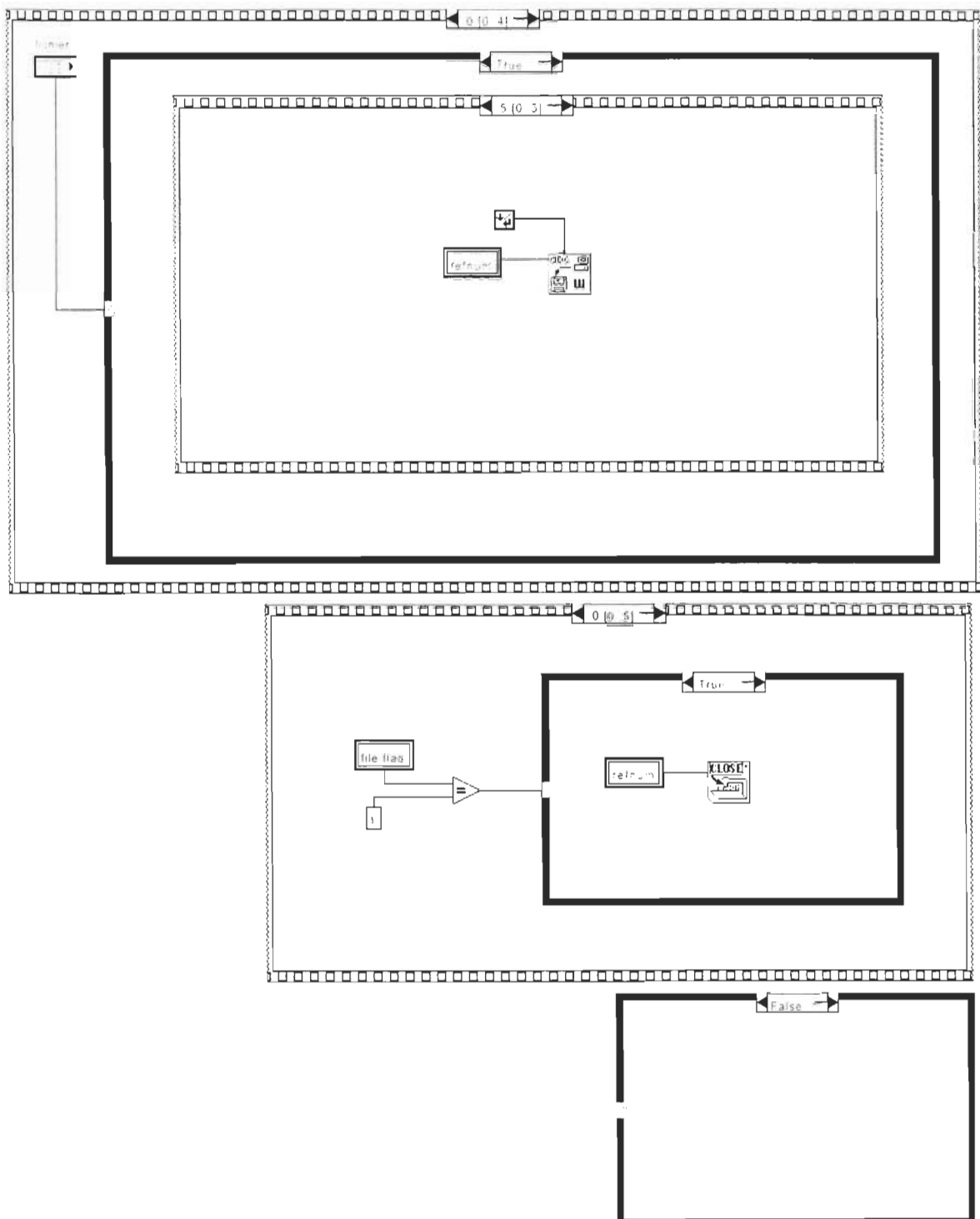


Emeter\_1.vi

E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:28



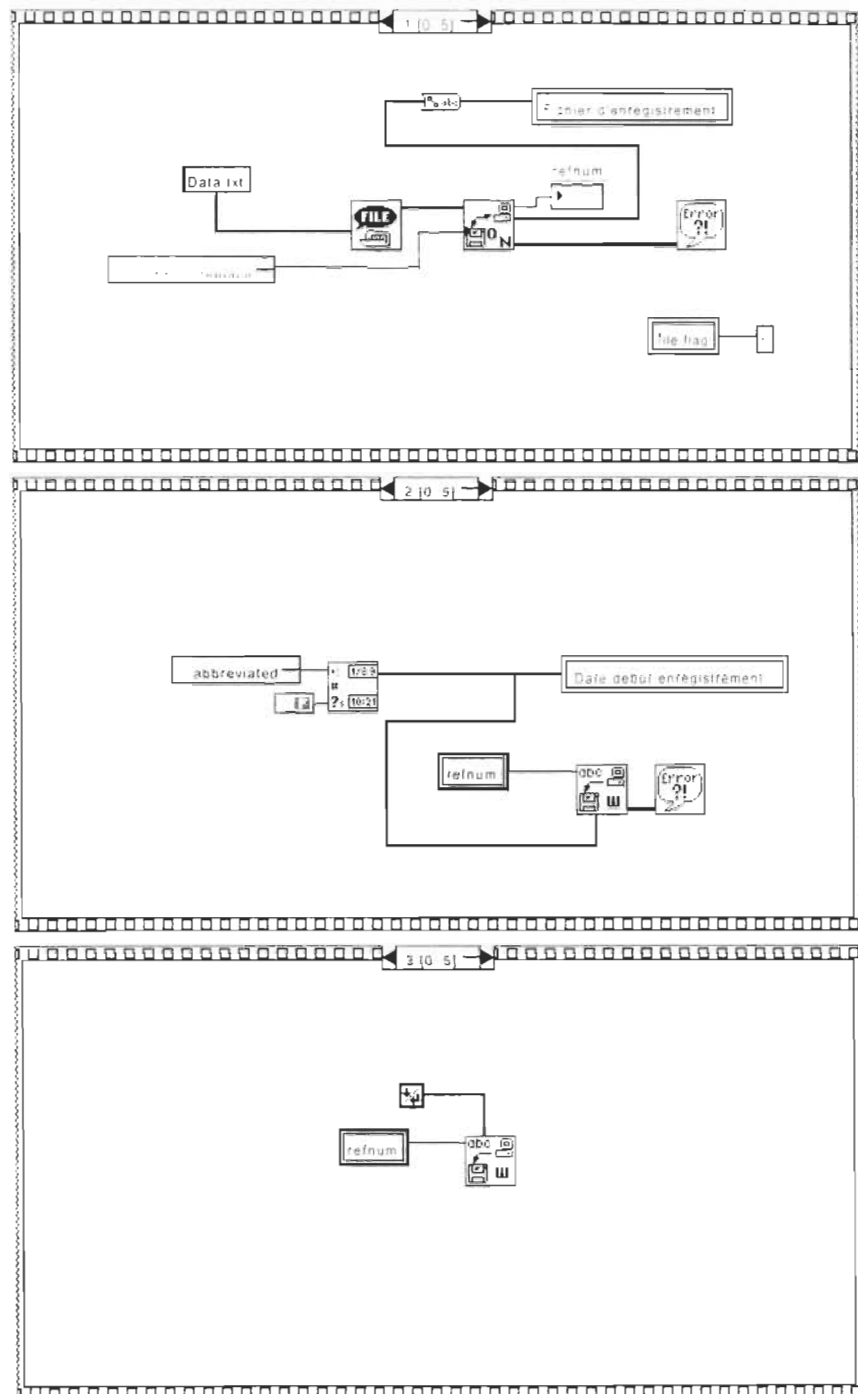


Emeter\_1.vi

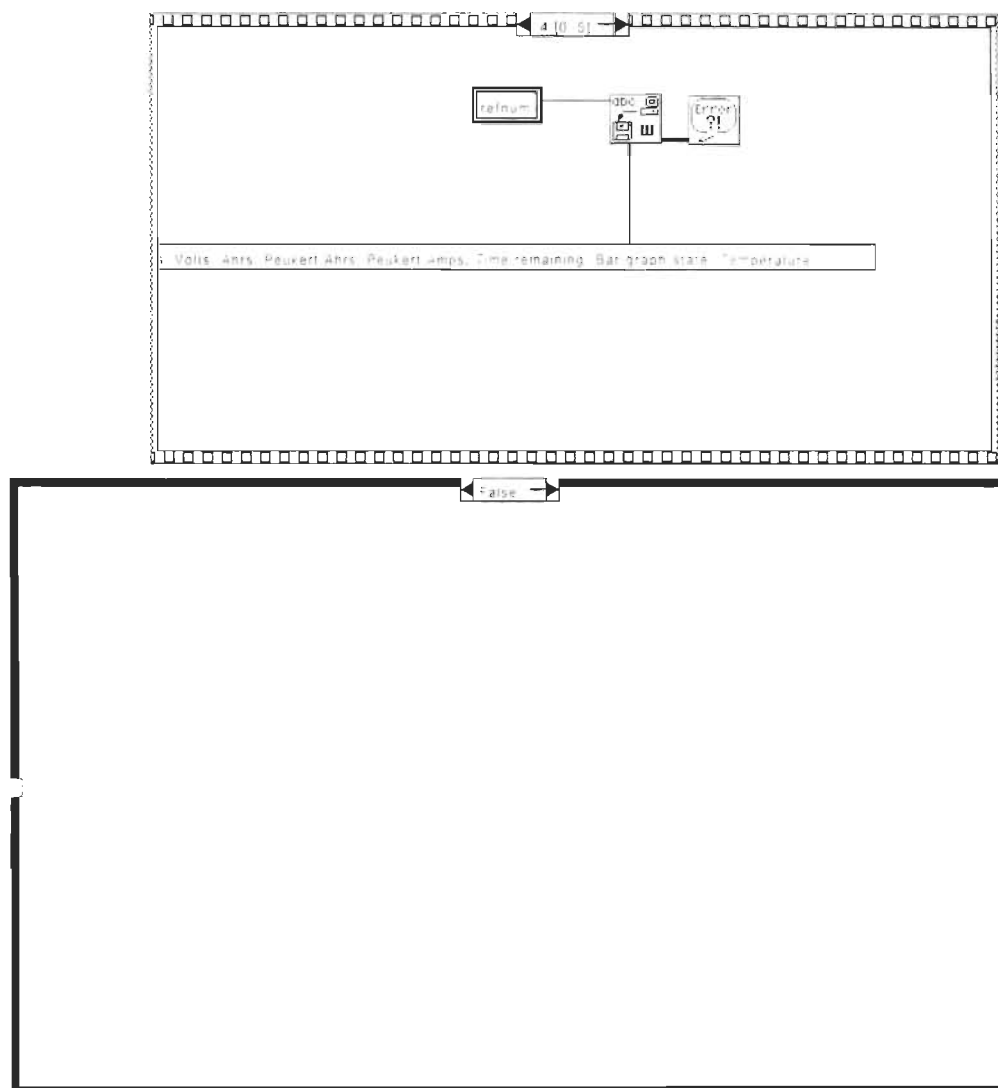
E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:28



Printed on 03-04-03 at 12:28



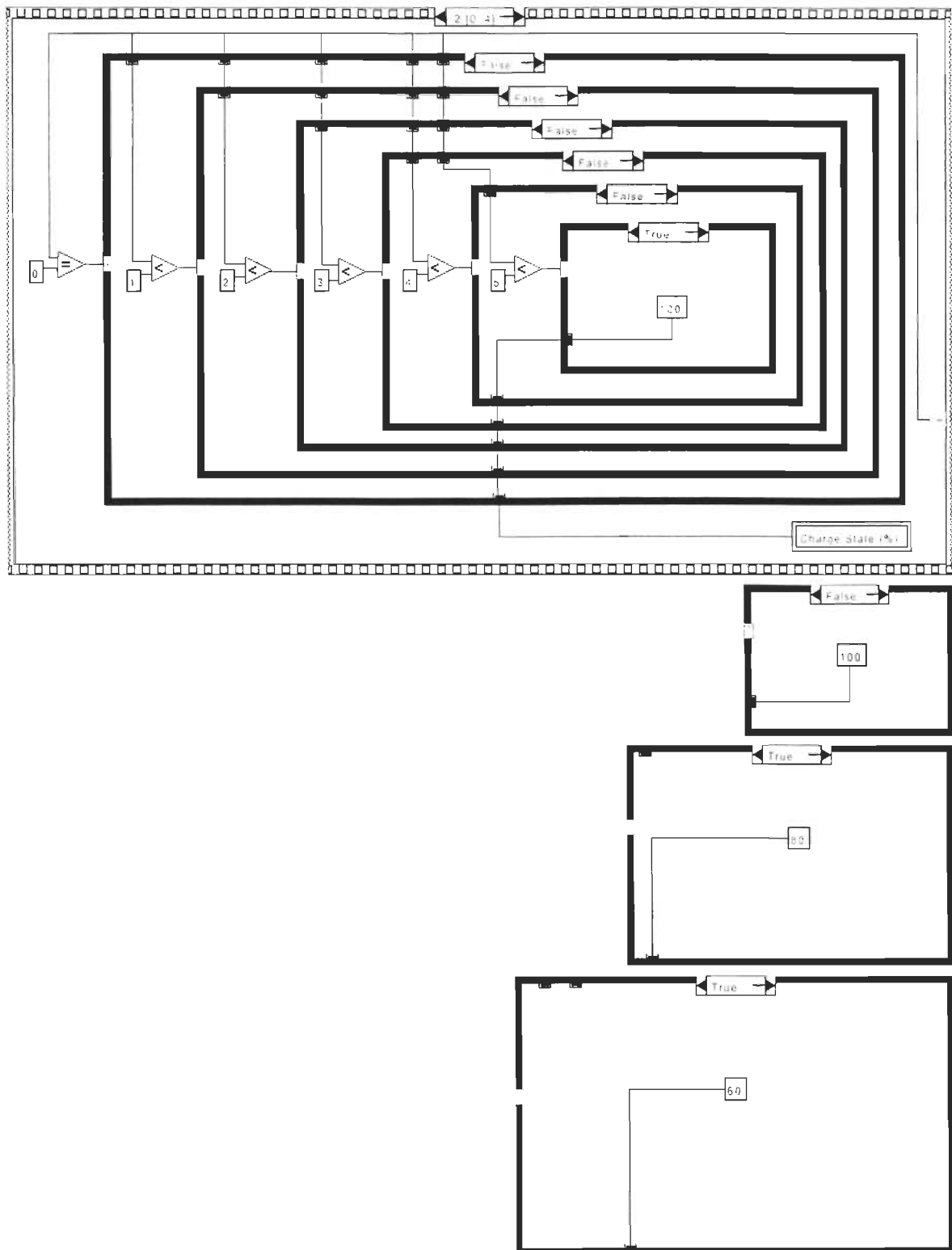


Emeter\_1.vi

E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:28



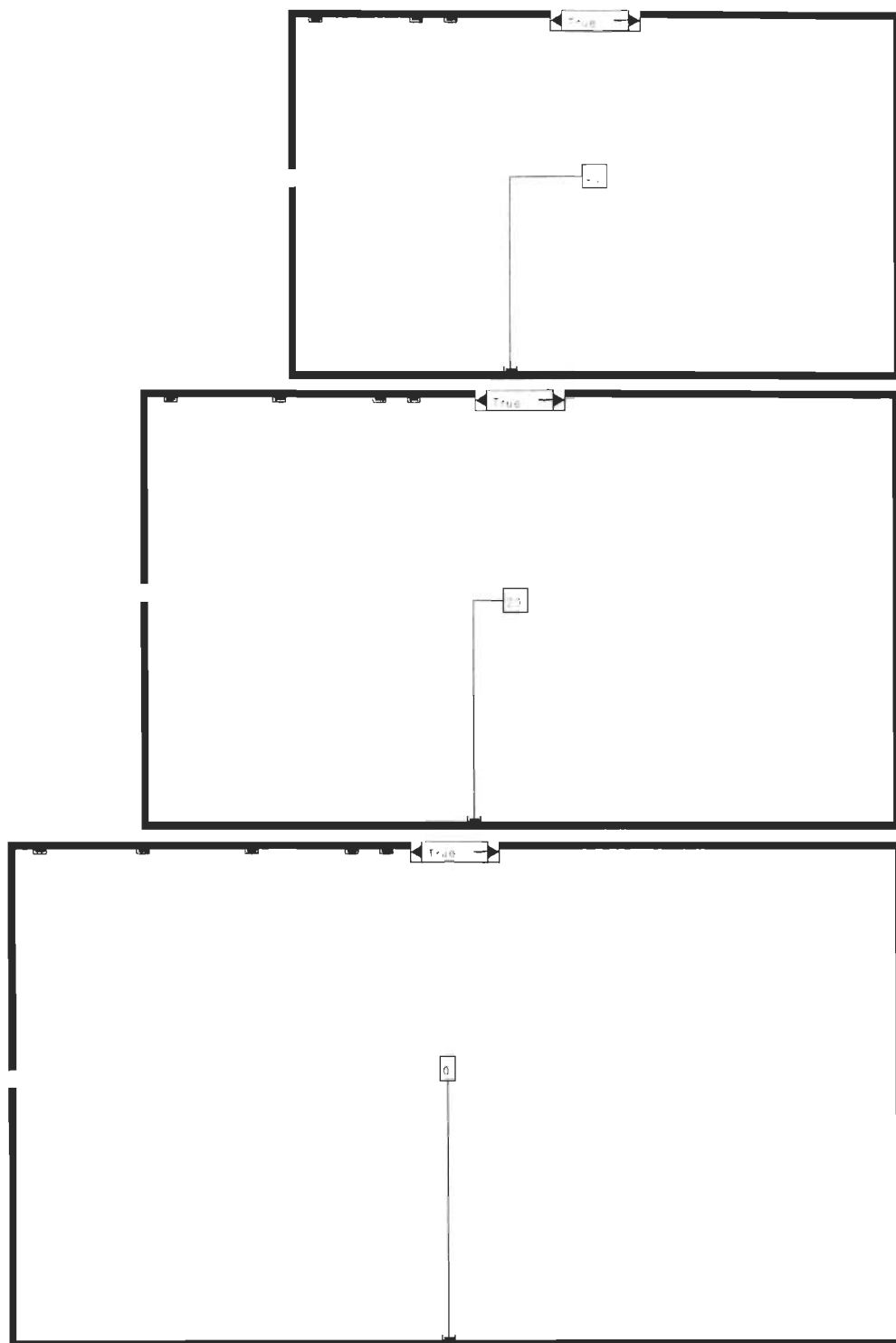


Emeter\_1.vi

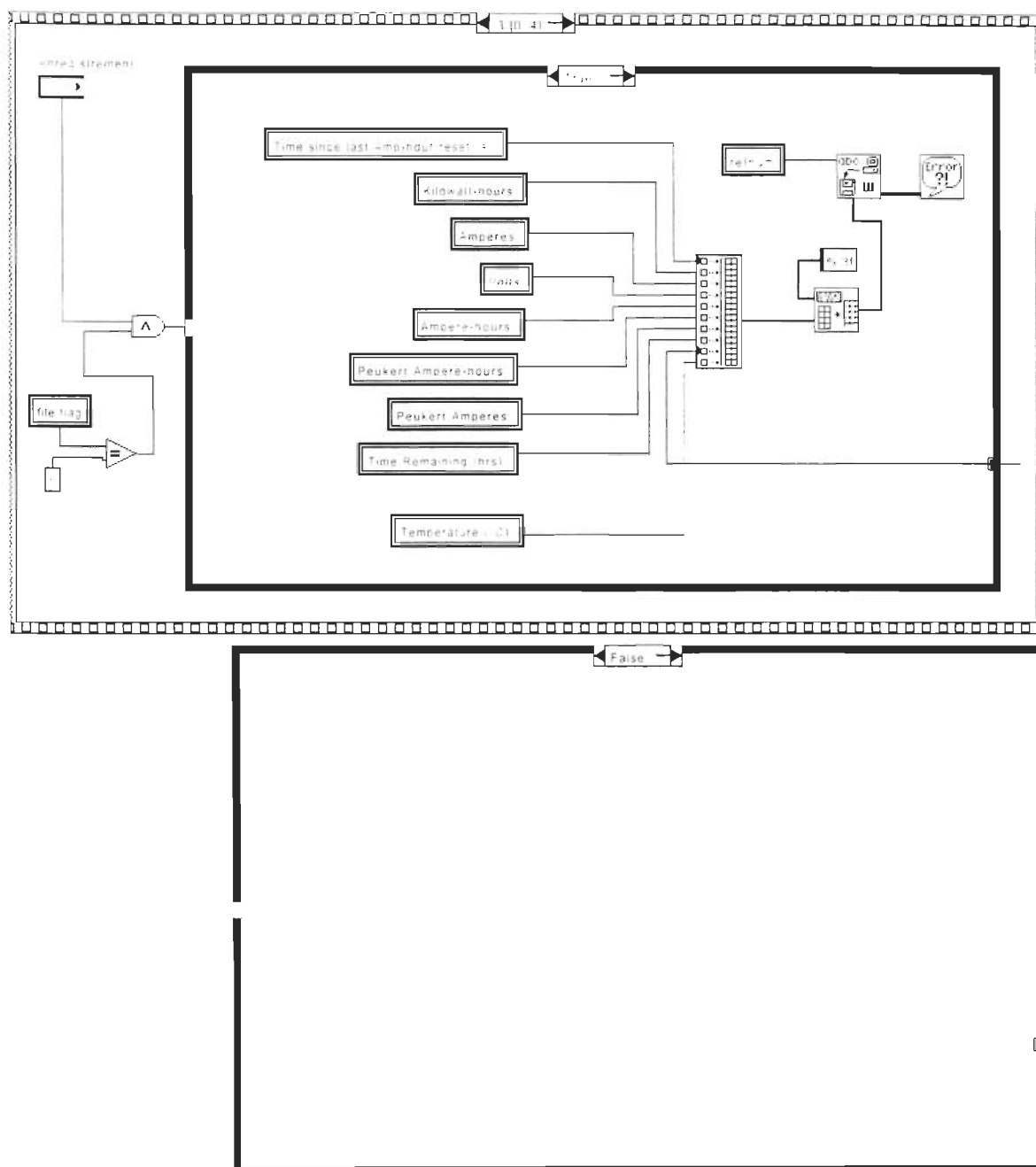
E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:28



Printed on 03-04-03 at 12:29



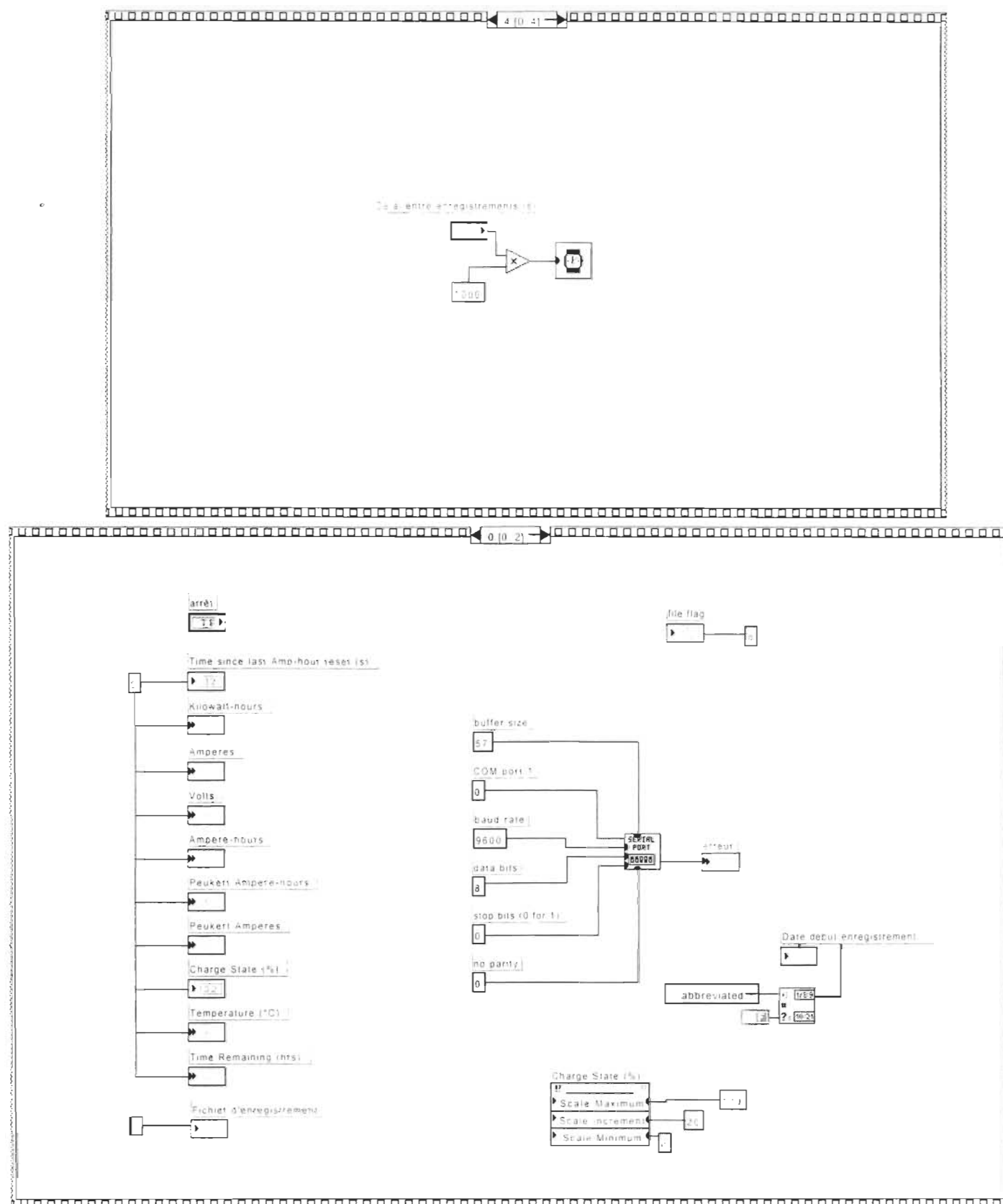


Emeter\_1.vi

E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:29





Emeter\_1.vi

E:\anouar\Emeter\_1.vi

Last modified on 00-08-31 at 09:21

Printed on 03-04-03 at 12:29

