

**Université du Québec**

**Mémoire présenté à  
l'Université du Québec à Trois-Rivières  
comme exigence partielle de la  
Maîtrise en génie électrique**

**Par  
Michaël Fournier**

**Utilisation rationnelle de la pile à combustible dans un  
système de production autonome d'électricité**

**Mai 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.

## Remerciements

Je tiens à remercier M. Kodjo Agbossou qui a accepté de diriger mes travaux. Je veux aussi remercier M. Jean Hamelin pour l'intérêt porté en tant que co-directeur et pour ses conseils et explications en rapport avec la pile à combustible.

Je désire aussi souligner l'importante contribution des membres précédents et actuels de l'équipe des Énergies Renouvelables qui m'ont apporté leurs expériences et leurs points de vue. En particulier, je désire remercier François Laurencelle, Pascal Larouche, Adil Anouar, Sousso Kélouwani, Mylène Robitaille, Alexis Bilodeau, Alexandre Palardy et Étienne Bernier.

Je remercie également les organismes qui m'ont soutenu financièrement durant cette période. Il s'agit des deux fonds conjoints FCAR-MRNQ (Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche - Ministère des Ressources Naturelles du Québec) et du CRSNG-RNC (Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie - Ressources Naturelles du Canada). Je remercie également la compagnie Greenlight Power Systems de m'avoir accueilli pour un stage à l'été 2002.

## Sommaire

Ce mémoire est en lien direct avec le système autonome de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables mis au point à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène. Ce système utilise une éolienne et des panneaux solaires comme sources primaires d'électricité afin d'alimenter une charge cible d'environ 5 kW via un bus à courant continu. Lorsque la production des sources primaires dépasse la consommation de la charge, un électrolyseur entre en fonction afin de convertir le surplus d'électricité en hydrogène. En l'absence d'énergie éolienne ou solaire, une pile à combustible est mise en fonction afin de pallier à la demande de la charge, utilisant l'hydrogène stocké.

Ce mémoire relate la problématique, la méthodologie et les résultats obtenus en rapport avec l'intégration et l'utilisation rationnelle de la pile à combustible au sein du système à énergies renouvelables.

Le premier chapitre explique en quoi les systèmes à énergies renouvelables tirent profit du stockage de l'énergie sous forme hydrogène. L'intérêt de la recherche démontré, la revue bibliographique et les objectifs sont présentés.

Le deuxième chapitre expose le fonctionnement de la pile à combustible à membrane polymère solide. Cette étude permet d'en apprécier les caractéristiques de fonctionnement qui deviendront les limites à respecter pour l'automatisation du générateur à pile à combustible. L'étude en régime dynamique a permis de vérifier que les transitoires produits par les hacheurs de courant n'ont pas d'impact significatif sur la pile. Toutefois, les grandes variations de charges peuvent être problématiques si la pile n'a pas encore atteint sa température nominale.

Le troisième chapitre relate l'élaboration et l'implantation des algorithmes de contrôle et de régulation du générateur à pile à combustible. L'implantation a été réalisée à l'aide du logiciel LabView DSC et d'un microcontrôleur. Deux cas expérimentaux sont aussi présentés pour démontrer la bonne opération de la commande et de la régulation.

Le quatrième chapitre expose l'étude des performances de la pile à combustible en fonction de la concentration en oxygène de l'oxydant. Cette étude permet d'envisager la récupération de l'oxygène produit par électrolyse afin d'alimenter la pile et ainsi accroître son efficacité et la puissance électrique disponible.

Le cinquième chapitre propose la combinaison d'éléments de modèles de piles à combustible tirés de plusieurs articles afin de former un modèle permettant de prédire la température de la pile selon le temps et le profil de charge qui lui est appliqué.

Finalement, le sixième chapitre montre l'atteinte de chacun des objectifs et propose d'autres avenues de recherche.

# Table des matières

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE .....	II
INDEX DES FIGURES .....	VI
INDEX DES TABLEAUX .....	VII
NOMENCLATURE.....	VII
CHAPITRE 1: INTRODUCTION .....	1
1.1 PROBLÉMATIQUE .....	1
1.1.1 Les systèmes autonomes .....	1
1.1.2 Sources d'énergies renouvelables .....	2
1.1.3 Production distribuée .....	3
1.1.4 Vers l'économie de l'hydrogène .....	5
1.1.5 Systèmes autonomes et stockage de l'hydrogène .....	6
1.1.6 Piles à combustible .....	8
1.2 ÉTAT DE LA RECHERCHE .....	10
1.3 DESCRIPTION DU PROJET .....	13
1.4 OBJECTIFS DE RECHERCHE .....	15
1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE.....	17
CHAPITRE 2: ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE LA PILE À COMBUSTIBLE .	18
2.1 PILE À MEMBRANE POLYMÈRE SOLIDE.....	18
2.1.1 Principe de fonctionnement.....	19
2.1.2 Assemblage membranaire .....	20
2.1.3 Stœchiométrie des réactifs.....	22
2.1.4 Gestion de l'eau à l'intérieur de la pile .....	23
2.1.5 Courbes de polarisation .....	24
2.1.6 Assemblages multicellulaires .....	27
2.1.7 Modes de défaillance .....	29
a) Renversement de la polarité d'une cellule.....	29
b) Assèchement de la membrane.....	30
c) Saturation des pores de la couche de diffusion.....	30
d) Fuite interne .....	30
e) Fuite externe .....	31
f) Impureté des réactifs.....	32
2.2 CARACTÉRISTIQUES DU GENPAC UTILISÉ .....	32
2.3 ÉTUDE DU GÉNÉRATEUR EN RÉGIME DYNAMIQUE .....	34
2.3.1 Transitoires rapides de faible amplitude.....	35
2.3.2 Transitoires peu fréquents de grande amplitude.....	42
2.3.3 Alimentation continue d'une charge variable.....	46
2.4 RÉSUMÉ .....	48

<b>CHAPITRE 3: RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE COMMANDE ET DE RÉGULATION DU GENPAC .....</b>	<b>49</b>
3.1 ÉTAT DE LA RECHERCHE .....	49
3.2 CAHIER DES CHARGES .....	50
3.2.1 Description du système à contrôler .....	50
3.2.2 Contraintes liées à la régulation du générateur.....	54
3.3 DESCRIPTION DES ALGORITHMES .....	55
3.3.1 Partie exécutée par l'ordinateur de la station de test .....	56
a) Architecture LabView DSC .....	56
b) Description de l'algorithme principal.....	59
3.3.2 Partie exécutée par le microcontrôleur.....	70
3.4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION .....	72
3.5 RÉSUMÉ .....	78
<b>CHAPITRE 4: ÉTUDE DES PERFORMANCES DE LA PAC SELON LA CONCENTRATION EN OXYGÈNE DE L'OXYDANT.....</b>	<b>79</b>
4.1 PROBLÉMATIQUE DE L'ENRICHISSEMENT .....	79
4.2 PERFORMANCES DE LA PILE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN OXYGÈNE DE L'OXYDANT.....	80
4.3 DISPOSITIFS D'ENRICHISSEMENT .....	84
4.3.1 Air.....	84
4.3.2 Adsorption Modulée en Pression (AMP) .....	85
4.3.3 Membranes Perméables Sélectives (MPS).....	88
4.3.4 Oxygène relâché par l'électrolyse (ORE).....	89
4.4 BILAN DE PUISSANCE ET EFFICACITÉ.....	91
4.5 RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	93
<b>CHAPITRE 5: MODÉLISATION DE LA PILE À COMBUSTIBLE .....</b>	<b>95</b>
5.1 TYPES DE MODÈLES .....	96
5.2 MODÈLE EN RÉGIME PERMANENT .....	97
5.2.1 Potentiel théorique .....	97
5.2.2 Surtensions d'activation .....	98
5.2.3 Surtension ohmique .....	98
5.3 VERS UN MODÈLE DYNAMIQUE .....	99
5.4 PROPOSITIONS ET CONCLUSION.....	101
<b>CHAPITRE 6: CONCLUSION.....</b>	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>108</b>
ANNEXE 1: ÉTIQUETTES DE LA STATION DE TEST .....	113
ANNEXE 2: CODE DU PROGRAMME CONTRÔLE_PILE_5.VI.....	115
ANNEXE 3: CODE DU PROGRAMME CARACTÉRISTIQUES5.VI .....	144
ANNEXE 4: CODE DU SOUS-PROGRAMME RESET.VI .....	153
ANNEXE 5: CODE DU SOUS-PROGRAMME STATUS.VI .....	156
ANNEXE 6: CODE DU SOUS-PROGRAMME STOÉCHIOMETRIE.VI .....	162
ANNEXE 7: CODE DU SOUS-PROGRAMME CONSIGNE.VI .....	165
ANNEXE 8: CODE DU SOUS-PROGRAMME STOP.VI.....	168

## Index des figures

Figure 1-1: Représentation du système autonome.....	14
Figure 1-2: Vue d'ensemble du GENPAC, de la station de test, de la source Elgar, du survolteur et de la charge Dynaload.....	16
Figure 2-1: Coupe d'une cellule d'une pile à membrane polymère solide [33] .....	19
Figure 2-2: Détail de l'assemblage membranaire et des canaux de distribution [34] .....	21
Figure 2-3: Contribution des différentes surtensions.....	25
Figure 2-4: Courbes de polarisation en fonction de la température [37].....	27
Figure 2-5: Schéma d'une pile avec plaques bipolaires [38] .....	28
Figure 2-6: Sortie de l'onduleur Enerwatt pour une charge de 1000 W.....	35
Figure 2-7: Tension à la sortie de la pile et sa transformée de Fourier .....	36
Figure 2-8: Courant à la sortie de la pile et sa transformée de Fourier .....	36
Figure 2-9: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 150 .....	38
Figure 2-10: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 210 .....	39
Figure 2-11: Forme d'onde produite par l'onduleur Trace, mesurée avec la charge California pour une puissance de 1000 W .....	40
Figure 2-12: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 150 .....	40
Figure 2-13: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 210 .....	41
Figure 2-14: Tension de la pile lors du passage de 40 à 100 A .....	43
Figure 2-15: Tension lors de la mise sous tension de lampes halogènes, la pile étant alors à 63°C .....	44
Figure 2-16: Tension lors de la mise sous tension d'une perceuse électrique à pleine intensité, la pile étant alors à une température de 57°C .....	44
Figure 2-17: Production maximale suite au démarrage.....	46
Figure 3-1: Organigramme du système de commande et de régulation du bloc de recouvrement .....	53
Figure 3-2: Organisation du système de contrôle du bloc de régénération .....	55
Figure 3-3: Panneau avant du programme Contrôle_pile_5.vi .....	60
Figure 3-4: Organigramme principal de Contrôle_pile_5.vi .....	61
Figure 3-5: Panneau avant du programme Caractéristiques5.vi .....	62
Figure 3-6: Organigramme de la boucle principale.....	65
Figure 3-7: Organigramme principal du programme implanté dans le microcontrôleur .....	71
Figure 3-8: Démarrage de la pile à froid.....	73
Figure 3-9: Régulation - Alarme rouge .....	73
Figure 3-10: Démarrage avec pile noyée .....	75
Figure 3-11: Régulation - Alarme jaune.....	76
Figure 4-1: Montage expérimental.....	81
Figure 4-2: Patron de courant utilisé pour le mélange à 40% d'oxygène .....	82
Figure 4-3: Courbes de puissance et de polarisation selon la concentration en oxygène de l'oxydant.....	83
Figure 4-4: Courbes de l'efficacité de conversion selon la concentration en oxygène de l'oxydant.....	83



Figure 4-5: Représentation du système AMP utilisé pour les calculs .....	87
Figure 4-6: Représentation schématisée d'un module MPS.....	89
Figure 4-7: Résultat des calculs comparatifs.....	93

## Index des tableaux

Tableau 1-1: Types de piles à combustible [10] .....	8
Tableau 1-2: Éléments du système à énergies renouvelables .....	14
Tableau 2-1: Sommaire des figures 2-7 et 2-8 .....	36
Tableau 2-2: Amplitude des harmoniques de tension à la sortie de la pile lorsque connectée à l'onduleur Enerwatt .....	37
Tableau 2-3: Sommaire des figures 2-9 et 2-10 .....	39
Tableau 2-4: Sommaire des figures 2-12 et 2-13 .....	41
Tableau 2-5: Amplitude des harmoniques avec le convertisseur survolteur (V) ....	42
Tableau 2-6: Valeur des tensions mesurées (V) .....	44
Tableau 3-1: Éléments du système de contrôle et régulation.....	51
Tableau 4-1: Détail des pertes parasites estimées .....	85
Tableau 4-2: Détails relatifs au calcul de la puissance de compression pour un courant de 140 A à la pile .....	85

## Nomenclature

$A$	Aire des cellules (cm <sup>2</sup> )
$C$	Chaleur massique moyenne (J/°C)
$c_{O_2}^*$	Concentration d'oxygène à l'interface catalyseur/gaz de la cathode (mol/cm <sup>3</sup> )
$E_{Nerst}$	Tension d'équilibre théorique de la réaction (V)
$E^0$	Force électromotrice standard (V)
$F, \mathfrak{F}$	Constante de Faraday
$(hA)_{pile}$	Coefficient de transfert de chaleur pour la surface de la pile (W/°C)
$(hA)_a$	Coefficient de transfert de chaleur à l'anode (W/°C)
$(hA)_c$	Coefficient de transfert de chaleur à la cathode (W/°C)
$(hA)_{eau}$	Coefficient de transfert de chaleur pour les surfaces exposées à l'eau de refroidissement (W/°C)
$I$	Courant (A)
$k$	Constante polytropique
$LHV$	Valeur calorifique basse – <i>low heating value</i> (MJ/kg)
$l$	Épaisseur de la membrane (cm)
$M$	Masse de la pile (kg)
$N$	Nombre de cellules composant la pile

$n_x$	Nombre d'électrons échangés par atome de l'espèce $x$
$P_{H_2}$	Puissance équivalente contenue dans le débit d'hydrogène consommé (W)
$P_{comp}$	Puissance consommée par la compression des gaz (W)
$P_{disp}$	Puissance disponible (W)
$P_{élec}$	Puissance électrique produite par la pile (W)
$P_{parasite}$	Puissance consommée par les auxiliaires (W)
$P_{pertes}$	Puissance perdue (par exemple la consommation des auxiliaires) (W)
$p_x$	Pression partielle de l'espèce $x$
$p_{O_2}^{interface}$	Pression partielle d'oxygène à l'interface catalyseur/gaz de la cathode (atm)
$\dot{Q}_x$	Débit de l'espèce $x$ (slpm)
$\dot{Q}_{x,\zeta}$	Débit de l'espèce $x$ à la pression $\zeta$ (lpm)
$\dot{q}_{théo}$	Puissance théorique (W)
$\dot{q}_{sens}$	Puissance sensible (W)
$\dot{q}_{élec}$	Puissance électrique (W)
$\dot{q}_{pertes}$	Puissance perdue (W)
$R$	Résistance ( $\Omega$ )
$r$	Taux de récupération de l'oxygène
$r_m$	Résistivité spécifique de la membrane au passage des protons ( $\Omega$ cm)
$T$	Température ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V$	Tension de la pile (V)
$V_{cell}$	Tension d'une cellule (V)
$\Delta t$	Incrément de temps
$\eta_x$	Efficacité du dispositif $x$
$\mathfrak{R}$	Constante des gaz
$\xi_n$	Paramètres empiriques 1 à 4
$\sigma_{act}$	Surtension d'activation (V)
$\sigma_{ohm}$	Surtension ohmique (V)
$\sigma_{conc}$	Surtension de concentration (V)
$\zeta_x$	Pression du côté $x$ du compresseur (kPa)
$[x]_y$	Concentration de l'espèce $x$ dans le mélange $y$

# Chapitre 1: Introduction

Dans ce chapitre, on expliquera en quoi ce sujet est pertinent et d'actualité. Tout d'abord, on définira ce qu'est un système autonome et en quoi ce type de système pourrait avoir une importance grandissante au cours des prochaines années. Ensuite, on expliquera les raisons qui font de l'hydrogène un vecteur énergétique et une alternative de premier choix pour le stockage à long terme de l'électricité. Enfin, on dressera un rapide portrait des différentes technologies de piles à combustible, ce qui complètera la problématique.

Par la suite, on passera en revue différents articles scientifiques ayant trait au sujet afin de montrer l'état de la recherche. Finalement, on expliquera les objectifs de la recherche et la méthodologie adoptée pour la mener à bien.

## ***1.1 Problématique***

### 1.1.1 Les systèmes autonomes

Plus de deux milliards d'individus vivant dans les pays en voie de développement n'ont pas accès à une alimentation électrique fiable [1]. Cela s'explique premièrement par la nature isolée et fragmentée de certains pays (dont les archipels) et deuxièmement par les coûts élevés de construction et de maintenance des réseaux électriques de grande échelle. Dans les pays en voie de développement où des réseaux électriques ont été installés, le service est souvent intermittent et de mauvaise qualité. Or, une alimentation électrique fiable est un préalable à la mise en service de plusieurs outils de développement, que l'on pense notamment aux services de santé et aux télécommunications.

Dans bien des cas, la solution réside dans les systèmes de production électrique autonomes. Ces systèmes produisent localement l'électricité et l'acheminent directement à la charge. Au titre des utilisations, on note l'alimentation en puissance des résidences et des petites communautés, le pompage de l'eau, l'éclairage d'urgence, l'éclairage de signalisation [2], la

protection cathodique<sup>i</sup>, l'aide à la navigation, la réfrigération des vaccins et l'électrification des clôtures [1].

Au Québec, on retrouve de ces systèmes dans les localités disséminées le long des baies d'Hudson et d'Ungava et aussi comme générateur d'urgence à l'intérieur de grands immeubles. La source de puissance est alors, plus souvent qu'autrement, un ensemble de génératrices diesel. Bien que plus économique que la liaison au réseau électrique, cette solution engage une dépendance face aux combustibles fossiles. Or, celle-ci implique des conséquences environnementales qu'il devient difficile de nier; le protocole de Kyoto en fait la preuve. Par la standardisation de l'utilisation des combustibles fossiles, des solutions locales, tirant avantage des ressources immédiates du milieu, sont parfois ignorées.

### 1.1.2 Sources d'énergies renouvelables

Dans une perspective de développement durable, il devient nécessaire de clarifier le sens du caractère « renouvelable » des sources d'énergies. Conventionnellement, cet adjectif est accolé aux sources d'énergies qui se renouvellent ou se régénèrent à l'intérieur d'un délai donné, relativement court à l'échelle humaine [3]. Ainsi, la biomasse forestière, qui peut être considérée comme l'accumulation de l'énergie solaire sous forme de structures carbonées, se renouvelle sur une période d'une quarantaine d'année et est donc considérée comme renouvelable. Il en est de même pour l'énergie hydroélectrique, qui obéit au cycle des saisons. Les ressources fossiles et nucléaires sont dites non-renouvelables.

Outre le fait que l'on puisse exploiter une ressource sans l'épuiser, il convient également de tenir compte de l'empreinte que laisse l'exploitation de cette ressource sur l'environnement. Ainsi, l'exploitation forestière, telle qu'elle est pratiquée, uniformise la flore, modifie la distribution de la faune et, selon les méthodes de culture, peut accélérer l'érosion des sols et introduire des résidus de

---

<sup>i</sup> Protection dont le but est de porter un objet métallique à un potentiel négatif par rapport à son environnement afin de prévenir sa corrosion.

pesticides dans le milieu. Il est donc clair que toutes les ressources dites renouvelables n'ont pas un effet neutre sur leur environnement immédiat.

De toutes les sources d'énergies, les énergies solaire, éolienne et marée-motrice ont les effets les moins significatifs sur leur environnement. Ces prélèvements d'énergie ne perturbent pas significativement la distribution de la ressource dans le temps ou l'espace. Par exemple, les stations marée-motrice ne modifient pas de façon notable la période de rotation de la terre et les parcs éoliens ne ralentissent pas significativement les vents au-dessus d'une région. En fait, on pourrait parler de sources d'énergie "propres". Pour les non-spécialistes, ces sources d'énergie sont celles auxquelles ont fait d'abord référence lorsqu'on parle d'énergies renouvelables. C'est donc sous cette appellation qu'elles seront désormais désignées dans cet ouvrage.

Ces sources d'énergies renouvelables souffrent toutefois d'un inconvénient majeur: elles sont intermittentes. Le vent, la lumière et le débit dû aux marées doivent être exploités selon leur disponibilité puisqu'ils n'impliquent pas de réservoir dans lequel on peut puiser au besoin, comme c'est le cas pour les hydrocarbures, l'hydroélectricité ou la biomasse. Leur disponibilité variable et intermittente est en fait l'obstacle majeur à leur exploitation. Cette variabilité rend impossible leur utilisation comme source unique à moins de leur adjoindre un élément de stockage. Par exemple, pour des applications de faible puissance telles que les stations de télécommunications et l'électrification des clôtures, on utilise parfois des panneaux photovoltaïques comme source primaire et une batterie chimique comme élément de stockage. L'ajout de cet élément de stockage augmente le coût de revient de l'électricité. C'est pourquoi les systèmes autonomes ne sont économiquement viables qu'aux endroits où le coût de l'énergie est élevé. Néanmoins, avec l'évolution actuelle des marchés de l'énergie, de nouvelles avenues s'ouvrent à l'utilisation de semblables systèmes.

### 1.1.3 Production distribuée

Au Québec, l'abondance de la ressource hydroélectrique a mené au développement de mégaprojets à de grandes distances des lieux de

consommation. Ces centrales produisent l'électricité parmi les moins chères et les moins polluantes du continent nord-américain. Or, actuellement, la reconnaissance des droits des autochtones et la plus grande conscience écologique de la population complexifient la sélection des projets visant l'augmentation de la capacité de production. On veut dorénavant revaloriser les déchets industriels (notamment les copeaux de bois laissés par l'industrie papetière) et assurer une certaine robustesse au réseau advenant un autre désastre naturel tel que le fut la crise du verglas de 1998.

Les projets pouvant répondre à ces besoins sont plus petits que les complexes hydroélectriques des années 70 et se retrouvent plus près des zones peuplées, un peu partout sur le territoire. Aux États-Unis, la puissance moyenne des centrales installées depuis 1978 n'a cessé de décroître pour atteindre 24 MW en 1990-1994 [4]. La réduction de la quantité d'énergie requise pour la production d'une unité de produit intérieur brut favorise également le rapprochement de la consommation et de la production [5].

Sur le plan politico-économique, la privatisation des entreprises énergétiques et la séparation des rôles de production et de distribution ouvrent la voie à la diversification de la production en faveur du moindre coût. Brandon présenta en 2001 [4], les prévisions du Centre de la technologie de l'énergie CANMET. Suivant cette tendance, la production québécoise se verra de plus en plus diversifiée et distribuée. Reid *et al.* [5] définissent la production distribuée comme la génération d'énergie et son introduction directement au niveau du réseau de distribution, évitant ainsi les investissements supplémentaires requis pour augmenter la capacité de transmission. C'est aussi à ce niveau que pourraient être implantées des unités de stockage.

Dans un marché dérégularisé, le prix de l'électricité variera selon l'offre et la demande et risque donc de varier avec la période de la journée. Si cette variation de prix s'avère importante, il pourrait être intéressant de stocker de l'électricité lorsque le prix est à son plus bas pour le revendre lorsque son prix augmente. Ceci représente donc une autre opportunité pour les systèmes de stockage présents dans les systèmes autonomes.

#### 1.1.4 Vers l'économie de l'hydrogène

Citons la Carte routière technologique pour l'énergie électrique canadienne produite par Industrie Canada en 2000 [6]: « En 2020, les percées technologiques importantes auront mené à des améliorations majeures des systèmes de production modulaire de l'énergie. La plupart de ces systèmes serviront à la production distribuée et utiliseront une gamme étendue de carburants permettant la production d'énergie propre, fiable, efficace et souple.[...] Les enjeux environnementaux seront de la plus haute importance. Ils modifieront le champ d'action d'ici 2020 parce que les systèmes écologiques auparavant trop coûteux seront alors économiques. »

La clé d'une telle synergie est le développement d'une forme d'énergie commune à toutes les sources, qui puisse facilement être transformée d'une forme à l'autre, qui soit économique et qui réponde aux contraintes environnementales. Ce vecteur énergétique par excellence est l'hydrogène. Il ne s'agit pas d'une source d'énergie puisqu'on ne retrouve pas d'accumulation d'hydrogène à l'état naturel sur terre. On peut toutefois le produire de diverses façons, par exemple par vaporéformage du gaz naturel ou par électrolyse de l'eau. L'hydrogène a une valeur calorifique basse (120 MJ/kg) plus élevée que les carburants usuels et peut être utilisé aussi bien dans les brûleurs catalytiques que dans les moteurs à explosion. Les produits de combustion de l'hydrogène sont exempts de gaz à effet de serre et contiennent moins d'oxyde d'azote que les produits de combustion des carburants fossiles. De plus, comme il est plus facile de stocker des molécules que des électrons, l'hydrogène, sous forme liquide ou gazeuse, permet le stockage de l'énergie. Il peut servir d'intermédiaire entre les sources d'énergies primaires (éolien, biomasse, etc.) et l'utilisation finale (carburant ou électricité). C'est pourquoi on l'appelle vecteur.

« Dans un communiqué de presse datant du 16 juillet 1998, le World Watch Institute prévoyait que les technologies renouvelables joueraient un rôle majeur d'ici 2020 et fourniraient 50% de l'énergie du monde d'ici 2050. » [6] L'usage de l'hydrogène comme vecteur énergétique est capital pour l'utilisation à grande échelle des énergies renouvelables intermittentes. Ainsi, on peut utiliser

l'électricité produite en période de surproduction pour obtenir de l'hydrogène par électrolyse. En période de sous-production, on utilise une pile à combustible ou un autre appareil de conversion afin de produire l'électricité nécessaire. De plus, l'hydrogène produit pourrait alternativement être brûlé pour fins de chauffage ou encore être transféré à bord de véhicules pour servir de carburant.

D'autre part, les technologies liées à l'hydrogène sont encore en phase de développement. Toutefois, les efforts qui leur sont dédiés sont limités par l'absence d'infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène. Or, l'établissement des infrastructures est continuellement reporté pour cause d'absence de débouchés. C'est la question de l'œuf ou de la poule; or, on sait que les deux se sont développés simultanément afin de s'adapter à l'environnement. Pour ce qui est de l'hydrogène, il revient aux gouvernements de légiférer de façon à ce que les sacrifices environnementaux découlant de l'utilisation des carburants fossiles se monnaient par une augmentation de leur coût, favorisant ainsi le développement de technologies alternatives.

#### 1.1.5 Systèmes autonomes et stockage de l'hydrogène

En 1990, Ledjeff [7] était l'un des premiers à décrire un système autonome photovoltaïque à stockage hybride. Sa simulation utilisait des batteries acide-plomb pour temporiser les variations de la charge et de la puissance produite par les panneaux photovoltaïques. À ce système de stockage à court terme était jumelé un électrolyseur afin d'assurer le stockage saisonnier. Une pile à combustible et un brûleur catalytique servaient à produire l'énergie supplémentaire au besoin à partir de l'hydrogène. Ainsi, le stock d'hydrogène était progressivement consommé en hiver pour être régénéré au cours de l'été.

Ce type de système permet d'optimiser à la fois la quantité d'énergie stockée et la puissance de stockage/récupération. En effet la première dépend de la taille du réservoir d'hydrogène alors que la deuxième est fixée indépendamment par la capacité de l'électrolyseur et de la pile [8].

Le stockage de l'hydrogène peut se faire sous plusieurs formes, soit pressurisé dans un réservoir, par liquéfaction ou encore sous forme d'hydrures



métalliques. La liquéfaction est la technique la moins efficace puisqu'il faut fournir beaucoup d'énergie pour refroidir l'hydrogène jusqu'à son point de condensation (énergie théorique de liquéfaction = 14,11 MJ/kg). Les hydrures métalliques permettent d'obtenir une plus grande densité énergétique que la liquéfaction mais ils sont lourds et coûteux. Le volume de stockage n'étant généralement pas une contrainte importante pour les systèmes autonomes, on favorise généralement les réservoirs à basse pression puisque cette technique est celle qui occasionne le moins de pertes. L'hydrogène ainsi stocké n'est pas affecté par la température, la durée du stockage, le nombre de cycle de charge/décharge et peut être complètement déchargé sans réduire la durée de vie du système [8].

Le stockage sous forme hydrogène n'est pas la seule technologie disponible mais est bien la plus intéressante pour le stockage à long terme. L'accumulation d'énergie par pompage de l'eau (centrales hydroélectriques réversibles) permet de stocker de grandes quantités d'énergie mais les sites naturels s'y prêtant sont rares. Il est en de même pour le stockage souterrain d'air comprimé. Quant à eux, les nouveaux volants d'inertie utilisant des roulements supraconducteurs sont chers et ne permettent de stocker que de petites quantités d'énergie [6]. Les batteries chimiques sont également coûteuses, se déchargent d'elle-même, ont un nombre de cycles de charge/décharge limité et représentent une menace pour l'environnement [8].

Le stockage sous forme hydrogène combine donc une grande quantité d'énergie, une bonne durée de vie comparativement aux batteries chimiques et une indifférence totale face à l'emplacement géographique [8]. Néanmoins, l'efficacité de stockage (ici définie comme le rapport de la quantité d'électricité que l'on peut récupérer sur la quantité d'électricité consommée) via l'hydrogène est faible. En effet, celle-ci est d'environ 35% alors qu'elle peut atteindre 82% pour les batteries chimiques [9]. Certains conviendront que cela n'a que peu d'importance si la source primaire est renouvelable puisque les coûts variables de ces sources sont très bas. Toutefois, pour stocker la même quantité d'énergie, il aura fallu surdimensionner les sources, affectant grandement les coûts d'investissements initiaux. Il est donc important d'améliorer l'efficacité du stockage sous forme

hydrogène afin de favoriser l'implantation de tels systèmes. Or, de tous les composants du système, la pile à combustible est le moins efficace et le moins mûr technologiquement.

### 1.1.6 Piles à combustible

Les piles à combustible sont des appareils de conversion électrochimique qui visent la production d'électricité à partir de l'oxydation contrôlée de l'hydrogène. En fait, elles dissocient physiquement les différentes étapes de la réaction, obligeant les électrons à s'échanger à travers un circuit électrique externe. C'est ce qui permet de retirer l'énergie de la réaction. Les charges positives sont échangées par l'intermédiaire d'un électrolyte dont la nature détermine le type de pile à combustible à laquelle on a affaire. Les principaux types de piles à combustible sont donnés au tableau 1-1.

**Tableau 1-1: Types de piles à combustible [10]**

<b>Types (Acronyme anglais)</b>	<b>Électrolyte</b>	<b>Température d'opération (°C)</b>	<b>Carburant</b>	<b>Efficacité globale (%)</b>
Alcaline (AFC)	Solution d'hydroxyde de potassium (KOH)	50-200	Hydrogène pur	55-65
À conversion directe du méthanol (DMFC)	Polymère	60-200	Méthanol liquide	50
Membrane polymère solide (SPEFC ou PEMFC)	Polymère	50-90	Hydrogène pur	40-55
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique	160-210	Hydrogène réformé	50-55
Acide sulfurique (SAFC)	Acide sulfurique	80-90	Alcool ou fuel reformé	-
Carbonate fondu (MCFC)	Carbonates fondus	630-650	Hydrogène, CO, gaz naturel, propane, diesel	45-55
Oxyde solide (SOFC)	Zirconium stabilisé et perovskite dopée	600-1000	Gaz naturel ou propane	50-55

Comme les piles à combustible convertissent directement l'énergie chimique en énergie électrique et calorifique, elles offrent une efficacité de

conversion beaucoup plus élevée que n'importe quel moyen de conversion thermomécanique. De plus, comme leur principe d'opération ne repose pas sur le mouvement de pièces mobiles, elles sont peu bruyantes, leur niveau de bruit correspondant approximativement à celui d'une conversation animée [10]. Aussi, l'absence de combustion élimine les émissions d'oxydes de soufre, d'oxydes d'azote, de particules et de composés organiques. Aussi, comme l'hydrogène ne contient pas de carbone, les émissions de monoxyde et de dioxyde de carbone sont nulles.

L'unité fondamentale permettant la réalisation de la réaction est appelée cellule. Chaque cellule contient au minimum deux chambres d'alimentation en réactifs, deux électrodes et un électrolyte. Les piles à combustible diffèrent des piles conventionnelles par le fait que les réactifs ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile mais lui sont acheminés de manière continue. Il est donc impossible d'épuiser une pile à combustible tant qu'on lui fournit les réactifs en quantités suffisantes.

La tension théorique que produit la réaction d'oxydo-réduction de l'hydrogène est d'environ 1,2 V mais on observe rarement une tension supérieure à 0,9 V par cellule. La différence entre ces deux valeurs correspond aux pertes, lesquelles sont dégagées sous forme de chaleur. Pour obtenir une tension de sortie plus élevée, on place en pratique un certain nombre de cellules en série, lequel nombre peut atteindre la centaine. Un tel assemblage en série porte le nom de batterie (ou « stack » en anglais). Toutefois, on lui préfère l'appellation « pile » réservant le terme « batterie » aux piles et batteries conventionnelles.

Les piles à combustible (PAC) produisent le courant tiré par la charge tant que l'alimentation en réactifs est suffisante. Néanmoins, les pertes croissent avec la densité de courant et font chuter la tension. Il est donc nécessaire de limiter ce dernier afin que la pile demeure dans un état stable. De plus, comme il s'agit de réactions électrochimiques, il faut s'assurer que les conditions propices au déroulement de celles-ci soient respectées afin de minimiser les pertes. Ces conditions dépendent du type de pile utilisé. La stratégie de régulation, qui doit garder la pile près des conditions optimales d'opération, doit également tenir

compte des nombreux auxiliaires (compresseurs, pompe, valves...) qui composent le générateur à pile à combustible (GENPAC).

## **1.2 État de la recherche**

La problématique qui précède montre bien tout l'intérêt des systèmes à énergies renouvelables utilisant l'hydrogène comme vecteur de stockage. Bien sûr, nous ne sommes pas les premiers à nous y intéresser. La section qui suit se veut un résumé des travaux de recherche publique effectués dans le domaine.

Comme mentionné auparavant, les systèmes à énergies renouvelables utilisant l'hydrogène prirent leur envol en 1990 lorsque Ledjeff [7] publia la première simulation d'un tel système. Ce dernier utilisait des panneaux photovoltaïques comme seule source d'énergie.

En 1993, Barra et Coiante [11] publièrent pour leur part une étude économique dans laquelle ils estimèrent à 0,22 USD/kWh le coût de l'électricité qui pourrait être produit par un système semblable pour une île de la Méditerranée. La plus grande partie des coûts revenait alors au coût d'acquisition des réservoirs destinés à recevoir l'hydrogène pressurisé à 30 bars. La même année, Garcia-Conde et Rosa [12] publièrent des résultats expérimentaux concernant une station de production d'hydrogène. Cette dernière est en fait la première moitié d'un système de stockage à hydrogène et est plus facile à étudier puisqu'il est encore difficile actuellement de trouver une pile à combustible sur le marché. Ils utilisèrent un électrolyseur alcalin et un convertisseur CC/CC afin de suivre le point de transfert optimal (*maximum power point tracking*) des panneaux photovoltaïques sur une période d'environ 6 mois.

L'année suivante, Hollenberg *et al.* [13] rapportèrent l'opération de la partie « production d'hydrogène et stockage par hydrure » d'un système de stockage connecté à des panneaux photovoltaïques d'une puissance totale de 150 W. Toujours en 1994, Dienhart et Siegel [14], réalisèrent une étude de faisabilité d'un système autonome stockant l'hydrogène et alimenté à partir de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes. Ils conclurent que le coût de l'électricité produite dépend grandement des conditions climatiques et des coûts d'investissements

prévus. Sous les conditions étudiées, l'énergie éolienne est moins dispendieuse que l'énergie solaire et le coût de revient de l'électricité renouvelable est abordable.

En 1995, Vanhanen et Lund [15], à la suite de la modélisation d'un système de stockage sous forme hydrogène dans son ensemble, conclurent que les caractéristiques des composants électrochimiques sont les points faibles responsables de la piètre efficacité globale du système.

En 1996, Galli et Stephanoni [16], présentèrent des résultats initiaux concernant un système de stockage à hydrogène alimenté par des panneaux photovoltaïques, stockant à l'aide d'hydrures et utilisant une pile à combustible semblable à celle utilisée à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène. Ces résultats faisaient état des caractéristiques de chacun des composants mais l'étude du système global n'était pas complétée et son opération était encore manuelle. La même année, Ibrahim *et al.* [17] rapportèrent avoir développé un modèle de système autonome à l'hydrogène utilisant une génératrice diesel comme source secondaire. Ils montrèrent que la rentabilité du projet tient à l'équilibre délicat entre la taille du générateur éolien et l'utilisation du diesel. Toujours en 1996, Cicconardi *et al.* [18] étudièrent différentes alternatives de stockage de l'hydrogène et de l'oxygène produit par électrolyse. Ils en conclurent que le stockage par hydrures métalliques est celui, parmi les cas étudiés, qui consomme le moins d'énergie suivi de près par le stockage sous pression à 20 MPa.

En 1997, Barthels *et al.* [19] rapportèrent l'opération d'un système autonome à l'hydrogène avec des panneaux photovoltaïques comme source primaire d'énergie. Dans ce système de 11.6 MWh/an, la pile à combustible compta pour 25% des pertes. La même année, Szyszka [20] rapporta l'opération sur dix ans d'une station de production d'hydrogène à laquelle s'ajoutaient la plupart des types de pile à combustible, de brûleurs catalytiques et un poste de ravitaillement d'hydrogène liquide. La conclusion majeure fut qu'aucun des systèmes n'était prêt à être mis sur le marché tel quel. De nombreux dispositifs supplémentaires (convertisseurs, purificateurs) avaient dû être ajoutés afin de pouvoir relier les différents appareils entre eux. Toujours en 1997, Lehman *et al.*

[21] rapportèrent l'opération d'un système utilisant des panneaux photovoltaïques, un électrolyseur alcalin et une pile à combustible à membrane polymère de façon continue et automatisée sur une période cumulant plus de 3900 heures (un peu moins de six mois). Le système s'était comporté de manière stable et sécuritaire pour la durée de la démonstration sauf pour ce qui est de la pile à combustible. Le fournisseur de celle-ci ne pouvant produire une pile pleinement opérationnelle, l'équipe avait dû se tourner vers la construction de ses propres prototypes.

En 1998, Torres *et al.* [22] publièrent des bilans d'énergie obtenus par simulation pour un système de stockage combiné sous forme hydrogène et par batteries utilisant des panneaux photovoltaïques comme source primaire d'énergie. Ils montrèrent que la pile à combustible n'est utilisée que pendant l'hiver, justifiant son utilisation pour le stockage à long terme. Toujours en 1998, Vanhanen *et al.* [23], obtinrent pour un système de stockage de faible puissance ( $< 1$  kW) utilisant des hydrures métalliques une efficacité globale variant entre 24 et 35%, la pile à combustible étant le maillon le moins efficace du système. Ils émirent également la recommandation de privilégier les électrolyseurs et piles à combustible à électrolyte polymère pour trois raisons. Premièrement, leur faible température de fonctionnement leur permet d'atteindre rapidement leur point d'opération optimum en opération intermittente. Deuxièmement, l'hydrogène produit par un électrolyseur à électrolyte polymère est de plus grande pureté et troisièmement, il est possible de recirculer l'hydrogène dans une pile à combustible de ce type de manière à réduire la consommation d'hydrogène pour une même puissance produite.

En 1999, Abdallah *et al.* [24] à la suite d'une étude économique, conclurent que l'Égypte pourrait devenir exportatrice d'hydrogène si elle exploitait sa filière photovoltaïque. Ce scénario d'exploitation mènerait aussi à une diminution de moitié du prix de l'hydrogène d'ici 2025, à un accroissement de la qualité de vie, à une augmentation du produit national brut égyptien et à une diminution de la pollution. La même année, Vosen et Keller [9] réalisèrent un modèle complet d'un système autonome utilisant le stockage sous forme hydrogène. Ils en conclurent que le stockage hybride est plus économique que les systèmes de stockage

utilisant seulement les batteries chimiques ou l'hydrogène. De plus, un algorithme basé sur les réseaux neuronaux et permettant de prévoir les entrées et les sorties d'énergie permet de diminuer la capacité de stockage et ainsi d'économiser 30% de leur coût, comparativement à un système géré par un algorithme de contrôle par hystérésis basé seulement sur l'état de charge.

En 2000, Rambach [25] présenta un système autonome en démonstration qui pourrait être implanté en Alaska. Il proposa de surdimensionner les apports renouvelables par rapport à la charge électrique de façon à pouvoir utiliser les surplus d'hydrogène comme carburant pour les véhicules. Cette option diminue le prix de revient du projet car le carburant est très coûteux dans cet état à cause des frais de transport. Il prétend aussi que les coûts sont dorénavant un obstacle plus important que le développement technologique en ce qui a trait à l'implantation de tels systèmes. Aussi en 2000, Dutton *et al.* [26] innovèrent en rapportant pour la première fois l'opération d'un système de production d'hydrogène par électrolyse grâce à la production électrique d'une éolienne. Ce projet explicita les problèmes de pureté de l'hydrogène produit en régime intermittent et mena à la construction d'une unité de démonstration améliorée.

En 2001, Jacobson *et al.* [27] décrivirent l'opération d'un système autonome semblable à celui de l'IRH. Ce système ne dispose cependant pas d'un convertisseur CC/CC afin d'alimenter l'électrolyseur. Cela impose donc l'opération de ce dernier en mode tout ou rien, ce qui implique soit des complications au niveau de la pureté de l'hydrogène produit, soit au niveau de l'optimisation des transferts de puissance et de l'efficacité du système.

### ***1.3 Description du projet***

Un projet de démonstration d'un système autonome basé sur les énergies renouvelables et utilisant l'hydrogène comme vecteur de stockage à long terme est en cours à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène affilié à l'Université du Québec à Trois-Rivières [28, 29, 30]. Une représentation schématique du système est donnée à la figure 1-1 et ses principaux éléments sont énumérés au tableau 1-2. Ce système comporte deux sources d'énergies renouvelables qui

alimentent un bus à courant continu via leur régulateur respectif: une éolienne à axe horizontal et des panneaux photovoltaïques. Au besoin, on peut utiliser la source Elgar pour simuler la puissance produite par les sources renouvelables sous certaines conditions de vent et d'ensoleillement.

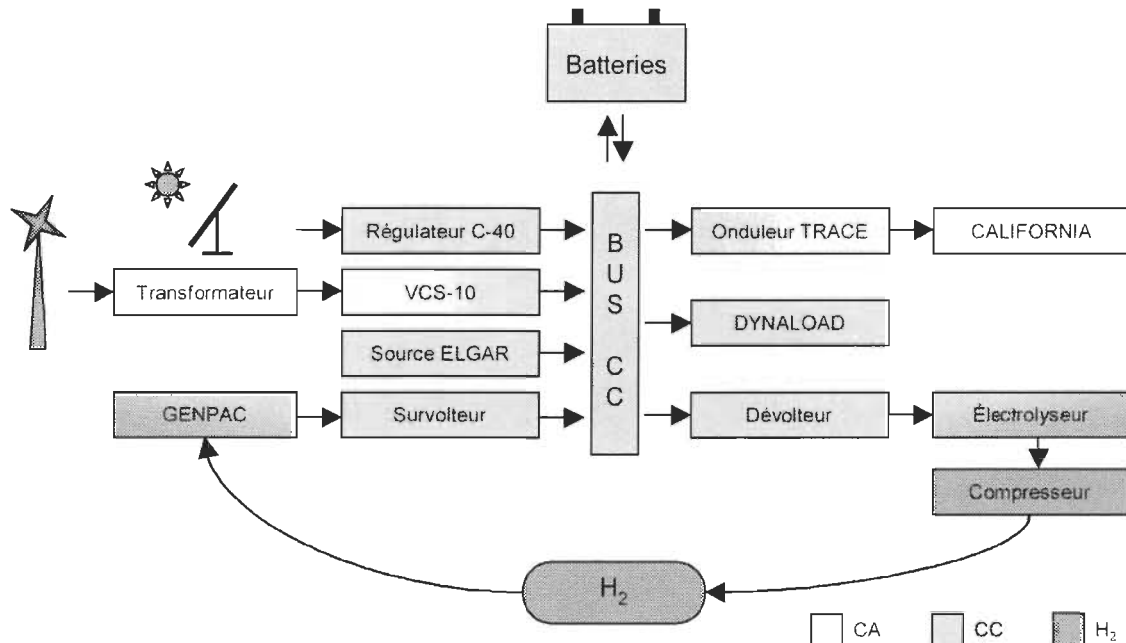


Figure 1-1: Représentation du système autonome

Tableau 1-2: Éléments du système à énergies renouvelables

Composant	Caractéristiques
Panneaux photovoltaïques	Golden Genesis GP, 1 kW pointe
Régulateur C-40	Trace Engineering, 40 A
Éolienne	Bergey BWC 10 kW, alternateur triphasé à aimant permanent, montée sur une tour de 30 m
Transformateur	Square D Company, rapport 2:1 ajustable, 30 kVA
Régulateur-redresseur VCS-10	Trace Engineering, 48 V
Source programmable CC Elgar	Elgar SW 10500, 78 A max
GENPAC	Ballard PGS-105B + MK5-E, 5 kW
Survolteur à commande multiphasée	IRH, 24-48 V, 5 kW
Onduleur	Trace Engineering, SW-5548, 5 kW
Charge programmable CA California	California Instruments, 2,5 kW, 3 kW pointe
Charge programmable CC Dynaload	TDI-Dynaload, 12 kW, refroidie à l'eau
Dévolteur à commande multiphasée	IRH, 48-36 V, 5 kW
Électrolyseur alcalin	Stuart Energy Systems, 5 kW
Compresseur	½ hp (372 W)
Réservoir d'hydrogène	10 bar, 3,8 m³ (soit environ 125 kWh [28])
Batteries acide-plomb	48 unités de 6 V en série/parallèle pour 42,24 kWh



Le bus est relié à une combinaison série-parallèle de batteries à décharge profonde. Le rôle de ces batteries est à la fois de stabiliser la tension du bus et d'effectuer le stockage à court terme de l'électricité.

La charge cible d'un tel système, que l'on peut simuler à l'aide des charges programmables California et Dynaload, peut être une station de télécommunication, un refuge en milieu isolé, un dispensaire ou toute autre utilisation nécessitant une alimentation électrique fiable pour une puissance moyenne totale de moins de 5 kW. L'organe de sortie CA est un onduleur intelligent qui fournit une tension constante de 115 V à 60 Hz.

La boucle de stockage sous forme hydrogène contient six éléments :

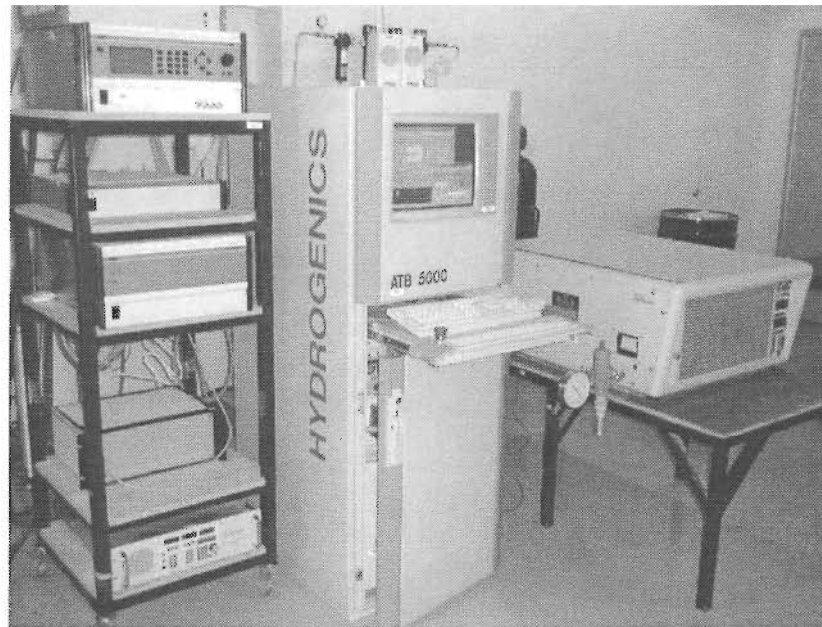
- Le convertisseur dévolteur,
- L'électrolyseur alcalin,
- Un compresseur à hydrogène,
- Un réservoir pouvant accueillir l'hydrogène pressurisé,
- Une pile à combustible Ballard MK5-E et son système auxiliaire PGS-105B formant ensemble un prototype de générateur à pile à combustible (GENPAC),
- Le convertisseur survolteur.

## ***1.4 Objectifs de recherche***

Dans ce projet, mon rôle est d'intégrer la pile à combustible au système. Pour y arriver, il faut d'abord étudier le comportement de la pile et sa réponse en fonction des différents paramètres d'opération afin de fixer les limites à respecter lors de l'automatisation du système de la pile. Cette étape permet également de se familiariser avec les caractéristiques de la technologie des PAC à membrane polymère solide et avec celles particulières au GENPAC prototype utilisé.

Une fois le GENPAC électriquement relié au système, il faut définir l'algorithme de contrôle de celui-ci et du convertisseur de puissance qui lui est associé afin d'assurer une alimentation fiable du bus CC. Cet algorithme doit également maintenir le GENPAC dans un régime stable, le tout avec un souci constant d'efficacité et de sécurité. L'automatisation du fonctionnement du GENPAC et de

son convertisseur sera réalisée à l'aide du logiciel LabView DSC de National Instrument. Pour améliorer l'efficacité de la pile à combustible, qui est actuellement le point faible du système de stockage (tel que montré en [23]), on veut aussi étudier le comportement de la pile en fonction de la concentration en oxygène de l'oxydant utilisé. L'utilisation de l'oxygène pur au lieu de l'air comme oxydant devant améliorer les performances de la pile, on veut comparer le supplément de puissance ainsi obtenu face à la dépense énergétique requise pour enrichir l'oxydant en oxygène selon diverses méthodes.



**Figure 1-2: Vue d'ensemble du GENPAC, de la station de test, de la source Elgar, du survolteur et de la charge Dynaload**

Finalement, comme l'efficacité du système autonome dépend beaucoup des caractéristiques de l'électrolyseur et du GENPAC, il est souhaitable de développer un modèle de ce dernier qui tienne compte des variations des paramètres d'opérations de la pile. Ce modèle pourra éventuellement servir à perfectionner les algorithmes de gestion du système autonome.

## **1.5 Structure du mémoire**

La première tâche effectuée, la recherche bibliographique générale se rapportant aux systèmes autonomes à énergies renouvelables, a été présentée au cours du présent chapitre.

Le chapitre 2 reprend le premier objectif, c'est-à-dire l'étude du comportement de la pile à combustible, premièrement en régime permanent, et ensuite en régime transitoire. On y expliquera en détail le fonctionnement de la pile, de son système auxiliaire et des conditions à respecter pour le bon fonctionnement de l'ensemble. On explorera ensuite les différentes mesures réalisées afin de caractériser le GENPAC. De ces résultats, on discutera de la possibilité d'utiliser le GENPAC comme unique source d'énergie (sans stockage à court terme supplémentaire) pour alimenter la charge cible du système autonome.

Le chapitre 3 reprend les caractéristiques du GENPAC et les transpose en contraintes à respecter pour l'algorithme de contrôle de celui-ci et de son convertisseur. L'algorithme répondant à ces conditions est ensuite expliqué et sa réalisation à l'intérieur de l'architecture LabView DSC est présentée. Bien sûr, les résultats de la recherche bibliographique concernant ce chapitre seront présentés au préalable.

Le chapitre 4 reprend l'étude du fonctionnement de la pile en fonction de la concentration en oxygène de l'oxydant. Cette étude a fait l'objet d'une publication dans le journal *Fuel cells, from fundamentals to systems* de Wiley-Vch.

Le chapitre 5 explique les différents modèles pouvant être utilisés dans le but de simuler le comportement de la pile à combustible. Il suggère également comment s'y prendre pour développer le modèle de la pile sous nos conditions d'expérimentation.

## **Chapitre 2: Étude du comportement de la pile à combustible**

Plusieurs publications ont vanté les caractéristiques des piles à combustible en faisant d'excellents générateurs [10,31,32]. Toutefois, la plupart de ces travaux ont été réalisés en régime permanent. En situation réelle d'opération, un générateur peut être soumis à de multiples transitoires. En effet, la charge varie avec les cycles d'arrêt et de démarrage des appareils de même qu'elle oscille autour de la charge moyenne dans le cas des charges commutées. Aussi, si le système est autonome, le fait de pouvoir répondre à ces transitoires devient un facteur clé de l'adoption ou du rejet de la technologie.

Le but de ce chapitre est donc de déterminer si les caractéristiques dynamiques de la pile à combustible en font une bonne candidate pour les systèmes autonomes. Néanmoins, il s'avère d'abord nécessaire d'expliquer les différentes composantes d'une pile à combustible et leurs interactions de façon à bien saisir l'importance des limitations qu'elles causent.

La première partie de ce chapitre sera donc consacrée aux bases du fonctionnement des piles à combustible à membrane polymère solide. Ce type de pile, due à sa faible température d'opération ( $< 100^{\circ}\text{C}$ ), permet d'atteindre rapidement la densité de puissance nominale. Les caractéristiques propres à l'unité étudiée seront ensuite exposées. Finalement, une discussion sur les performances de la pile en régime transitoire sera présentée à partir de résultats expérimentaux.

### ***2.1 Pile à membrane polymère solide***

La pile à combustible désignée pour faire partie du système autonome est du type à membrane polymère solide. Comme son nom l'indique, ce type de pile à combustible utilise comme électrolyte une membrane polymère. Celle-ci, lorsqu'elle est hydratée convenablement, permet le passage des protons. Le fonctionnement des piles hydrogène-air à électrolyte polymère est présenté dans la présente section.

### 2.1.1 Principe de fonctionnement

L'unité fonctionnelle des piles à membrane polymère solide (PEMFC) est une cellule. On peut en voir la coupe à la figure 2-1.

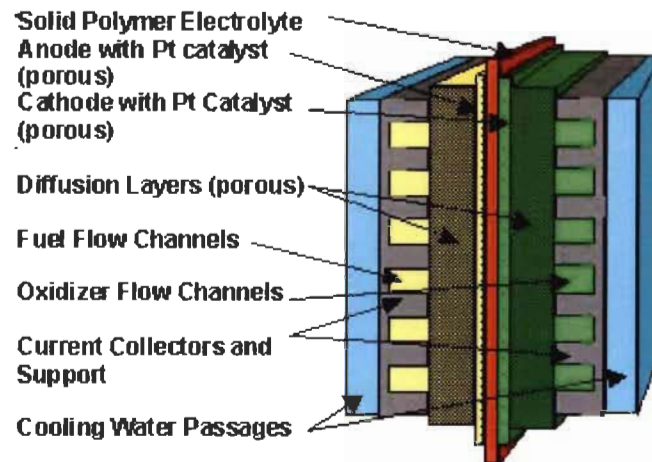


Figure 2-1: Coupe d'une cellule d'une pile à membrane polymère solide [33]

Des plaques de graphite remplissent le rôle de collecteur de courant. Ces plaques sont également pourvues de rainures, appelées canaux, dont la fonction est de distribuer les réactifs sur la section de la cellule. Ces plaques, disposées par paires, enserrant un assemblage membranaire comprenant les couches de diffusion, les électrodes et la membrane. Cet assemblage est dénommé « *membrane electrode assembly (MEA)* » en anglais.

L'hydrogène gazeux est amené à la surface de l'assemblage membranaire par les canaux du collecteur de courant de polarité négative. De là, l'hydrogène est libre de diffuser au travers la couche de diffusion (*gas diffusion layer*) pour atteindre l'anode. À la surface du catalyseur, l'hydrogène s'oxyde pour laisser la place à des protons selon la réaction suivante :



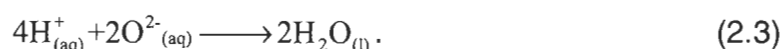
Des molécules d'eau s'adjoignent aux protons ( $\text{H}^+$ ), ce qui permet à ceux-ci d'être entraînés par le champ électrique au travers la membrane polymère. De l'autre côté de la membrane, les protons rencontrent de nouveau une couche catalysée, la cathode, où est également présent de l'air. Cet air, acheminé à cet endroit par

les canaux du collecteur de courant de polarité positive et la diffusion à travers la couche de diffusion, contient de l'oxygène qui se réduit au contact du catalyseur:



Les électrons consommés sont ceux produits à l'anode et qui se sont rendus jusqu'à la cathode en suivant le chemin : anode – couche de diffusion des gaz négative – collecteur de courant négatif – circuit électrique externe à la pile – collecteur de courant positif – couche de diffusion positive – cathode.

L'électronégativité de l'oxygène dissocié est à l'origine du champ électrique qui amène à lui les protons produits de l'autre côté de la membrane. Ainsi, les protons se combinent avec l'oxygène de l'air pour former de l'eau selon la réaction :



Il est ici important de noter que les électrodes d'une pile à membrane polymère solide ne sont pas des électrodes classiques. Il s'agit plutôt de zones où sont mis en présence trois types de régions :

- le catalyseur et son support;
- une région permettant le transfert des protons adjacente à la membrane et
- une région permettant le transfert simultané des espèces gazeuses vers l'électrode et de l'eau vers la sortie de la pile.

Il faut donc comprendre que ces conditions ne se retrouvent que dans une zone très mince, même par rapport à l'épaisseur de la membrane.

### 2.1.2 Assemblage membranaire

La figure 2-2 montre le détail de l'assemblage membranaire enserré entre les collecteurs de courant.

Les **couches de diffusion** sont constituées d'un conducteur électrique poreux réalisé à partir de matériaux graphitiques. Ces matériaux sont rendus hydrophobes, généralement par imprégnation avec une solution de Téflon, afin d'éviter l'accumulation d'eau dans les pores du matériau. La couche de diffusion permet la diffusion des réactifs sur toute la surface de la membrane.

Le **catalyseur** est la seule surface sur laquelle la réaction peut se produire. Généralement de platine, le catalyseur représente une part importante du coût d'une pile à électrolyte polymère solide. Les premiers prototypes de ces piles pouvaient contenir jusqu'à 8 mg/cm<sup>2</sup> de platine par électrode [35]. Aujourd'hui, grâce notamment à une meilleure dispersion des particules de catalyseur, on obtient des résultats satisfaisant avec des teneurs aussi basses que 0,12 mg/cm<sup>2</sup> [36]. Le catalyseur se doit d'avoir un contact électrique direct avec la couche de diffusion afin d'assurer la continuité du circuit électrique.

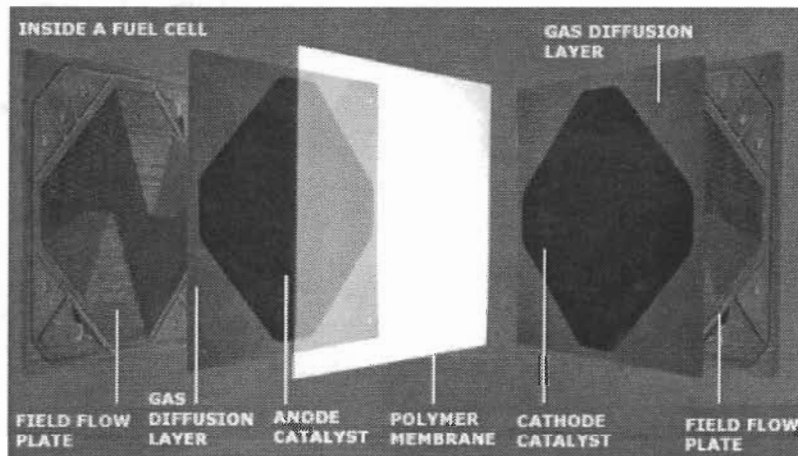


Figure 2-2: Détail de l'assemblage membranaire et des canaux de distribution [34]

La **membrane** est constituée d'une structure polymère dense sur laquelle sont attachés des groupements sulfonés. Ceux-ci, contrairement au reste du polymère, sont fortement polaires. Suite à sa fabrication, la membrane n'est pas conductrice de protons; elle doit être hydratée afin que des molécules d'eau se fixent aux groupements sulfonés, créant ainsi des zones polaires, hydrophiles et contiguës. Le regroupement de ces zones forme un réseau de canaux par lesquels des cations (en l'occurrence les protons) peuvent voyager d'une face à l'autre de la membrane.

L'épaisseur de la membrane est l'un des paramètres majeurs des assemblages membranaires. En effet, plus la membrane est mince, moindre est la résistance au passage des protons. Toutefois, une membrane plus mince est plus sensible aux chocs mécaniques (notamment ceux dus aux variations de pression entre les deux faces de la membrane et à la dilatation thermique) et offre

moins de résistance à la diffusion des réactifs. Cette diffusion est à éviter puisque si la réaction se produit sans la barrière physique que représente la membrane, le potentiel produit est perdu, réduisant ainsi l'efficacité de la conversion. Une membrane populaire, le Nafion 112, a une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.3 Stœchiométrie des réactifs

La quantité de réactifs purs consommée par la pile à combustible est bien entendu proportionnelle au courant produit par la pile. Cette quantité, ou débit, exprimée en litre standard par minute<sup>ii</sup> (slpm) est définie par :

$$\dot{Q}_x = \frac{\Re T}{\zeta} \frac{NI}{\Im n_x} = 1,39 \times 10^{-2} \frac{NI}{n_x} \quad (2.4)$$

où  $n_x$  vaut 2 pour l'hydrogène et 4 pour l'oxygène.

La stœchiométrie d'un réactif est définie comme le rapport entre le débit dudit réactif introduit dans la pile et le débit réellement consommé par la réaction.

$$\text{stoechiométrie} = \frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_{x,\text{consommée}}} \quad (2.5)$$

L'efficacité de la pile à combustible est définie comme le rapport de la quantité d'énergie électrique produite par la pile sur la quantité d'énergie (LHV, énergie libre de Gibbs) chimique contenue dans le carburant utilisé.

$$\eta_{\text{pile}} = \frac{P_{\text{élec}}}{P_{H_2}} = \frac{V \cdot I}{\frac{LHV \cdot N \cdot I}{2 \cdot F}} = \frac{2 \cdot F \cdot V}{LHV \cdot N} \quad (2.6)$$

Si on veut obtenir l'efficacité du générateur à pile à combustible, il faut retrancher la puissance consommée par les auxiliaires du système de la puissance produite par le générateur.

$$\eta_{\text{gén}} = \frac{P_{\text{élec}} - P_{\text{pertes}}}{P_{H_2}} \quad (2.7)$$

Or, la majeure partie de la consommation de ces auxiliaires revient à l'alimentation en air si la pile fonctionne avec des réactifs pressurisés (voir le tableaux 4.1 et 4.2,

---

<sup>ii</sup> Dans l'industrie gazière, le slpm est une unité de débit massique équivalente au débit volumique que représenterait la masse de gaz sous les conditions normales (1 atm, 20°C).



AIR). Ainsi, afin d'avoir une bonne efficacité, il est nécessaire d'opérer la pile avec des stœchiométries aussi faibles que possible, voir unitaires, afin de minimiser les débits. Toutefois, cette option n'est pas réalisable en pratique puisqu'il en résulterait une concentration nulle des réactifs à la sortie de la pile. L'équation de Nerst de la réaction globale



et donnant le potentiel théorique d'une cellule est donnée par:

$$E_{Nerst} = E^0 + (\mathcal{R}T/2\mathcal{F}) \ln[p_{\text{H}_2}] + (\mathcal{R}T/2\mathcal{F}) \ln[p_{\text{O}_2}^{1/2}]. \quad (2.9)$$

Il est à noter que les pressions partielles sont données par le produit de la pression du mélange de gaz (ici constante) par la concentration de l'espèce dans ce mélange. D'après cette équation, la tension chuterait abruptement à l'extrémité du canal, lorsque les concentrations tendent vers zéro. Or, comme la tension se doit d'être plus ou moins constante dans la section de la cellule, la tension de celle-ci s'en trouverait grandement affectée. Il est donc nécessaire d'utiliser des stœchiométries plus élevées (1,1 à 1,2) de façon à éviter l'effet pernicieux du logarithme près de la concentration nulle en fin de canal.

#### 2.1.4 Gestion de l'eau à l'intérieur de la pile

Le seul produit de la réaction globale (équ. 2.8) est donc de l'eau qui doit bien entendu être évacuée hors de la pile. L'eau est produite à la cathode, ce qui induit un gradient de concentration depuis ce point. L'eau sera donc poussée à s'éloigner de la cathode, ce qu'elle peut faire dans deux directions. Une partie de l'eau est donc poussée jusqu'à l'interface entre la couche de diffusion et les canaux de la cathode. C'est pourquoi la modulation du débit d'oxydant permet d'évacuer les surplus d'eau. Le gradient de concentration pousse l'autre partie de l'eau produite à diffuser à travers la membrane pour atteindre l'anode.

À fort courant, un autre effet entre en jeu. Lors de son parcours au travers de la membrane, le proton entraîne un certain nombre de molécules d'eau. L'eau est donc tirée vers la cathode ce qui a l'effet contraire de la diffusion traitée au paragraphe précédent. L'effet d'entraînement des protons (appelé *osmotic drag*)

prend plus d'importance à fort courant et peut causer l'assèchement de l'anode si l'hydrogène n'est pas humidifié convenablement.

Comme le moteur de l'évacuation de l'eau à l'extérieur de l'assemblage membranaire est le gradient de concentration d'eau entre la membrane et les réactifs, il est possible, et même nécessaire, que le taux d'humidité des réactifs soit ajusté de manière à ce que le gradient mène à des conditions stables d'humidification. En effet, si les réactifs étaient secs, l'eau de la réaction et celle contenue dans la membrane seraient vivement sollicitées afin de rejoindre les réactifs. Selon la nature de la membrane, un assèchement partiel ou même total pourrait se produire et compromettre sérieusement le fonctionnement et même l'intégrité de la pile. Ainsi, les GENPAC stationnaires, pour lesquels l'efficacité importe plus que la dimension ou la masse des équipements, sont souvent munis d'humidificateurs qui ont pour rôle d'amener les débits de réactifs au taux d'humidité souhaité avant de pénétrer à l'intérieur de la pile. Généralement, les réactifs sont saturés en eau à leur arrivée aux cellules. Ceci permet aux membranes de maintenir leur état d'humidification. Néanmoins, la force résultante appliquée sur l'eau produite par la réaction est plutôt faible et, selon les designs particuliers, peut nécessiter des artifices pour mener à bien l'élimination des quantités d'eau supplémentaires produites à fort courant.

### 2.1.5 Courbes de polarisation

La courbe de polarisation d'une pile à combustible est la courbe exprimant la relation courant-tension de la pile. C'est avec cette courbe que l'on obtient les informations concernant l'efficacité et la puissance de la pile. Ces courbes sont de première importance si on veut diagnostiquer les défaillances reliées aux phénomènes électrochimiques. Les courbes de polarisation normalisées par rapport au nombre de cellules et à leur surface active permettent également de comparer les PAC entre elles.

Tel que montré à la figure 2-3, la tension d'une cellule  $V_{cell}$  est égale à la somme de 4 éléments :

$$V_{cell} = E_{Nerst} + \sigma_{act} + \sigma_{ohm} + \sigma_{conc} , \quad (2.10)$$

où  $E_{Nerst}$  est la tension théorique de la réaction,  $\sigma_{act}$  représente les surtensions d'activation à l'anode et à la cathode,  $\sigma_{ohm}$  sont les pertes ohmiques et  $\sigma_{conc}$  est la surtension de concentration.

Lorsque le circuit électrique de la pile est ouvert, la tension de celle-ci tend vers la tension théorique de la réaction. Celle-ci est donnée par l'équation de Nerst exprimée à l'équation 2.9. Elle dépend donc des pressions partielles des réactifs et de la température de la cellule.

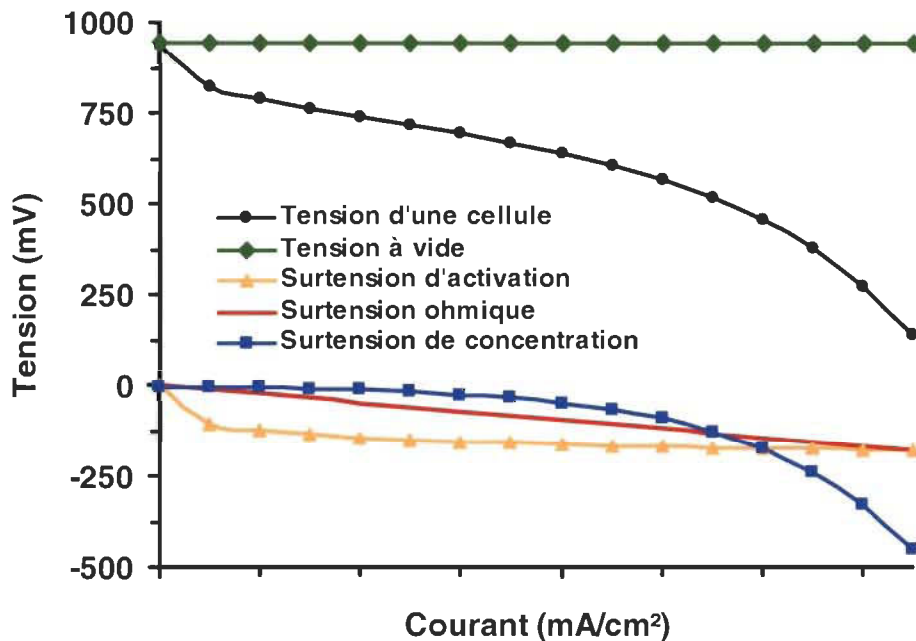


Figure 2-3: Contribution des différentes surtensions

Dès que le circuit de la pile se ferme, même si le courant est très faible, les surtensions d'activation entrent en jeu. Celles-ci sont dues au potentiel nécessaire à l'activation des courants d'échange requis à l'opération des sites réactionnels. Pour les piles hydrogène-air, la surtension d'activation à la cathode dépasse la surtension d'activation de l'anode. Ces surtensions sont en quelque sorte une barrière de tension qu'il faut franchir afin que la réaction puisse se produire. La hauteur de la barrière, la perte de tension, demeure essentiellement la même peu importe le nombre de molécules prenant part à la réaction (*i.e.* le courant produit).

Avec l'augmentation du courant, les pertes ohmiques engendrent une chute de tension de plus en plus grande. Les pertes ohmiques proviennent de deux types de résistances. La première est liée au passage des protons à travers la membrane. La seconde est liée au passage des électrons d'un collecteur de courant à l'autre et est de moindre importance que la première. La résistance protonique est bien entendu largement dépendante du niveau d'hydratation de la membrane.

La surtension de concentration devient importante à fort courant. C'est à ce moment que la pression partielle d'eau devient suffisamment importante pour affecter significativement celle de l'oxygène et restreindre l'accès de ce dernier aux sites réactionnels. Lorsqu'on atteint cette région de courant, la tension et l'efficacité de conversion s'effondrent rapidement. C'est pourquoi on évite en pratique les très forts courants.

Avec toutes ces pertes, il est clair que de la chaleur s'accumulerait dans la pile. C'est pourquoi un système de refroidissement, soit à l'air ou liquide, doit faire partie intégrante du générateur. La tension produite par une pile augmente avec la température. Néanmoins, passé les environs de 80°C, les problèmes d'humidification sont plus susceptibles de se produire, et l'efficacité commence à chuter [35]. La figure 2-4 montre des courbes de polarisation en fonction de la température.

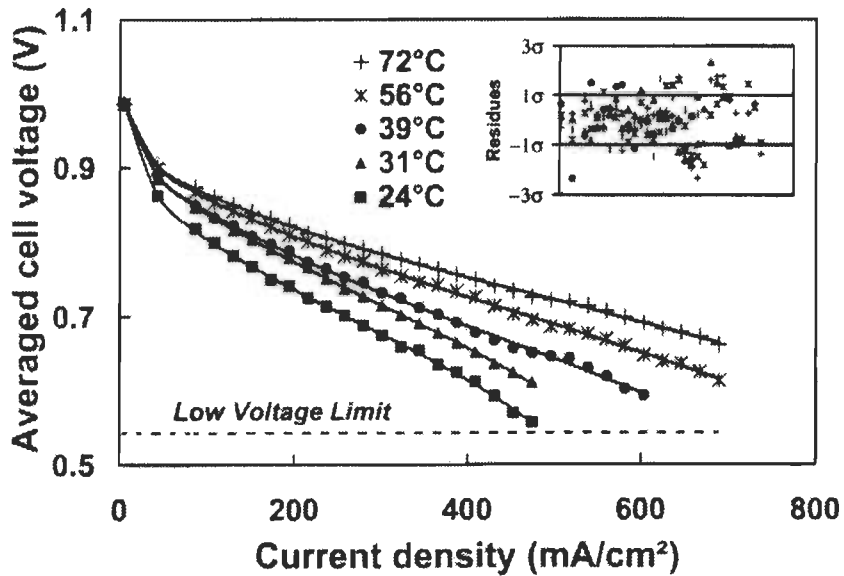
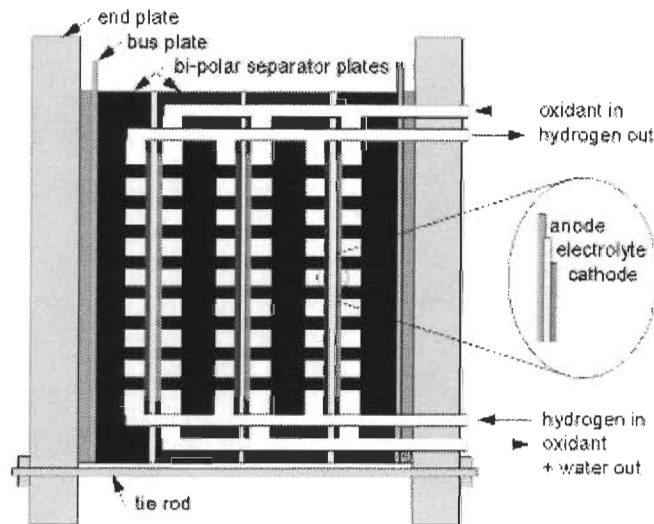


Figure 2-4: Courbes de polarisation en fonction de la température [37]

### 2.1.6 Assemblages multicellulaires

Parce qu'elles ne peuvent produire plus d'un volt de tension, les piles à combustible ne sont pour ainsi dire jamais utilisées de façon individuelle. Elles sont regroupées en assemblages multicellulaires ou piles. Ces assemblages forment la quasi-totalité des générateurs s'appuyant sur la technologies des piles à combustible, c'est pourquoi le terme « pile » sert à désigner autant les assemblages multicellulaires que les PAC composées d'une seule cellule. À l'intérieur d'un assemblage multicellulaire, les cellules sont électriquement reliées en série et sont alimentées en réactif de façon parallèle, comme on peut le voir à la figure 2-5.



**Figure 2-5: Schéma d'une pile avec plaques bipolaires [38]**

Dans le type d'assemblage bipolaire, les plaques collectrices de courant ont deux polarités relatives : elles sont positives pour une cellule et négatives pour la cellule suivante. Ce type d'empilement est utilisé pour la pile MK5 de Ballard Power Systems. Entre chaque groupe bipolaire de deux cellules est aussi intercalée une plaque permettant la circulation de l'eau de refroidissement.

Les assemblages multicellulaires ont des caractéristiques qui rendent leur opération légèrement différente des PAC composées d'une seule cellule. Les réactifs sont amenés aux différentes cellules constituant la pile par un simple distributeur. Les cellules étant toutes similaires mais n'offrant pas exactement la même résistance au passage du réactif dans ses canaux, les débits parcourant les dits canaux ne sont pas tous identiques et peuvent varier selon les conditions particulières à chaque cellule. Dans les montages multicellulaires, les variations de conditions telles que l'humidification et la température ne sont pas observables seulement dans la section de la cellule mais aussi d'une cellule à l'autre. Il est donc tout à fait concevable d'observer des conditions de surhumidification à un bout de la pile alors que l'autre extrémité est en situation d'assèchement. Dû à cette plus grande variabilité, l'étude des assemblages multicellulaires est plus difficile que l'étude des cellules seules et cela se reflète dans la disponibilité de la littérature.

### 2.1.7 Modes de défaillance

Un certain nombre de conditions mettant en péril soit l'intégrité de la pile à combustible soit la sécurité des installations peuvent se présenter lors de l'opération d'une pile à combustible à membrane polymère solide. Ces conditions doivent être reconnues et évitées. La liste suivante a été construite à partir de mon expérience personnelle avec les PAC et complétée à partir de la littérature, soit principalement à partir de brevets.

#### *a) Renversement de la polarité d'une cellule*

Un aspect critique du fonctionnement de la pile à combustible à membrane polymère solide est en lien direct avec la gestion de l'eau à l'intérieur de celle-ci. Il s'agit de l'humidification adéquate de la membrane. Lorsqu'une portion de la membrane n'est pas humidifiée adéquatement, sa résistivité augmente et les pertes thermiques qui y sont associées également. Avec l'élévation de la température, l'évaporation de l'eau s'accélère, initiant un cercle vicieux d'assèchement de la membrane. Lorsque le potentiel de la cellule a chuté suffisamment, la réaction souhaitée s'interrompt au profit de la réaction inverse, l'hydrolyse. La cellule est alors alimentée en tension par ses voisines et scinde les molécules d'eau qui se présentent à la cathode. La résistivité de la membrane demeure élevée et les possibilités de retour à la normale par hydratation supplémentaire sont vouées à l'échec. Si le renversement de polarité perdure, des dommages permanents seront causés à la membrane. Il s'agit donc d'une situation qu'il faut consciencieusement éviter.

Pour ramener la situation à la normale, il faut permettre l'augmentation de la tension de la cellule vers la bonne polarité. Ceci est effectué en pratique en réduisant le courant demandé à la pile. Ainsi, les différentes pertes diminuent, et la pile peut retrouver la bonne polarité malgré une résistance élevée. En conservant un faible courant, la réaction produira progressivement de l'eau qui sera absorbée par la membrane pour éventuellement rencontrer des conditions d'humidification plus adéquates.

### *b) Assèchement de la membrane*

Il s'agit de la première phase du renversement de polarité et elle est reconnue par une diminution de la tension aux bornes d'une cellule. Une plus grande humidification, que ce soit par la réduction du débit d'oxydant ou par l'augmentation de son taux d'humidité, permet généralement de rétablir la situation si elle est détectée assez tôt. Si rien n'est fait, le renversement de polarité est à craindre.

### *c) Saturation des pores de la couche de diffusion*

L'accumulation d'eau dans la couche de diffusion a pour effet de bloquer ses pores et de même l'accès des réactifs aux sites réactionnels. La saturation des pores a donc le même effet que la diminution de la concentration des réactifs, c'est-à-dire, la diminution de la tension produite.

### *d) Fuite interne*

Une fuite interne se produit lorsque les réactifs peuvent entrer directement en contact ou se mélanger une fois à l'intérieur de la pile. Généralement, une telle fuite se produit à travers la membrane. Celle-ci peut s'être fissurée suite à des chocs mécaniques, à un frottement contre des aspérités, ou encore suite au développement de trous d'épingles, aussi appelés « *pin-holes* ». Ceux-ci ont tendance à se développer plus facilement à travers les membranes minces et lorsque la membrane souffre d'un assèchement. Encore, lorsque la pile a été inutilisée sur une période prolongée, la membrane a perdu de son eau et gagnera légèrement en volume avec l'absorption subséquente de l'eau produite. Ce stress dimensionnel, jumelé à la dilatation thermique sur la gamme de température d'utilisation de la pile (entre 20 et 90°C), peut accélérer la détérioration de la membrane.

Une fuite interne agit sur deux plans. Premièrement, comme les réactifs ne sont plus séparés par la membrane, ils auront tendance à réagir simultanément sur le même site réactionnel. L'échange des charges électriques se produisant ainsi sans l'intermédiaire du circuit externe, le potentiel enregistré aux bornes de la



cellule fautive peut chuter significativement. De plus, les gaz mélangés peuvent réagir violemment au contact du catalyseur. Il s'ensuit une production rapide de chaleur et une élévation locale de la température qui fragilise le précaire équilibre de la distribution de l'eau.

La fuite interne peut être détectée par la présence résiduelle de réactifs dans les gaz d'échappement de la pile. Par exemple, la détection d'azote dans l'hydrogène à la sortie de la pile est un signe révélateur. Toutefois, ces mesures sont ardues et dispendieuses. Un diagnostic plus simple peut être établi en variant la pression d'admission des deux réactifs. Lorsque ceux-ci sont admis à la même pression, l'échange de gaz par l'ouverture devrait être minime et l'effet sur la tension de la cellule tout autant négligeable. Toutefois, dès que les pressions se différencient, on devrait observer une chute de tension aux bornes de la cellule affectée [39, 40].

Il n'existe pas de solution simple pour colmater les fuites. Même si certains rêvent de pouvoir condamner la cellule fautive, l'état actuel de la technologie ne le permet pas. Une cellule ayant un taux de fuite significatif entraîne la mise hors fonction de la PAC et requiert sa reconstruction.

#### *e) Fuite externe*

Une fuite externe se produit lorsqu'un des fluides traversant la pile se fraie un chemin vers l'extérieur là où il ne devrait pas en avoir. Si seulement une faible proportion du débit du dit fluide emprunte l'ouverture, l'effet sur la tension de la pile peut-être minime et difficilement décelable. On pourra noter, tout au mieux, une augmentation des débits. Toutefois, la présence de ces fluides dans l'environnement de la pile peut représenter un risque important, surtout si on parle d'eau, d'hydrogène ou d'oxygène pur. Les critères qui fixeront l'arrêt de la pile (puisque'il n'existe pas d'autre solution que la reconstruction de celle-ci) dépendront donc beaucoup plus des normes de sécurité à respecter que des critères de préservation de la pile elle-même.

Les fuites externes peuvent être causées par l'usure des joints d'étanchéité, un relâchement de la pression exercée sur l'empilement ou encore par le bris des plaques collectrices de courant, qui craignent le gel et les chocs mécaniques.

#### *f) Impureté des réactifs*

Du côté de l'hydrogène, on craint habituellement l'accumulation de monoxyde de carbone sur le catalyseur. Ce monoxyde de carbone est produit lors du reformage, c'est-à-dire lors de la production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures. Le monoxyde de carbone a une grande affinité pour le platine mais ne réagit pas à son contact. Ainsi, en présence d'un carburant contaminé au monoxyde de carbone, le platine se couvre progressivement de celui-ci, bloquant ainsi la réaction de l'hydrogène. L'effet est le même que la diminution de la quantité de catalyseur par unité de surface. En présence d'une faible quantité d'oxygène, le monoxyde de carbone lié se transforme en dioxyde de carbone libre [41]. L'effet est donc réversible. Toutefois, d'autres contaminants, tels le sulfure d'hydrogène, ne peuvent être délogés des sites réactionnels.

Du côté de l'oxydant, on craint moins les contaminants puisque l'oxygène peut en oxyder la plupart. Néanmoins, il faut veiller à filtrer les hydrocarbures laissés par les compresseurs.

La plupart des contaminants ont un effet cumulatif et l'exposition à des concentrations même faibles peut mener à une dégradation des performances de la pile à plus ou moins long terme.

## ***2.2 Caractéristiques du GENPAC utilisé***

Ce générateur est composé d'une pile à combustible MK5-E et de son système auxiliaire PGS-105B. Ce système auxiliaire effectue une partie des tâches nécessaires à l'opération de la PAC. Il est muni de quatre interrupteurs enclenchant les séquences de démarrage, d'arrêt et de la mise sous-circuit/hors-circuit du générateur. Il est possible de contrôler ces interrupteurs à distance à l'aide de connexions électriques appropriées.

L'humidification des réactifs est réalisée à l'intérieur même de la pile dans une section réservée à cet effet. L'humidification se fait au contact de membranes perméables dont une des faces est en contact direct avec le circuit d'eau de refroidissement. Comme il s'agit d'un dispositif passif, il est impossible d'influer sur la quantité d'eau transmise aux réactifs.

Le circuit d'alimentation en oxydant amène directement ce dernier dans la pile. À la sortie de celle-ci, l'eau qu'il a entraînée est récupérée par une trappe à eau et un robinet à pression constante régule le débit de sortie de façon à maintenir une pression d'air constante à la cathode. Le débit d'air traversant la pile doit donc être fixé, de manière externe au générateur, par le débit d'air amené en surpression à l'entrée de celui-ci.

Pour tirer profit de la haute pureté de l'hydrogène utilisé, une boucle de recirculation de l'hydrogène est implantée autour de la pile. Un filtre dé-ionisant, une trappe à eau et une pompe à membrane relie la sortie de l'anode à son entrée. Cette boucle est aussi reliée à l'arrivée d'hydrogène du générateur afin d'y puiser de l'hydrogène supplémentaire au besoin. Ce dispositif a pour but de faire circuler au travers de la pile un débit correspondant à une stœchiométrie supérieure à l'unité alors que le débit entrant dans le générateur est égal à celui consommé par la pile. On obtient ainsi une meilleure efficacité. De plus, comme l'hydrogène utilisé n'est pas de pureté irréprochable, une purge périodique ouvre la boucle de recirculation de façon à remplacer une partie de l'hydrogène captif par de l'hydrogène frais.

Le circuit de refroidissement assure le respect de la limite supérieure de température de la pile. L'eau produite par la réaction est récupérée parmi les réactifs inutilisés à la sortie de la pile et est envoyée vers un réservoir tampon. C'est de ce réservoir qu'est pompée l'eau de refroidissement vers la pile. Une valve dévie au besoin l'eau vers un radiateur où des ventilateurs sont activés automatiquement pour faciliter le transfert de chaleur. Comme la pile produit constamment de l'eau lorsqu'elle est en opération, aucune source extérieure d'eau n'est requise. Une sortie d'eau est toutefois présente afin d'éliminer l'eau produite avant d'excéder la capacité du réservoir tampon.

Le GENPAC comprend également un régulateur de tension de faible puissance permettant d'alimenter les auxiliaires du générateur (pompes, valves, ventilateurs, affichage, etc.). Le circuit de puissance de la pile est relié directement aux bornes du générateur, sans régulation. La tension de sortie peut varier entre 20 et 34 V.

Le générateur comprend également un système de sécurité le mettant automatiquement hors-fonction si la tension totale de la pile, c'est-à-dire la somme des tensions des 35 cellules la composant, chute sous les 19 V.

### ***2.3 Étude du générateur en régime dynamique***

De nombreuses études en régime stationnaire ont déjà été réalisées au sujet des piles à combustible à électrolyte polymère solide. Ce régime stipule qu'avant chaque mesure, la pile a été opérée suffisamment longtemps sous les conditions de tests pour que ses caractéristiques macroscopiques (telles que la tension et la température) se soient stabilisées. Selon le niveau de stabilité recherché, cela peut prendre de une à plusieurs heures. Bien qu'utiles afin de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques agissant dans la pile, ces données ne reflètent pas les conditions réelles d'opérations auxquelles sont soumises les piles, sauf pour les installations stationnaires reliées au réseau. L'intérêt est donc d'investiguer les caractéristiques du générateur en régime dynamique.

En se basant sur les conditions réelles auxquelles le générateur pourrait avoir à faire face, on peut diviser le régime dynamique selon deux sources de transitoires :

- les transitoires rapides de faible amplitude
- et les transitoires peu fréquents de grande amplitude.

Le premier cas est relié à l'utilisation d'un hacheur, pouvant faire partie d'un onduleur ou d'un convertisseur survolteur, alors que le deuxième est lié à la variation de l'amplitude de la charge.

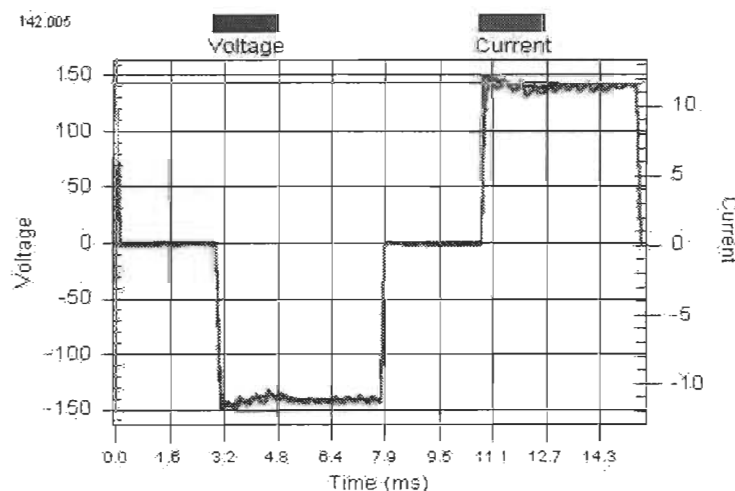
Il est d'intérêt de vérifier l'effet de ces transitoires sur le comportement du GENPAC. D'abord, on peut se donner une idée de ces transitoires en réalisant

une analyse harmonique sommaire de la sortie de la pile. Ensuite, on jugera de l'impact de ces transitoires selon que l'opération du GENPAC s'en trouve perturbée ou non.

Pour les séries de mesure exécutées, les formes d'ondes sont recueillies avec un oscilloscope numérique Tektronix TDS-210. La tension est obtenue directement aux bornes de la pile alors que le courant est relevé par le biais d'une résistance shunt de 0,10145 mΩ. Avant chaque mesure, la pile est amenée près de sa température normale d'opération à l'aide de la charge programmable à courant continu Dynaload alors branchée en parallèle avec la pile.

### 2.3.1 Transitoires rapides de faible amplitude

Ces transitoires sont causés par les hacheurs. Un premier essai est réalisé en branchant directement un onduleur sur la sortie de la pile. Il s'agit d'un onduleur modèle 1500 fabriqué par Enerwatt. Celui-ci peut produire en continu une puissance de 1500 W sous une tension de 110 V, 60±3 Hz. Il a été conçu pour fonctionner avec une tension d'entrée nominale de 24 V. La charge CA de California Instrument permettant de mesurer la forme d'onde à son entrée, on peut observer la sortie de l'onduleur Enerwatt. Pour une charge de 1000 W, en mode puissance constante et avec le facteur de puissance maintenu à l'unité, on obtient la figure 2-6 comme résultat:



**Figure 2-6: Sortie de l'onduleur Enerwatt pour une charge de 1000 W**

Tel que lu sur la charge California, la forme d'onde presque carrée amène des taux de distorsion harmonique de courant et de tensions fluctuant autour de 32%.

Dans les mêmes conditions, on a obtenu, à la sortie de la pile alors à 67°C , les mesures illustrées par les figures 2-7 et 2-8 et résumées au tableau 2-1.

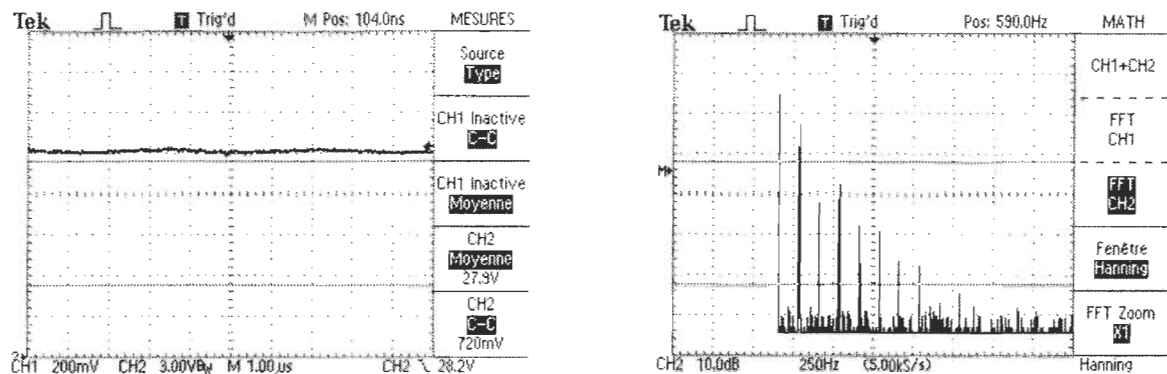


Figure 2-7: Tension à la sortie de la pile et sa transformée de Fourier

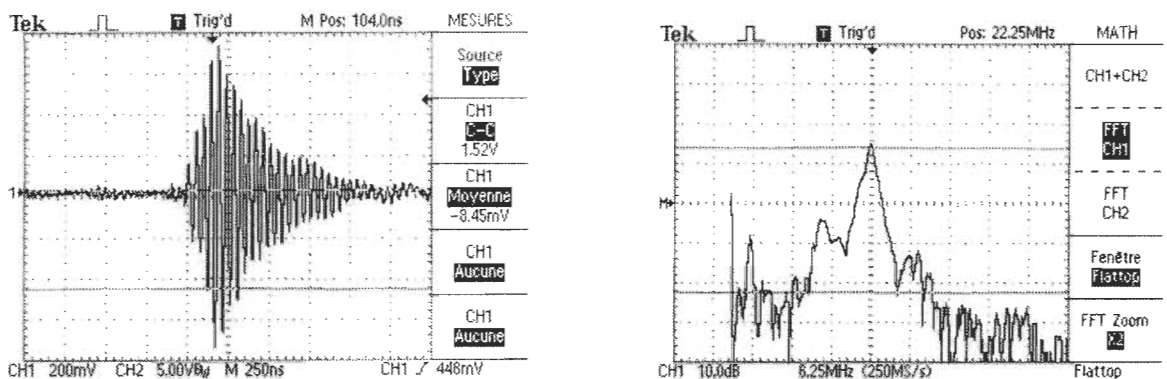


Figure 2-8: Courant à la sortie de la pile et sa transformée de Fourier

Tableau 2-1: Sommaire des figures 2-7 et 2-8

	Tension	Courant
Valeur maximale	28,26 V	7575 A
Valeur moyenne	27,90 V	83 A
Valeur minimale	27,54 V	-7408 A
Échelle	3 V/div	1971 A/div

Il était difficile de synchroniser le déclenchement de l'oscilloscope sur les ondes. Comme le signal de courant est de très petite amplitude, le rapport signal sur bruit est faible. En fait, le bruit est tel que les valeurs maximales et minimales

obtenues sont complètement farfelues. Le spectre en fréquence du courant est aussi caractéristique d'un bruit important. La valeur moyenne est elle aussi erronée puisqu'on devrait retrouver un courant moyen d'environ 43 A afin de fournir les 1200 W correspondant approximativement à la somme de la puissance ondulée et de la consommation des auxiliaires. Il est donc clair que le signal de courant obtenu grâce au shunt ne peut servir d'indicateur fiable. On doit donc se rabattre exclusivement sur le signal de tension, ce qui tout de même suffisant pour apprécier l'amplitude des transitoires.

Bien que filtré, c'est bien ce signal de courant qui est utilisé pour fixer le débit d'oxydant. Sur l'affichage du générateur, la valeur fluctuait constamment. Toutefois, le système d'acquisition contrôlant le générateur n'était pas perturbé par ces transitoires. Il ne faut pas s'inquiéter de voir les réactifs administrés à la pile selon le courant moyen plutôt que selon le courant instantané. En effet, le volume de réactifs contenu à l'intérieur de la pile suffit à compenser les rapides variations périodiques du débit consommé par la pile.

La tension observée a quant à elle une forme légèrement triangulaire. La transformée de Fourier du signal a permis d'en extraire la fréquence et l'amplitude des harmoniques. Celles-ci sont données dans le tableau 2-1. L'ordre des harmoniques a été donné par rapport à la fondamentale ondulée bien que celle-ci soit absente du signal mesuré (sortie CC de la pile). L'harmonique de plus grande amplitude ne correspond qu'à environ 3 % du signal CC. En fait, outre les fluctuations des indicateurs, le générateur ne montrait aucun signe de fonctionnement inhabituel.

**Tableau 2-2: Amplitude des harmoniques de tension à la sortie de la pile lorsque connectée à l'onduleur Enerwatt**

Harmonique					
0	2	4	6	8	10
CC	125 Hz	250 Hz	375 Hz	500 Hz	627 Hz
27,9 V	0,974 V	0,107 V	0,186 V	0,059 V	0,039 V

Or, en pratique au sein du système autonome de l'IRH, la pile est reliée au bus CC par le biais d'un convertisseur survolteur à commande multiphasée. L'étude des transitoires doit donc comporter l'interaction de la pile avec cet appareil. On s'intéresse d'abord à la sortie de la pile lorsqu'il n'y a pas d'autre hacheur que le convertisseur survolteur en fonction dans le système. Ce scénario correspond en fait à la charge des batteries à l'aide de la pile à combustible lorsque aucune charge n'est appliquée au système et que la production de l'éolienne et des panneaux solaires est nulle.

Le convertisseur survolteur est construit de façon à recevoir une consigne numérique variant entre 127 et 255. Cette consigne correspond en fait à un rapport cyclique qui croît avec la valeur de la consigne. Les tensions ont été obtenues pour des consignes de 150 et 210, correspondant approximativement à des puissances respectives de 1100 et 2700 W (voir les figures 2-9, 2-10 et le tableau 2-3). Les courants, inutilisables à cause du fort niveau de bruit, ne sont pas reproduits ici. La fréquence et l'amplitude des harmoniques de ces résultats sont données au tableau 2-5.

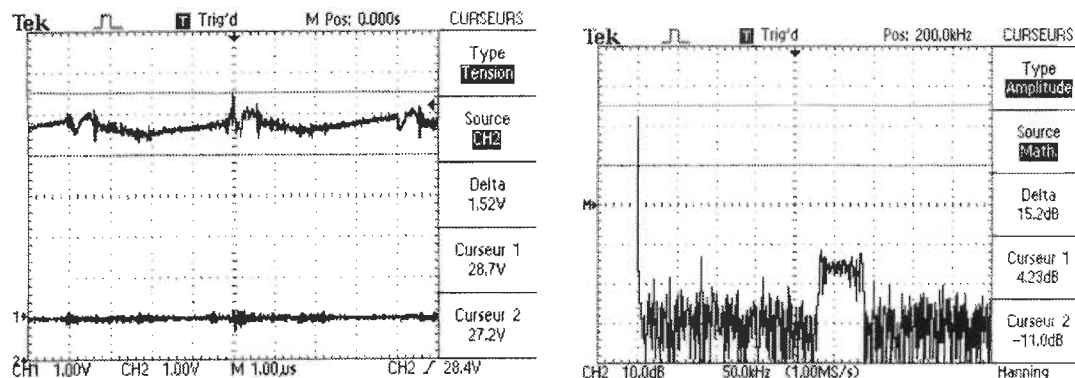


Figure 2-9: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 150



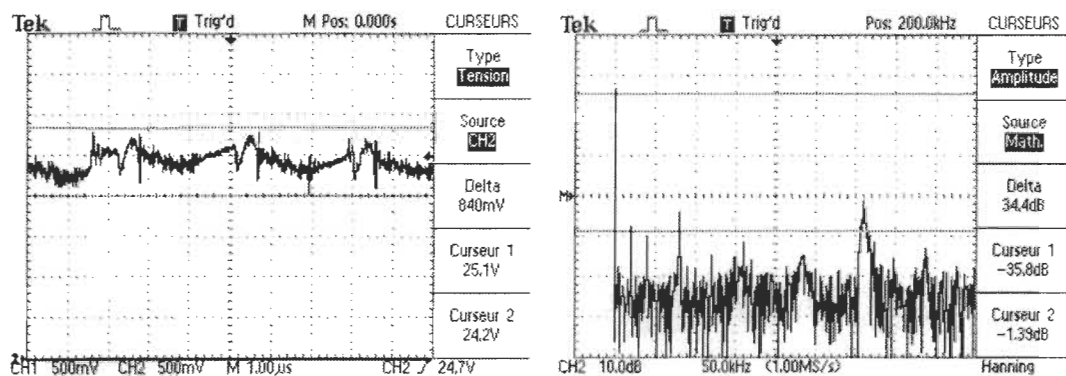


Figure 2-10: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 210

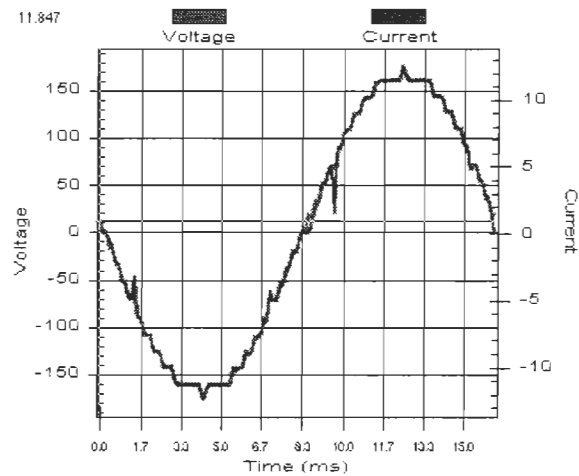
Tableau 2-3: Sommaire des figures 2-9 et 2-10

	Patron = 150	Patron = 210
Valeur maximale	28,7 V	25,0 V
Valeur moyenne	27,7 V	24,6 V
Valeur minimale	27,4 V	24,2 V
Échelle	1 V/div	0,5 V/div

La période d'oscillation se situant dans les deux cas aux alentours de  $3,5\mu\text{s}$ , on s'attend à retrouver les plus fortes harmoniques aux environs de 290 kHz. L'amplitude des harmoniques est encore une fois faible, ne représentant au plus que 0,25% de la composante continue.

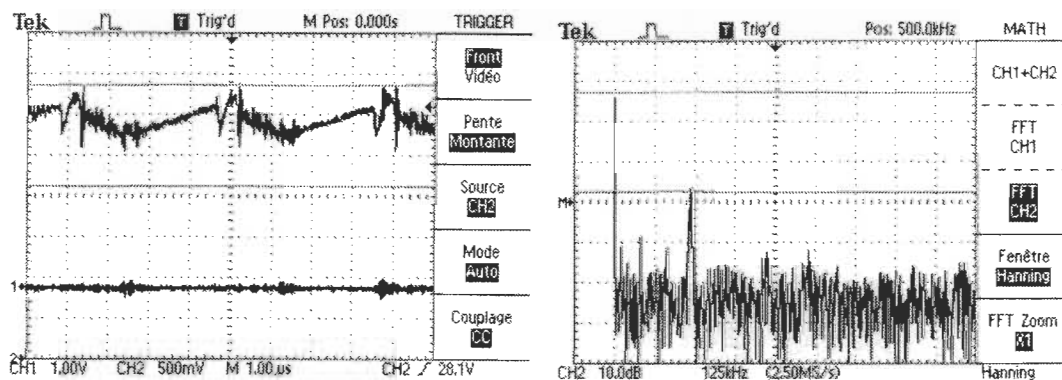
On s'intéresse également à un cas semblable au cas précédent. Cette fois-ci deux hacheurs sont en fonction simultanément, celui du convertisseur survolteur et celui de l'onduleur produit par Trace Engineering. Ce cas correspond donc à la situation où la pile charge les batteries tout en alimentant une charge CA. L'intérêt de cette situation réside dans la remontée possible d'harmoniques créées par l'onduleur jusqu'à la pile, au travers du convertisseur survolteur.

Contrairement à l'onduleur produit par Énerwatt, cet onduleur produit une onde de forme presque parfaitement sinusoïdale, comme on a pu l'observer sur l'affichage de la charge CA California reproduit à la figure 2-11. Les taux de distorsions harmoniques sont très faibles en courant et en tension.

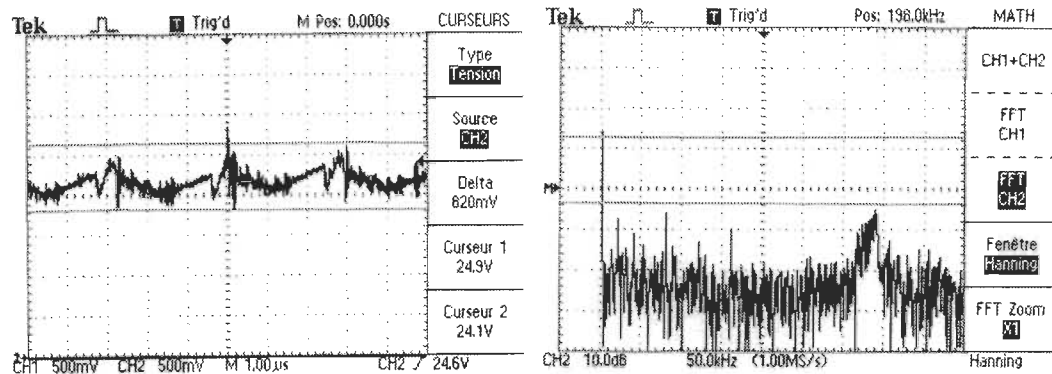


**Figure 2-11: Forme d'onde produite par l'onduleur Trace, mesurée avec la charge California pour une puissance de 1000 W**

Pour fin de comparaison, les consignes utilisées pour le convertisseur survolteur sont les mêmes qu'à l'étape précédente et la puissance tirée par la charge CA est gardée constante à 1000 W. Les figures 2-12 et 2-13 montrent les résultats obtenus.



**Figure 2-12: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 150**



**Figure 2-13: Tension et sa transformée de Fourier pour un patron de 210**

On remarque que la forme des ondes est très semblable aux formes observées sur les figures 2-9 et 2-10.

**Tableau 2-4: Sommaire des figures 2-12 et 2-13**

	Patron = 150	Patron = 210
Valeur maximale	28,5 V	25,1 V
Valeur moyenne	27,6 V	24,5 V
Valeur minimale	27,2 V	24,1 V
Échelle	0,5 V/div	0,5 V/div

La tableau 2-5 permet d'observer l'amplitude des harmoniques. On remarque que celle-ci est relativement faible et qu'elle devient maximale pour les fréquences se rapprochant de 350 kHz, ce qui correspond approximativement à la fréquence de commutation du convertisseur survolteur multiphasé (320 kHz). Selon la consigne utilisée (et donc la séquence de commutation des hacheurs), l'amplitude relative des différents harmoniques varie. On remarque également que le fonctionnement de l'onduleur Trace n'a pas une grande influence sur la fréquence ou l'amplitude des harmoniques. C'est donc dire que les perturbations qu'il produit sont soit de très faible amplitudes ou soient considérablement réduites du fait de la présence des batteries chimiques sur le bus CC.

**Tableau 2-5: Amplitude des harmoniques avec le convertisseur survolteur (V)**

Patron	Charge CA	20 kHz	40 kHz	80 kHz	160 kHz	~ 350 kHz
150	Absente	~ 0	0,012	0,018	0,018	0,041
150	1000 W	~ 0	0,011	0,017	0,013	0,051
210	Absente	0,019	0,015	0,028	0,018	0,063
210	1000 W	0,019	0,016	0,025	0,016	0,040

Comme aucun signe de comportement anormal du générateur n'a été observé et que la mesure des harmoniques a donné des résultats très satisfaisants, on peut conclure que la pile à combustible se prête bien au jumelage avec un hacheur survolteur. Même les perturbations créées par des onduleurs de basse qualité ne semblent pas avoir d'effet significatif sur la pile, comme on l'a expliqué auparavant.

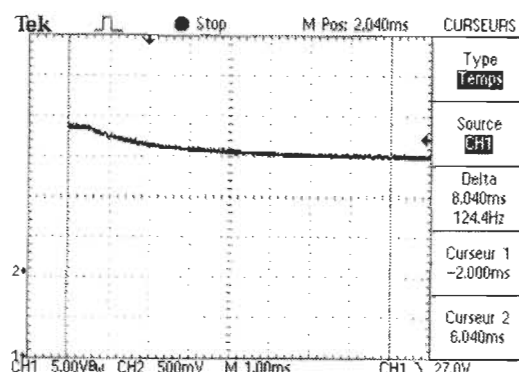
Une expérimentation à plus long terme aurait permis de déterminer si la présence d'harmoniques contribue au réchauffage accéléré de la pile. En effet, les courants harmoniques se transforment en pertes ohmiques en traversant la pile. Or, comme la pile comporte son propre système de régulation de la température, une augmentation de la quantité de chaleur de cet ordre est loin d'être critique. De plus, comme il le sera démontré plus loin, il serait tout à notre avantage d'accélérer le réchauffement de la pile suite à son démarrage. La présence des harmoniques de commutation pourrait donc s'avérer bénigne, voire avantageuse.

### 2.3.2 Transitoires peu fréquents de grande amplitude

Ces transitoires sont liés à la variation de la charge appliquée au générateur. Contrairement aux générateurs mécaniques, le GENPAC n'est pas affecté par les constantes d'inertie puisque sa source de puissance est une réaction électrochimique. Le GENPAC a donc des avantages certains en régime dynamique. Il est proposé d'évaluer qualitativement les caractéristiques dynamiques du GENPAC à partir de résultats expérimentaux. Seulement les

signaux de tension seront donnés puisque les signaux de courant sont trop bruités.

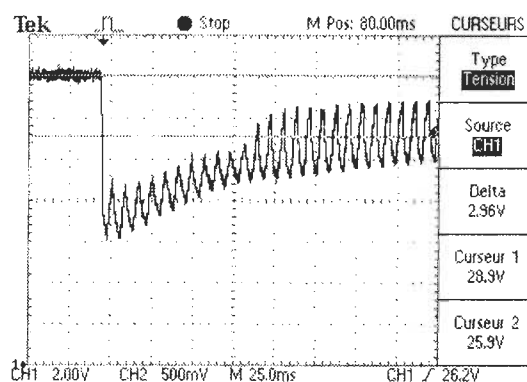
Plusieurs configurations sont expérimentalement étudiées. Le premier cas est le passage instantané de 40 à 100A de la charge à CC reliée directement à la pile pour les fins de l'expérience, la pile se trouvant initialement à une température de 56 °C. Le transitoire de tension est illustré à la figure 2-14.



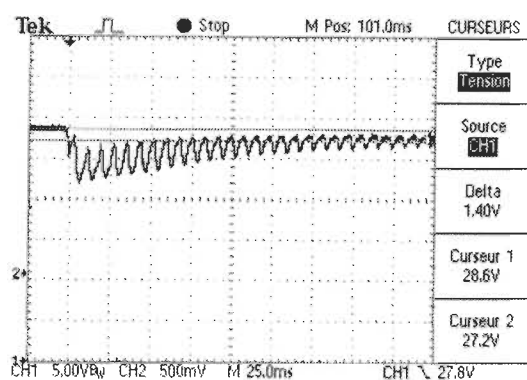
**Figure 2-14: Tension de la pile lors du passage de 40 à 100 A**

Malgré la variation de courant quasi-instantanée (limitée par le temps de réponse de la charge et observée sur celle-ci) la tension a chuté progressivement de 31,5 V pour se stabiliser à 28,7 V environ 8 ms après le changement de charge. Par la courbe de polarisation, on sait que la tension diminue lorsque le courant augmente. Le délai avec lequel cela se produit est aussi relié au temps requis pour que les débits et pressions des réactifs se stabilisent. Ce temps ne peut donc pas être considéré comme étant complètement indépendant du système de contrôle du débit d'oxydant, externe au GENPAC.

D'autres essais ont été réalisés avec des charges à courant alternatif reliées à la pile par l'intermédiaire de l'onduleur Énerwatt (voir les figures 2-15 et 2-16). Les charges utilisées sont des lampes halogènes, d'une puissance de 845 W (mesuré à la sortie de la pile) et une perceuse Makita, 115 V, 5,1 A (donné par le manufacturier). Les tensions mesurées sont données au tableau 2-6.



**Figure 2-15: Tension lors de la mise sous tension de lampes halogènes, la pile étant alors à 63°C**



**Figure 2-16: Tension lors de la mise sous tension d'une perceuse électrique à pleine intensité, la pile étant alors à une température de 57°C**

**Tableau 2-6: Valeur des tensions mesurées (V)**

	Lampes halogènes	Perceuse
Valeur initiale	28,9	28,6
Valeur minimale	18,9	22,2
Valeur finale	26,0	27,2
Amplitude d'oscillation finale	3,1	2,0
Échelle	2 V/div	5 V/div

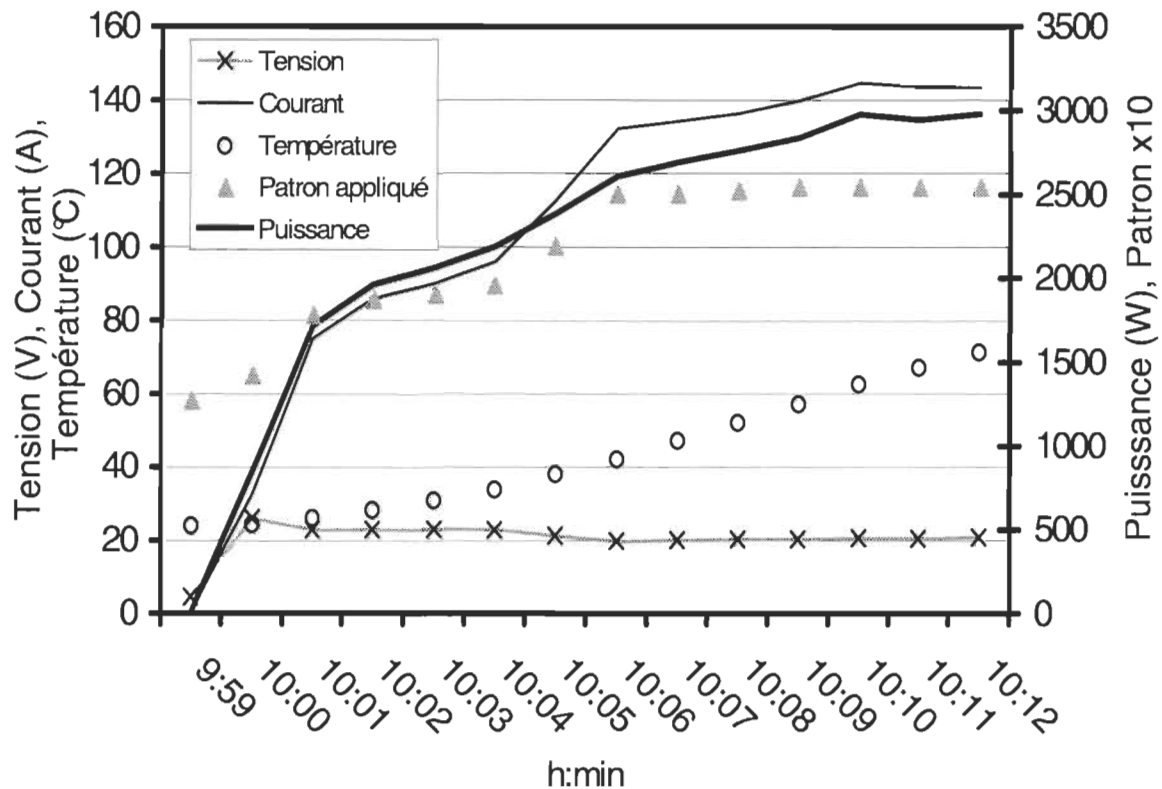
Les temps de stabilisation de la tension pour les lampes et la perceuse sont ici respectivement d'environ 150 et 200 ms. Ces temps, significativement plus élevés que ce qu'on avait trouvé pour la charge à CC, ne sont pas seulement dus à la réponse de la pile mais aussi à la stabilisation de la charge elle-même, qui

varie avec le temps, étant donné soit l'inertie, soit la variation de la résistance des filaments avec leur échauffement. Néanmoins, la pile a pu délivrer la puissance requise avec succès et ce, sans dépassement ni instabilité.

On peut donc croire que ce qui limite les performances dynamiques de la pile est plus lié à sa température qu'à la vitesse avec laquelle se fait la variation de la charge. À la figure 2-4, des courbes de polarisation de la pile en fonction de la température ont été présentées. Celles-ci montrent clairement que pour une température donnée, le courant produit par la pile ne peut dépasser une certaine valeur. Il est donc avantageux, autant du point de vue de l'efficacité que de la puissance maximale pouvant être produite, de maintenir la pile aussi près que possible de sa température nominale. Or, lorsque le courant produit par la pile est inférieur à environ 50 A, les pertes thermiques du générateur font que sa température se stabilise à un niveau inférieur à sa température nominale. Il s'avère donc que la pile ne pourra produire le courant demandé si le transitoire se situe dans la plage de courant inaccessible pour la température actuelle de la pile.

La variation de la température de la pile dépend essentiellement de la quantité de chaleur qu'elle produit. Cette chaleur, due aux pertes et à la nature exothermique de la réaction, est proportionnelle au courant produit. Le délai d'échauffement est donc minimisé si le courant produit est modulé de façon à suivre le courant maximal pouvant être produit par la pile à sa température actuelle.

La figure 2-17 montre l'évolution de la puissance et de la température de la pile lors d'un démarrage à partir de 24°C alors qu'une consigne maximale (patron 255) est fournie au programme de contrôle. La version du programme de contrôle utilisée pour obtenir ce graphique vise à faire correspondre le patron appliqué à la consigne de patron. On tire toujours le plus grand courant possible de la pile mais sans jamais dépasser le courant maximal ou le patron de consigne. Le programme de contrôle final, présenté au chapitre 3, vise plutôt à faire correspondre la production du GENPAC à une consigne de puissance.



**Figure 2-17: Production maximale suite au démarrage**

La pile a été démarrée à 9:58. On voit bien que le patron maximal a été appliqué à partir de 10:06, soit 8 minutes après le démarrage. Toutefois, la puissance à ce moment était de 2600 W. Pour le même patron, une puissance de 3000 W peut être atteinte lorsque la température atteint 71°C; cela s'est produit à 10:12. Il est donc clair que la pile ne peut produire sa puissance maximale au démarrage. Elle peut produire 2000 W environ 4 minutes après le démarrage, 2500 W après 8 minutes, et 3000 W après 14 minutes.

### 2.3.3 Alimentation continue d'une charge variable

Comme il est impossible de fournir la puissance nominale du générateur au démarrage, trois options s'offrent lorsqu'on doit alimenter une charge qui ne peut être mise hors tension même temporairement.

Premièrement, on peut garder le GENPAC continuellement en fonction et lui faire produire une certaine charge de manière intermittente ou continue de façon à ce qu'il se maintienne à une température lui permettant de produire sa



puissance nominale. Cette option tirerait profit d'une meilleure isolation thermique du générateur. Néanmoins, la consommation de réactifs pour maintenir la pile à la bonne température peut s'avérer inacceptable par rapport à la quantité utilisée pour les besoins électriques, selon la fréquence et la durée d'opération du GENPAC.

La deuxième option réside dans le surdimensionnement du GENPAC. Ainsi, même à faible température, le générateur pourrait produire la puissance nominale requise. Selon Thornstensen [42], la puissance de pointe du générateur devrait varier entre 200 et 300% de la puissance de pointe pouvant lui être demandée. Cela implique toutefois que les réactifs puissent atteindre des conditions normales de pression et de débits instantanément. C'est pourquoi un dispositif de stockage électrique doit tout de même être prévu afin de pallier aux quelques secondes pendant lesquelles s'effectue le démarrage du générateur. Il est aussi important de noter que, dans un système autonome tel que celui à l'étude ici, le GENPAC représente la plus grande part des coûts. Le surdimensionnement du générateur se veut donc être une option très onéreuse.

La troisième option utilise un générateur possédant une puissance de pointe se rapprochant de la puissance maximale demandée. Toutefois, un système de stockage direct d'électricité doit être prévu afin de compenser la différence entre la production et la demande au cours du réchauffage. Par exemple, comme notre générateur prend environ 15 minutes pour atteindre sa pleine puissance, des batteries chimiques doivent être utilisées pour stocker l'énergie requise afin de répondre aux besoins pour une dizaine de minutes. En effet, même s'il ne peut la supporter à lui seul, le générateur commence à alimenter la charge dès qu'il est mis en opération. Sous certaines conditions, il pourrait même s'avérer profitable de détourner une certaine partie de la puissance produite par le GENPAC afin d'alimenter un élément chauffant logé dans son système de refroidissement et ainsi accélérer l'atteinte de sa température nominale.

## **2.4 Résumé**

Le but de ce chapitre était de déterminer si les caractéristiques de la pile à combustible en font un bon générateur électrique pour les systèmes autonomes. Tout d'abord, le principe de fonctionnement de la pile à combustible à membrane polymère solide a été exposé afin d'en apprécier les avantages et les facteurs limitatifs. Cela a permis d'identifier un certain nombre de modes de défaillance desquels il faudra prendre garde lors de l'opération du GENPAC. Cette investigation a aussi permis d'identifier des stratégies de régulation qui seront exploitées lors de l'automatisation du système.

La seconde partie de ce chapitre visait à caractériser le fonctionnement du GENPAC en régime dynamique. En effet, il s'agit du régime d'opération anticipé pour les systèmes autonomes. Il a été décidé de diviser les transitoires de puissance en deux catégories: soit ceux associés aux hacheurs présents dans les convertisseurs de puissance et ceux dus à la variation de l'amplitude de la charge.

Le GENPAC doit être relié électriquement au système autonome via un convertisseur survolteur ou bien encore être connecté directement à un onduleur afin que sa puissance soit rendue utile. Une analyse harmonique sommaire a été réalisée afin d'apprécier les transitoires créées par ces types de convertisseur à la sortie du GENPAC. Malgré la fluctuation rapide de l'afficheur de tension du GENPAC lorsque relié directement à l'onduleur, aucune anomalie n'a été observée. Il a été constaté que le convertisseur survolteur produit des transitoires de moindre importance que les onduleurs; il se marie donc parfaitement avec le GENPAC.

Des essais avec des variations de charge plus importantes ont montré que le GENPAC les supporte bien à condition que la nouvelle puissance demandée demeure inférieure à la puissance maximale que peut produire la pile en fonction de sa température. En effet, la puissance maximale du générateur ne peut être atteinte tant que sa température n'est pas nominale. À partir de cette dernière observation, trois options ont été suggérées afin de permettre l'alimentation continue d'une charge variable à l'aide d'un GENPAC.

## **Chapitre 3: Réalisation d'un système de commande et de régulation du GENPAC**

Afin de s'intégrer au système à énergie renouvelable, le générateur à pile à combustible doit non seulement s'adjoindre à un convertisseur de puissance; il doit aussi être muni d'un système de commande et de régulation. Dans ce chapitre, la régulation comprend tout ce qui tient au maintien de la pile sous des conditions normales d'opérations : c'est-à-dire les contrôles permettant d'éviter les modes de défaillances propres à la pile, ceux-ci ayant été énumérés à la section 2.1.7. Le système de commande, quant à lui, suppose l'utilisation d'un générateur s'autorégulant et vise à faire correspondre la production du générateur avec la consigne énoncée par l'ordinateur central du système autonome. Il sera donc responsable de la mise en marche et de l'arrêt du générateur, du suivi de la consigne, et ce, de façon automatique et sûre.

La séparation des rôles de commande et de régulation vient du souci de modularité du système de contrôle. Il est en effet présagé que la régulation devienne partie intégrante des GENPAC. Le fait que le générateur nécessite un système de régulation pour fonctionner et que les constituantes de ce système dépendent des spécificités de la PAC utilisée sont deux arguments militant en ce sens. C'est pourquoi les rôles de régulation et de commande ont été séparés.

Ce chapitre présente d'abord ce qui a déjà été publié en lien avec l'automatisation des générateurs à pile à combustible. Ensuite, le cahier des charges du système de commande et régulation est exposé. Finalement, le fonctionnement des algorithmes élaborés est présenté. Quelques résultats expérimentaux obtenus à la suite de l'implantation de ces algorithmes sont aussi montrés.

### ***3.1 État de la recherche***

Il existe peu de documents décrivant les algorithmes de contrôle des générateurs à PAC. Néanmoins, on peut en tirer les principaux éléments à considérer pour la sécurité du système.

En 1999, Eriksen [43] décrit un système d'acquisition et de contrôle pour un système photovoltaïque et de stockage sous forme hydrogène par hydrure à très petite échelle (puissance photovoltaïque = 126 W). La logique de sécurité interrompait la production de la pile si jamais sa tension devenait inférieure à la moitié de son nombre de cellules afin d'éviter l'inversion de potentiel de l'une d'elles.

La même année, Mizuno [44] obtint un brevet selon lequel soit le débit d'oxydant est augmenté, soit sa pression est augmentée, soit l'humidité de l'oxydant est réduite, quand l'une ou l'autre des conditions suivantes se présente: la tension d'au moins une cellule a chuté, la résistance d'au moins une cellule a augmenté ou encore l'humidité des gaz à la sortie de la pile a augmenté. Ainsi, l'humidité excédentaire est retirée de la pile. Cependant, cette technique exacerbe l'assèchement si jamais il se produit.

En 2001, Webb et Moller-Holst [45] proposèrent une technique de mesure de la tension des cellules d'une PAC. Cet article résume bien tous les avantages liés à ce type de mesures. Ils soutiennent qu'elles assurent des performances stables et une bonne efficacité, qu'elles protègent la PAC de menaces provenant d'impuretés et, finalement, qu'elles permettent de satisfaire aux normes de sécurité additionnelles liées à l'utilisation de l'hydrogène.

### ***3.2 Cahier des charges***

On divise ici le cahier des charges en deux parties. Premièrement, on spécifie les appareils que l'on désire contrôler, les fonctions que l'on désire leur faire accomplir et la façon dont on peut communiquer avec eux. Ensuite, on définit ce qui sera régulé, c'est-à-dire les paramètres du générateur qui seront surveillés et corrigés au besoin. Le tableau 3-1 résume les éléments du cahier des charges.

#### **3.2.1 Description du système à contrôler**

Au sein du système à énergies renouvelables, les transferts de puissance sont contrôlés par un ordinateur central. Celui-ci vise à maintenir les batteries à l'intérieur d'une gamme d'états de charge convenable, ce qui permet l'alimentation

ininterrompue des charges. Il y arrive en commandant au bloc de stockage sous forme hydrogène (dont l'électrolyseur est l'élément principal) et au bloc de recouvrement d'électricité (dont le GENPAC est l'élément essentiel) de se mettre en marche au besoin et avec une puissance fixée. Le but ultime du système de contrôle du bloc de recouvrement d'électricité est donc de produire l'énergie demandée par l'ordinateur central. Cette demande, ou consigne, est sous forme de puissance et peut varier de 0 à 5 kW.

**Tableau 3-1: Éléments du système de contrôle et régulation**

Rôle	Élément	Fonctions	Entrées-Sorties
Commande	GENPAC (Pile MK5-E + PGS-105B)	Produire l'énergie électrique	Commandes de démarrage/arrêt, connexion/déconnexion du convertisseur
	Convertisseur survolteur	Moduler le courant produit par la pile	Rapport cyclique des hacheurs
	Station de test	Acquisition de données Communication avec l'ordinateur central Opérer le générateur et le convertisseur	Entrées/sorties analogiques et digitales Ports séries et GPIB
Régulation		Gérer les débits de réactifs S'assurer que la pile demeure en régime stable en modulant les débits de réactifs ou, en dernier recours, la charge.	Tension des groupes de cellules Tension de la pile Débits de réactifs Température de la pile

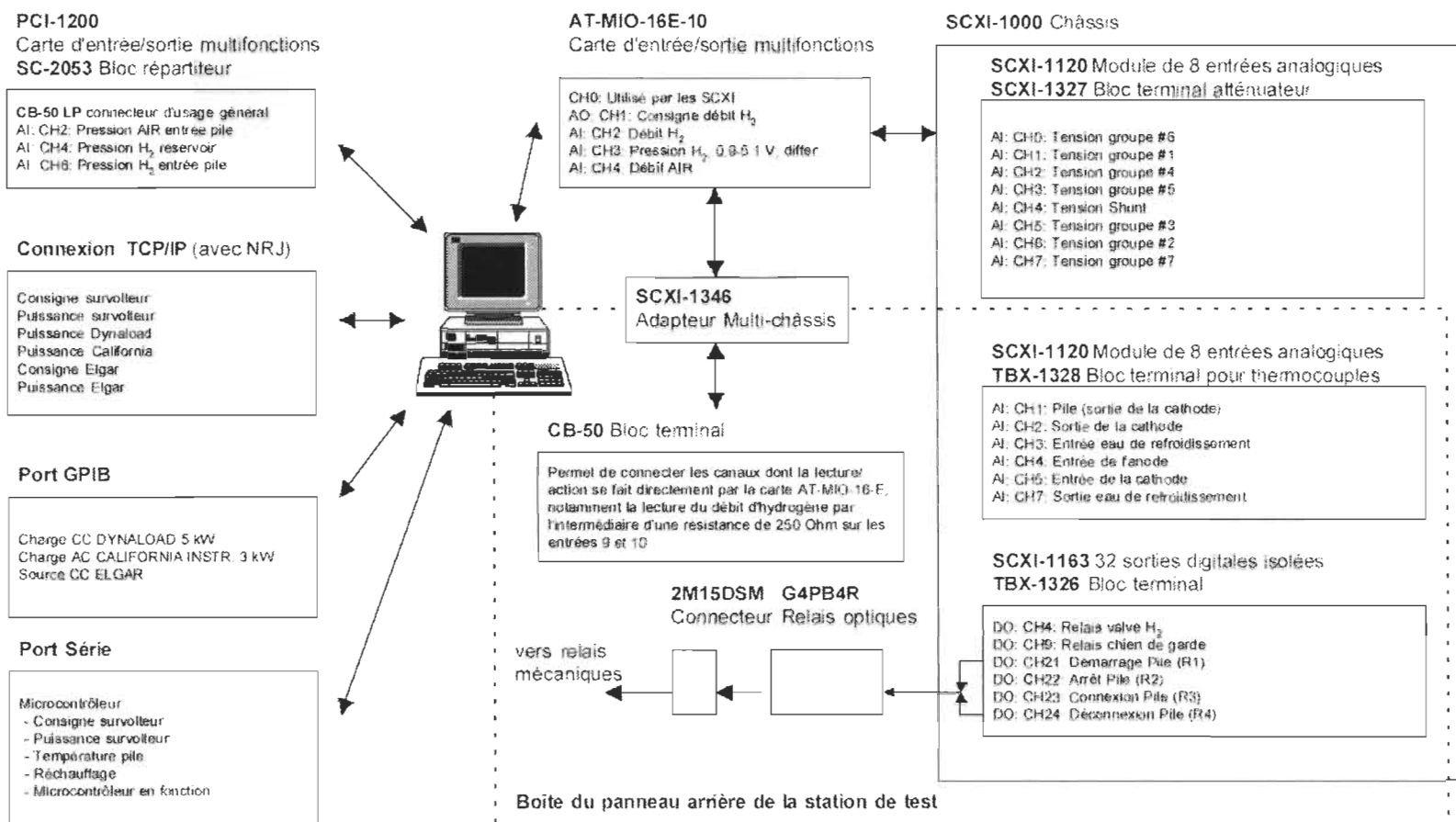
Le bloc de recouvrement de l'électricité est composé du GENPAC décrit précédemment, d'un convertisseur survolteur, des alimentations en hydrogène et en air comprimés de même que d'une station de test de pile à combustible (voir figure 1-2). Cette station de test a été utilisée auparavant pour la caractérisation de la pile à combustible. Elle contient les valves et régulateurs nécessaires au contrôle des débits de réactifs, un système d'acquisition, un ordinateur personnel et un dispositif de sécurité matériel appelé « chien de garde ». Le bloc de recouvrement peut tirer profit de cette station de test en autant qu'elle demeure propre à la caractérisation.

Le système d'acquisition compris dans la station de test est construit à partir d'éléments National Instruments. L'organigramme de ce système est donné à la figure 3-1. La principale carte utilisée est une AT-MIO-16-E qui régit le

contrôleur de débit d'oxydant et le débitmètre d'hydrogène. Elle sert aussi de port de connexion pour le système modulaire de traitement du signal SCXI-1000. Les différents modules de celui-ci permettent de réaliser les acquisitions de température et de tension, de même que l'activation des commandes logiques. La carte PCI-1200 offre des entrées analogiques supplémentaires qui permettent de relever la pression des gaz en divers points du système. En plus des cartes d'entrées/sorties, le système utilise différents ports de communications. L'ordinateur de la station de test et l'ordinateur central du système autonome font partie d'un même réseau local, ce qui permet l'échange direct de données. Un port GPIB est utilisé pour contrôler les charges Dynaload et California de même que la source CC ELGAR. Les ports séries permettent aussi d'établir une communication avec le microcontrôleur.

Le convertisseur survolteur, utilisé pour faire correspondre la tension de sortie de la pile et la tension du bus CC, est commandé via un microcontrôleur qui lui transmet la consigne via un port parallèle. Le mot de 8 bits envoyé sur ce port correspond à un certain rapport cyclique. L'amplitude du courant transféré par le survolteur est modulée selon ce rapport.

**Figure 3-1: Organigramme du système de commande et de régulation du bloc de recouvrement**



On peut résumer, en quelques points, les fonctions que doit assumer le système de contrôle :

1. Vérifier en tout temps la consigne envoyée par l'ordinateur central;
2. Démarrer le générateur si la consigne devient non-nulle;
3. Incrémenter ou décrémente le rapport cyclique du convertisseur de façon à produire la consigne sans toutefois dépasser le courant maximal que peut produire la pile (ce qui causerait son arrêt);
4. Enregistrer et envoyer à l'ordinateur central la valeur de la puissance passée au bus CC;
5. Arrêter le générateur lorsque la consigne a été nulle pour une durée supérieure à un seuil fixé au préalable.
6. Enregistrer les performances du GENPAC dans le temps. Cela permet l'optimisation du système en rendant possible les calculs d'efficacité.

### 3.2.2 Contraintes liées à la régulation du générateur

Ici figurent les contraintes liées au bon fonctionnement de la pile. On compte notamment :

1. L'alimentation en réactifs;
2. La vérification de la tension des cellules, assurant ainsi une protection contre l'inversion de potentiel, l'assèchement et la surhumidification des membranes;
3. La vérification de la température et de la tension totale;

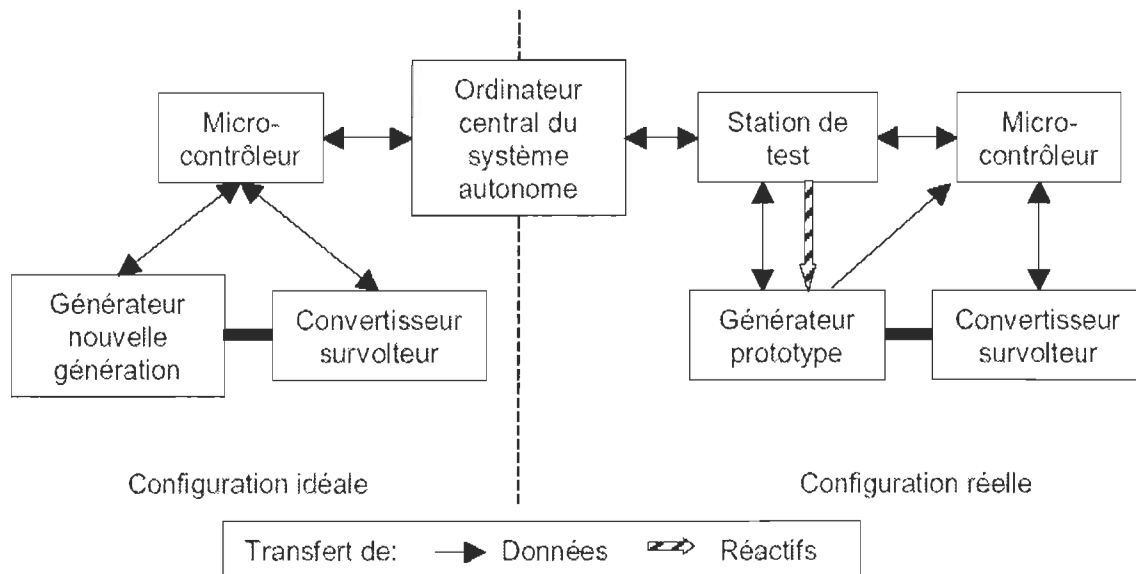
Le prototype de générateur utilisé comporte déjà quelques fonctionnalités permettant de répondre à une part de ces contraintes. En effet, le prototype comporte un système de régulation de la température qui permet d'éviter l'échauffement excessif de la pile, qui mènerait à son assèchement. De plus, le générateur comporte 8 sondes de tensions réparties le long de la pile qui relèvent la tension des cellules par groupe de 5 unités. Lorsque la tension d'un des groupes devient inférieure de plus d'une certaine tension (ajustable) à la moyenne de tous les groupes, la pile est arrêtée. Bien qu'utile, ce dispositif de sécurité ne



permet pas de corriger la situation ayant mené au déséquilibre, ce qui résulte en de fréquents arrêts de la pile. C'est pour cette raison que ce dispositif est remplacé par une logique plus évoluée dans le système de régulation implanté (voir la section 3.3.1 b) ii d)).

### 3.3 Description des algorithmes

La séparation des rôles de commande et de régulation et l'incorporation de cette dernière à même le GENPAC porte à croire que la commande peut être implantée dans un microcontrôleur. Toutefois, comme la nature du générateur utilisé impose l'ajout d'une certaine régulation, il est logique de tirer parti de la station de test qui comprend déjà les instruments de contrôle des débits des réactifs et qui facilite le stockage et l'échange de données. Il a donc été choisi d'incorporer les principales fonctions de commande dans un micro-contrôleur et de laisser le reste à la station de test, comme le montre la figure 3-2.



**Figure 3-2: Organisation du système de contrôle du bloc de régénération**

L'architecture des algorithmes réalisés et leurs fonctionnalités sont présentées ici. Leurs codes sont placés en annexe.

### 3.3.1 Partie exécutée par l'ordinateur de la station de test

Les fonctions de contrôle et de régulation de la station de test sont exécutées par l'intermédiaire du logiciel LabView DSC de National Instruments. Ce logiciel, utilisant un langage de programmation graphique, permet de créer des instruments virtuels aussi appelés VI, pour « Virtual Instrument ». Le module « Datalogging & Supervisory Control (DSC)» lui ajoute, comme son nom l'indique, des fonctionnalités additionnelles facilitant l'acquisition de données et le contrôle.

#### *a) Architecture LabView DSC*

Le logiciel LabView DSC est constitué de trois niveaux distincts : les serveurs, le moteur et les instruments virtuels (VI) [46]. Cette dichotomie a pour but d'augmenter l'interchangeabilité des instruments et des applications et de simplifier le stockage des données. Voici le rôle de chacun des niveaux :

##### ***i) Niveau serveur***

Le serveur Data AcQuisition (DAQ) a pour but de faire le lien entre les cartes d'entrée/sortie et le moteur. Avant d'être utilisé, le serveur doit être configuré pour refléter la configuration matérielle adoptée. Ainsi, il faut fournir le type de connexion (ex. : parallèle, référencée ou non), la plage de tension admissible et le gain appliqué s'il y a lieu. En donnant un nom à chacun des canaux configurés, on définit les « chemins » que prendra l'information. Lorsqu'on crée un canal, par exemple pour la mise à jour du chien de garde, on indique à partir de quelle carte on veut l'actionner (AT-MIO), par l'intermédiaire de quel module SCXI (le 1327), et sur quel canal (le 9). Une fois cette définition enregistrée, il reste à connecter le relais du chien de garde à la sortie correspondante du bloc terminal. Si on décide d'utiliser cette sortie à une autre fin, on n'aura qu'à renommer le canal de façon à mieux représenter son usage.

## **ii) Niveau moteur**

Le moteur est le lien entre les serveurs et les instruments virtuels. Il remplit de nombreuses tâches. C'est lui qui garde en mémoire la valeur associée à chacune des étiquettes. Cette dernière est le nom utilisé pour dénommer une variable. Chaque étiquette est associée à un canal du niveau serveur et représente une grandeur physique. Cette grandeur physique est calquée sur la valeur numérique réelle envoyée sur le canal selon une règle de correspondance linéaire du type  $Ax+B$  que l'on peut modifier à son gré à l'intérieur du module de configuration des étiquettes, le « Tag Editor ». Le moteur permet donc de manipuler les données sous une forme naturelle. La description des étiquettes utilisée pour cette application est placée à l'annexe 1.

Le moteur sert aussi à réduire le débit de données du fait qu'il est activé par des événements (*event driven*). En fait, les serveurs transmettent les données au moteur au même rythme qu'elles sont produites par les cartes d'acquisition. Le moteur ne tient compte des nouvelles valeurs que si elles diffèrent des valeurs stockées de plus d'un certain pourcentage de la plage dynamique. Ainsi, la valeur des étiquettes n'est transmise aux instruments virtuels que lorsqu'elles ont changé significativement. Ce seuil de changement significatif (« dead band ») peut être ajusté de façon individuelle pour chacune des étiquettes de la même façon que la règle de correspondance. Il est aussi à noter que les instruments virtuels utilisés en écriture doivent modifier la valeur des étiquettes de cette même proportion avant que le moteur n'agisse sur les canaux de sortie.

Un autre usage intéressant du moteur est la gestion de la base de données binaire ODBC Citadel. Il s'agit d'un format de base de données standard qui peut être interrogé à distance à l'aide de requêtes SQL, telles que celles produites par Microsoft Query. Ces données peuvent donc facilement être importées dans Microsoft Excel pour traitement ultérieur.

Comme les étiquettes sont sous forme de valeurs physiques, les données stockées peuvent être utilisées sans autre conversion. Le seuil de changement significatif pour l'inscription dans la base de données peut être spécifié de manière indépendante de celui de la mise à jour des valeurs pour les instruments virtuels.

Il est possible de rendre le moteur accessible par connexion internet via le protocole TCP/IP. Ainsi, il est possible de lire ou de modifier une étiquette à partir d'un moteur LabView DSC tournant sur un autre ordinateur. C'est le procédé utilisé pour partager des valeurs entre la station de test et l'ordinateur central du système autonome.

L'avantage du module DSC est important. Sans lui, il n'y a pas de moteur; toutes les valeurs doivent être mises à jour à chaque itération et le stockage de données doit être fait manuellement. Aussi, les applications devraient alors communiquer directement avec les cartes en spécifiant les adresses et les paramètres d'acquisition.

### ***iii) Niveau instruments virtuels***

Les instruments virtuels (VI) sont les applications que l'on fait fonctionner dans l'environnement LabView. Plusieurs peuvent être exécutés simultanément sur le même ordinateur par le même moteur. Il faut toutefois prendre garde aux effets de l'exécution multitâche du système d'exploitation qui peuvent entraîner des délais indésirables.

Un VI est composé de deux fenêtres, l'interface utilisateur (*panel*) et le code (*diagram*). On retrouve sur l'interface utilisateur des contrôles (qui agissent sur les variables) et des indicateurs (qui affichent la valeur des variables). Ces fonctions sont tirées de bibliothèques et peuvent être configurées de multiples façons. Lorsqu'on insère ces fonctions sur l'interface utilisateur, un symbole les représentant apparaît sur la fenêtre de code. C'est en reliant ces symboles entre eux par des opérations et des connecteurs que s'écrit le code en langage G.

Ce langage de programmation graphique (d'où le G) représente les types de variables par des codes de couleurs et d'épaisseur de ligne. Les données sont passées d'un élément à un autre le long de ces lignes. Lorsqu'on exécute l'application en mode débogage, des billes circulent le long des lignes pour illustrer le passage des données (*data flow*). Les éléments d'un langage de programmation avancé sont aussi présents en G : les boucles, variables locales ou globales, sous-programmes, gestion de la mémoire, synchronisation, commandes directes d'entrée/sortie, etc.

Un programme de contrôle tirant profit des fonctionnalités de LabView DSC est construit afin d'automatiser le fonctionnement du système à pile à combustible. Ce programme permet d'opérer la pile sans surveillance humaine de manière à répondre à la consigne de puissance spécifiée par l'ordinateur central du système à énergies renouvelables. Il se doit aussi d'opérer la pile avec un débit d'air permettant de conserver le niveau d'hydratation des membranes de la pile.

### *b) Description de l'algorithme principal*

Cet algorithme constitue la base du VI Contrôle\_pile\_5, dont le code complet est placé à l'annexe 2. L'interface utilisateur est montrée à la figure 3-3. L'algorithme est composé d'une séquence principale qui ordonne les trois phases que sont l'initialisation du programme, la phase principale d'exécution et la phase de terminaison du programme (voir la figure 3-4).

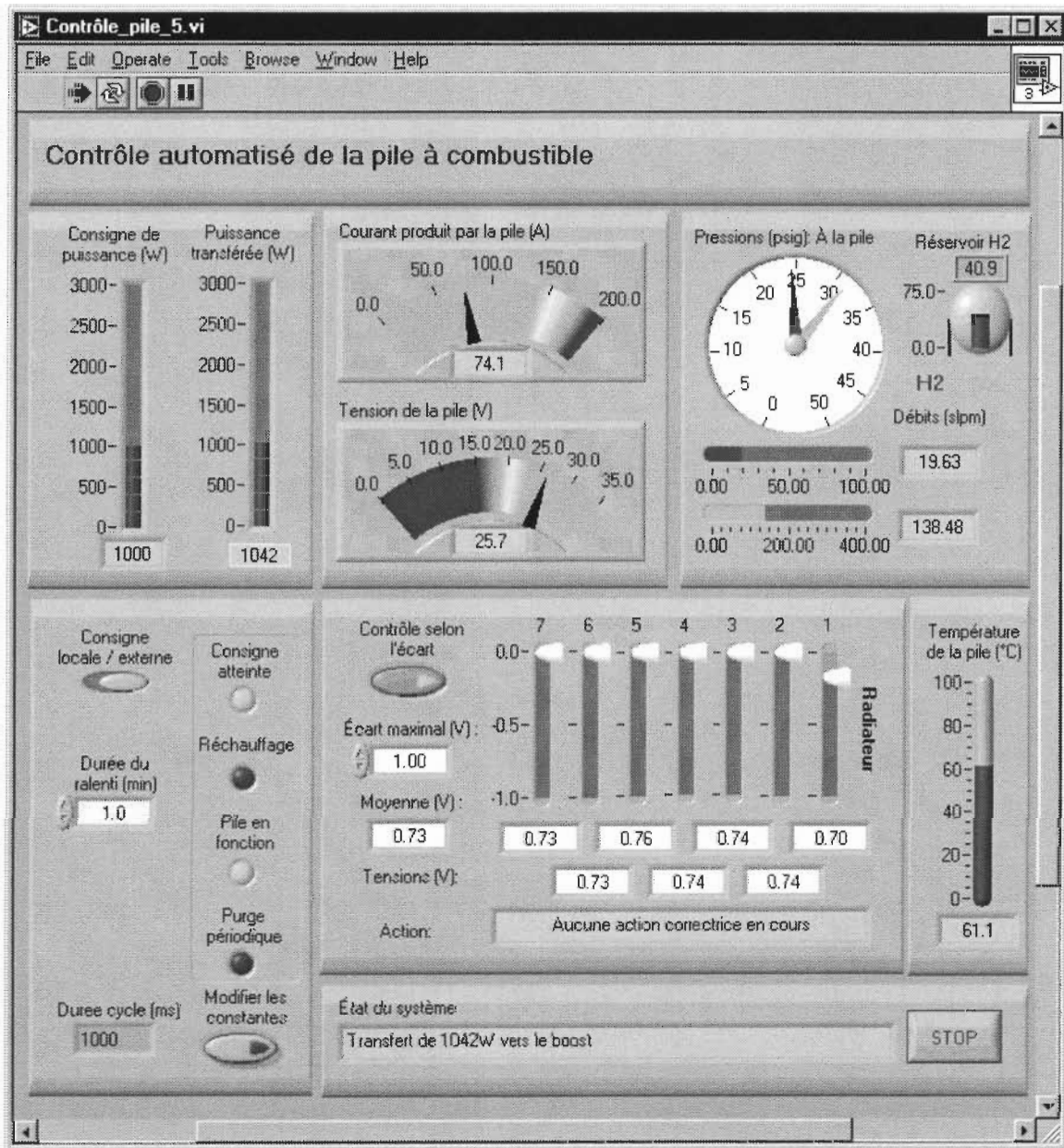


Figure 3-3: Panneau avant du programme Contrôle\_pile\_5.vi

### ***i) Phase d'initialisation***

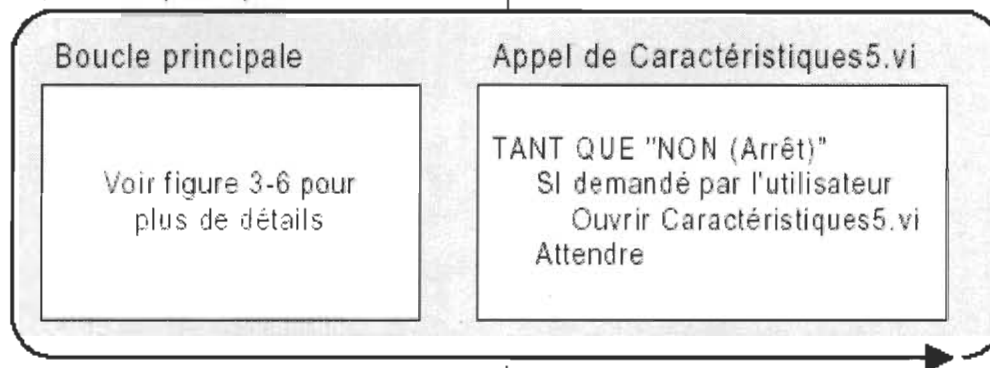
La phase d'initialisation associe à chacune des variables et des sorties du programme une valeur correspondant à l'état du système à l'arrêt. Cela permet de placer le système dans un état connu pour la suite du programme. Cette phase fait également appel à un sous-programme appelé Caractéristiques5. Celui-ci fait apparaître une fenêtre, montrée à

la figure 3-5, et offre la possibilité à l'utilisateur de modifier les constantes qui seront utilisées pour la suite des opérations. Le code de ce sous-programme est placé à l'annexe 3.

i) Phase d'initialisation

Lancer Caractéristiques5.vi  
Afficher message d'enclenchement manuel du chien de garde  
Initialiser les variables et l'état des relais  
Initialiser la communication avec le microcontrôleur

ii) Phase principale



iii) Phase de terminaison

Séquence d'arrêt du GENPAC (sans effet si déjà arrêté)  
Envoie signal d'arrêt au microcontrôleur  
Affichage de la cause de l'arrêt

**Figure 3-4: Organigramme principal de Contrôle\_pile\_5.vi**

Au démarrage du programme, ces constantes sont lues dans un fichier texte par défaut, spécifié au préalable. L'opérateur est ensuite libre de modifier la valeur des constantes, d'enregistrer les changements dans un fichier et de spécifier un autre fichier par défaut.

Les constantes sont divisées en quatre catégories :

- Pile à combustible : *Nombre de cellules, Concentration en oxygène de l'oxydant, Débit minimum d'oxydant, Durée de la purge d'oxydant au*

démarrage (s) et Débit d'oxydant au démarrage (slpm). Ces valeurs permettent de calculer le débit d'oxydant pour tout type de pile.

- Communication : *Port série (COM)*. Spécifie le port à utiliser pour communiquer avec le microcontrôleur.

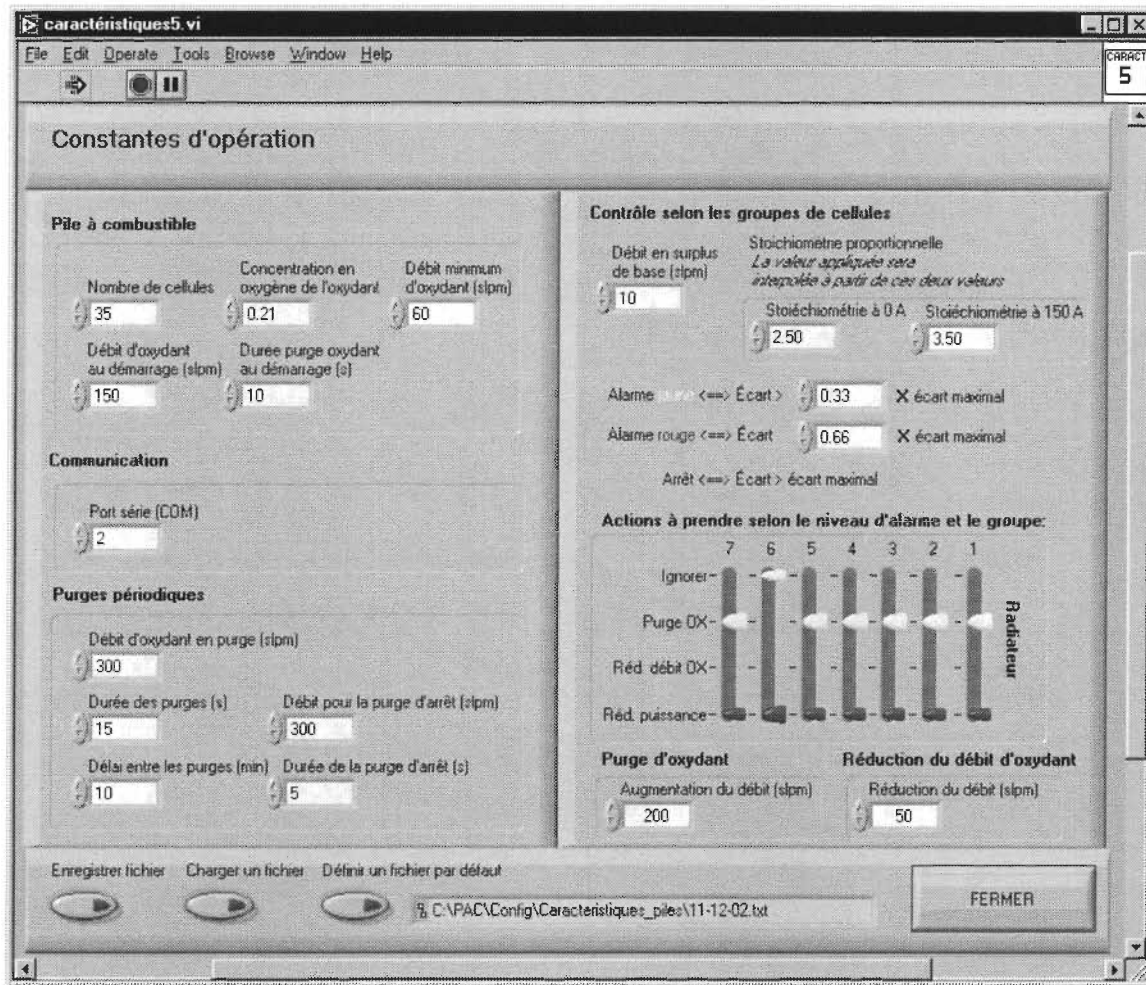


Figure 3-5: Panneau avant du programme Caractéristiques5.vi

- Purges périodiques : *Débit d'oxydant en purge (slpm)*, *Durée des purges (s)*, *Délai entre les purges (min)*, *Débit pour la purge d'arrêt (slpm)* et *Durée de la purge d'arrêt (s)*. Les purges aident à la répartition uniforme de l'eau à l'intérieur de la pile. Si les purges périodiques sont jugées superflues, on peut les éliminer en donnant une valeur nulle au *Débit d'oxydant en purge (slpm)*.



- Contrôle selon groupe de cellules. Ces constantes ne servent que lorsque le contrôle selon l'écart est activé. Les *Stœchiométrie à 0A* et *Stœchiométrie à 150 A* permettent d'interpoler la valeur de la stœchiométrie qui sera utilisée selon le courant produit par la pile. Le *Débit en surplus de base (slpm)* sera ajouté au débit stœchiométrique. Les *niveaux d'alarme jaune et rouge* fixent les seuils auxquels les alarmes respectives s'activeront. Les *actions à prendre* permettent de choisir l'action à entreprendre si l'un ou l'autre des niveaux d'alarme survient pour chacun des groupes de cellules. Enfin, l'*Augmentation du débit (slpm)* et la *Réduction du débit (slpm)* fixent l'amplitude des actions correspondantes.

En appuyant sur le bouton FERMER, les valeurs des constantes sont envoyées au programme principal via des variables globales afin que celui-ci puisse poursuivre son exécution.

La dernière étape de la phase d'initialisation fait apparaître un message à l'opérateur afin que ce dernier enclenche manuellement le chien de garde. Ce dispositif matériel garantit l'arrêt du générateur et la fermeture de l'alimentation en hydrogène si l'exécution du programme s'interrompt. C'est également à cet endroit que la communication série avec le microcontrôleur est initiée avec le sous-programme Reset dont le code est placé en annexe 4.

## ***ii) Phase principale***

La phase principale est en fait constituée de deux boucles opérant en parallèle. La première est la boucle principale, consistant en une séquence de quatre phases (voir la figure 3-6), et la seconde est la boucle d'appel du sous-VI *Caractéristiques5*, le même qu'à la phase d'initialisation. Cependant, cette fois-ci, les valeurs sont chargées à partir des variables globales au lieu du fichier. *Caractéristiques5* peut donc être appelé pendant le fonctionnement de la boucle principale afin de modifier les constantes d'opération. Ceci s'avère particulièrement utile lorsque des

problèmes de régulation sont rencontrés et que les différentes actions à prendre doivent être testées afin de choisir la plus appropriée.

L'exécution de ces deux boucles se termine lorsque l'une des conditions d'arrêt est rencontrée. Il est à noter que le panneau avant de caractéristiques<sup>5</sup> est également fermé à la rencontre de l'une de ces conditions. Ces conditions sont :

- Une demande d'arrêt par l'opérateur, i.e. lorsque le bouton STOP est pressé;
- Une trop faible pression d'hydrogène dans le réservoir;
- L'arrêt soudain de la pile;
- Le non-démarrage de la pile;
- Un débalancement des tensions des groupes de cellules; et,
- Le défaut, de la part du microcontrôleur, de renvoyer un signal d'activité.

Ces conditions seront explicitées au fur et à mesure que les états les définissant seront rencontrés.

## **ii) a) Première étape de la boucle principale**

La première phase de la boucle principale est l'acquisition de la consigne et la mise à jour de l'affichage. C'est ici que l'on détermine si la consigne sera fixée localement ou par l'ordinateur central du système autonome à l'aide du contrôle *Consigne locale/externe*. Dans le premier cas, celle-ci est fixée par l'opérateur dans la case juste en dessous de *Consigne locale/externe*. Dans le cas contraire, l'étiquette *Consigne boost* est lue et utilisée comme consigne. La valeur de cette étiquette, fixée par l'ordinateur central, est échangée entre les deux moteurs LabView DSC via le réseau local. Dans les deux cas, la consigne est affichée sur le panneau avant par l'indicateur barre *Consigne de puissance (W)*. Cette phase sert également à envoyer une impulsion sur le relais du chien de garde afin de le maintenir actif. De plus, on calcule la durée d'une itération de la boucle principale. Finalement, les commandes rendues

inutiles selon les états des contrôles *Consigne locale/externe* et *Contrôle selon l'écart* sont grisées.

TANT QUE une condition d'arrêt n'est pas rencontrée (dénotée par \*)

ii) a) Première étape

Acquisitionner la consigne de puissance  
Envoyer une impulsion au chien de garde  
Calculer le temps d'exécution de la boucle principale  
Mettre à jour l'affichage

ii) b) Deuxième étape

ii) b) A) GENPAC hors fonction

SI Consigne puissance > 0  
Démarrer la pile  
SI Échec démarrage \*  
Démarrer la purge de démarrage  
  
SINON  
SINON

ii) b) B) GENPAC en fonction

1. Appliquer le débit d'oxydant calculé selon le courant produit  
Courant < 4A ? \*
2. Envoyer la consigne au microcontrôleur
3. Arrêt automatique du générateur si le transfert de puissance a été nul pour plus de la durée maximale du ralenti

ii) c) Troisième étape

Interroger le microcontrôleur sur son état  
Lire les entrées analogiques  
État du microcontrôleur = OFF ? \*  
Pression d'hydrogène dans le réservoir <= 241 kPa ? \*

ii) d) Quatrième étape

Lire la tension de chacun des groupes de cellules  
Calculer l'écart avec la moyenne  
Déterminer le niveau d'alarme pour chaque groupe  
Écart d'un groupe > écart maximal ? \*  
Si une alarme est présente, permettre l'action correspondante

Figure 3-6: Organigramme de la boucle principale

## ii) b) Deuxième étape de la boucle principale

La deuxième phase de la boucle principale introduit deux séquences d'opérations selon que la pile est ou n'est pas présentement en fonction.

A) Prenons d'abord le cas où la pile est arrêtée. Dans ce cas, on regarde d'abord la consigne de puissance. Si celle-ci est supérieure à zéro, on amorce le démarrage de la pile. Celui-ci débute avec l'ouverture de la valve d'hydrogène et le réglage du débit d'oxydant à la valeur fixée par le panneau des constantes. Le relais de démarrage de la pile est ensuite activé et le courant de la pile est ensuite surveillé. La détection du démarrage s'effectue lorsque le courant produit par la pile est d'au moins 4 A, ce qui correspond au courant requis pour la mise en marche des auxiliaires du générateur. Si cette condition n'est pas respectée dans un délai de 10 secondes, le relais de démarrage est remis à sa position initiale et un échec au démarrage est décrété, ce qui met fin à la boucle principale dès la complétion du prochain cycle. Bien entendu, l'alimentation des réactifs est aussi coupée. Cependant, si l'opération est un succès, la pile est décrétée en fonction et le relais de connexion de la pile au convertisseur survolteur est fermé. La pile sera donc prête à produire la puissance dès que les purges de démarrage seront terminées. (Pendant celles-ci, les sorties des réactifs de la pile sont ouvertes, ce qui affecte leur pression et donc la capacité de production de la pile.) Si la consigne n'est pas supérieure à zéro, le message « En attente d'une consigne non-nulle » est affichée dans l'*État du système*.

B) Lorsque le GENPAC est en fonction, une séquence en trois phases est amorcée.

1. La première est le calcul du débit d'oxydant. Le débit stœchiométrique est calculé selon l'équation 2.4. Ce calcul utilise les constantes énoncées dans le panneau des constantes. Si le

*Contrôle selon l'écart* n'est pas activé, les valeurs de la stœchiométrie et du débit en surplus sont issues des contrôles *Stœchiométrie* et *Débit en surplus (slpm)* du panneau avant. Sinon, la stœchiométrie est interpolée à l'aide de la fonction *Stœchiométrie* dont le code est placé à l'annexe 6. Le débit en surplus provient du panneau des constantes et est modulé au besoin pour créer les purges ou les diminutions du débit d'oxydant correspondant aux actions à prendre en cas d'alerte. Le débit stœchiométrique est ensuite comparé au débit minimum pour y être toujours égal ou supérieur. De plus, si la durée de la purge de démarrage n'est pas encore dépassée, le débit correspondant est imposé. Ensuite, on vérifie si on est en présence d'une purge périodique ou non. Si c'est le cas et que le débit d'oxydant en purge est supérieur au débit calculé jusqu'à maintenant, c'est le premier qui prévaut. Sinon, le débit reste inchangé. On s'assure ainsi de ne jamais imposer un débit inférieur au débit stœchiométrique. Enfin, on impose le débit d'oxydant de la purge d'arrêt si on se trouve dans cette situation.

2. La deuxième phase vise à envoyer la consigne au convertisseur si elle a été changée depuis la dernière itération de la boucle principale. Il est à noter que cette phase ne peut s'effectuer tant que la purge de démarrage n'est pas terminée (pendant ce temps, le message « Attente de la fin de la purge de démarrage » reste affiché). Si le contrôle selon l'écart est activé, on vérifie d'abord si la consigne ne doit pas être momentanément amenée à zéro pour éviter l'arrêt de la pile, ce qui représente une des actions pouvant être entreprise en cas d'alarme. Ensuite, si la consigne a été changée, elle est envoyée au microcontrôleur par le sous-programme *Consigne* dont le code se trouve à l'annexe 7. Si la pile a été déconnectée, elle est reconnectée. Finalement, on détermine s'il est temps de mettre la pile au ralenti ou de l'arrêter. On vérifie d'abord si la consigne est nulle et si le microcontrôleur a atteint

l'équilibre. Si tel n'est pas le cas, le message « Transfert de X W vers le bus » est affiché. Sinon, le ralenti est amorcé. Celui-ci a pour but de maintenir la pile en opération, et donc prête à produire dans un délai minimum, tout en consommant le moins d'hydrogène possible. Cela se réalise en déconnectant la pile du convertisseur survolteur. La pile ne consomme ainsi plus que l'hydrogène requis au bon fonctionnement de ses auxiliaires. Pendant cette période, un message indiquant le temps écoulé depuis le début du ralenti est affiché. Si la durée de ralenti est excédée (fixée par *Durée du ralenti (min)* du panneau avant), on décrète le début de la purge d'arrêt.

3. Cette dernière phase a pour but d'arrêter automatiquement la pile. Rappelons que cette condition survient lorsque la pile a été placée au ralenti pour une période excédant la durée maximale du ralenti. Tant que la purge d'arrêt est en cours, le message « Purge d'arrêt automatique » est affiché. À la fin de celle-ci, le relais d'arrêt de la pile est activé et les réactifs sont coupés. À la prochaine itération, le message « En attente d'une consigne non-nulle » sera affiché. C'est ce qui termine la deuxième phase de la boucle principale.

### **ii) c) Troisième étape de la boucle principale**

La troisième phase de la boucle principale vérifie l'état du microcontrôleur et met à jour l'affichage des variables. Le microcontrôleur renvoie son état ON/OFF, la puissance transférée, la température de la pile, l'atteinte ou non de la consigne et indique si la pile est en réchauffage. La signification de ces données sera expliquée à la section 3.3.2. La température de la pile, l'atteinte de la consigne, le réchauffage et la puissance transférée sont affichés sur le panneau avant. Si le microcontrôleur n'est pas à ON, cela mettra fin à l'exécution de la boucle principale dès la fin de la prochaine itération. Les pressions des réactifs et leurs débits sont lus à cette étape et affichés également. C'est aussi le cas pour la pression d'hydrogène à l'intérieur du réservoir. Si celle-ci

devient inférieure à 275,8 kPa (40 psig), son indicateur devient jaune en guise d'avertissement et si sa pression devient inférieure à 241 kPa (35 psig), la pile sera arrêtée à la fin de la prochaine itération. Le courant produit par la pile est également lu et affiché.

#### **ii) d) Quatrième étape de la boucle principale**

La quatrième phase de la boucle principale est celle du contrôle selon l'écart. La tension de chacun des groupes de cellule est lue et est affichée. La somme des tensions de ces groupes donne la tension de la pile qui est affichée sur le panneau avant. On calcule ensuite l'écart entre la tension de chacun des groupes et la tension moyenne des groupes. Ces écarts sont affichés à l'aide de barres sur le panneau avant. Ensuite, à l'aide de l'écart maximal donné par le contrôle avant *Écart maximal (V)* et des seuils donnés par le panneau des constantes, on définit le niveau d'alarme correspondant à chacun des groupes. L'écart maximal donne aussi la plage dynamique des indicateurs d'écart. La couleur de remplissage des barres d'écart donne la couleur de l'alerte. La couleur verte signifie que tout va bien, la couleur jaune signifie que des mesures peuvent être prises pour rééquilibrer la pile et la couleur rouge signifie que l'on doit immédiatement agir afin d'éviter l'arrêt de la pile. Bien entendu, ces alarmes ne sont significatives que si la pile est en fonction.

Les niveaux d'alarme présents sont stockés dans un tableau dont on extrait la valeur maximale. Si la valeur maximale correspond à l'état de plus d'un groupe de cellules, l'alarme sera associée au premier cas rencontré. Si la valeur maximale représente le dépassement de l'écart maximal (qui n'est représenté par aucune couleur) la pile sera arrêtée dès la fin de la prochaine itération. Dans le cas contraire, si l'alarme la plus élevée est verte, le message « Aucune action correctrice en cours » sera affiché. Pour les autres cas, dépendamment de la couleur du niveau d'alarme le plus élevé, on appliquera l'action correctrice correspondante spécifiée dans le panneau des constantes. Cette action sera également

affichée dans le champ *Action*. Si le contrôle selon l'écart n'est pas activé, le message « Contrôle par groupe de cellules non activé » sera affiché dans le champ *Action* et les alarmes de couleur seront ignorées. C'est ce qui termine la boucle principale.

### ***iii) Phase de terminaison du programme***

Cette phase vise à arrêter la pile de manière sécuritaire si le programme a détecté une erreur. Ainsi, la commande STOP, dont le code est placée à l'annexe 8, est envoyée au microcontrôleur, la pile est arrêtée et les débits de réactifs sont interrompus. Finalement, l'erreur qui a causé l'arrêt du programme est affichée dans le champ *État du système*.

### **3.3.2 Partie exécutée par le microcontrôleur**

Cette partie a été implantée dans un microcontrôleur de la famille Motorola 68HC11 par une équipe d'étudiants au baccalauréat à partir de l'algorithme qui avait été préalablement développé et implanté dans une version antérieure du programme de contrôle et régulation en LabView DSC. Un organigramme général du programme implanté est montré à la figure 3-7.

Le rôle du microcontrôleur est de faire correspondre la puissance produite par la pile à la consigne qui lui est envoyée par le programme Contrôle\_pile\_5.vi. Pour ce faire, le microcontrôleur est muni de capteurs de tension et de courant reliés à la sortie du survolteur. La moyenne de ces mesures, calculée sur une période d'environ 8 ms, permet de calculer la puissance transférée au bus CC. Si cette valeur s'écarte de la consigne de plus d'une certaine valeur seuil, le patron du survolteur, qui correspond au rapport cyclique, est incrémenté ou décrémenté. Lorsque la puissance mesurée correspond approximativement à la consigne, on considère l'équilibre atteint.

Ce type de contrôle n'est cependant pas suffisant puisque la pile ne peut produire plus d'un certain courant dépendamment de sa température. Ainsi, le patron du survolteur ne peut être incrémenté lorsque le courant produit par la pile (approximativement proportionnel au courant à la sortie du survolteur) s'approche



du courant maximal que celle-ci peut produire à la présente température. Quand cela se produit, la pile est dite en réchauffage. Dès que la température de la pile atteindra le prochain seuil, le patron pourra être incrémenté à nouveau. Cette façon de faire permet, en plus d'éviter l'arrêt involontaire de la pile, de réchauffer celle-ci le plus rapidement possible. En effet, les pertes absolues de la pile sont plus importantes à fort courant; elle se réchauffe donc plus vite. La relation température-courant maximal est donnée par deux vecteurs.

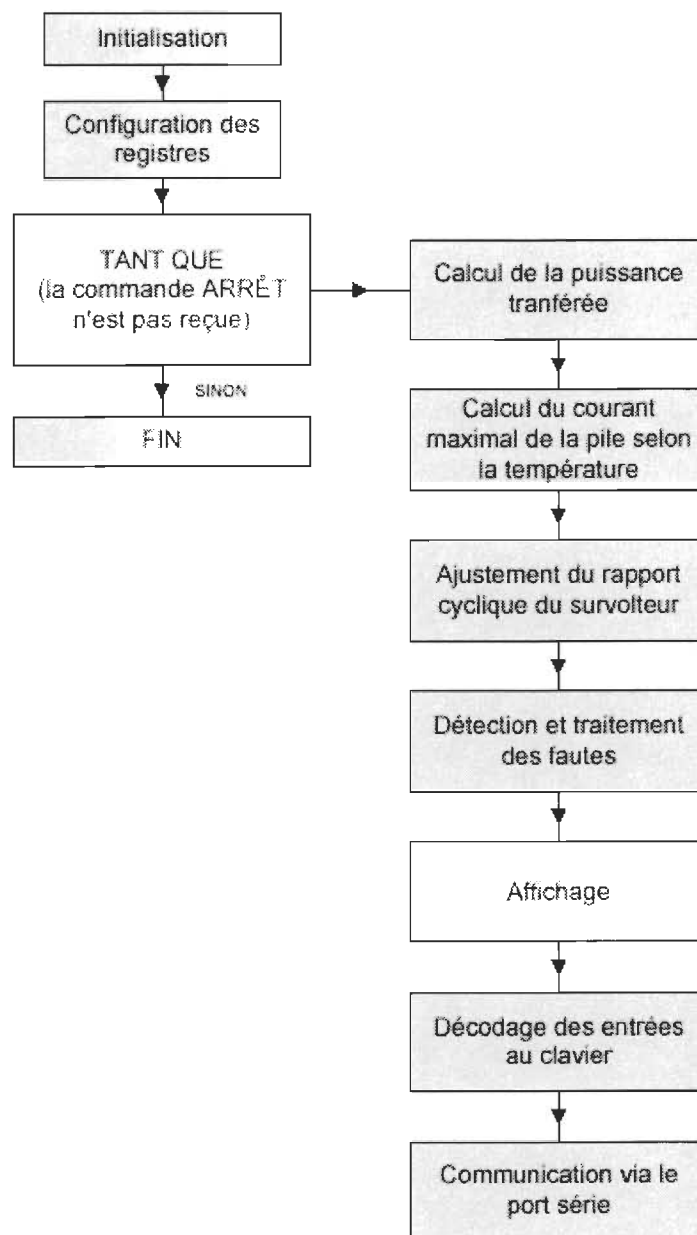


Figure 3-7: Organigramme principal du programme implanté dans le microcontrôleur

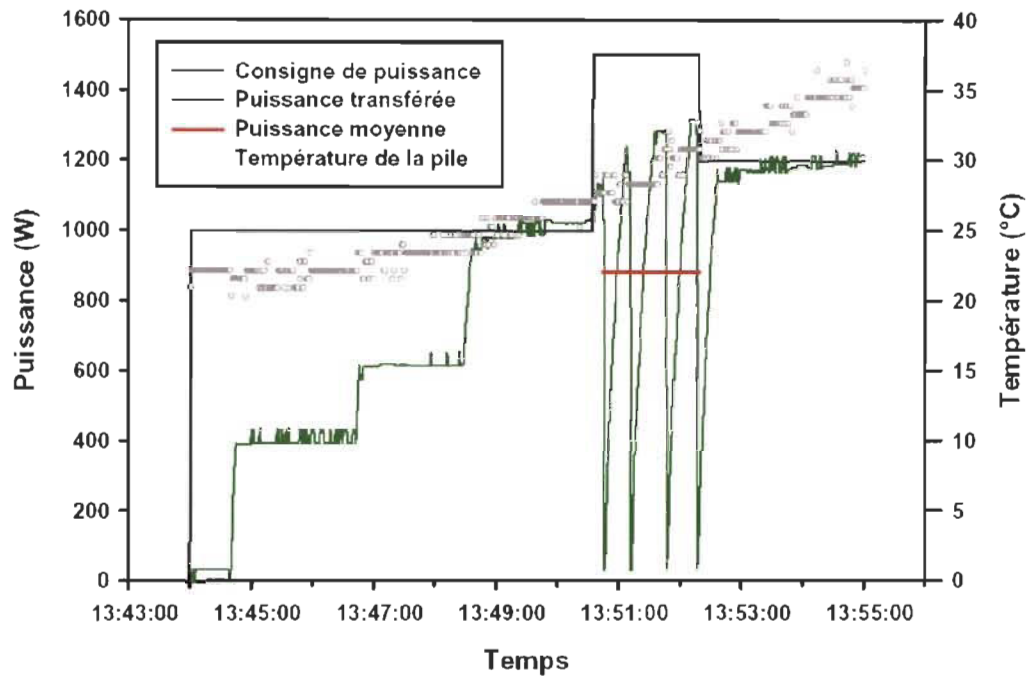


Figure 3-8: Démarrage de la pile à froid

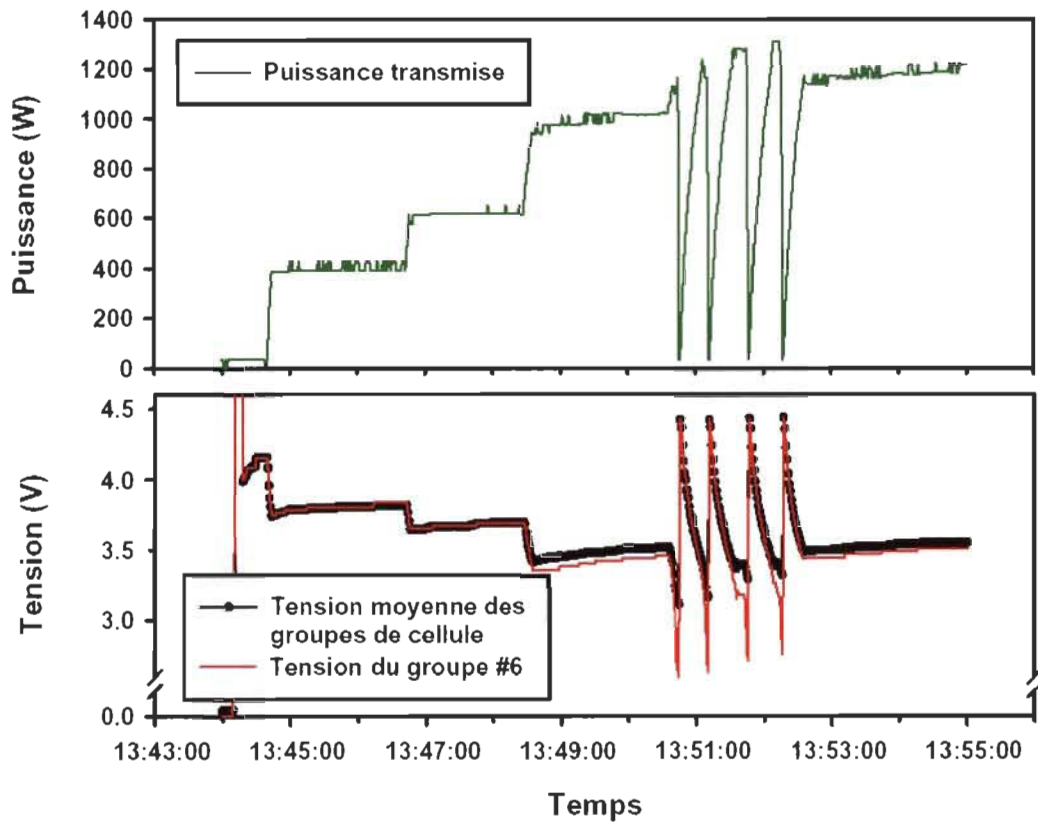


Figure 3-9: Régulation - Alarme rouge

Lorsqu'une requête d'état est envoyée au microcontrôleur par le port série, celui-ci renvoie les informations décrivant son état. Ces informations comptent notamment la *puissance transférée*, la *température de la pile*, l'atteinte de l'*équilibre* et le *réchauffage*. De plus, s'il est en mesure de recevoir une consigne, *micro ON* sera vrai.

### **3.4 Résultats expérimentaux et discussion**

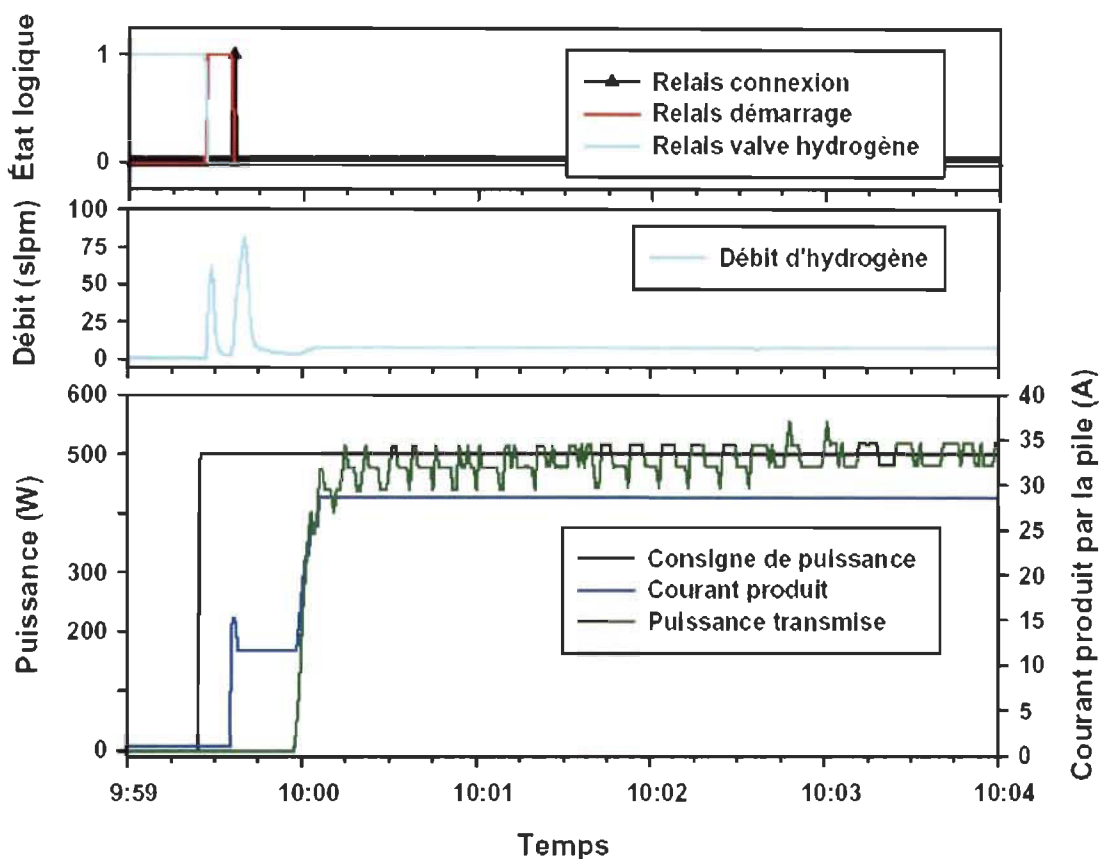
Comme toutes les données importantes sont véhiculées via des étiquettes, elles sont stockées automatiquement dans la base de données ODBC, ce qui facilite grandement l'étude du comportement du système a posteriori. Cette base de données peut être interrogée directement à partir de l'explorateur NI-MAX (*Measurement and Automation eXplorer*) ou encore à partir de MS Excel via des requêtes SQL (*Structured Query Language*). Les figures suivantes donnent le tracé de quelques variables pour différents scénarios pouvant survenir lors de l'opération du système autonome.

La figure 3-8 donne l'évolution de la puissance transmise au bus CC par le GENPAC suite à son démarrage à température ambiante, la consigne étant initialement fixée à 1000 W. Il est bien apparent que la puissance transférée est limitée par l'algorithme du microcontrôleur selon la température de la pile. Ceci se répercute par la présence des deux plateaux de puissance aux environ de 425 et 600 W et le passage du premier au deuxième dès le passage du seuil de température (23°C). La consigne a été atteinte à 13:48:46. À 13:50:35, la consigne a été poussée à 1500 W, ce qui a fait chuté la tension du groupe de cellules #6. C'est alors qu'est entré en action le système de régulation de la pile, comme on peut le voir à la figure 3-9, afin d'éviter l'arrêt du générateur. À 13:52:18, la consigne a été ramenée à 1200 W et le système s'est par la suite stabilisé autour de cette valeur.

La figure 3-9 montre qu'avant d'atteindre les 1500 W, la tension du groupe 6 chute par rapport à la tension moyenne des groupes d'une façon telle qu'elle franchit le seuil de l'alarme rouge, ce qui provoque la réinitialisation de la puissance transmise. Cela a pour conséquence de ramener la puissance moyenne transmise au cours de cette période aux environs de 885 W (Fig. 3-8). Comme cela a été démontré au chapitre précédent, la modulation de la charge est bénigne tant qu'elle demeure inférieure à la charge nominale dictée par la température de la pile. On ne respecte donc plus la consigne mais on évite ainsi l'arrêt du générateur.

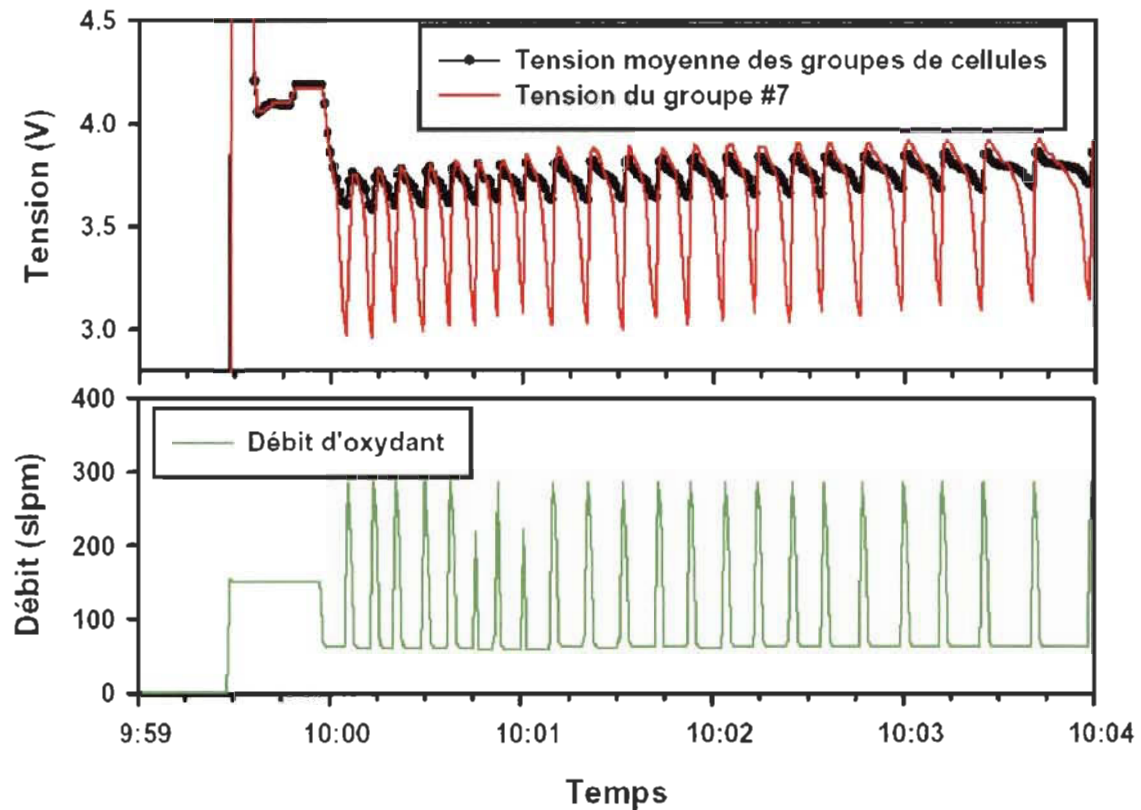
La présence d'une fuite transmembranaire est suspectée pour une des cellules du groupe 6 puisque la tension de ce groupe chute brusquement dès que les pressions des deux réactifs ne sont plus tout à fait égales, la situation se résorbant avec l'égalisation des pressions. Avec le montage actuel, la pression d'hydrogène chute quelque peu lorsque le débit d'hydrogène augmente, ce qui crée un déséquilibre des pressions de réactifs à courant plus important (donc débit d'hydrogène élevé), tel que cela se produit ici à plus de 1200 W. L'utilisation d'un régulateur à deux étages pourrait améliorer la situation dans l'attente du remplacement du générateur. En effet, le mélange des réactifs peut provoquer des explosions, et la présence de celles-ci (même de très faibles amplitudes) ne peut que détériorer davantage les membranes et éventuellement rendre la pile totalement inutilisable.

Les figures 3-10 et 3-11 illustrent un autre démarrage du générateur mais cette fois avec une consigne de 500 W.



**Figure 3-10: Démarrage avec pile noyée**

La figure 3-10 montre bien les étapes du démarrage. Dès la détection de la consigne non nulle, la valve d'hydrogène est ouverte (9:59:25), ce qui produit un brusque débit d'environ 63 slpm d'hydrogène (9:59:29). Pendant ce temps, le relais de démarrage de la pile est activé (9:59:27) jusqu'à ce que le courant produit par la pile devienne non nul (9:59:36). À ce moment, le générateur est relié au convertisseur survolteur via l'actionnement du relais de connexion (9:59:36). Ensuite survient une brève purge d'hydrogène, liée au second pic de débit (9:59:40), et une purge d'oxydant, de durée ajustable. Dès la fin de cette dernière (9:59:56), la consigne est acheminée au microcontrôleur qui entre alors en action pour stabiliser la puissance transmise aux alentours de 500 W, la consigne prescrite (10:00:06).



**Figure 3-11: Régulation - Alarme jaune**

La figure 3-11 montre l'écart qui se crée entre la tension du groupe #7 et la tension moyenne des groupes. Lorsque cet écart dépasse le seuil jaune, le débit d'oxydant est porté à 300 slpm, ce qui rétablit la tension du groupe #7. Cela est caractéristique de l'accumulation d'eau dans ce groupe. Dès que l'écart redevient inférieur au seuil jaune, le débit d'oxydant reprend sa valeur normale. Il s'ensuit une oscillation entre les états normaux et d'alarme jaune. La période de cette oscillation augmente avec le temps, ce qui montre que l'accumulation d'eau est en train de se résorber. Cela pourrait se poursuivre jusqu'à ce qu'une purge périodique (de plus longue durée que la purge qui est ici liée à l'alarme jaune) se produise. Néanmoins, la régulation permet de produire la puissance désirée même si la pile présente une anomalie de comportement.

Les résultats montrés ci-haut et les autres essais réalisés montrent que les algorithmes implantés permettent l'opération du GENPAC de façon automatisée et sûre. Bien sûr, on aurait pu choisir d'autres façons de faire selon les problèmes les plus souvent rencontrés avec le générateur.

Notamment, au niveau du contrôle, il a été choisi de fixer le courant maximal que peut produire le générateur selon sa température. Alternativement, il aurait été possible de limiter l'accroissement du courant lorsque la tension du générateur s'approche d'une limite inférieure. Ces deux approches sont équivalentes lorsque le générateur fonctionne bien et que ses performances sont stables. Toutefois, la seconde technique aurait l'avantage de ne pas nécessiter les ajustements rendus nécessaires par la dégradation des performances du générateur avec le temps. D'un autre côté, cette différence n'est significative que lorsque l'on s'approche de la limite maximale de courant que peut produire le générateur. Or, il sera montré au prochain chapitre (fig. 4-4) que l'efficacité du générateur chute à forte puissance. Donc, en pratique, exception faite de la période de réchauffement de la pile, cette zone de fonctionnement risque de ne pas être utilisée.

Au niveau de la régulation, on pourrait bénéficier d'un relevé de la tension individuelle de chacune des cellules composant la pile à combustible. Lorsque le générateur fonctionne bien, c'est-à-dire lorsque les cellules ont un comportement plus ou moins uniforme, le relevé par groupe suffit pour déceler les problèmes d'humidification des membranes. Toutefois, lorsqu'une cellule est dans une condition spéciale (comme c'est le cas pour une cellule du groupe #6, dont la membrane est percée), sa tension est beaucoup moindre que celle des autres cellules de son groupe. Ainsi, la tolérance sur la tension de groupe doit être faible afin de détecter l'anomalie, qui, à plus ou moins long terme, cause des dommages irréversibles. Or, une tolérance faible (un petit écart maximal) rend difficiles les corrections liées à la régulation et provoque l'arrêt du GENPAC plus fréquemment. Si le nombre de cellules composant chacun des groupes est moindre, la détection des anomalies sera plus aisée. Le compromis entre le nombre de canaux dédiés au relevé des tensions et l'acuité de détection désirée doit aussi se faire en considérant la fréquence des fautes de régulation. Ainsi, une pile moins abîmée que celle utilisée pourrait se satisfaire plus aisément du présent système.

### ***3.5 Résumé***

Ce chapitre traitait de la réalisation d'un système de commande et de régulation du GENPAC. Tout d'abord, la revue de littérature a permis de confirmer certaines stratégies identifiées au chapitre précédent. De plus, le cahier des charges a été présenté en précisant les rôles de commande et de régulation. Ensuite, les algorithmes des programmes réalisés en LabView DSC ont été détaillés de même que le système d'acquisition utilisé. Enfin, des essais expérimentaux ont permis de confirmer le bon fonctionnement des algorithmes implantés et leur capacité à maintenir la pile en production malgré ses écarts de comportement.



## **Chapitre 4: Étude des performances de la PAC selon la concentration en oxygène de l'oxydant**

Ce chapitre se veut un approfondissement de l'article « Fuel Cell Operation with Oxygen Enrichment » publié dans la revue scientifique : Fuel Cells, from fundamentals to systems de Wiley-Vch et dont je suis le principal auteur. Le texte original [47] de l'article est présenté à l'annexe 9. Ce chapitre présente l'étude des performances du GENPAC selon la concentration en oxygène de l'oxydant utilisé. Il vise aussi à comparer différentes techniques d'enrichissement en oxygène. Ces techniques consomment une certaine puissance électrique afin de produire l'oxydant enrichi. Toutefois, comme ce dernier améliore les performances du générateur, le bilan de puissance peut se révéler positif et améliorer l'efficacité de ce dernier, qui, comme on l'a déjà mentionné, est le maillon faible de la chaîne du stockage par hydrogène.

On explique d'abord les raisons qui portent à croire que l'utilisation d'un oxydant plus riche en oxygène que ne l'est l'air améliore les performances de la pile, ce qui est ensuite vérifié expérimentalement. Ensuite, les différentes techniques d'enrichissement sont présentées, ce qui permet d'identifier leur principe de fonctionnement et leur consommation énergétique. Ces calculs, combinés aux performances expérimentales de la pile, permettent de dresser le bilan comparatif de chacune des techniques d'enrichissement selon la puissance et l'efficacité du générateur que ces techniques permettent d'atteindre.

### ***4.1 Problématique de l'enrichissement***

Les piles à combustible à membrane polymère solide sont respectueuses de l'environnement, peu bruyantes et sont de surcroît l'un des moyens les plus efficaces pour convertir l'énergie chimique en électricité [8,31,32,48]. Malheureusement, le coût élevé des matériaux entrant dans leur fabrication freine leur introduction sur le marché.

Afin de diminuer le coût des piles à combustible par kilowatt, de grands efforts sont consacrés à accroître leur densité de puissance. L'équation de Nerst

(éq. 2.9) révèle que l'utilisation de l'oxygène au lieu de l'air accroît la tension de la pile, et donc son efficacité et sa densité de puissance. Toutefois, alimenter une pile avec de l'oxygène au lieu de l'air entraîne une multitude de problèmes. La manutention de bouteilles de gaz, qu'il soit comprimé ou liquéfié, entraîne des contraintes pratiques et résulte en une complexité et des coûts accrus. C'est pourquoi il est proposé, comme alternative, de comparer des techniques de production d'air enrichi en oxygène sur les lieux même de son utilisation, c'est-à-dire localement, à proximité du GENPAC.

Les techniques comparées sont au nombre de trois. Il s'agit de l'Adsorption Modulée en Pression (AMP)<sup>iii</sup>, des Membranes Perméables Sélectives (MPS) et de la récupération de l'Oxygène Relâché par l'Électrolyse (ORÉ). Cette dernière technique est d'un intérêt particulier pour les systèmes utilisant le stockage sous forme hydrogène puisque l'oxygène produit par électrolyse est habituellement relâché dans l'atmosphère. Il constitue donc un sous-produit pouvant être valorisé.

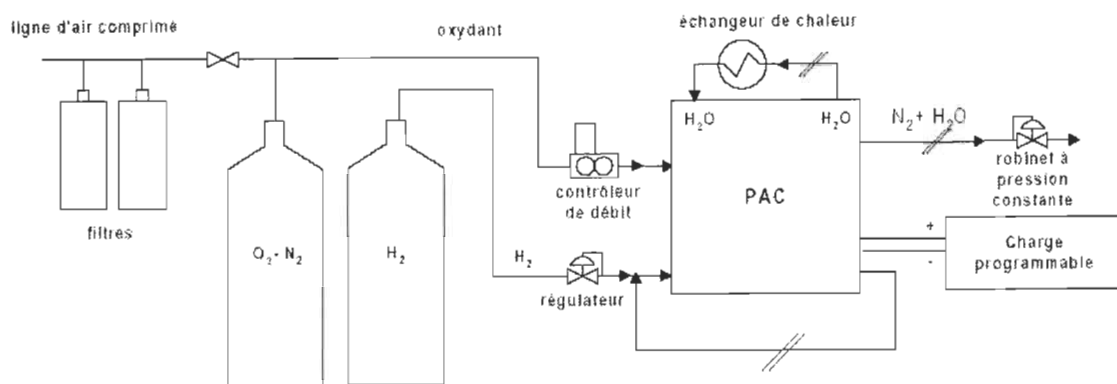
## ***4.2 Performances de la pile en fonction de la concentration en oxygène de l'oxydant***

Il faut d'abord évaluer ces performances afin de pouvoir ultérieurement en extrapoler les performances du générateur adjoint de chacun des dispositifs d'enrichissement.

Par ces mesures, on veut obtenir les courbes de polarisation de la pile en fonction de la concentration en oxygène de l'oxydant. La charge programmable Dynaload, reliée directement à la pile, est utilisée pour balayer la plage de courants. La tension de la pile est mesurée directement sur ses terminaux électriques et le courant de la pile (et non celui à la sortie du générateur) est mesuré à l'aide d'une résistance shunt placée à l'intérieur du générateur.

---

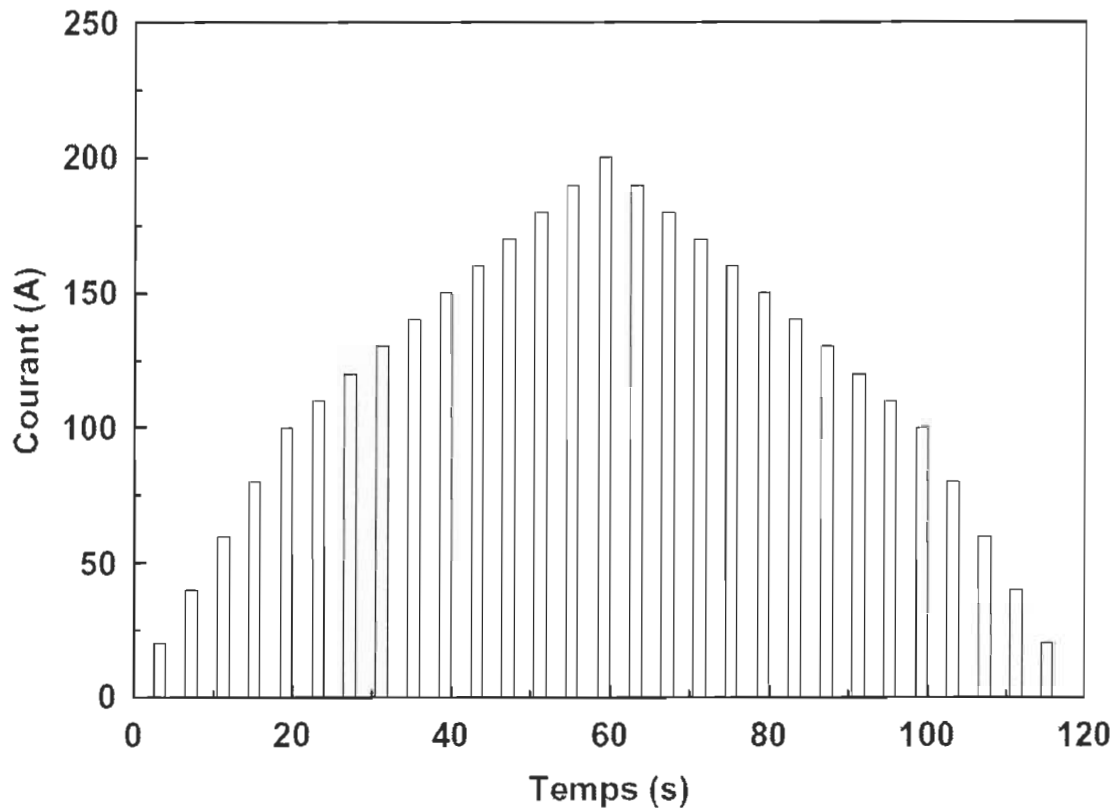
<sup>iii</sup> Mieux connue sous sa dénomination anglaise « pressure swing adsorption » ou PSA.



**Figure 4-1: Montage expérimental**

Avant chaque série de mesures, la pile était amenée à une température de  $72 \pm 2^\circ\text{C}$  avec de l'air comme oxydant; l'hydrogène et l'oxydant étant tous les deux administrés à une pression de 343 kPa. Ensuite, l'air était changé pour l'oxydant à tester. Cinq différentes séries de mesures ont été réalisées en utilisant à tour de rôle de l'air, de l'oxygène pur et des mélanges d'azote et d'oxygène correspondant à des concentrations en oxygène de 80%, 60% et 40%.

Le patron de courant utilisé, montré à la figure 4-2, reprend la forme d'un histogramme alors que le débit d'oxydant était gardé constant à 275 slpm. Cette combinaison de débit constant et de charge intermittente agit comme une purge périodique d'oxydant et permet d'amoindrir les problèmes de distribution de l'eau à l'intérieur de la pile. Ces problèmes sont en effet accentués par les très forts courants pouvant être atteints avec l'oxydant enrichi. Un algorithme de régression utilisant les moindres carrés a été ensuite utilisé afin de faire correspondre les données avec une équation polynomiale et de tracer les courbes de polarisation, de puissance et d'efficacité.



**Figure 4-2: Patron de courant utilisé pour le mélange à 40% d'oxygène**

La figure 4-3 montre les courbes de polarisation et de puissance en fonction du courant pour les différentes concentrations en oxygène de l'oxydant. L'efficacité de la pile à combustible en fonction des mêmes concentrations est donnée à la figure 4-4. L'efficacité de la pile est définie par l'équation 2.6.

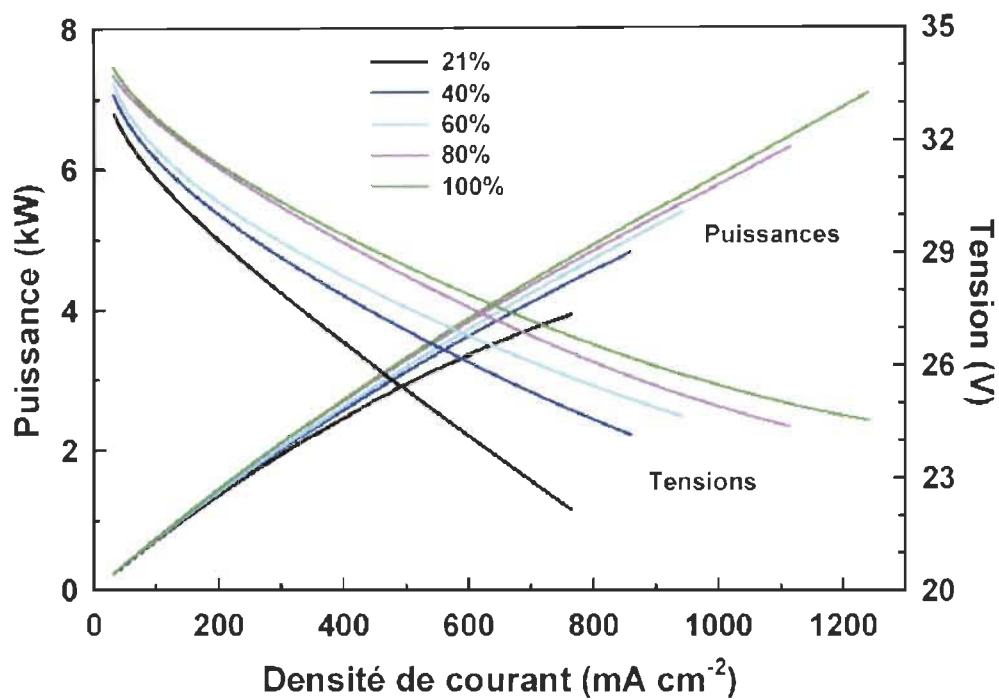


Figure 4-3: Courbes de puissance et de polarisation selon la concentration en oxygène de l'oxydant

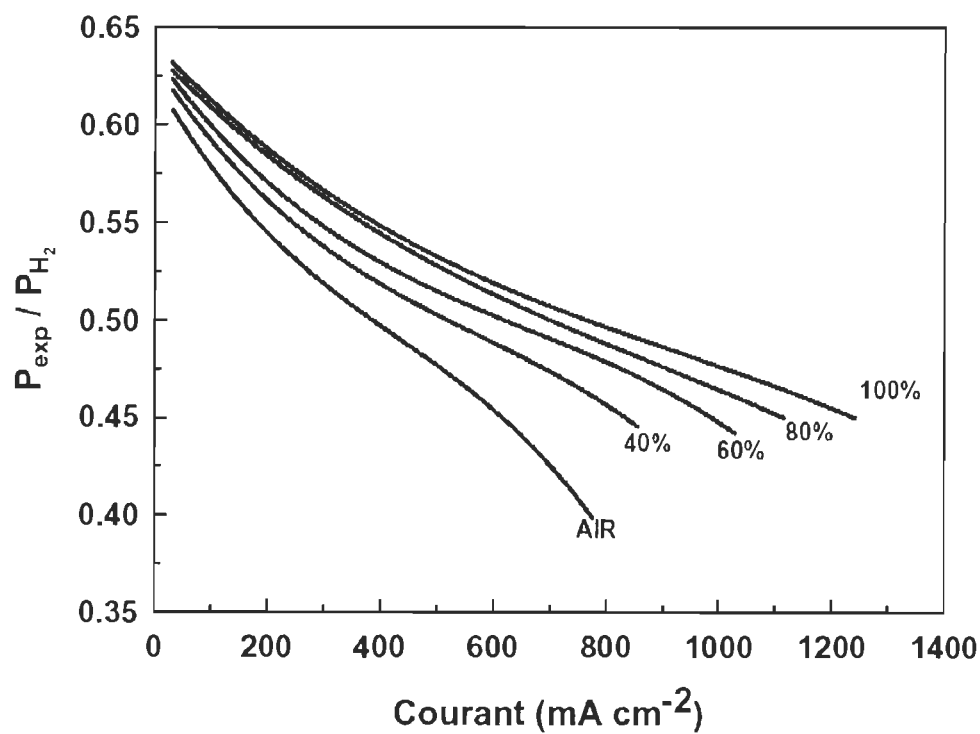


Figure 4-4: Courbes de l'efficacité de conversion selon la concentration en oxygène de l'oxydant

L'abrupte chute de tension due à la polarisation de concentration se produit à des densités de courant de plus en plus grandes à mesure qu'augmente la pression partielle d'oxygène dans l'oxydant. Conséquemment, de plus grandes densités de courant peuvent être atteintes avec la même pile lorsque la concentration en oxygène augmente. Alternativement, pour la même valeur de courant, la tension de la pile augmente à cause de la meilleure efficacité de la pile. La plus grande augmentation relative de tension, de puissance et d'efficacité de la pile se produit lorsque l'on passe d'une concentration de 21 à 40% d'oxygène et semble être directement proportionnelle à la densité de courant. Il ne sera donc pas forcément nécessaire de produire un grand enrichissement pour en retirer un bénéfice.

### ***4.3 Dispositifs d'enrichissement***

Industriellement, de multiples techniques sont utilisées afin d'enrichir l'air en oxygène. Parmi celles-ci, l'AMP, les MPS et l'ORÉ sont retenues puisque l'échelle de ces installations se prête bien aux GENPACs de petite et de moyenne envergure. Dans cette section, le principe de fonctionnement de chaque technologie est exploré et les facteurs utilisés pour évaluer leur consommation de puissance liée à la compression des gaz sont listés. La puissance consommée par les auxiliaires de chaque système est dénommée séparément par « pertes parasites ». Elle est extrapolée à partir de la consommation actuelle des auxiliaires du générateur et de la consommation prévue des équipements additionnels. Les pertes parasites sont listées au tableau 4-1 alors que les puissances requises à la compression des gaz pour des courants de 140 A à la pile sont présentés au tableau 4-2.

#### **4.3.1 Air**

L'oxygène de l'air est l'oxydant le plus communément utilisé par les piles à combustible. L'air contient 78,03% d'azote, 20,99% d'oxygène et 0,94% d'argon [49]. Une certaine puissance de compression est requise afin d'amener l'air de la pression atmosphérique à la pression d'opération de la pile.

**Tableau 4-1: Détail des pertes parasites estimées**

	Air	AMP	MPS	ORÉ	ORÉ + recirculation
PGS-105	200	200	200	200	200
Microcontrôleur	6	6	6	6	6
Contrôleur de débit	10	10	10	10	10
Valves	25	325	25	75	75
Pompe de recirculation	-	-	-	-	36
Total (W) :	241	541	241	291	327

**Tableau 4-2: Détails relatifs au calcul de la puissance de compression pour un courant de 140 A à la pile**

	Air	AMP	MPS	ORÉ	ORÉ + recirculation
$P_{\text{admission}}$ (kPa)	101	101	101	101	101
$P_{\text{étape1}} / P_{\text{étape2}}$ (kPa)	-	385 / 138	104 / 32.4	791	791
$P_{\text{pile}}$ (kPa)	343	343	343	343	343
Récupération $O_2$	1.00	0.53	0.35	1.00	1.00
Concentration $O_2$	0.21	0.92	0.30	0.35	1.00
Puissance de compression/ (vaccum) (W)	466	1077	386 (275)	327	94

#### 4.3.2 Adsorption Modulée en Pression (AMP)

Cette technologie est communément utilisée pour les systèmes de séparation de l'oxygène de l'air à petite échelle [49]. L'AMP repose sur le principe de l'adsorption physique préférentielle. On pousse un mélange de gaz dans une enceinte contenant une matière sous forme de grains de faible diamètre. En choisissant la matière appropriée, on peut choisir le composant du mélange qui sera adsorbé préférentiellement. Ainsi, la concentration de ce composant dans le flot du gaz le long de la colonne décroît et on retrouve un gaz appauvri à la sortie. Si on alimente en air et que c'est l'azote qui est absorbé préférentiellement, c'est

un gaz enrichi en oxygène que l'on retrouve à la sortie. Il est cependant à noter que les propriétés d'adsorption de l'oxygène et de l'argon sont si semblables que leur séparation par cette méthode est très difficile. En fait, si on extrait l'azote de l'air, le gaz de sortie sera aussi enrichi en argon. Cela limite donc la pureté de l'oxygène aux environs de 95% [49]. Quand toute la surface des grains est occupée par le gaz adsorbé, on coupe l'alimentation en gaz et on laisse tomber la pression. Le composant est désorbé et évacué de l'enceinte. Ce procédé cyclique doit être effectué en utilisant au moins deux enceintes en parallèle pour obtenir un débit continu.

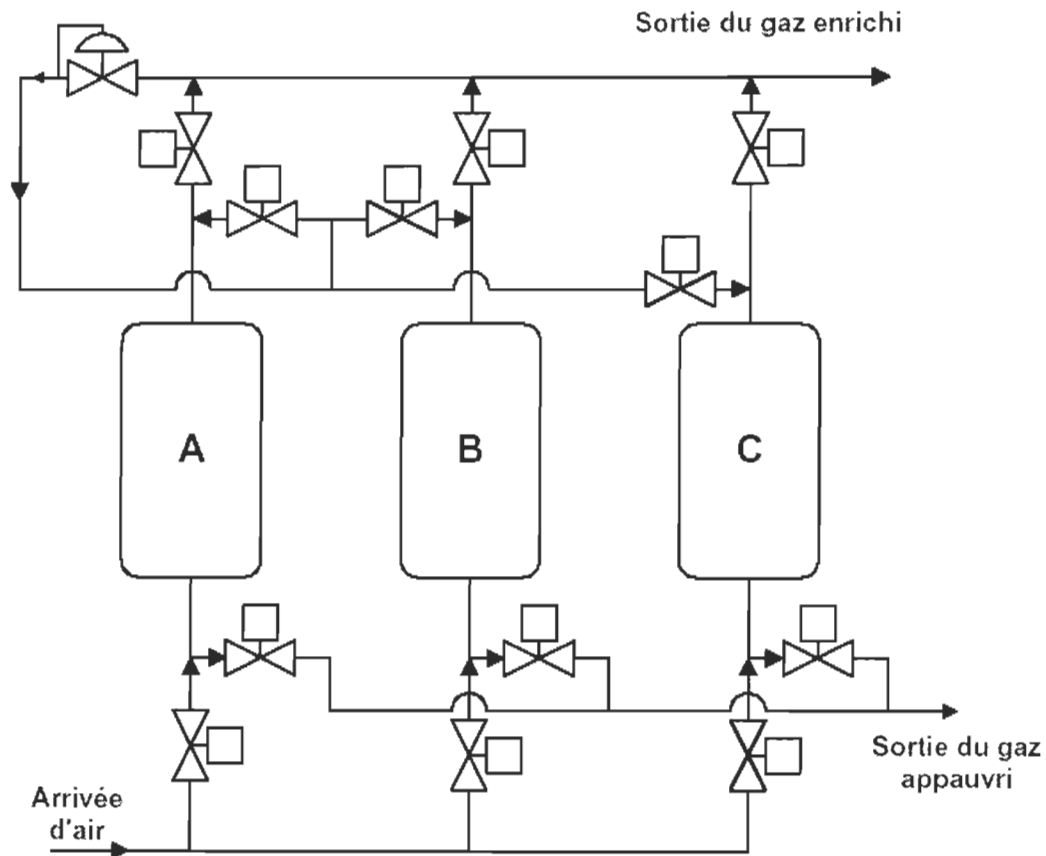
Le cycle d'absorption modulée en pression utilisé pour les calculs [50] a été testé de façon extensive par Sircar [51]. Ce cycle comprend 6 étapes :

1. Pressurisation de la colonne d'adsorption de la pression atmosphérique à une pression intermédiaire par l'admission combinée d'air à l'entrée de la colonne et l'admission de gaz enrichi en oxygène par sa sortie.
  2. Pressurisation de la colonne d'adsorption de la pression intermédiaire à la pression maximale par admission d'air seulement.
  3. Dépressurisation à iso-courant jusqu'à la pression intermédiaire. Le gaz expulsé est le produit enrichi en oxygène et est partiellement utilisé pour la prochaine étape 1.
  4. Dépressurisation jusqu'à une pression inférieure mais encore supérieure à la pression atmosphérique. Une portion du gaz expulsé est le produit, le reste est utilisé pour la prochaine purge de l'étape 6.
  5. Dépressurisation à contre-courant jusqu'à la pression atmosphérique. Le gaz enrichi en azote est rejeté.
  6. Purge à contre-courant avec le gaz enrichi en oxygène obtenu à l'étape 4. Le gaz enrichi en azote recueilli à l'entrée de la colonne est toujours rejeté.
- Répétition à partir de l'étape 1.

En utilisant la zéolithe 5A comme adsorbant, une pression d'adsorption de 385 kPa et une pression de désorption de 101 kPa, Sircar [51] a obtenu un produit composé à 91,9% d'oxygène, relâché à une pression de 138 kPa tout en récupérant 52,8% de l'oxygène contenu dans l'air admis.



Le schéma d'un tel système est montré à la figure 4-5 où A, B et C sont les trois colonnes d'adsorption requises afin de produire un débit relativement constant à la sortie du système. On y voit également les valves automatisées utilisées pour la pressurisation depuis l'entrée des colonnes, l'évacuation du gaz enrichi, la dépressurisation à contre-courant, l'évacuation du gaz adsorbé et la purge à contre-courant avec le gaz enrichi.



**Figure 4-5: Représentation du système AMP utilisé pour les calculs**

Les appareils d'AMP récents peuvent comprendre des étapes supplémentaires de purge et d'égalisation des pressions de façon à accroître la pureté du produit, le niveau de récupération ou encore l'efficacité du dispositif [49]. QuestAir Technologies [52] manufacture ce type d'appareil pour les adjoindre à des piles à combustible mais les données concernant les consommations énergétiques sont gardées confidentielles.

Toutes les techniques utilisées requièrent une puissance significative afin d'amener les gaz à la pression d'opération. Cette puissance est dénotée puissance de compression. Pour l'AMP, la puissance de compression sert à alimenter le dispositif avec de l'air à la pression d'adsorption et aussi à faire correspondre la pression du produit à celle requise pour alimenter la pile. Le débit d'air requis pour alimenter le dispositif AMP est calculé avec :

$$\dot{Q}_{air} = \frac{[O_2]_{oxi}}{r[O_2]_{air}} \dot{Q}_{oxi} \quad (4.1)$$

où  $\dot{Q}_{oxi}$  est le débit requis pour alimenter le GENPAC ou encore le débit de gaz enrichi produit,  $[O_2]_{oxi}$  est la concentration en oxygène du produit,  $[O_2]_{air}$  est la consommation en oxygène de l'air et  $r$  est le niveau de récupération de l'oxygène.

#### 4.3.3 Membranes Perméables Sélectives (MPS)

Les membranes perméables sélectives sont des pellicules polymères non poreuses. La séparation se fait lorsqu'un gaz peut traverser la membrane plus facilement que le gaz duquel on veut le séparer. Le taux avec lequel ce gaz peut traverser ces membranes dépend de son habileté à s'y dissoudre et à diffuser. Il est donc lié à sa taille et à ses propriétés électrostatiques.

Les membranes perméables sont généralement appliquées sur des fibres à âme creuse de polysulfone. Celles-ci offrent une très grande surface par unité de volume. Ces fibres sont groupées et insérées dans un cylindre muni d'une ouverture sur son côté. En bouchant l'espace inter-fibre aux deux extrémités du tube, on obtient un module<sup>iv</sup> de faible volume ayant une très grande surface utile. Un schéma d'un module MPS à âme creuse est montré à la figure 4-6.

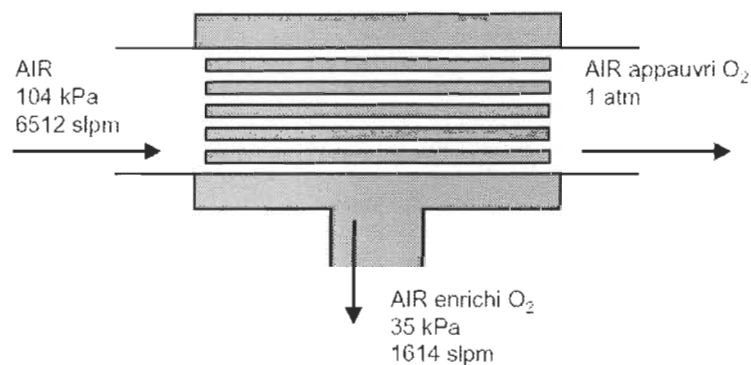
On fait ensuite circuler l'air à l'intérieur de ces fibres. L'oxygène se dissolvant plus rapidement que l'azote dans ce polymère, moins d'azote que d'oxygène ne passe à travers la pellicule pour former le mélange de sortie, enrichi en oxygène. Pour forcer la diffusion à se faire dans le sens voulu, on doit imposer un différentiel de pression entre les deux faces de la membrane. Or, comme c'est

---

<sup>iv</sup> Dénommé « hollow fiber module » en anglais.

bien la différence de pression partielle qui est le moteur de la séparation, il est généralement préféré de former un vide partiel à la sortie du gaz enrichi. Ceci permet d'obtenir la même force de séparation qu'en mode pressurisé mais sans le surplus de travail lié à la compression à de hautes pressions. On peut ainsi réduire la consommation de puissance du dispositif par un facteur trois [53].

Compact Membrane Systems [54] a développé un module de fibres perméables à âme creuse qui permet de produire 1614 slpm d'air enrichi à 30% d'oxygène à 32,4 kPa s'il est alimenté avec 6512 slpm d'air légèrement au-dessus de la pression atmosphérique.



**Figure 4-6: Représentation schématisée d'un module MPS**

Pour fin de calculs, les données de Compact Membrane Systems sont utilisées en assumant le rapport des débits d'entrée et de sortie comme étant constant. La puissance de compression pour cette technique tient compte du travail requis pour générer un grand débit d'air à une faible pression positive (104 kPa absolu) afin d'alimenter le dispositif et également du travail requis pour produire le vide partiel (35 kPa absolu) à la sortie du dispositif correspondant au gaz enrichi. Le travail nécessaire afin d'amener le gaz enrichi jusqu'à la pression d'opération de la pile est également calculé.

#### 4.3.4 Oxygène relâché par l'électrolyse (ORÉ)

Pour les applications où un électrolyseur est présent, l'oxygène produit par l'électrolyse, qui est normalement relâché dans l'environnement, peut être récupéré et stocké dans un réservoir pressurisé. Si l'électrolyseur est modifié de

façon à rendre possible la récupération de l'oxygène, celui-ci peut être utilisé afin d'alimenter la pile à combustible. Cependant, comme la réaction d'électrolyse est la réaction inverse de celle qui se produit dans la pile à combustible, le débit d'oxygène disponible correspond à une stœchiométrie unitaire d'oxydant à la pile à combustible. Or, comme on l'a déjà vu, il est impossible d'opérer la pile à cette stœchiométrie.

Or, comme l'oxygène produit par électrolyse est très pur, on peut envisager la recirculation de l'oxygène dans la pile, comme cela se fait pour l'hydrogène dans notre générateur. La pompe de recirculation de l'oxydant permettrait alors de garder un débit d'oxydant à l'intérieur de la pile suffisamment élevé afin de permettre l'enlèvement de l'eau en surplus et de fixer une stœchiométrie apparente supérieure à l'unité. Une trappe à eau et un filtre déionisant devraient être installés à la sortie de la cathode afin d'en extraire l'eau et les ions avant que le gaz ne soit renvoyé à l'entrée de la cathode. Également, une purge périodique du circuit doit être envisagée afin d'éviter l'accumulation d'impuretés. La puissance de compression est ici requise afin d'amener l'oxygène produit par électrolyse à la pression de stockage, qui a été fixée à 791 kPa pour imiter le stockage de l'hydrogène [28,29].

Si la boucle de recirculation de l'oxygène ne pouvait être implémentée, de l'air devrait être ajouté au flot d'oxygène afin d'atteindre la stœchiométrie souhaitée. Le débit d'air additionnel est donné par :

$$\dot{Q}_{air} = \frac{1}{[O_2]_{air}} \left( \frac{stoéchiométrie - 1}{2} \right) \dot{Q}_{H_2} \quad (4.2)$$

où  $\dot{Q}_{H_2}$  est le débit d'hydrogène. La concentration en oxygène du mélange obtenu est donnée par :

$$[O_2]_{oxi} = \frac{\dot{Q}_{O_2,elec} + [O_2]_{air} \cdot \dot{Q}_{air}}{\dot{Q}_{O_2,elec} + \dot{Q}_{air}} \quad (4.3)$$

ce qui donne 34,7% d'oxygène pour une stœchiométrie de 2. Dans ce cas, en plus de la puissance consommée par le stockage, on doit aussi tenir compte de la puissance requise à la compression du flot d'air jusqu'à la pression d'opération de la pile.

## 4.4 Bilan de puissance et efficacité

Maintenant que les besoins en débits et pressions sont connus pour chacune des techniques, on peut calculer le bilan de puissance du système. Celui-ci est l'ensemble comprenant le GENPAC, les dispositifs d'enrichissement, leurs auxiliaires, s'il y a lieu, et le ou les compresseur(s) dédié(s) à l'oxydant. On suppose toujours l'alimentation en hydrogène indépendante du système. La puissance électrique disponible  $P_{disp}$  fournie par le système est donnée par :

$$P_{disp} = P_{elec} - P_{comp} - P_{parasite} \quad (4.4)$$

où  $P_{elec}$  est la puissance électrique produite par la pile à combustible et est donnée par :

$$P_{elec} = VI \quad (4.5)$$

où  $V$  et  $I$  sont interpolées à partir de la Figure 4-3.  $P_{comp}$  représente la somme des puissances de compression utilisées pour l'oxydant et  $P_{parasite}$  est la somme des autres pertes parasites. L'efficacité du système  $\eta_s$  est donnée par:

$$\eta_{sys} = \frac{P_{disp}}{P_{H_2}} \quad (4.6)$$

où  $P_{H_2}$  est la puissance chimique disponible dans l'hydrogène telle que défini à l'intérieur de l'équation 2.6. Elle peut également être définie par :

$$P_{H_2} = 179,3 \frac{W}{slpm} \times \dot{Q}_{H_2} \quad (4.7)$$

En négligeant les purges, le débit d'oxygène  $\dot{Q}_{O_2}$  est donné par :

$$\dot{Q}_{O_2} = \frac{1}{2} \dot{Q}_{H_2} \cdot stoéchiométrie . \quad (4.8)$$

Le débit d'oxydant correspondant  $\dot{Q}_{oxi}$  est lui donné par :

$$\dot{Q}_{oxi} = \frac{\dot{Q}_{O_2}}{[O_2]_{oxi}} . \quad (4.9)$$

En combinant les équations (4.8) et (4.9):

$$\dot{Q}_{oxi} = \frac{\dot{Q}_{H_2} \cdot \text{stoéchiométrie}}{2 \cdot [O_2]_{oxi}}. \quad (4.10)$$

Pour les calculs comparatifs, une stœchiométrie d'oxygène constante de 2 est utilisée pour tous les cas sauf l'ORÉ comprenant une boucle de recirculation. Pour ce dernier cas, la stœchiométrie est fixée à l'unité. Il est toutefois à noter que le débit constant utilisé pour obtenir les performances expérimentales de la pile correspond en fait à une stœchiométrie variant de l'infini à 2,4 pour l'air à courant maximal. Cette différence affectera principalement les performances qu'aurait le générateur à de forts courants et de faibles concentrations en oxygène de l'oxydant puisque ces conditions correspondent aux plus faibles pressions partielles d'oxygène.

Le travail de compression adiabatique est calculé avec [55] :

$$P_{comp} = \frac{1}{60 \cdot \eta_{comp}} \frac{\zeta_{in} \dot{Q}_{oxi, p_{in}}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\zeta_{out}}{\zeta_{in}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (4.11)$$

où l'efficacité de compression  $\eta_{comp}$  (égale à 0.63) est le produit de l'efficacité du compresseur et de l'efficacité d'un moteur électrique,  $\zeta_{in}$  est la pression absolue à l'entrée du compresseur,  $\dot{Q}_{oxi, \zeta_{in}}$  est le débit d'oxydant à la pression  $\zeta_{in}$  (alpm),  $k$  est la constante polytropique (égale à 1,4) et  $\zeta_{out}$  est la pression absolue à la sortie du compresseur. Pour la création du vide, une efficacité de compression inférieure au cas sur atmosphérique est prévue et la valeur de 0,5 est utilisée.

Cette approche pour estimer le bilan de puissance peut être utilisée pour tout courant de charge et pour toutes les techniques d'enrichissement. Il est cependant clair que les systèmes réels sont optimisés pour un point d'opération fixe; ainsi, la différence entre le bilan estimé et le bilan réel dépend de la charge. Néanmoins, cette approche suffit pour fin de première comparaison des techniques d'enrichissement.

## 4.5 Résultats et discussion

Avant d'observer les conclusions de cette étude, il est important de rappeler les caractéristiques du GENPAC pour lequel les données ont été collectées. Ce générateur utilise une pile pressurisée conçue pour fonctionner à l'hydrogène pur. Comme la puissance de compression forme une large part du total des pertes, l'extrapolation à un générateur utilisant des réactifs non pressurisés est hasardeuse. De plus, comme la puissance de compression est proportionnelle au débit, les résultats sont sensibles au choix de la stœchiométrie retenue.

La figure 4-7 donne l'efficacité énergétique du système comprenant le GENPAC, les dispositifs d'enrichissement, leurs auxiliaires et le compresseur d'oxydant en fonction de la puissance électrique disponible.

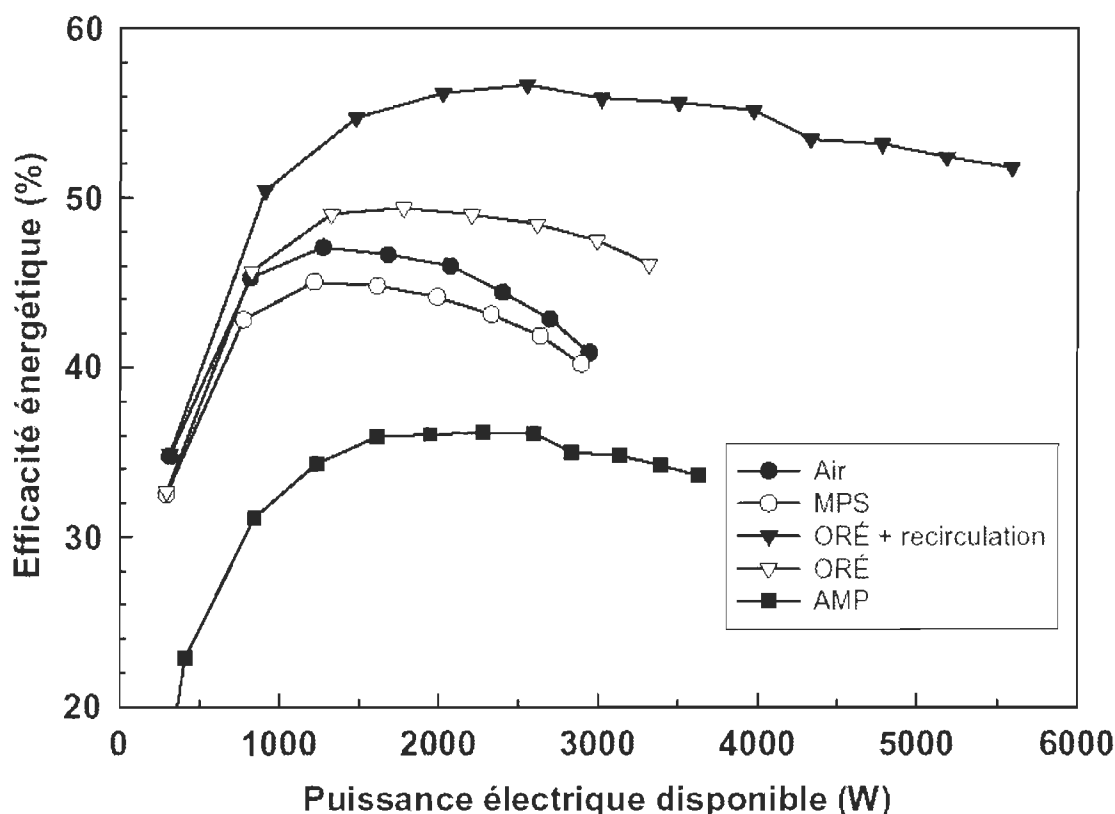


Figure 4-7: Résultat des calculs comparatifs

Comparé à l'air, la séparation par membranes perméables conduit à une efficacité moindre du système. Une légère amélioration des caractéristiques de perméation des membranes suffirait à rendre les MPS avantageuses. En fait,

pour la même consommation énergétique, si le module produisait un mélange contenant 35% d'oxygène, il améliorerait l'efficacité du système.

Comme c'est actuellement le cas pour les membranes perméables, l'AMP utilisant le cycle décrit ici n'améliore pas les performances du générateur. En fait, le travail de compression requis est plus important que le gain enregistré avec l'augmentation de la concentration en oxygène de l'oxydant. Néanmoins, des résultats différents pourraient survenir en utilisant des cycles produisant une plus faible concentration en oxydant avec un plus faible rapport des pressions d'adsorption/désorption.

Sans modifier le générateur, l'utilisation de l'ORÉ permet d'augmenter l'efficacité du système à puissance maximale d'environ 5%. Si la boucle de recirculation en oxygène est implantée, la même efficacité s'accroît de 11% et la puissance disponible passe à 5,6 kW, ce qui est environ le double de ce qu'on obtient sans enrichissement.

Avec les données disponibles, aucune des techniques étudiées ne permettrait d'augmenter la puissance disponible ou l'efficacité de générateurs portatifs (ceux-ci n'étant jamais alimentés directement depuis un électrolyseur). Néanmoins, les MPS sont à considérer dans un avenir proche puisque les propriétés de perméation des membranes sont en constante progression. Cependant, le cycle d'AMP tel qu'étudié ne peut être profitable si sa consommation électrique n'est pas grandement diminuée. Pour les applications stationnaires où l'hydrogène est produit par l'électrolyse, des améliorations significatives d'efficacité et de puissance sont prévues. La démonstration expérimentale de la modification de l'électrolyseur et de l'incorporation de la boucle de recirculation de l'oxygène au sein du générateur sont néanmoins requises afin de pouvoir mieux évaluer l'option.



## Chapitre 5: Modélisation de la pile à combustible

Lors du développement de l'algorithme de contrôle du système autonome à énergies renouvelables, il devient nécessaire de modéliser le système dans son ensemble afin de comparer les effets des différents algorithmes de contrôle et d'ajuster leurs paramètres. Ainsi, on doit disposer d'un modèle pour chacune des composantes principales du système.

Il a été démontré que la capacité de réponse d'une PEMFC aux transitoires de courant est bonne (réf. Chap. 2 et [56]). Il est donc peu probable que les transitoires électriques constituent un problème de taille. Néanmoins, le modèle retenu devrait permettre d'obtenir les propriétés dynamiques, ici au sens électrique, de la pile à combustible.

Jusqu'à maintenant, à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène, le modèle de la pile à combustible utilisé [57] à cette fin est basé sur un modèle construit pour une pile phosphorique [15]. Néanmoins, ce dernier reflète adéquatement le comportement d'une pile à membrane polymère. Or, bien que ce modèle incorpore la température de la pile, le schéma de simulation utilisé la fait évoluer arbitrairement. En fait, cela introduit une certaine imprécision puisque, dépendamment de la fréquence et de la durée de fonctionnement de la pile, le régime transitoire (correspondant au réchauffement de la pile) peut occuper une part importante du temps de fonctionnement. Ces divergences auront donc un impact sur la puissance et l'efficacité simulée de la pile.

Bien entendu, l'approximation actuelle reste valable. Il vaut toutefois la peine de repérer un modèle qui se voudrait plus fidèle. Ainsi, ce chapitre se veut un bref aperçu des types de modèles pouvant s'appliquer à une pile à combustible. On y formule aussi la description d'un modèle prometteur bien que celui-ci n'ait pu être implanté, faute de temps.

## **5.1 Types de modèles**

La détermination du type de modèle à privilégier dépend de la nature des informations que l'on souhaite en tirer. Trois possibilités s'offrent à nous: le modèle purement théorique, le modèle semi-empirique et le modèle empirique.

Le modèle théorique tend à prévoir le comportement local de chacune des variables et requiert des informations détaillées sur chacune des composantes de la pile (telles que la porosité des couches de diffusion). Ces modèles permettent de mieux comprendre les mécanismes qui s'opèrent à l'intérieur de la pile et pourront éventuellement servir à la Conception Assistée par Ordinateurs (CAO). Les modèles actuels [58-60] sont d'une complexité étonnante et ne réussissent toujours pas à représenter une pile dans son ensemble. D'autre part, ils requièrent un travail de calcul prohibitif pour l'application qui nous intéresse.

Le modèle empirique est la simplification extrême de l'interaction entre les variables globales de la pile [61,62]. On ajuste tout simplement les coefficients d'une équation simple de façon à faire concorder le modèle aux résultats expérimentaux. On doit trouver les nouveaux coefficients pour chaque ensemble de conditions d'opération. Ce modèle est très pratique lorsqu'on veut prévoir les performances de la pile sous des conditions d'utilisation qui ont déjà été testées. Toutefois, sa généralisation est très hasardeuse.

L'approche semi-empirique se veut un compromis entre les deux approches. Elle relie les phénomènes observés empiriquement aux caractéristiques de la pile. Lorsque les relations sont bien connues, les paramètres sont obtenus directement à partir des valeurs théoriques. Pour d'autres phénomènes, les relations sont moins solides et on doit utiliser des valeurs expérimentales pour ajuster les coefficients. Cette approche implique des calculs plus complexes que le modèle empirique mais permet de prévoir les performances de toute pile de type PEM pour laquelle on connaît les principales caractéristiques de ses composantes. Ce type de modèle ne renseigne toutefois pas sur les valeurs locales des variables.

## 5.2 Modèle en régime permanent

L'équipe du Royal Military College (RMC) a publié une série d'articles au cours de la dernière décennie [63-67] décrivant un modèle semi-empirique polyvalent, fonctionnel et relativement simple. Ce modèle suppose une distribution uniforme de la température et du courant dans la pile. Aussi, les pressions, les débits et compositions des réactifs, de même que les tensions sont supposées uniformes d'une cellule à l'autre.

La version généralisée du modèle [66] représente la tension de chacune des cellules comme la somme de trois contributions : le potentiel théorique, les surtensions d'activations (à l'anode et la cathode) et la surtension ohmique.

$$V_{cell} = E_{Nerst} + \sigma_{act} + \sigma_{ohm} \quad (5.1)$$

La surtension de concentration est négligée puisque les courants à partir desquels elle prend de l'importance ne sont pas utilisés en pratique. Les autres contributions sont détaillées ci-après.

### 5.2.1 Potentiel théorique

Le potentiel théorique dépend de la température de la pile et des concentrations respectives des réactifs sur leurs sites réactionnels, c'est-à-dire aux interfaces catalyseur/couche de diffusion.

$$E_{Nerst} = 1,229 - 8,5 \times 10^{-4} (T - 298,15) + 4,3085 \times 10^{-5} \cdot T \cdot \left[ \ln(p_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}^*) \right] \quad (5.2)$$

L'évaluation des pressions partielles aux interfaces requiert une analyse du transport de masse à trois interfaces:

1. canaux/électrodes poreuses;
2. phase gazeuse des électrodes/film d'eau à la surface du catalyseur;
3. film d'eau/catalyseur.

Le calcul de chacune des pressions ou concentrations est donc relativement complexe et est expliqué en détail dans [64]. Il incorpore notamment les valeurs de

- taux d'humidité des réactifs;
- stœchiométries respectives des réactifs;

- température de la pile;
- composition des réactifs;
- pressions d'alimentation et de sortie des réactifs;
- épaisseur de la couche de diffusion et un facteur de correction reflétant sa porosité;
- aire active d'une cellule
- courant produit par la pile.

### 5.2.2 Surtensions d'activation

Ces surtensions sont liées à l'initiation des échanges et dépendent des étapes intermédiaires de réaction. En fait, plusieurs constantes requises pour le calcul des paramètres sont difficilement évaluables et une méthode empirique est préférée. L'équation suivante est donc utilisée où les paramètres  $\xi_1$  à  $\xi_4$  sont obtenus expérimentalement.

$$\sigma_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \left[ \ln(c_{O_2}^*) \right] + \xi_4 T \left[ \ln(I) \right] \quad (5.3)$$

La concentration de l'oxygène contenu dans le film d'eau qui recouvre le catalyseur ( $c_{O_2}^*$ ) dépend de l'épaisseur de ce film et de la pression partielle de l'oxygène gazeux à la surface du film. Elle est donnée par l'équation suivante:

$$c_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^{interface}}{5,08 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (5.4)$$

### 5.2.3 Surtension ohmique

La surtension ohmique est la chute de tension attribuable à la résistance des collecteurs de courant en graphite et des électrodes de même qu'à la résistance de la membrane au transfert des protons.

$$\sigma_{ohmique} = \sigma_{ohmique}^{electronique} + \sigma_{ohmique}^{protonique} = -I \left( R^{electronique} + R^{protonique} \right) = IR^{interne} \quad (5.5)$$

La résistance électronique est constante et doit être évaluée expérimentalement.

La résistance protonique est une fonction complexe du contenu en eau de la membrane et de sa distribution, les deux étant eux aussi dépendants de la

température et du courant. Une approche empirique est adoptée et une expression générale qui permet de refléter tous les paramètres principaux de la membrane est choisie.

$$R^{protonique} = \frac{r_M l}{A} \quad (5.6)$$

$r_M$  est la résistance spécifique pour le flot de protons hydratés ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $l$  est l'épaisseur de la membrane et  $A$  est l'aire effective d'une cellule.  $r_M$  est également fonction de  $I$ , de  $A$ , de  $T$  et d'un paramètre qui exprime le degré d'humidification de la membrane.

### 5.3 Vers un modèle dynamique

L'opération normale du système à énergies renouvelables implique des changements de charge, des démarrages et des arrêts de la pile à combustible qui sont accompagnés de variations de la température de la pile avec le temps. Il est donc important d'ajouter les transitions de température au modèle en régime permanent, comme l'a proposé Amphlett [68].

Le modèle thermique en régime permanent comporte 4 termes :

$$\dot{q}_{théo} = \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{élec} + \dot{q}_{pertes} \quad (5.7)$$

que sont la puissance théorique produite par la pile, la puissance sous forme de chaleur sensible (somme des puissances utilisées pour chauffer les flux de gaz à l'anode, à la cathode de même que l'eau de refroidissement), la puissance électrique et les pertes. Des équations de bilan de masse et d'énergie peuvent donc être écrites [68].

Les pertes thermiques pouvant aussi être obtenues à partir d'équations de transfert de chaleur, on peut résoudre les équations de bilan et ainsi exprimer l'accumulation de chaleur dans la pile. La chaleur moyenne transférée à l'espace immédiat de la pile peut être exprimée sous la forme :

$$(hA)_{pile} = \frac{\dot{q}_{pertes}}{(T_{pile} - T_{ambiante})} \quad (5.8)$$

Les termes de chaleur sensible peuvent eux aussi être reliés à des coefficients de transfert de chaleur.

$$\begin{aligned}
(hA)_a &= \frac{\dot{q}_{sens,a}}{T_{pile} - 0,5(T_{a,entrée} + T_{a,sortie})} \\
(hA)_c &= \frac{\dot{q}_{sens,c}}{T_{pile} - 0,5(T_{c,entrée} + T_{c,sortie})} \\
(hA)_{eau} &= \frac{\dot{q}_{sens,eau} + \dot{q}_{hum}}{T_{pile} - 0,5(T_{eau,entrée} + T_{eau,sortie})}
\end{aligned} \tag{5.9}$$

La valeur des coefficients  $(hA)$  doit être obtenue expérimentalement.

Pour passer au modèle dynamique, on ajoute un terme d'accumulation de chaleur à l'équation 5.7.

$$MC \left( \frac{dT_{pile}}{dt} \right) = \dot{q}_{théo} - \dot{q}_{sens} - \dot{q}_{élec} - \dot{q}_{pertes} \tag{5.10}$$

où  $M$  est la masse totale de la pile,  $C$  est la chaleur massique moyenne de la pile et  $dT_{pile}/dt$  est la variation de température selon le temps. On peut donc isoler :

$$\frac{dT_{pile}}{dt} = \frac{1}{MC} (\dot{q}_{théo} - \dot{q}_{sens} - \dot{q}_{élec} - \dot{q}_{pertes}) \tag{5.11}$$

On pourra alors utiliser cette équation comme base :

$$T_{pile,j+1} = T_{pile,j} + \left( \frac{dT_{pile}}{dt} \right)_j \Delta t \tag{5.12}$$

où  $\Delta t$  peut prendre une valeur d'environ une minute. On procédera alors comme suit :

1. On utilise la valeur actuelle de la température de la pile pour obtenir la tension de la pile par l'équation 5.1 et ainsi la puissance électrique.
2. Le modèle thermique, en combinant les équations de bilan de masse/énergie et les équations 5.8 et 5.9 permet de trouver la nouvelle température de sortie des gaz et la puissance sensible  $\dot{q}_{sens}$ .
3. On obtient la puissance théorique totale  $\dot{q}_{théo}$  selon la température.
4. On obtient  $\dot{q}_{pertes}$  depuis l'équation 5.7.
5. On peut alors utiliser les équations 5.11 et 5.12 pour calculer la variation de température de la pile dans le temps et donc la température de celle-ci à l'instant  $t+1$ .

Ce modèle peut donc permettre de calculer la température de la pile, la température de sortie des gaz, la tension de la pile et la puissance électrique en fonction du temps.

### ***5.4 Propositions et conclusion***

Le modèle présenté précédemment ne tient compte que de la pile et non de l'ensemble du générateur. Il faudra donc apporter quelques modifications aux hypothèses pour l'appliquer à notre cas.

1. Du point de vue du générateur, la majeure partie de l'eau est conservée et ne peut donc pas être vue comme un transfert de chaleur sensible. La seule énergie retirée par l'intermédiaire de l'eau est celle transférée à l'échangeur de chaleur et celle expulsée avec l'eau produite en surplus, cette dernière pouvant être négligeable.
2. Le circuit de refroidissement (et l'eau qu'il contient) fait donc partie de l'élément d'accumulation de chaleur et les variables  $M$  et  $C$  devront être ajustées en conséquence. On peut supposer la température de l'eau de refroidissement approximativement égale à la température de la pile.
3. La surface d'échange étant beaucoup plus élevée et les matériaux étant différents, l'ajout du circuit de refroidissement comme élément de stockage modifie également les coefficients d'échange thermique.
4. Comme notre système comporte une boucle de recirculation à l'anode, la façon de calculer la pression partielle d'hydrogène diffèrera de celle utilisée dans [64]. En effet, on y assume une faible stœchiométrie, ce qui n'est pas notre cas. La recirculation a aussi comme effet de maintenir la température d'entrée à l'anode presque égale à sa température de sortie. Les termes relatifs à l'hydrogène pourraient donc être négligés dans les pertes sensibles.
5. L'air est forcé à l'intérieur du générateur, ce qui affecte les coefficients d'échange de chaleur. La vitesse de l'air varie selon le nombre de ventilateurs en fonction.

6. De plus, lorsque la température de la pile devient supérieure à 80°C, le circuit de refroidissement est dérivé automatiquement vers un échangeur de chaleur, ce qui fait brusquement chuter la température de la pile.

Les articles mentionnés et la méthodologie proposée constituent une base valable pour la construction d'un modèle du générateur à PAC qui permettra d'en évaluer la température en fonction du temps à partir du profil de charge. Le modèle de Ceraolo [69] pourrait remplacer le modèle en régime permanent suggéré. Il permet une meilleure modélisation des propriétés électriques transitoires mais aux dépens d'une complexité accrue.

L'évaluation des paramètres de déperdition thermique requiert un appareillage dont on ne dispose pas. Cependant, on pourrait tenter d'obtenir les pertes thermiques à partir de mesures expérimentales réalisées par François Laurencelle [70] sur la même pile il y a de ça quelques années.



## Chapitre 6: Conclusion

Ce mémoire a repris les différentes étapes d'un travail qui consistait à intégrer une pile à combustible au sein d'un système autonome à énergies renouvelables de même qu'à définir les conditions permettant d'en faire une utilisation rationnelle.

Les systèmes à énergies renouvelables, si on exclut l'hydroélectricité, occupent présentement une infime part du marché. Néanmoins, comme cela a été exposé au chapitre 1, cette part de marché augmentera rapidement au cours des prochaines années sous l'action conjuguée des pressions environnementales, de la dérégulation et de la distribution de la production électrique. De plus, la maturation des technologies de stockage d'électricité profitera aux systèmes autonomes qui pourraient fort bien devenir compétitifs hors de leur créneau habituel que forment les utilisations où les réseaux électriques fiables sont absents. Le travail réalisé est donc d'un intérêt certain.

Le système autonome concerné par la présente étude utilise une éolienne et des panneaux photovoltaïques comme sources primaires et fait appel à un électrolyseur pour stocker les surplus d'électricité sous forme d'hydrogène. La pile à combustible a comme rôle de produire de l'électricité à partir de cet hydrogène stocké de façon à combler, si nécessaire, la différence entre la charge et la production des sources primaires. Le bon fonctionnement de la pile garantit donc l'alimentation continue de la charge.

La première tâche à réaliser pour mener à bien l'intégration de la pile à combustible, ou plutôt du générateur à pile à combustible, est de l'étudier de façon à mettre en évidence son mode d'opération et ses caractéristiques. Ainsi, on en a déduit les limites à respecter pour l'automatisation du système de la pile, autant au niveau de l'alimentation en réactifs que des modes de défaillances face auxquels il faut se prémunir. Aussi, une étude du comportement du générateur à PAC en régime dynamique a été effectuée. Il en a été déduit que les transitoires rapides de faibles amplitudes, tels que ceux produits par les hacheurs survolteurs, n'ont pas d'influence néfaste sur le générateur. Les transitoires de plus grande

amplitude, définis ici comme ceux représentant un pourcentage significatif de la capacité de production du générateur, requièrent plus d'attention. En effet, le courant (et donc la puissance) que peut produire le générateur est limité selon la température de la pile. Celle-ci, sous sa température nominale d'opération, ne peut supporter la densité de courant correspondant à sa puissance nominale. Ainsi, si les transitoires en question amènent le générateur à produire au-delà de ce qu'il peut faire à sa température actuelle, sa tension chutera abruptement et il s'arrêtera. Pour éviter ces situations, il est possible soit d'utiliser un moyen de stockage palliatif et temporaire, tel une batterie chimique, soit de surdimensionner le générateur de façon à ce que la charge maximale qu'il ait à supporter ne représente plus que 30 à 50% de sa production nominale. Ces résultats mettent en évidence les contraintes additionnelles dont il faut tenir compte pour automatiser le fonctionnement du générateur au sein du système autonome.

Ensuite, un algorithme de commande et de régulation a été développé et implanté à l'aide du logiciel LabView DSC et d'un microcontrôleur. Le rôle de la commande vise à faire correspondre la puissance transférée au bus CC via le convertisseur survolteur à la consigne de puissance désirée. Ce rôle est assumé en majeure partie par le microcontrôleur. Le rôle de régulation vise à maintenir la pile dans un état stable de fonctionnement. Cela est réalisé en relevant la tension de la pile en différents points afin de déterminer si une condition anormale est en train de se développer. Si tel est le cas, une augmentation ou une réduction du débit d'oxydant est programmée afin de rétablir l'équilibre de l'humidification des membranes. Si ce correctif échoue, une réinitialisation de la puissance transférée est permise afin d'éviter l'arrêt intempestif du générateur. Cette réinitialisation périodique, en contrepartie, réduit la puissance moyenne transférée.

Les tests réalisés ont prouvé que l'algorithme implanté permet de suivre la consigne à l'intérieur d'un délai raisonnable, ce dernier dépendant de la température initiale de la pile et du taux de variation de la consigne. Dans le pire des cas, c'est-à-dire la production maximale suite à un démarrage à température ambiante, ce délai peut atteindre 14 minutes (Figure 2-17). Lorsque la température ne limite pas la puissance appliquée, le taux de variation est de

28,5 W/s. L'algorithme s'est montré stable pour l'ensemble des tests et permet donc l'automatisation du fonctionnement du générateur à pile à combustible et du convertisseur qui lui est associé de manière à répondre à la consigne et ce, de façon sûre. En effet, si une condition pouvant être le résultat d'une situation à risque se présente (par exemple, l'arrêt imprévu du générateur), l'algorithme met automatiquement le système hors fonction.

Une autre étape du travail réside en l'étude des performances du générateur avec un enrichissement en oxygène de l'oxydant. Cette étude se justifie par le fait que le générateur à PAC est le maillon le moins efficace de la boucle de stockage sous forme hydrogène. Toute amélioration de l'efficacité de celui-ci se répercuterait donc sur l'efficacité du système autonome. La mesure des performances de la pile avec différentes concentrations en oxygène de l'oxydant a été réalisée. L'amélioration des performances est sensible dès les premiers pourcentages d'enrichissement et se répercute autant sur la tension que sur le courant maximal admissible (et donc sur la puissance produite). Ensuite, trois techniques d'enrichissement ont été comparées à partir de données recueillies dans la littérature: l'adsorption par modulation de pression, les membranes perméables sélectives et la récupération de l'oxygène produit lors de l'électrolyse. Si on soustrait la consommation énergétique de ces techniques du supplément d'énergie qu'elles permettent de tirer de l'hydrogène, il s'avère que seulement la récupération de l'oxygène produit par l'électrolyse est avantageuse. En effet, les autres n'offrent qu'un bilan négatif. L'oxygène étant un sous-produit jusqu'alors perdu, il est facile de le valoriser. Cette façon de faire permettrait d'augmenter l'efficacité du générateur de 5%. De plus, comme l'oxygène produit par électrolyse est approximativement aussi pur que l'hydrogène, on peut imaginer l'implantation d'une boucle de recirculation de l'oxydant à l'intérieur du générateur comme c'est présentement le cas avec l'hydrogène. Cela permettrait d'accroître l'efficacité du générateur par 20% et de presque doubler la puissance maximale du générateur. L'enrichissement par récupération de l'oxygène produit par électrolyse est donc une technique prometteuse qui se marie particulièrement bien avec les systèmes de stockage sous forme hydrogène.

La dernière tâche accomplie est de tirer profit de la recherche bibliographique réalisée afin de cerner un modèle du GENPAC qui permettrait de simuler celui-ci plus fidèlement que ne le fait le modèle utilisé jusqu'à présent. La combinaison d'une série d'articles a donc été proposée afin de créer un modèle permettant de prédire la température de la pile en fonction du temps et du profil de charge. Comme ces articles traitent seulement de la pile à combustible, une série de modifications a été proposée afin que le modèle puisse être appliqué au générateur.

Chacune des tâches ayant été réalisée avec succès, l'ensemble des objectifs fixés ont été atteints. Néanmoins, la réalisation de ce travail me porte à proposer un certain nombre de recommandations.

Tout d'abord, le prototype de générateur utilisé n'est plus représentatif des dernières générations de piles. De plus, le grand nombre d'heures d'opération qu'il cumule et le nombre de conditions sous lesquelles il a été opéré font que ses performances se sont grandement détériorées. La fuite trans-membranaire suspectée au niveau du groupe #6 n'augure rien de bon. Les déséquilibres que cela implique pourraient très rapidement rendre le générateur tout à fait inopérant. On suggère donc le remplacement de celui-ci. (Quelques mois après la rédaction initiale de ce travail, les performances du générateur se sont dégradées sérieusement. La présence d'une importante fuite transmembranaire a été confirmée bien qu'il eut été impossible de déterminer dans quelle cellule elle se trouvait puisqu'il nous était interdit d'ouvrir l'empilement de cellules.)

Ensuite, on gagnerait beaucoup à valider expérimentalement la récupération de l'oxygène produit par l'électrolyseur et à démontrer le fonctionnement de la boucle de recirculation de l'oxydant à l'intérieur du générateur. Il s'agit d'une formule novatrice jamais rencontrée dans la littérature.

Il serait aussi intéressant de modifier la boucle de stockage sous forme hydrogène du système autonome afin de vérifier si on pourrait ainsi la simplifier. Le système actuel, utilisant un électrolyseur alcalin et une PAC à membrane polymère solide, rend nécessaire la purification des réactifs produits par l'électrolyseur avant leur introduction dans la pile. Aussi, l'utilisation d'un

compresseur à piston pour amener l'hydrogène à la pression de stockage introduit des traces d'hydrocarbures. L'utilisation d'un électrolyseur et d'une PAC de même type pourrait permettre d'éviter ces complications. En effet, un électrolyseur à membranes produit de l'hydrogène pressurisé de haute pureté qui peut être stocké sans autre étape de compression [71-72].

En se basant sur le fait que l'électrolyseur et la PAC ne sont jamais utilisés simultanément au sein du système autonome, on pourrait pousser plus loin l'intégration de ces deux composants en les remplaçant par une pile réversible. Ces piles, à membranes polymères, peuvent jouer à la fois le rôle d'électrolyseur et de pile à combustible. On pourrait ainsi réduire le coût du système.

Enfin, maintenant qu'il a été démontré qu'un système autonome de capacité réaliste utilisant le stockage hydrogène fonctionne, il serait intéressant de comparer les différentes alternatives possibles sur la base de l'entretien requis et de la fiabilité des composants principaux et de leurs auxiliaires. On pourrait comparer les différents types de piles et d'électrolyseurs, les méthodes de stockage et aussi l'utilisation d'alternatives à la PAC, comme les brûleurs catalytiques et les moteurs à explosion alimentés à l'hydrogène.

## Bibliographie

- 1 NEWNHAM, R.H. et BALDSING W.G.A. "Benefits of partial-state-of-charge operation in remote-area power-supply systems", *J. Power Sources*, vol. 107, 2002, pp. 273-279.
- 2 H POWER Corp, GIBBARD, F. "Performance and field experience of portable and mobile fuel cells in the 50 W to 250 W power range", Small fuel cells and battery technologies for use in portable applications, New Orleans, 26-28 avril 2000.
- 3 PATTERSON, D.J., "Renewable energy engineering - Sustainable energy engineering - An overview", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.1, no. 1, 1999, pp. 34-39.
- 4 GOUVERNEMENT DU CANADA, Ministère des ressources naturelles du Canada, BRANDON, Rob, *Feuille de route relative à la technologie canadienne de l'électricité, WG4: Production d'électricité à petite échelle et énergies renouvelables*, présentation donnée pour le pôle énergie en Mauricie, Trois-Rivières (Qc), 28 août 2001.
- 5 HYDRO-QUÉBEC, REID, R., SAULNIER, B., *et al*, "Emerging technologies, generation and storage for distributed and autonomous energy systems", présenté lors de *15th CanWEA Conference & Trade Show*, Rimouski (Qc), 27-29 septembre 1999, 7 p.
- 6 GOUVERNEMENT DU CANADA, Industrie Canada, *Carte routière technologique: L'énergie électrique canadienne, prévisions*, Sa majesté la Reine du chef du Canada, 2000, 70 p.
- 7 LEDJEFF, K., "Comparison of storage options for photovoltaic systems", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 15, no. 9, 1990, pp. 629-633.
- 8 SMITH, W., "The role of fuel cells in energy storage", *J. Power Sources*, vol. 86, 2000, pp. 74-83.
- 9 VOSEN, S.R. et KELLER, J.O., "Hybrid energy storage for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 24, 1999, pp. 1139-1156.
- 10 STAMBOULI, A.B. et TRAVERSA, E., "Fuel cells, an alternative to standard sources of energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, 2002, pp. 297-306.
- 11 BARRA, L. et COIANTE, D. "Energy cost analysis for hydrogen-photovoltaic stand-alone power stations", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 18, no. 8, 1993, pp. 685-693.
- 12 GARCIA-CONDE, A.G. et ROSA, F., "Solar hydrogen production: a Spanish experience", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 18, no. 12, 1993, pp. 995-1000.
- 13 HOLLENBERG, J.W., CHEN, E.N. *et al*, "Development of a photovoltaic energy conversion system with hydrogen energy storage", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 20, no. 3, 1995, pp. 239-243.
- 14 DIENHART, H., et SIEGEL, A., "Hydrogen storage in isolated electrical energy systems with photovoltaic and wind energy", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.19, no. 1, 1994, pp. 61-66.
- 15 VANHANEN, J.P. et LUND, P.D., "Computational approaches for improving seasonal storage systems based on hydrogen technologies", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 20, no. 7, 1995, pp. 575-585.
- 16 GALLI, S. et STEPHANONI, M., "Development of a solar-hydrogen cycle in Italy", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 5, 1997, pp. 453-458.

- 17 IBRAHIM, M.I., ELMALLAH, A.A. *et al*, "Investigation of techno-economical performance of using hydrogen storage with integrated renewable energy systems", dans VERIZOGLU, T.N., WINTER, C.-J. *et al*. éditeurs, *Hydrogen Energy Progress XI, Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference*, Stuttgart, 23-28 Juin 1996, vol. 2, pp. 2055-2060.
- 18 CICCONARDI, S.P., JANNELLI, E. *et al*. "Hydrogen energy storage: hydrogen and oxygen storage subsystems", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 9, 1997, pp. 897-902.
- 19 BARTHEL, H., BROCKE, W.A. *et al*, "Phoebus-Jülich: An autonomous energy supply system comprising photovoltaic, electrolytic hydrogen, fuel cell", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 4, 1998, pp. 295-301.
- 20 SZYSZKA, A. "Ten years of solar hydrogen demonstration project at Neunburg vorm wald, Germany". *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 10, 1998, pp. 849-860.
- 21 LEHMAN, P. A., CHAMBERLIN, C.E. *et al*, "Operating experience with a photovoltaic-hydrogen energy system", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 5, 1997, pp. 465-470.
- 22 TORRES, L.A., RODRIGEZ, F.J., *et al*, "Simulation of a solar-hydrogen-fuel cell system: results for different locations in Mexico", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 11, 1998, pp. 1005-1009.
- 23 VANHANEN, J.P. et LUND, P.D., "Electrolyser-Metal Hydride-fuel cell system for seasonal energy storage", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 4, 1998, pp. 267-271.
- 24 ABDALLAH, M.A.H., ASFOUR, S.S. *et al*, "Solar-hydrogen energy system for Egypt", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 24, 1999, pp. 505-517.
- 25 RAMBACH, G.D., "Integrated hydrogen utility systems for remote northern communities", Hydrogen Millennium 10th Canadian Hydrogen Conference, Québec, 28-31 mai 2000.
- 26 DUTTON, A.G., BLEIJS, J.A.M., *et al*, "Experience in design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 25, 2000, pp. 705-722.
- 27 GOUVERNEMENT DES ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE, Department of Energy, JACOBSON, R., PURCELL, R., *et al*. "Renewable hydrogen systems integration and performance modeling" Proceedings of the 2001 DOE hydrogen program review, NREL/CP-570-30535, 2002
- 28 AGBOSSOU, K., HAMELIN, J. *et al*, "Fuel cell and hydrogen storage for stand alone renewable energy system", *Int. J. Renewable Energy Engineering*, vol. 2, no. 3, 2000, pp. 254-259.
- 29 AGBOSSOU, K., CHAHINE, R., *et al*, "Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications", *J. Power Sources*, vol. 96, 2001, pp. 168-172.
- 30 KOLHE, M., AGBOSSOU, K., *et al*, "Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen", *Renewable Energy*, vol. 28, 2003, pp. 727-742.
- 31 SAMMES, N. M. et BOERMA, R. "Small-scale fuel cells for residential applications", *J. Power Sources*, vol. 86, 2000, pp. 98-110.
- 32 SUSAI, T., KAWAKAMI, A *et al*, "Development of a 1 kW polymer electrolyte fuel cell power source", *J. Power Sources*, vol. 92, 2000, pp. 131-138.
- 33 FLUENT, *PEM Fuel Cells Modeled in FLUENT* [En ligne], <http://www.fluent.com/about/news/newsletters/01v10i2/s2.htm> (page consultée le 19 décembre 2002).

- 34 FUEL CELL TODAY, *Reference center>media kit>images* [En ligne], [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com) (page consultée le 19 décembre 2002).
- 35 GOUVERNEMENT DES ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE, Department of Energy, HIRSCHENHOFER, J.H., STAUFFER, D.B. *et al*, éd. "Fuel Cell Handbook, fourth edition" [CD-ROM], DOE/FETC-99/1076, 1998.
- 36 QI, Z. et KAUFMAN, A. "Low Pt loading high performance cathodes for PEM fuel cells", *J. Power Sources*, vol. 113, 2003, pp. 37-43.
- 37 LAURENCELLE, F., CHAHINE, R. *et al*, "Characterization of a Ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack", *Fuel Cells*, vol. 1, no. 1, 2001, pp. 66-71.
- 38 BARBIR, F., *Review of hydrogen conversion technologies* [En ligne], [www.iahe.org/h2convrt.htm](http://www.iahe.org/h2convrt.htm) (page consultée le 19 décembre 2002).
- 39 KNIGHTS, S.D, WILKINSON, D.P., "Method and apparatus for detecting a leak within a fuel cell", US patent # 6,492,043, 2002.
- 40 WILKINSON, D.P, CAMPBELL, S.A., "Method and apparatus for detecting transfer leaks in fuel cells" US patent #6,485,651, 2002.
- 41 KNIGHTS, S.D., LAURITZEN, M.V., "Method for operating fuel cells on impure fuels", US patent #6,210,820, 2001.
- 42 THORSTENSEN, Bernt, "A parametric study of fuel cell system efficiency under full part load operation", *J. Power Sources*, vol. 92, 2001, pp. 9-16.
- 43 ERIKSEN, J., *Development of a data acquisition and control system for a small-scale PV-H2 system - First design phase* [En ligne], <http://www.fys.uio.no/~joner/paper1.html> (page consultée le 20 mai 1999).
- 44 MIZUNO, Seiji, "Polyelectrolytic fuel cell and the method of controlling the operation thereof", US Patent #5939218, 1999.
- 45 WEBB, D. et MOLLER-HOLST, S., "Measuring individual cell voltages in fuel cell stacks", *J. Power Sources*, vol. 103, 2001, pp. 54-60.
- 46 NATIONAL INSTRUMENTS, ZANETTI, S., *Tackling high channel count applications in LabVIEW*, NI-WEEK, 16-18 août 2000, [En ligne] [http://zone.ni.com/devzone/learningcenter.nsf/webmain/7FCC69DBFA9C7C0C862569310079EB37?opendocument&node=DZ52097\\_US](http://zone.ni.com/devzone/learningcenter.nsf/webmain/7FCC69DBFA9C7C0C862569310079EB37?opendocument&node=DZ52097_US) (page consultée le 15/12/02).
- 47 FOURNIER, M., HAMELIN, J. *et al*, "Fuel cell operation with oxygen enrichment", *Fuel Cells*, vol. 2, no. 2, 2002, pp. 117-122.
- 48 AMPHLETT, J. C., OLIVEIRA, E. H. de, *et al*. "Dynamic interaction of a proton exchange membrane fuel cell and lead-acid battery", *J. Power Sources*, vol. 95, 1997, pp. 173-178.
- 49 RUTHVEN, D.M., FAROOQ, S., *et al*, *Pressure swing adsorption*, New-York, VCH Publishers, 1994, 343 p.
- 50 BATTA, L. B., "Selective adsorption gas separation process", U.S. Patent, 3,636,679, 1972.
- 51 SIRCAR, S., "Air fractionation by adsorption", *Separation science and technology*, vol. 23, no. 14-15, 1988, pp. 2379-2396.
- 52 Questair Technologies Inc., 6961 Russell Avenue, Burnaby (BC), Canada V5J 4R8.



- 53 GOLLAN, A. et KLEPER, M.H., 1986 *Symposium on Industrial Combustion Technologies*, ASM Int., 1986, pp. 179-185.
- 54 Compact Membrane Systems Inc., 325 Water Street, Wilmington, DE 19804 (USA), personal communication with K. Callaghan, Director, Engine Division.
- 55 BOLZ, G. et TUVE, G.L. éd., *Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC press, Cleveland, 1973, 1166 p.
- 56 HAMELIN, J., AGBOSSOU, K., *et al*, "Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, 2001, pp. 625-629.
- 57 KÉLOUWANI, Souso, "Stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène", Mémoire, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002, 166 f.
- 58 ROWE, A. et LI, X., "Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells", *J. Power Sources*, vol. 102, 2001, pp. 82-96.
- 59 MURGIA, G., PISANI, L. *et al*, "Electrochemistry and mass transport in polymer electrolyte membrane fuel cells", *J. Electrochemical Society*, vol. 149, no. 1, 2002, pp. A31-A38.
- 60 UM, S., WANG, C.-Y., *et al*, "Computational Fluid Dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells", *J. Electrochemical Society*, vol. 147, no. 12, 2000, pp. 4485-8893.
- 61 KIM, J., LEE, S.-M., *et al*, "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation", *J. Electrochemical Society*, Vol. 142, n. 8, 1995, pp. 2670-2674.
- 62 CHU, D. et JIANG, R., "Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks: Part 1: Evaluation and simulation of an air breathing PEMFC stack", *J. Power Sources*, vol. 83, 1999, pp. 128-133.
- 63 AMPHLETT, J.C., BAUMERT, R.M., *et al*, "Parametric modeling of the performance of a 5-kW proton-exchange membrane fuel cell stack", *J. Power Sources*, 49, 1994, pp. 349-356.
- 64 AMPHLETT, J.C., BAUMERT, R.M., *et al*, "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: I. Mechanistic Model Development", *J. Electrochemical Society*, vol. 61, n. 1, 1995, pp. 1-8.
- 65 AMPHLETT, J.C., BAUMERT, R.M., *et al*, "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: II. Empirical Model Development", *J. Electrochemical Society*, vol. 142, n. 1, 1995, pp. 9-15.
- 66 MANN, R.F., AMPHLETT, J.C., *et al*, "Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *J. Power Sources*, vol. 86, 2000, pp. 173-180.
- 67 FOWLER, Michael, MANN, Ronald F., *et al*, "Incorporation of voltage degradation into a generalized steady state electrochemical model for a PEM fuel cell", *J. Power Sources*, 106, 2002, pp. 274-283.
- 68 AMPHLETT, J.C., MANN, R.F., *et al*, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells", *J. Power Sources*, vol. 61, 1996, pp. 183-188.
- 69 CERAOLO, M., MIULLI, C. *et al*, "Modelling static and dynamic behaviour of proton exchange membrane fuel cells on the basis of electro-chemical description", *J. Power Sources*, vol. 113, 2003, pp. 131-140.
- 70 LAURENCELLE, François, "Étude d'un système d'énergies renouvelables à base d'hydrogène", Mémoire, Université du Québec à Trois-Rivières, 2001, 85 f.

- 71 PROTON ENERGY SYSTEMS, Energy systems > Zero-emission vehicles, [En ligne]  
<http://www.protonenergy.com/index.php/html/energysystems/applications/zeroemission/index.html>  
I (page consultée le 28/04/03).
- 72 VANDENBORRE HYDROGEN SYSTEMS, Products > H2 Igen, [En ligne]  
<http://www.hydrogensystems.com/index2.html> (page consultée le 28-04-03).

## **Annexe 1: Étiquettes de la station de test**

Tag Name	Data Type	Tag Access	I/O Group	Update Deadband	Log Data	Log Data Deadband	Log Resolution	Set Initial Value	Initial Value	Raw Full Scale	Raw Zero Scale	Eng Full Scale	Eng Zero Scale	Units	Scaling	Coerce
Watchdog	Discrete	Output	DaqOpc	On Change	Off	On Change	N/A	Off	Off	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	None	N/A
H2 valve	Discrete	Output	DaqOpc	On Change	On	On Change	N/A	On	Off	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	None	N/A
FC stop	Discrete	Output	DaqOpc	On Change	On	On Change	N/A	On	Off	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Invert	N/A
FC start	Discrete	Output	DaqOpc	On Change	On	On Change	N/A	On	Off	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	None	N/A
FC disconnect	Discrete	Output	DaqOpc	On Change	Off	On Change	N/A	On	Off	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Invert	N/A
FC connect	Discrete	Output	DaqOpc	On Change	Off	On Change	N/A	On	Off	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Invert	N/A
Oxydant flow setpoint	Analog	Output	DaqOpc	0.25	On	1	0.01	On	0	5	0	400	0	slpm	Linear	Off
Water outlet temperature	Analog	Input	DaqOpc	1	On	1	0.01	Off	0	100	0	100	0	Deg C		Off
Water inlet temperature	Analog	Input	DaqOpc	1	On	1	0.01	Off	0	100	0	100	0	Deg C		Off
Stack Voltage	Analog	Memory		0.02	On	1	0.01	On	0	50	0	50	0	V		Off
Stack temperature	Analog	Input	DaqOpc	1	On	1	0.01	Off	0	100	0	100	0	Deg C		On
H2 tank pressure	Analog	Input	DaqOpc	0.5	On	1	0.01	Off	0	10	0	200	0	psig	Linear	Off
H2 inlet temperature	Analog	Input	DaqOpc	1	On	1	0.01	Off	0	100	0	100	0			Off
Fuel cell shunt current	Analog	Input	DaqOpc	0.33	On	1	0.01	On	0	0.03/0.35	0	300	0	A	Linear	Off
Flow reading oxydant	Analog	Input	DaqOpc	0.25	On	1	0.01	Off	0	5	0	400	0	slpm	Linear	Off
Flow reading H2	Analog	Input	DaqOpc	0.1	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	100	0	slpm	Linear	Off
Fc inlet fuel pressure	Analog	Input	DaqOpc	4	On	4	0.5	Off	0	0.045	0	50	0	psig	Linear	Off
Fc inlet air pressure	Analog	Input	DaqOpc	4	On	4	0.5	Off	0	0.045	0	50	0	psig	Linear	Off
Cell Group #7	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
Cell Group #5	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
Cell Group #4	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
Cell Group #3	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
Cell Group #2	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
Cell Group #1	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
Cell Group #6	Analog	Input	DaqOpc	0.2	On	0.4	0.01	Off	0	5	0	5	0	V		Off
H2 pressure test station	Analog	Input	DaqOpc	1	On	1	0.01	Off	0	5.1	0.9	100	0	psig	Linear	Off
Courant ELGAR	Analog	Memory		1	On	1	0.01	Off	0	100	0	100	0			Off
Puissance charge CC	Analog	Memory		0.05	On	0.05	1	On	0	5000	0	5000	0	W		Off
Puissance source ELGAR	Analog	Memory		0.02	On	0.02	1	On	0	5000	0	5000	0	W		Off
Consigne boost	Analog	Input	Remote nrj	0.02	On	0.02	1	Off	0	5000	0	5000	0	W		Off
Tension BUS	Analog	Input/Outp	Remote nrj	1	On	1	0.1	Off	0	70	0	70	0	V		Off
Puissance boost	Analog	Memory		0.05	On	0.05	1	On	0	5000	0	5000	0	W		Off
Consigne source ELGAR	Analog	Input	Remote nrj	0.02	On	0.5	1	On	0	5000	0	5000	0	W		Off
Puissance charge AC	Analog	Memory		0.03	On	0.03	1	On	0	3000	0	3000	0	W		Off

## **Annexe 2: Code du programme Contrôle\_pile\_5.vi**



Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:01

---

Connector Pane



**Contrôle\_pile\_5.vi**

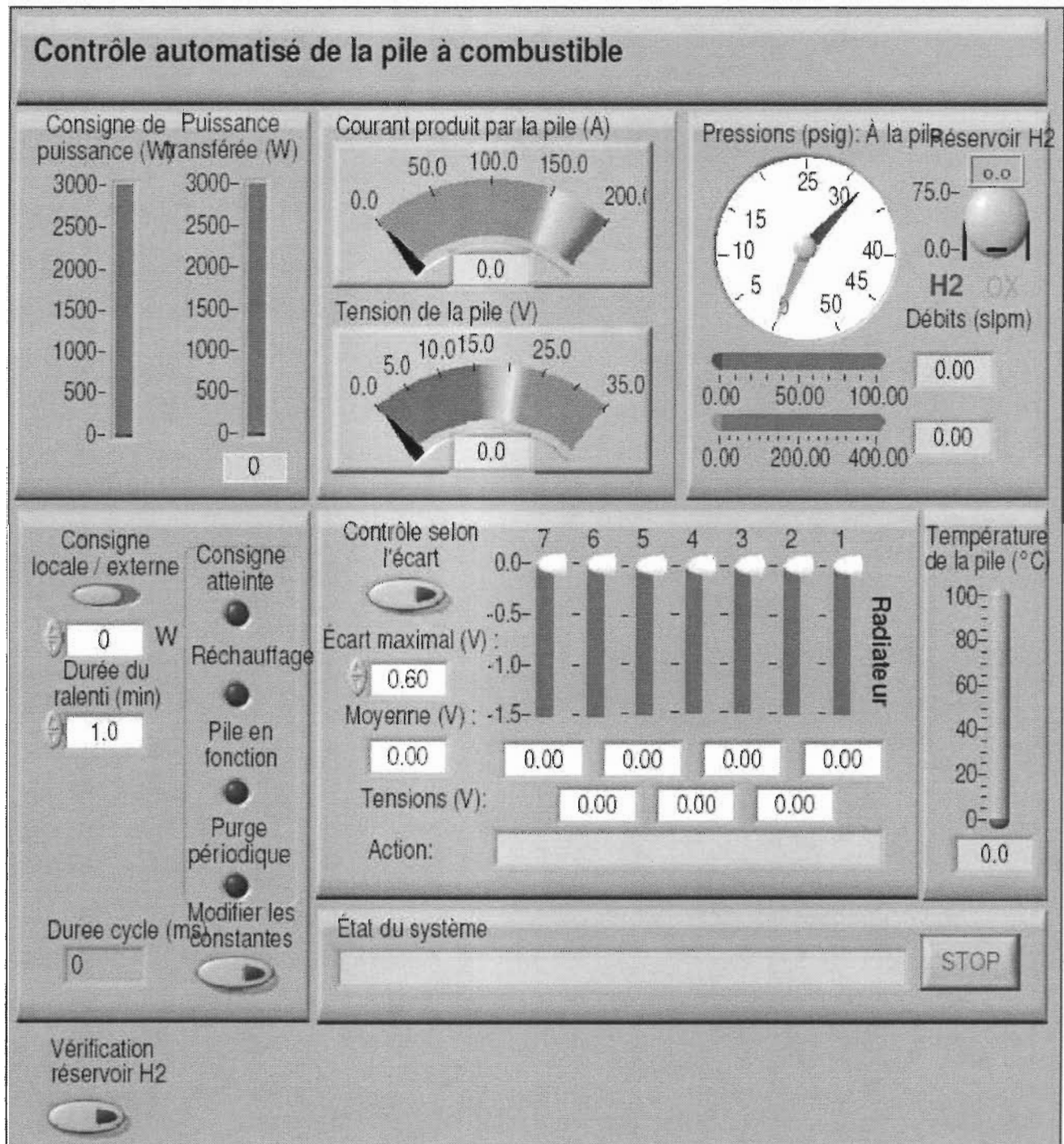
Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:01

Front Panel





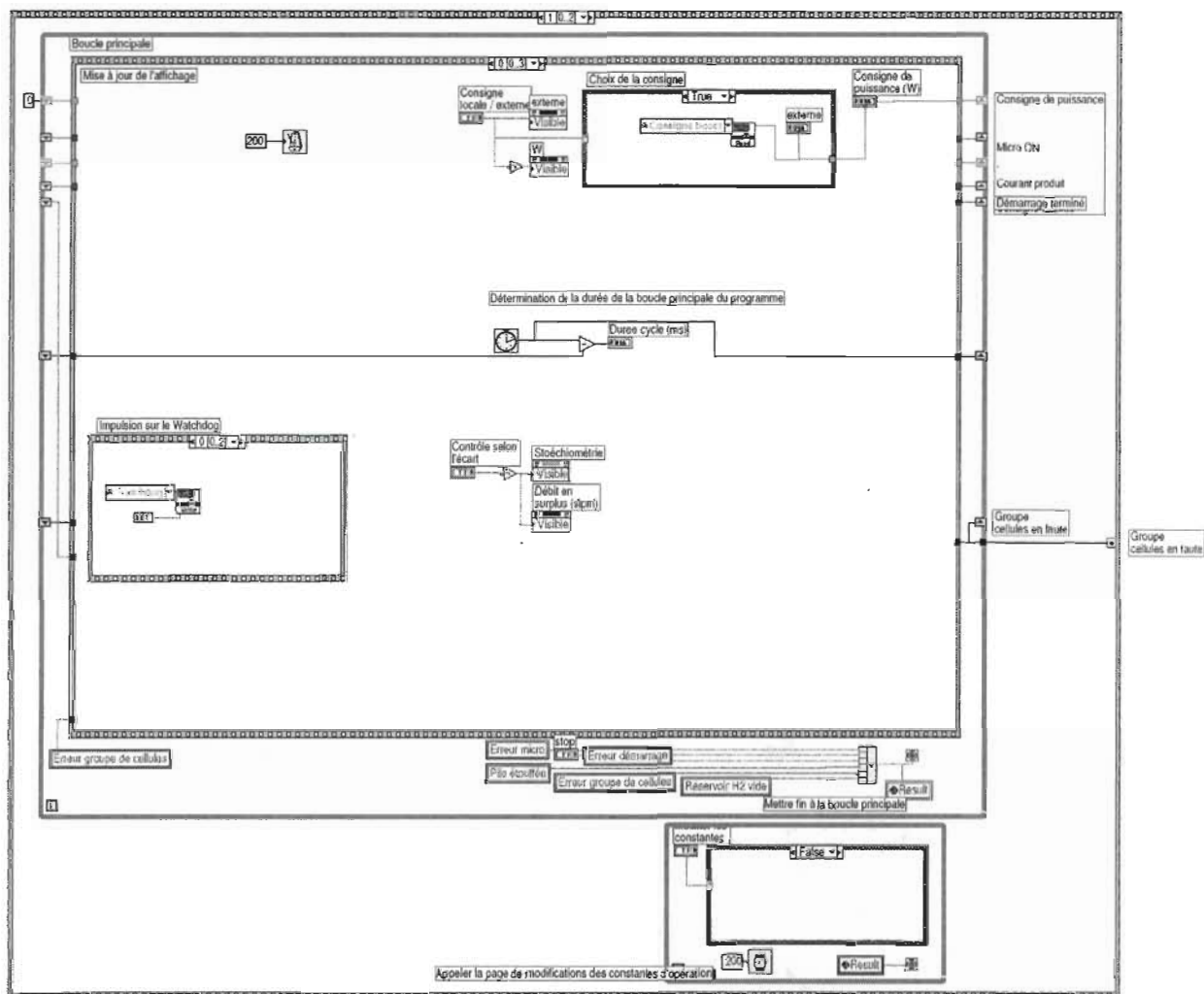
Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02

## Block Diagram





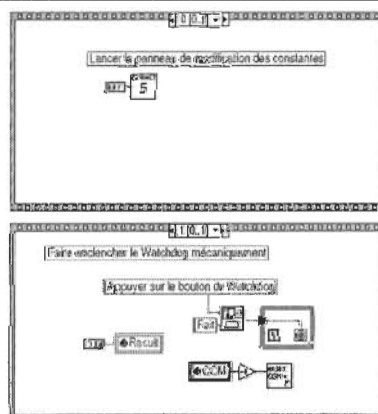
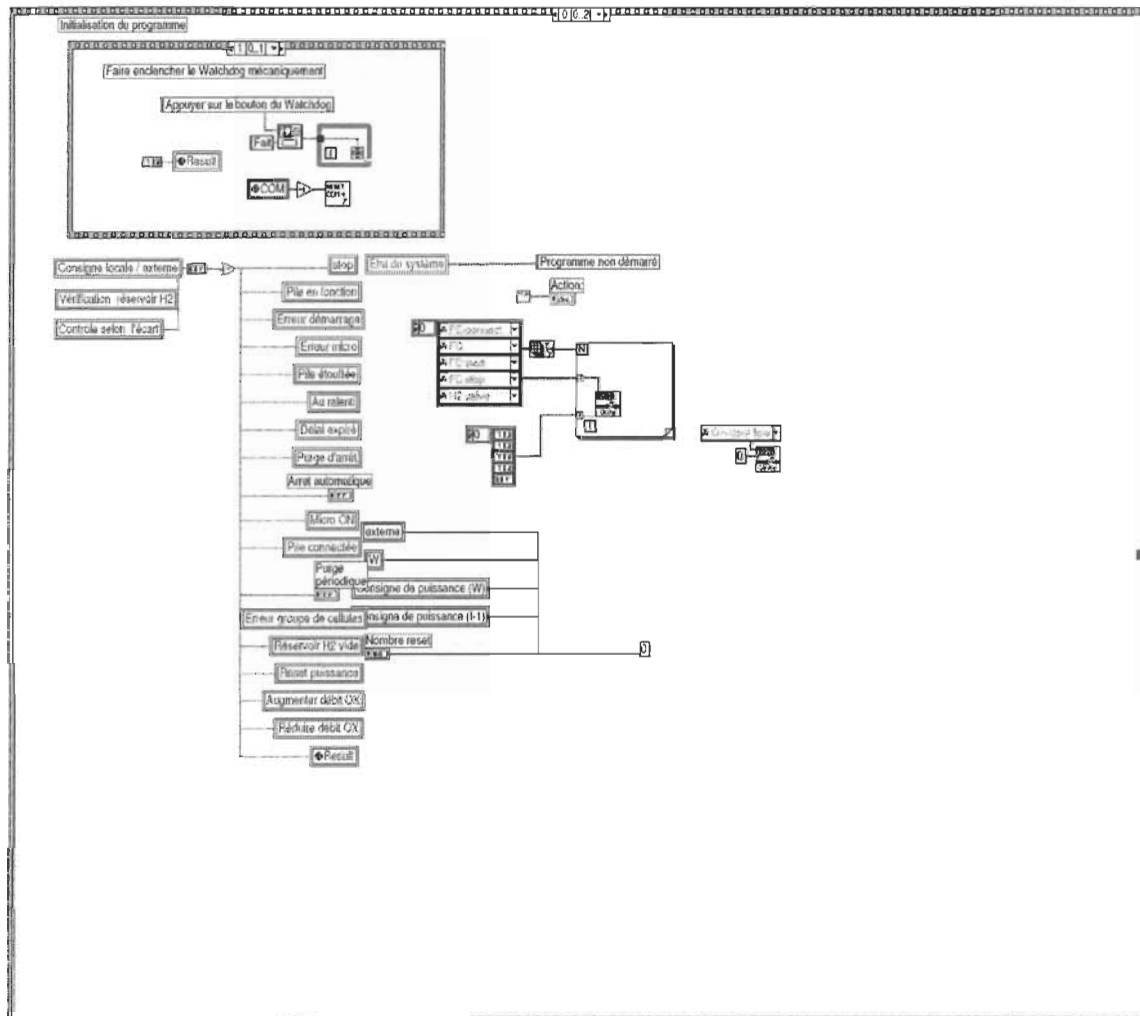


Contrôle\_pile\_5.vi

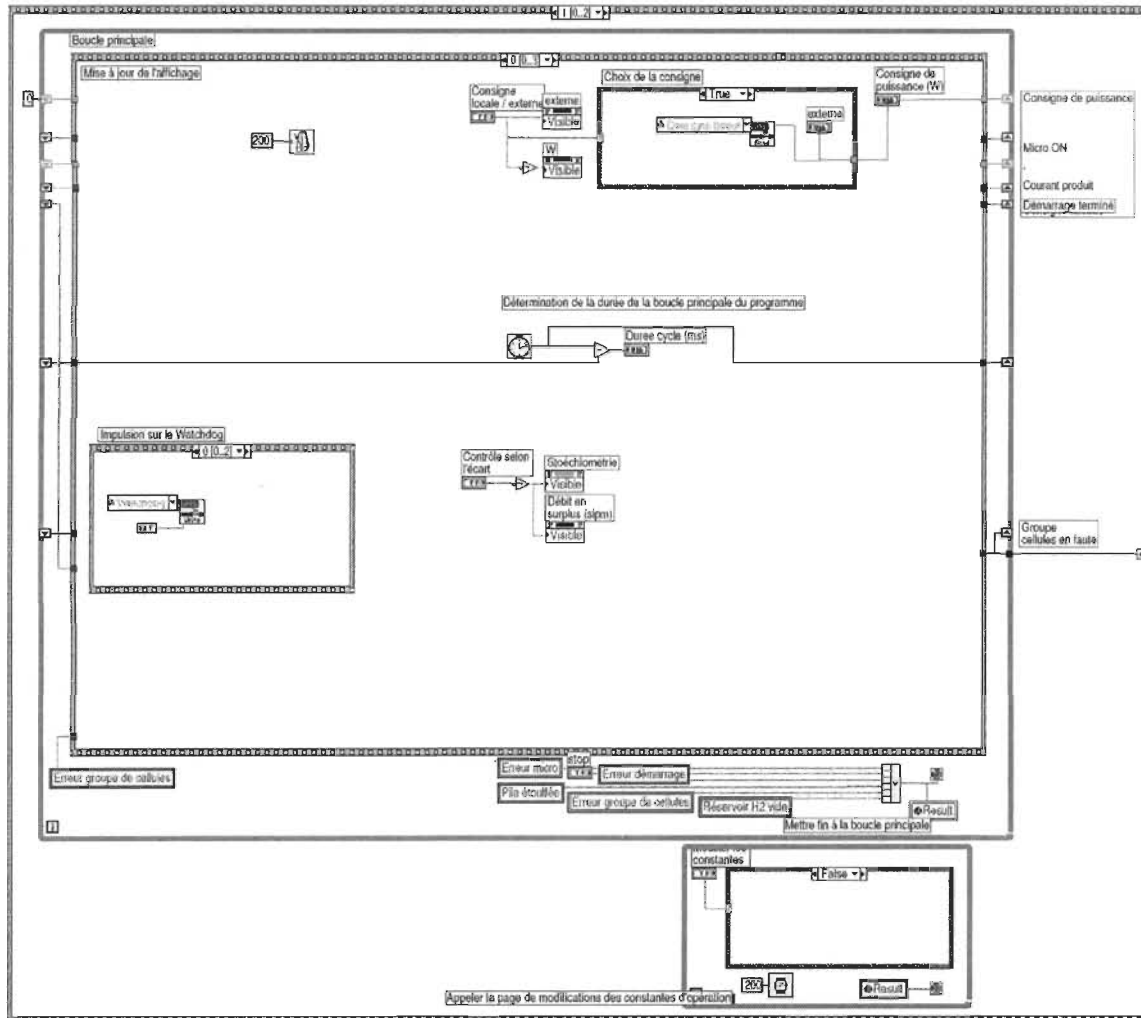
C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02



Printed on 03-04-03 at 14:02





Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02



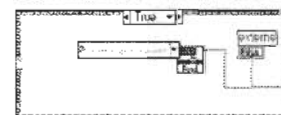
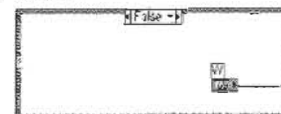
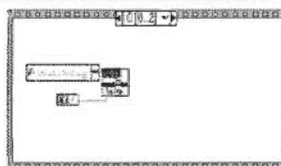
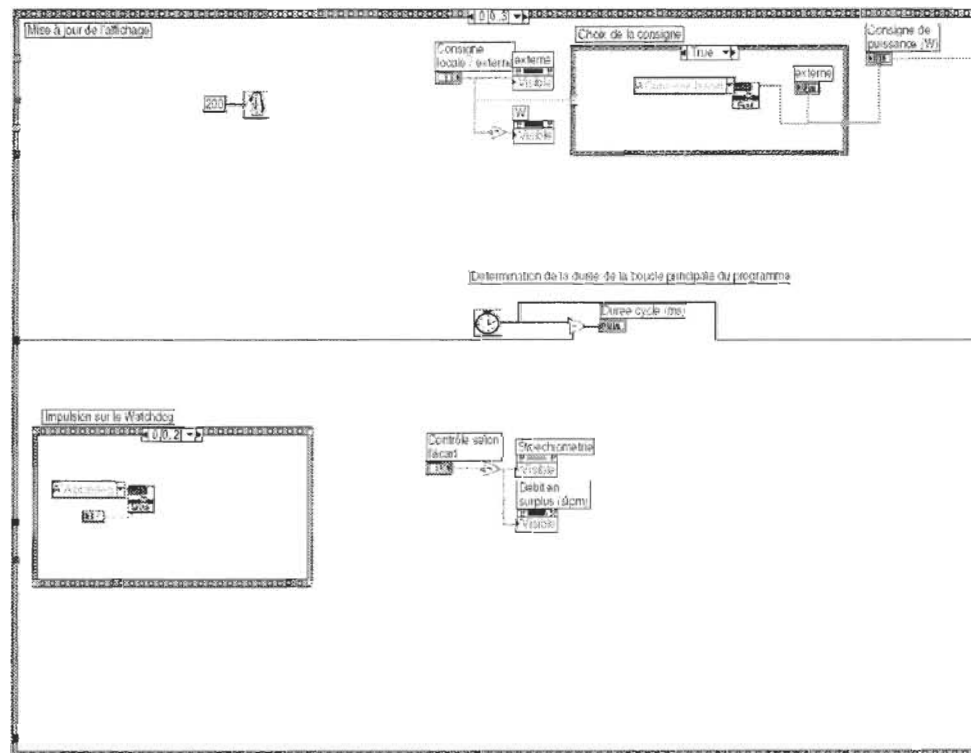


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02



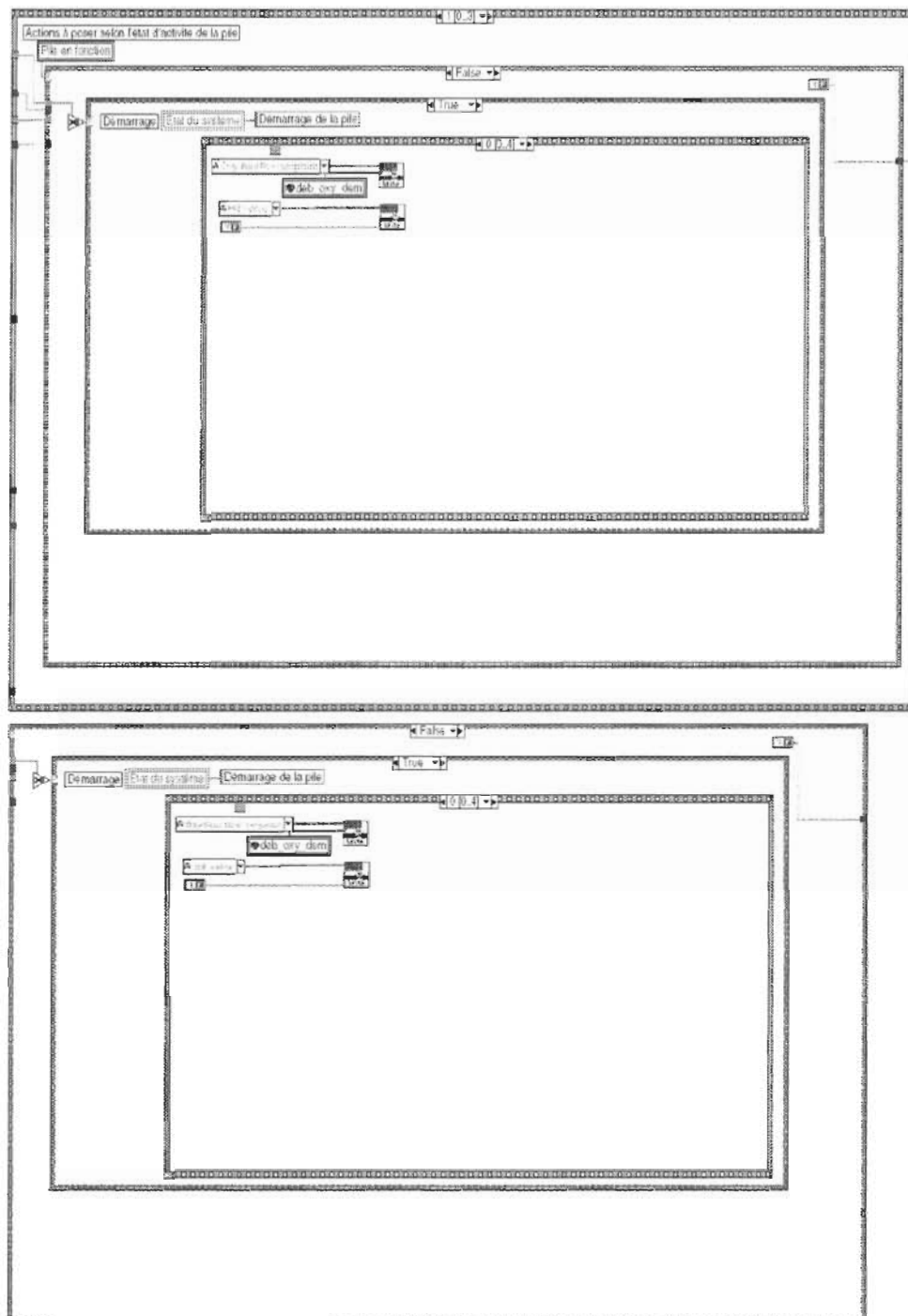


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02



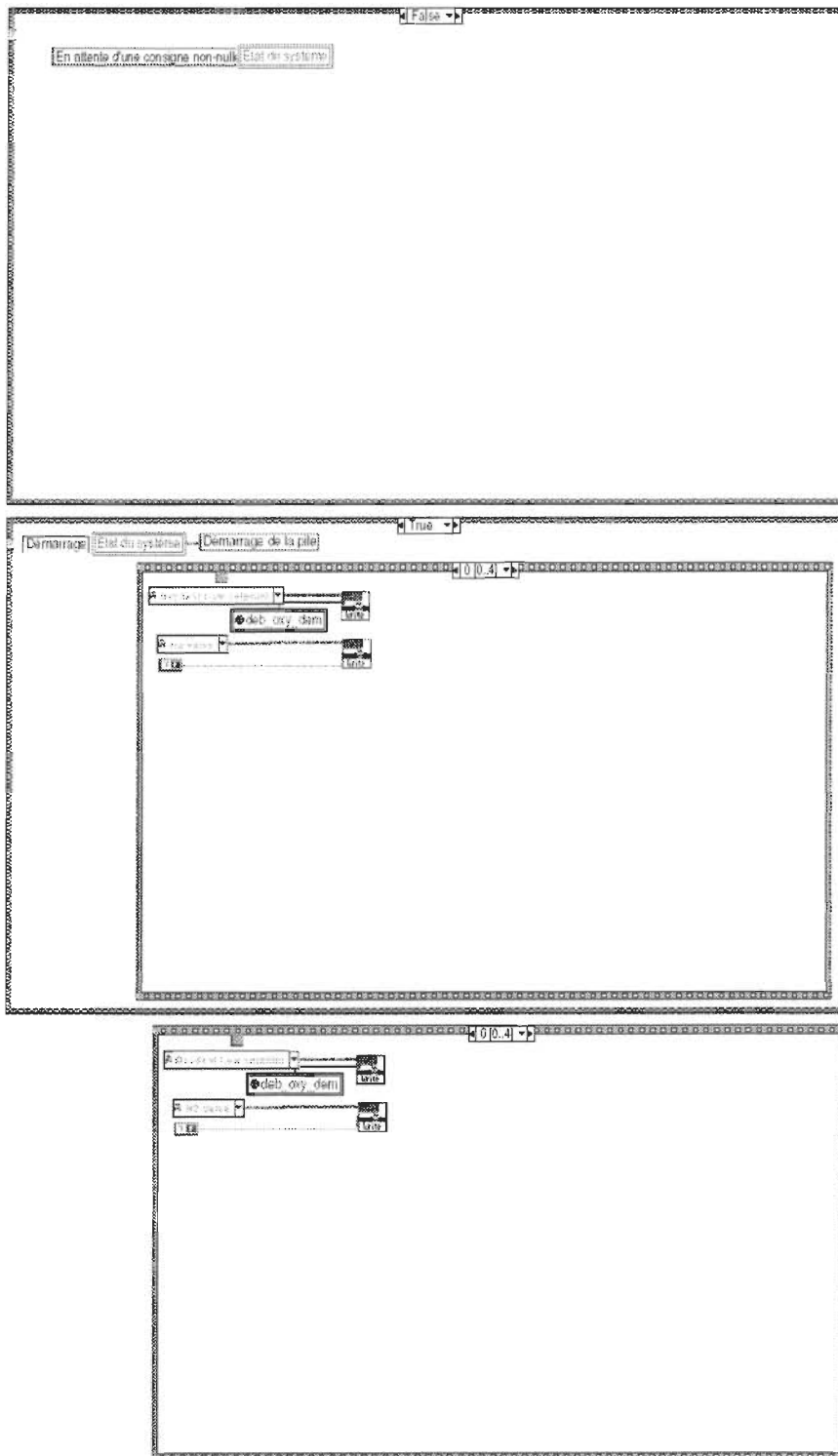


e\_pile\_5.vi

rael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

modified on 02-12-19 at 16:05

on 03-04-03 at 14:02



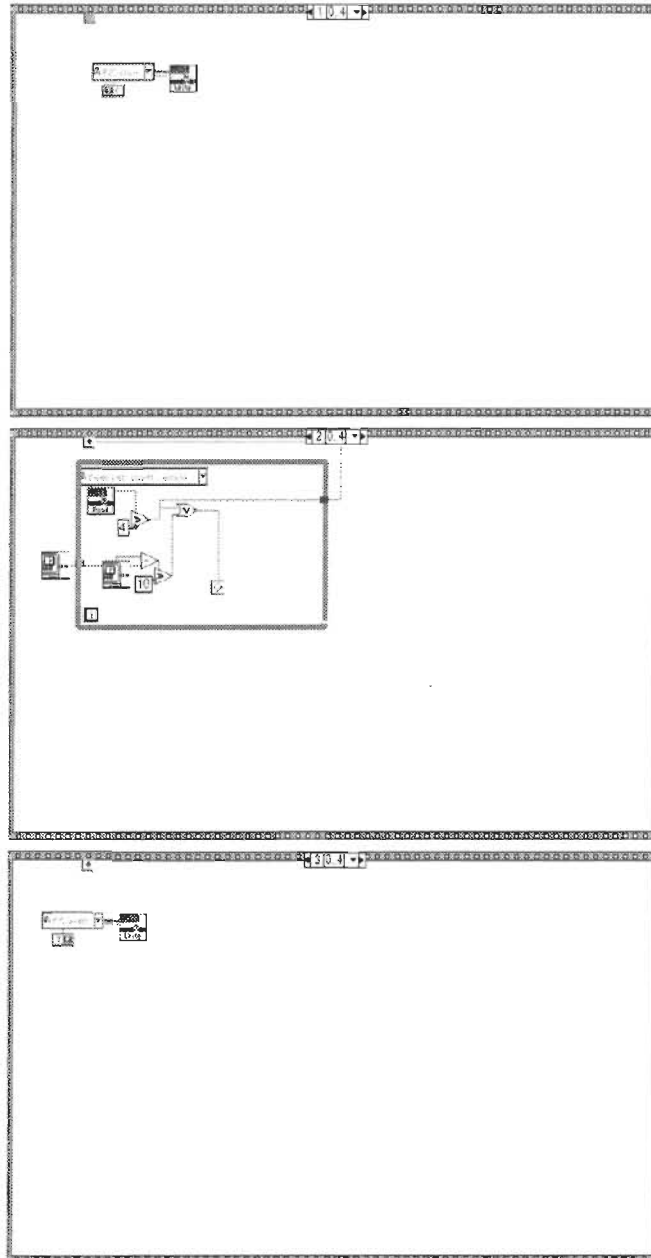


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02



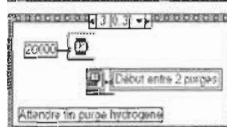
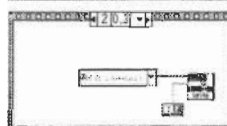
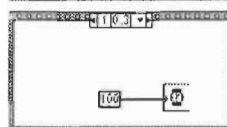
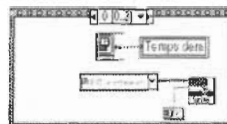
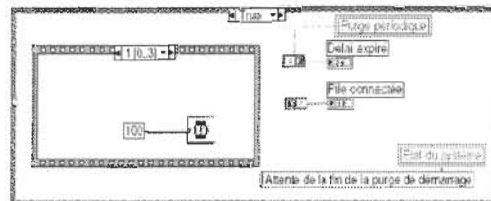
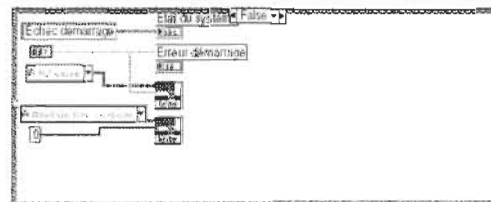
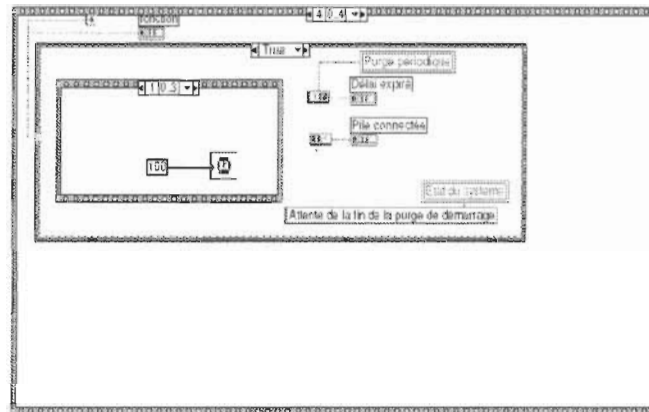


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:02





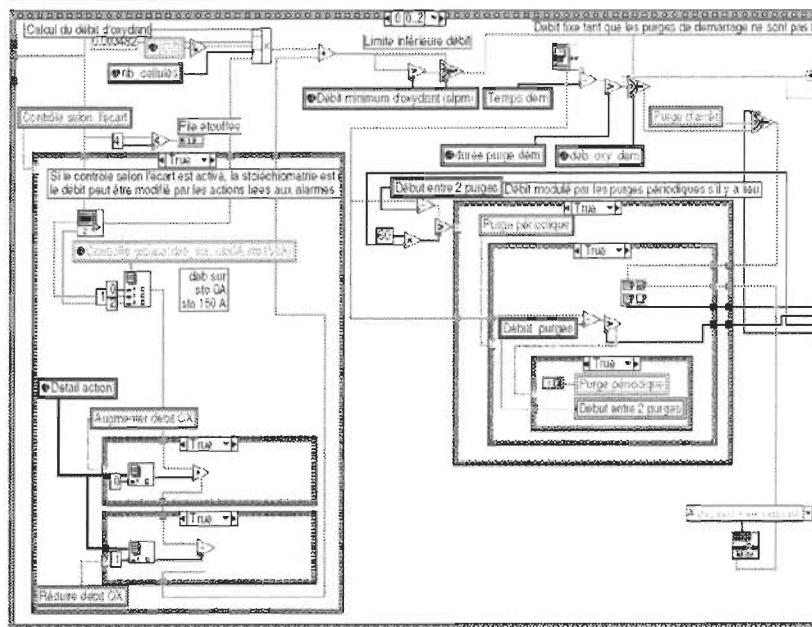
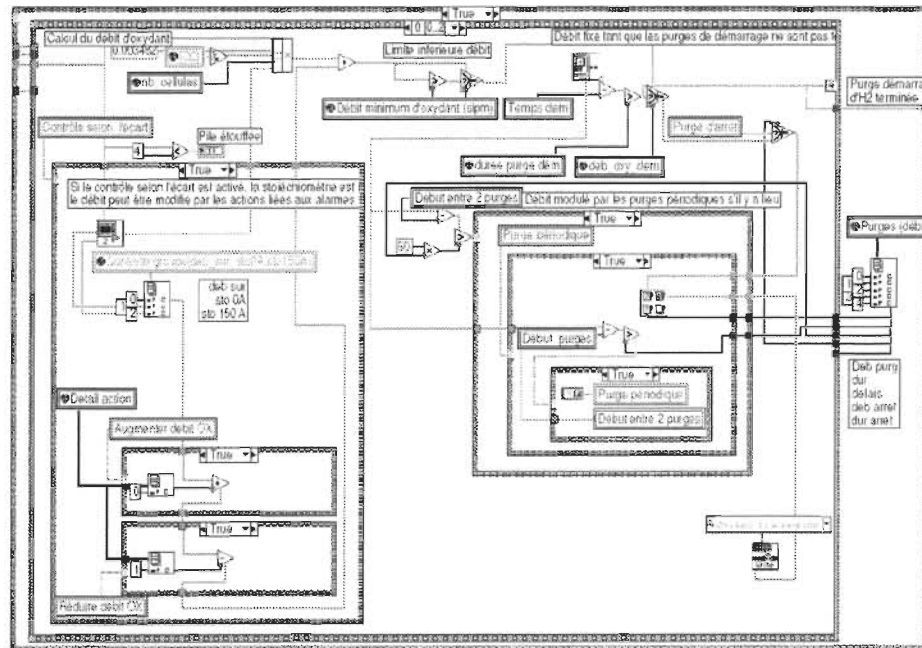


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



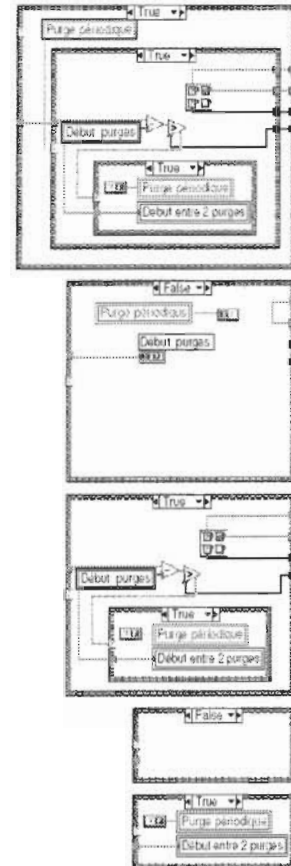
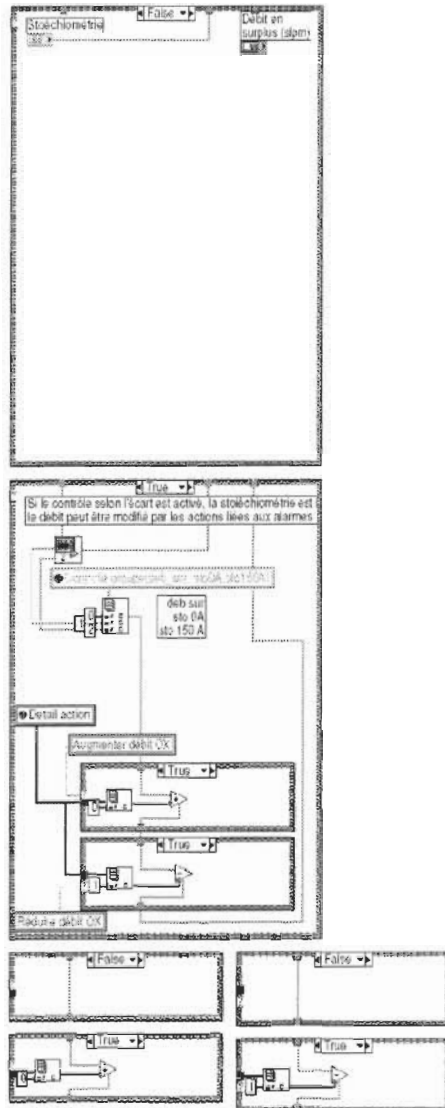


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



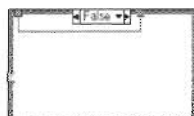
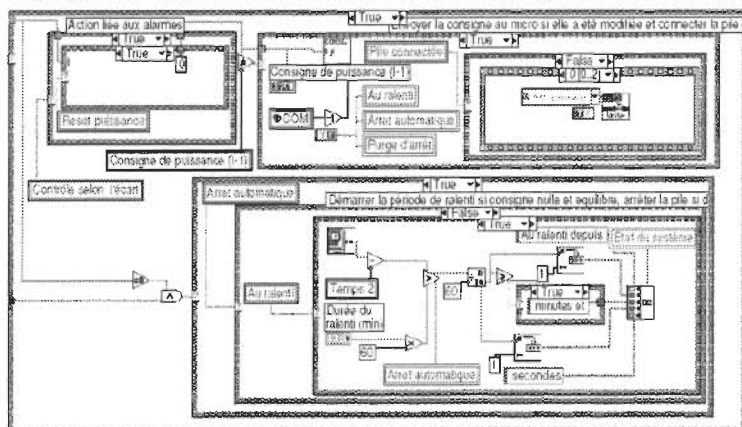
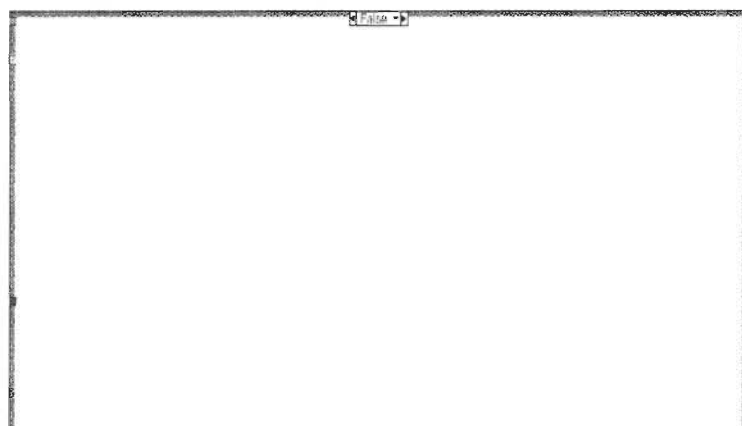
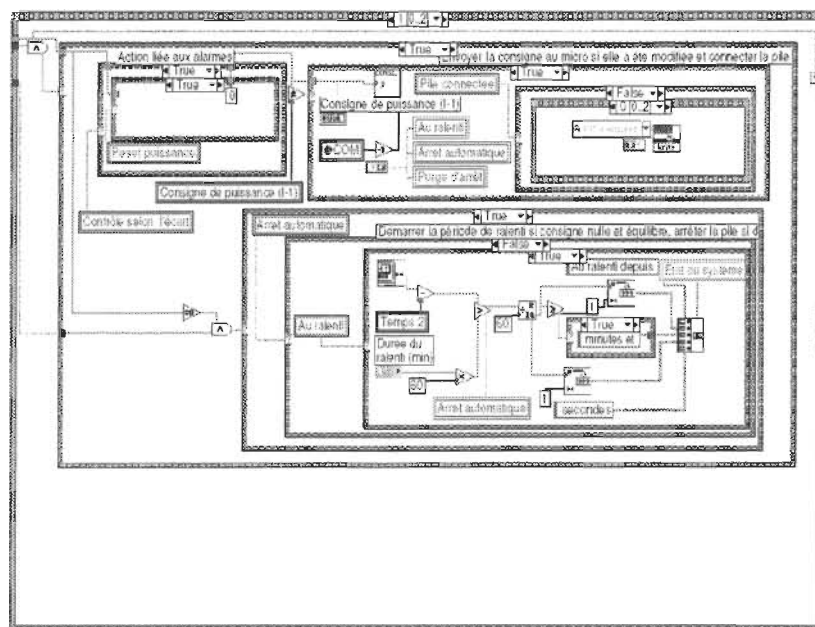


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



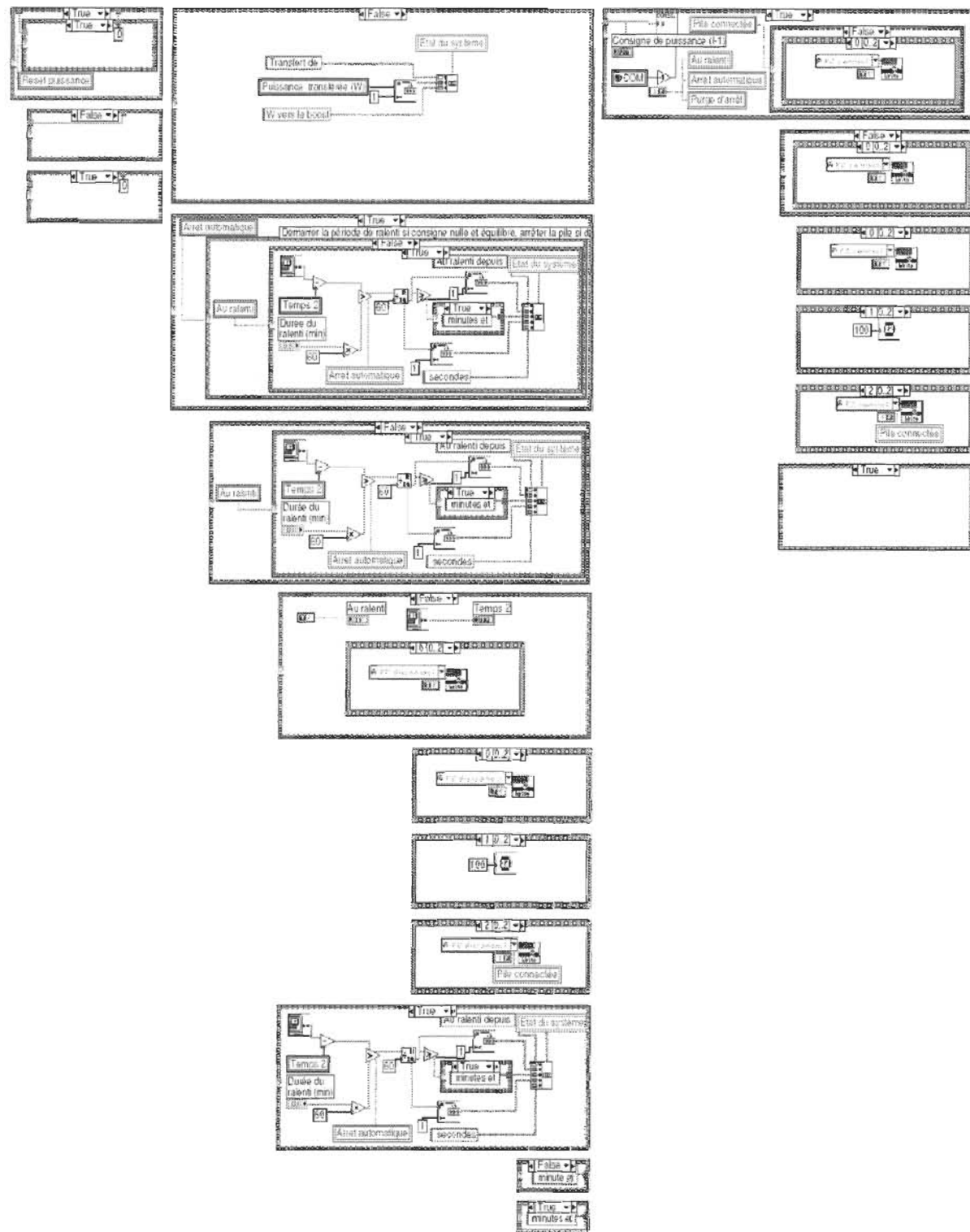


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



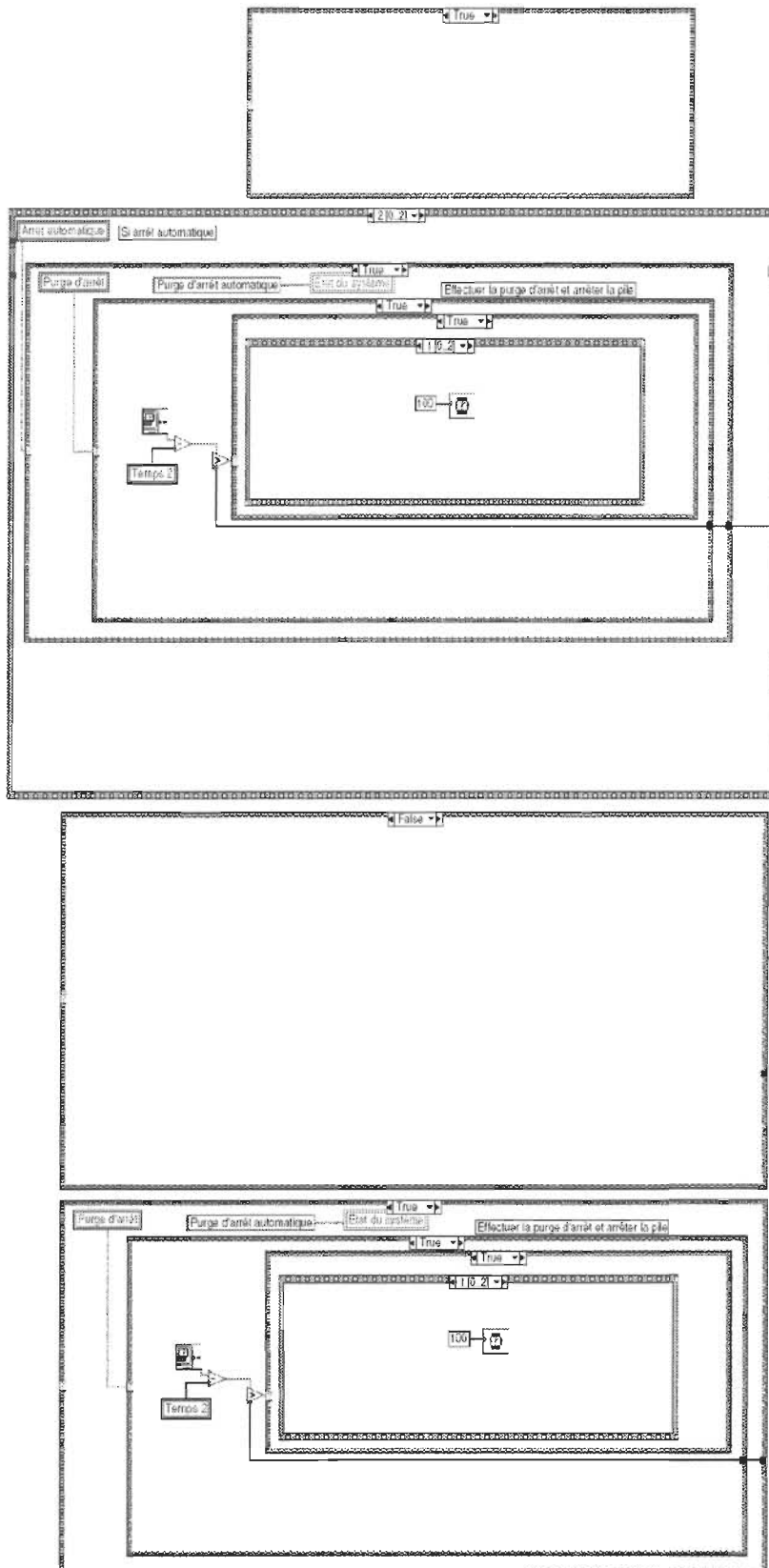


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



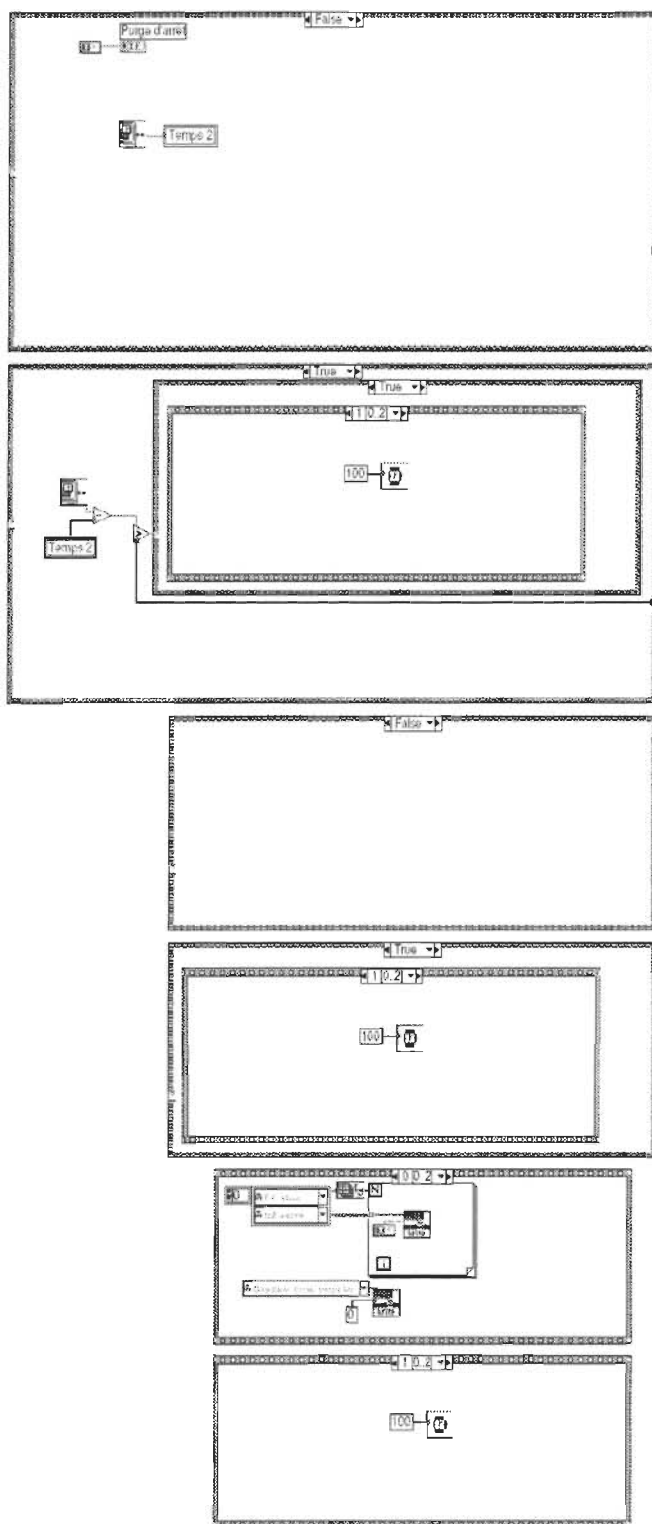


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



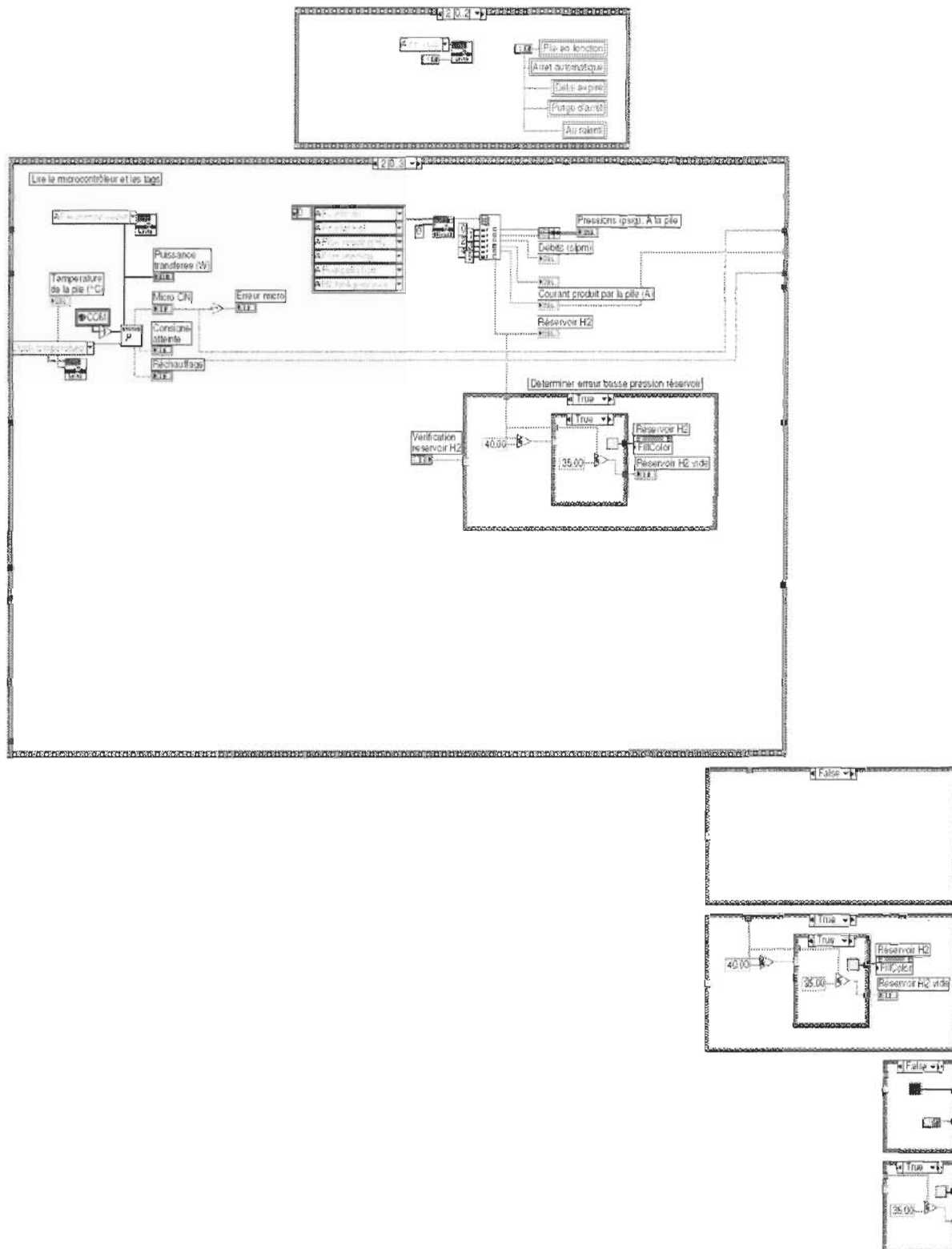


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



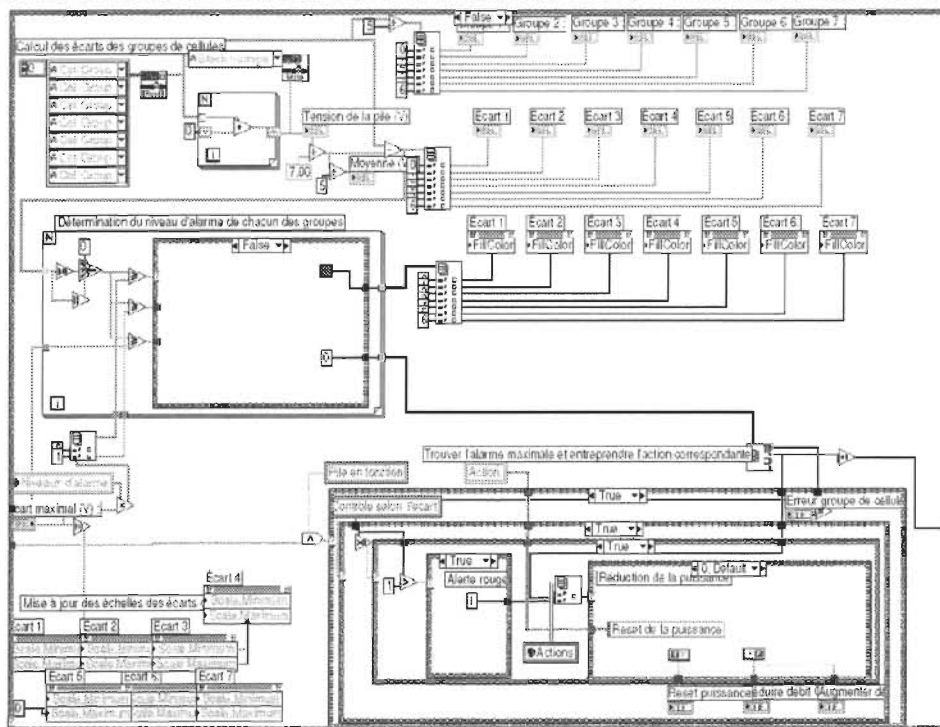
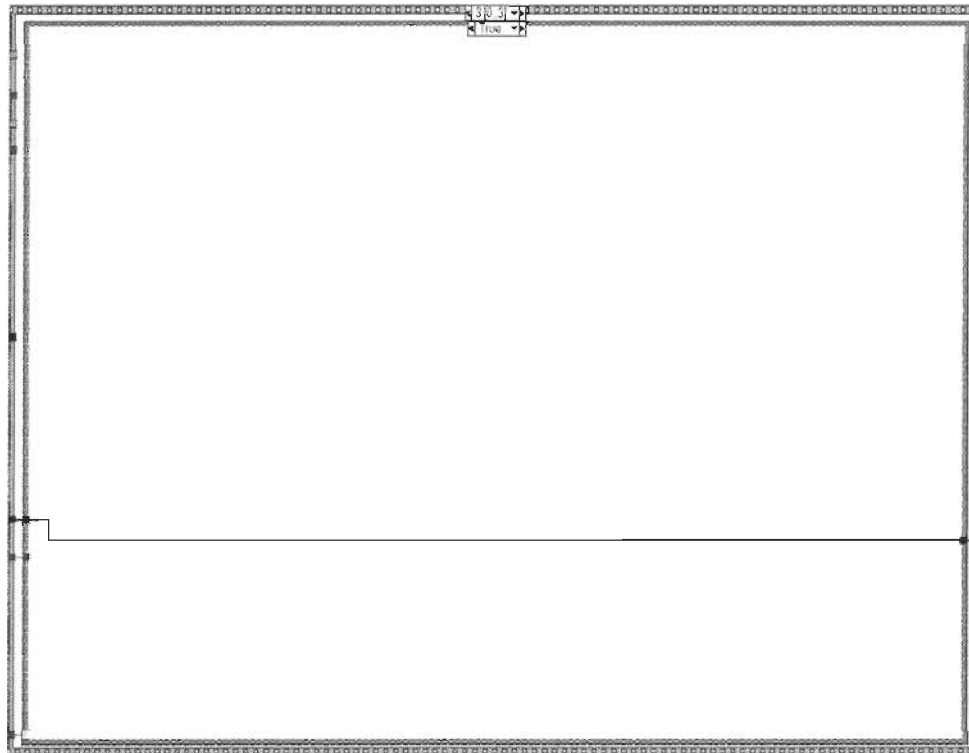


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03







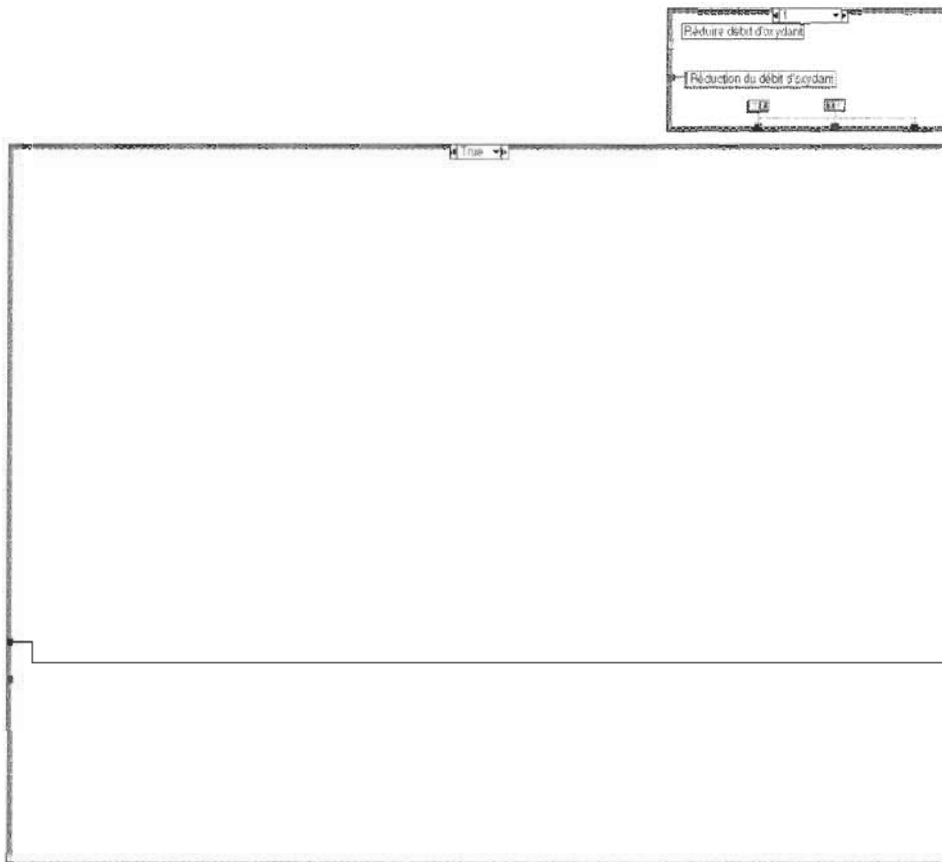


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



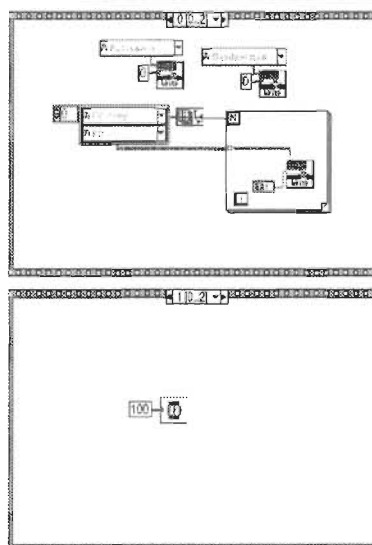
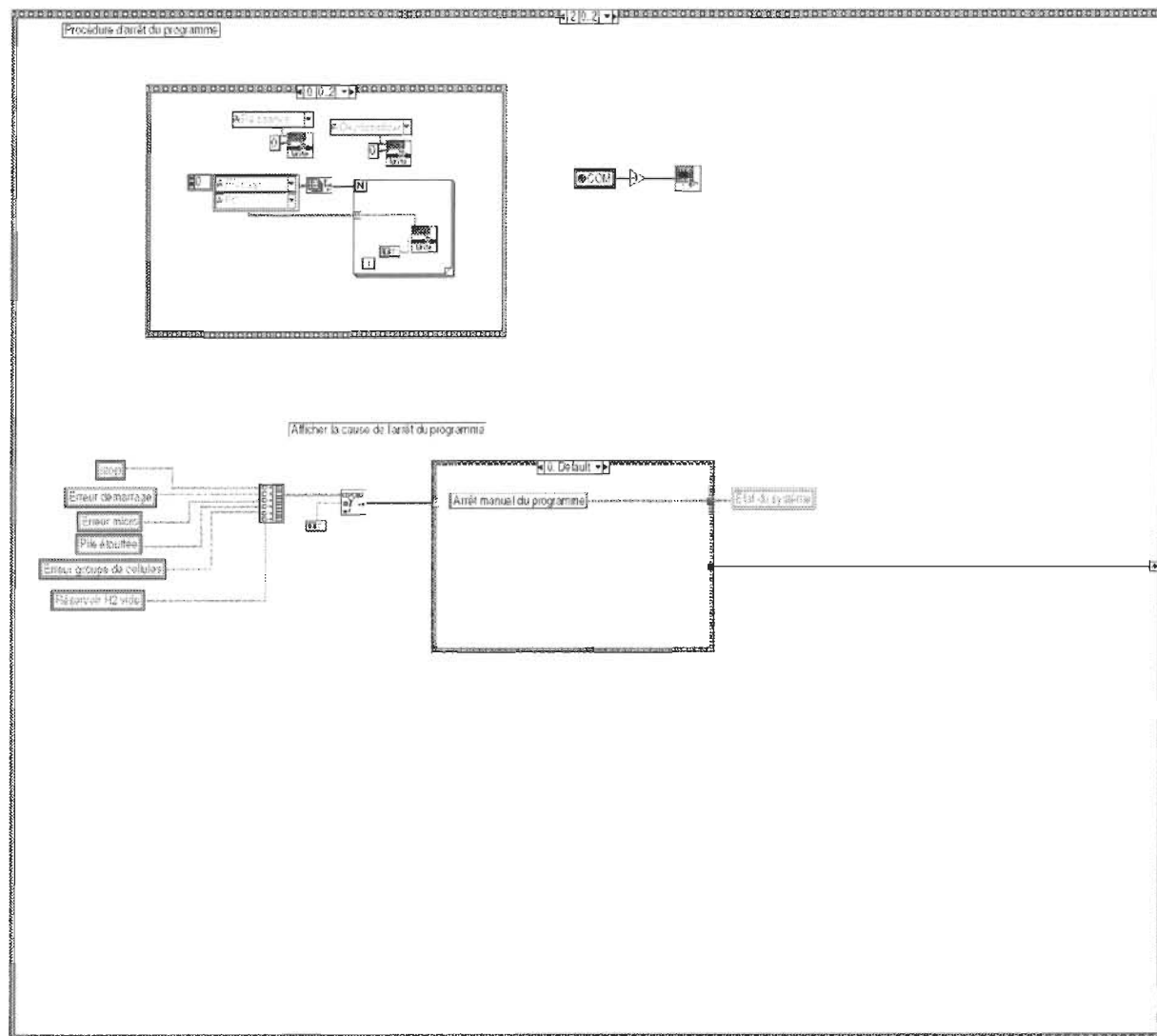


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03





Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



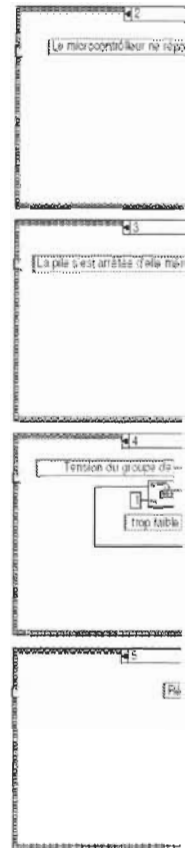
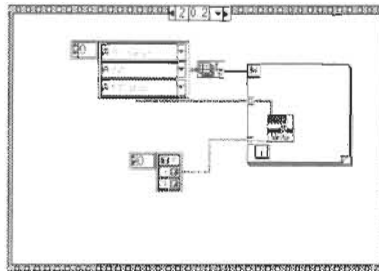


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:03



Position in Hierarchy

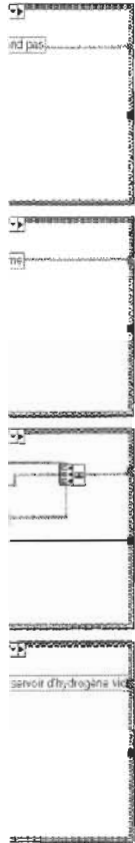


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:04



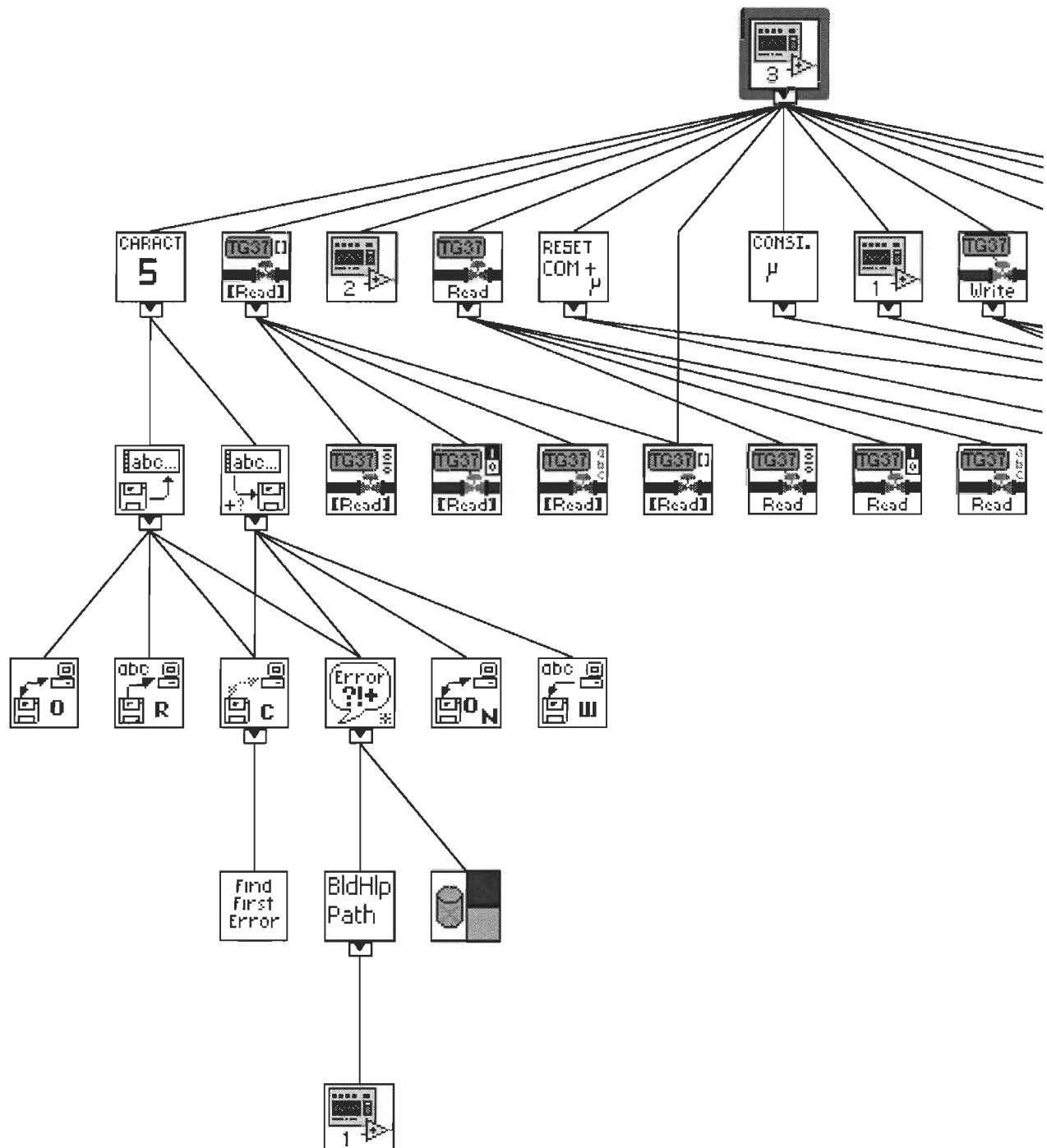


Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.lib\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:04



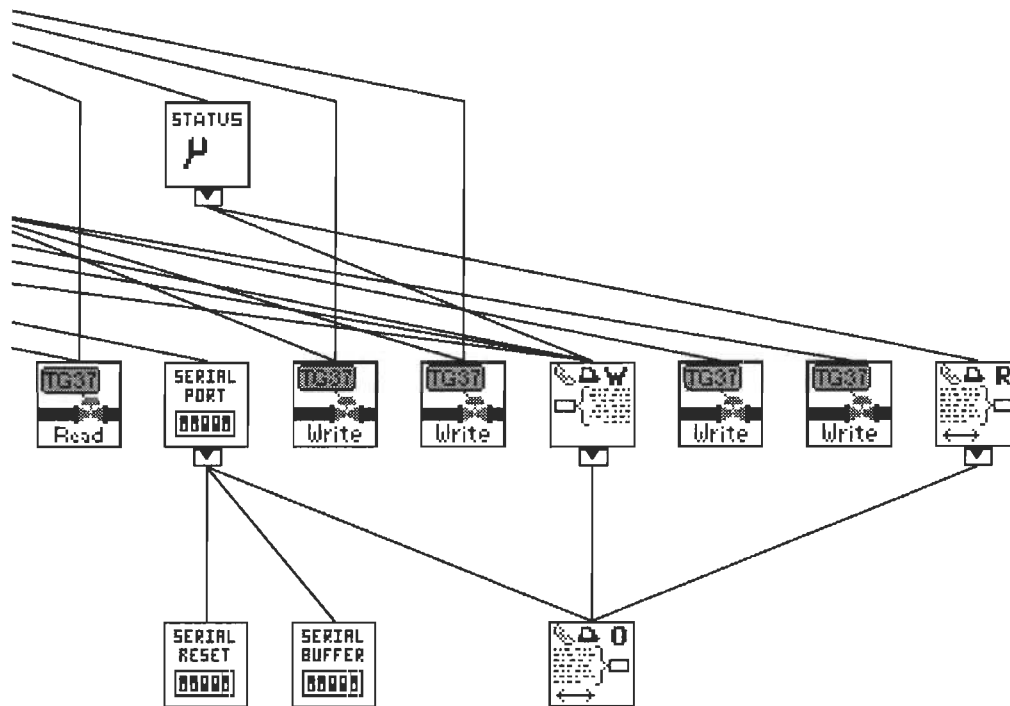
## List of SubVIs

**Write Tag.vi**

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Write Tag.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\Contrôle\_pile\_5.vi

Printed on 03-04-03 at 14:04







Contrôle\_pile\_5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Contrôle\_pile\_5.vi

Last modified on 02-12-19 at 16:05

Printed on 03-04-03 at 14:04



### Write Tag (analog).vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Write Tag (analog).vi



### Write Tag (discrete).vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Write Tag (discrete).vi



### Read Tag.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Read Tag.vi



### Read Tag (analog).vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Read Tag (analog).vi



### reset.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\reset.vi



### Read Multiple Tags.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Read Multiple Tags.vi



### Read Multiple Tags (analog).vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\lvdsc\Tag\User\Read Multiple Tags (analog).vi



### status.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\status.vi



### consigne.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\consigne.vi



### Stoiechiometrie.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Stoiechiometrie.vi



### caractéristiques5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\



### PAC\_GBL.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\PAC\_GBL.vi



### stop.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\stop.vi

### **Annexe 3: Code du programme Caractéristiques5.vi**

caractéristiques5.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\caractéristiques5.vi  
 Last modified on 02-12-11 at 11:42  
 Printed on 03-01-23 at 17:16

## Connector Pane

Ouvrir depuis fichier par d... CARACT  
5  
**caractéristiques5.vi**

## Front Panel

### Constantes d'opération

#### Pile à combustible

Concentration en oxygène de l'oxydant (slpm) Débit minimum oxydant (slpm)

Nombre de cellules

Débit d'oxydant au démarrage (slpm)  Durée purge oxydant au démarrage (s)

#### Communication

Port série (COM)

#### Purges périodiques

Débit d'oxydant en purge (slpm)

Durée des purges (s)  Débit pour la purge d'arrêt (slpm)

Délai entre les purges (s)  Durée de la purge d'arrêt (s)

#### Contrôle selon les groupes de cellules

Débit en surplus de base (slpm)  Stoichiométrie proportionnelle   La valeur appliquée sera interpolée à partir de ces deux valeurs Stoichiométrie à 0 Stoichiométrie à 150 A

Alarme jaune <==> Écart  X écart maximal

Alarme rouge <==>  X écart maximal

Arrêt <==> Écart > écart maximal

#### Actions à prendre selon le niveau d'alarme et le groupe:

	7	6	5	4	3	2	1
Ignorer-							
Purge OX-							
Red. débit OX-							
Red. puissance-							

Radiateur

#### Purge d'oxydant

Augmentation du débit (slpm)

#### Réduction du débit d'oxydant

Réduction du débit (slpm)

Enregistrer fichier  Charger un fichier  Définir un fichier par défaut

Ouvrir depuis fichier par défaut

## Controls and Indicators



























- TF Enregistrer fichier
- TF Charger un fichier

caractéristiques5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\caractéristiques5.vi

Last modified on 02-12-11 at 11:42

Printed on 03-01-23 at 17:17

-  Définir un fichier par défaut
-  Ouvrir depuis fichier par défaut
-  Débit d'oxydant en purge (slpm)
-  Durée des purges (s)
-  Délai entre les purges (min)
-  Validé
-  Débit en surplus de base (slpm)
-  Stoiéchiométrie à 0 A
-  Stoiéchiométrie à 150 A
-  Durée de la purge d'arrêt (s)
-  Débit pour la purge d'arrêt (slpm)
-  Port série (COM)
-  Niveau jaune
-  Niveau rouge
-  Débit d'oxydant au démarrage (slpm)
-  Nombre de cellules
-  Concentration en oxygène de l'oxydant
-  Durée purge oxydant au démarrage (s)
-  Débit minimum d'oxydant (slpm)
-  Slide
-  Slide 2
-  Slide 3
-  Slide 4
-  Slide 5
-  Slide 6
-  Slide 7

caractéristiques5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\caractéristiques5.vi

Last modified on 02-12-11 at 11:42

Printed on 03-01-23 at 17:17

 **Augmentation du débit (slpm)**

 **Réduction du débit (slpm)**

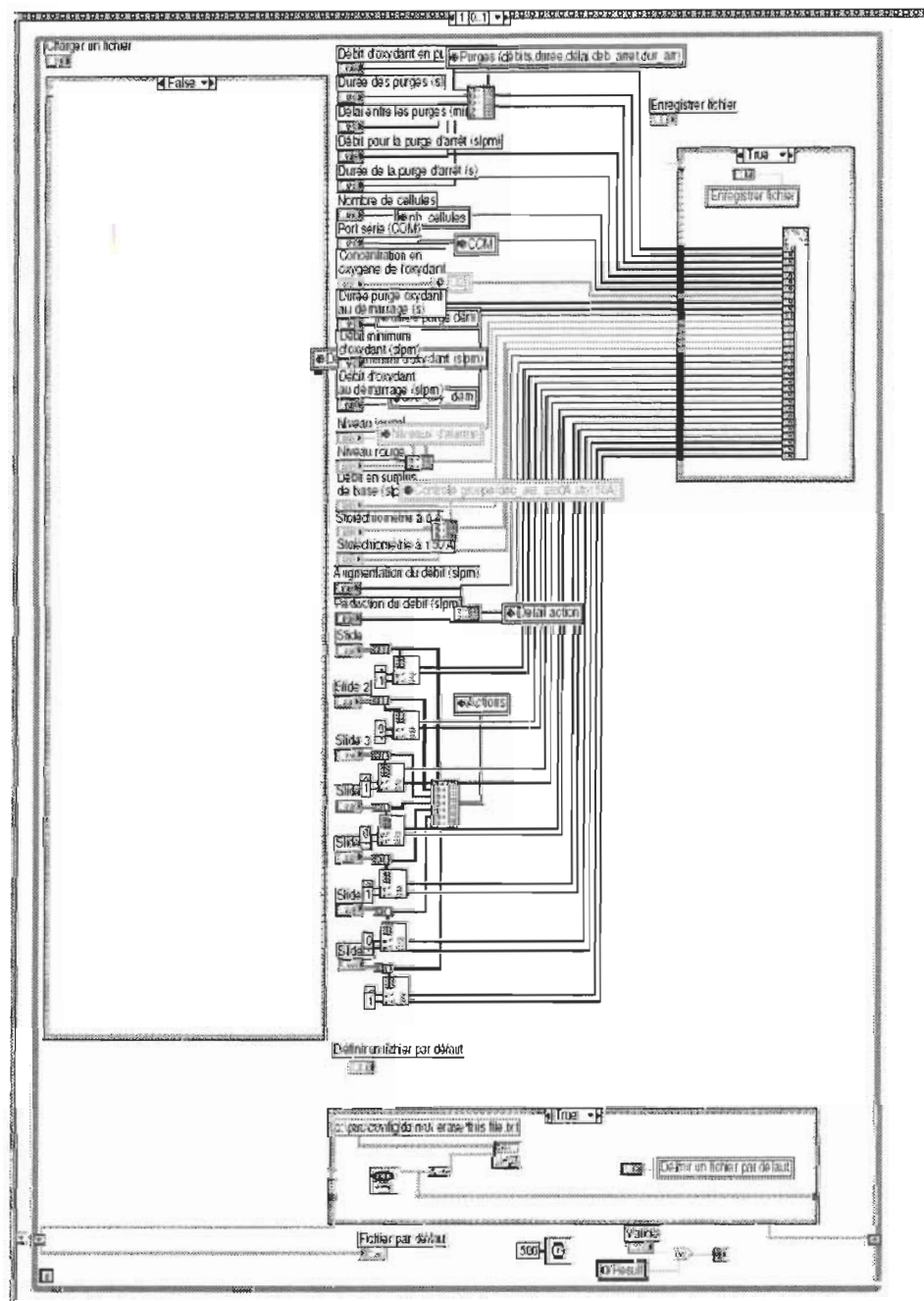
 **Couleurs**

 **Color Box**

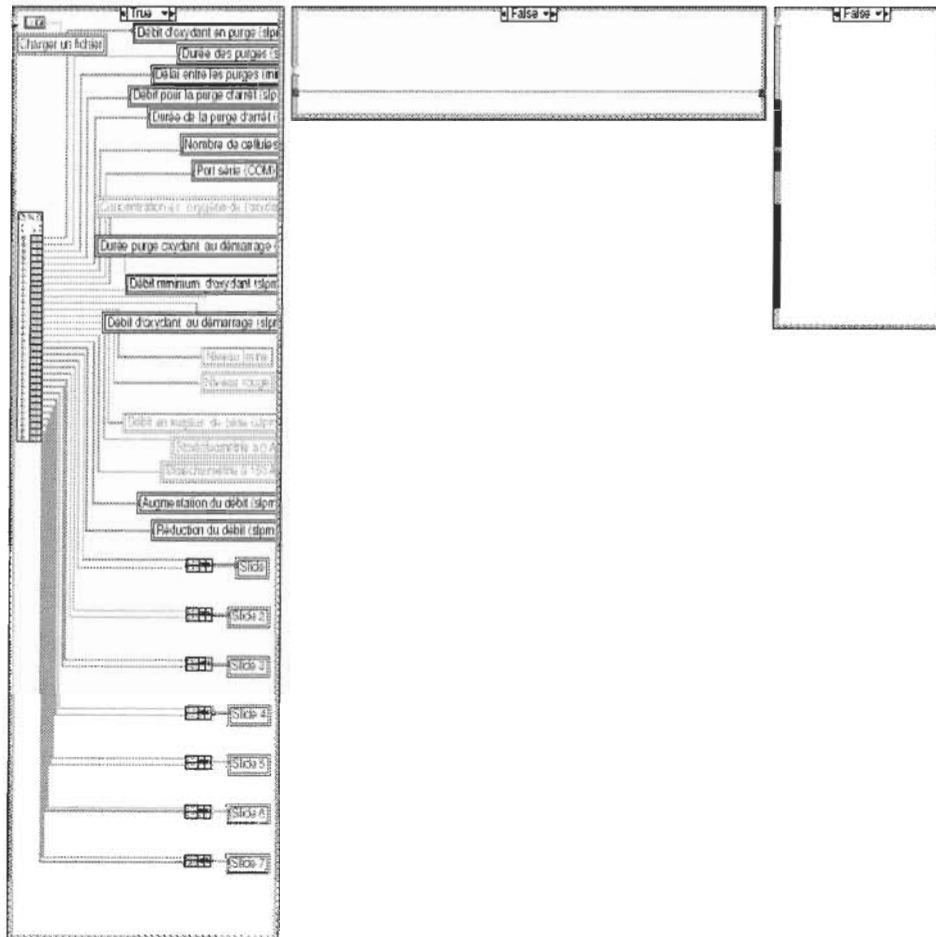
 **Fichier par défaut**

Printed on 03-01-23 at 17:17

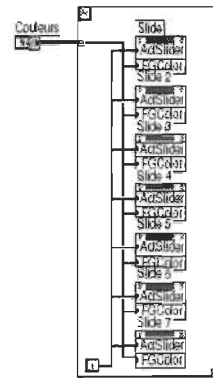
### Block Diagram



Printed on 03-01-23 at 17:17

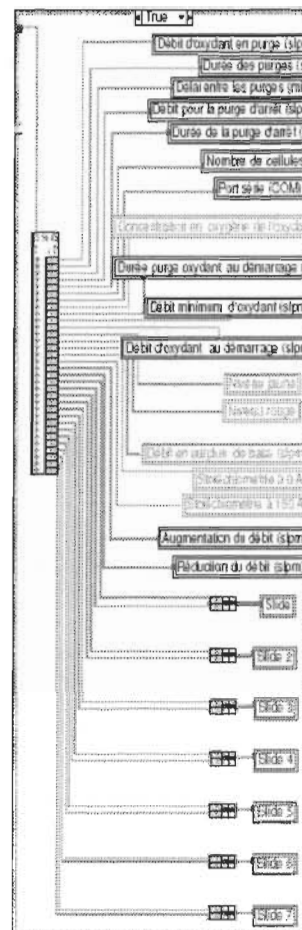


Printed on 03-01-23 at 17:17





caractéristiques5.vi  
C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\caractéristiques5.vi  
Last modified on 02-12-11 at 11:42  
Printed on 03-01-23 at 17:17



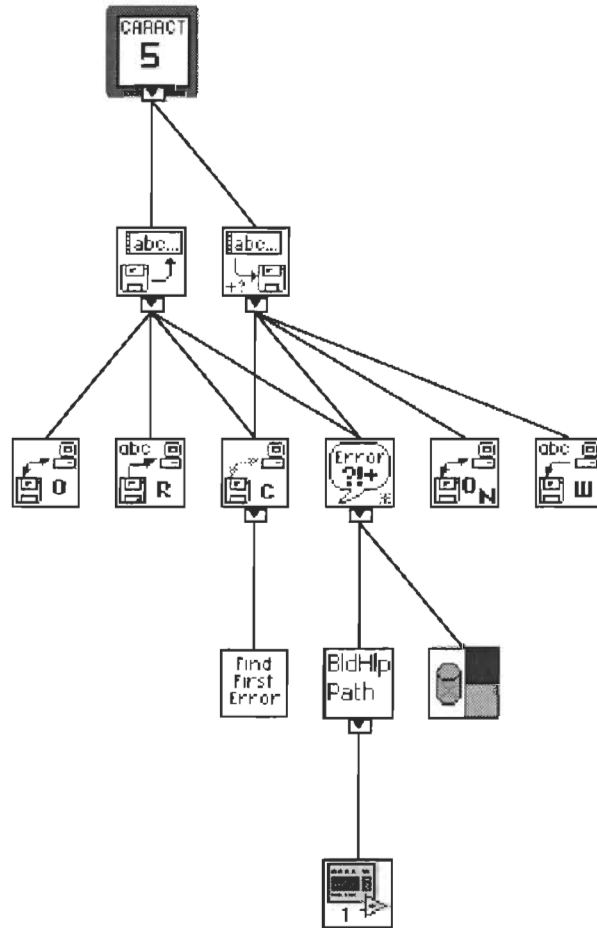
Position in Hierarchy

caractéristiques5.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.lib\caractéristiques5.vi

Last modified on 02-12-11 at 11:42

Printed on 03-01-23 at 17:18



# List of SubVIs



## Write Characters To File.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Utility\file.lib\Write Characters To File.vi



## Read Characters From File.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Utility\file.lib\Read Characters From File.vi



## PAC\_GBL.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.lib\PAC\_GBL.vi

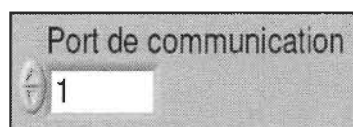
## **Annexe 4: Code du sous-programme Reset.vi**

reset.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.IIb\reset.vi  
 Last modified on 02-11-21 at 14:51  
 Printed on 03-01-23 at 17:38

# Connector Pane



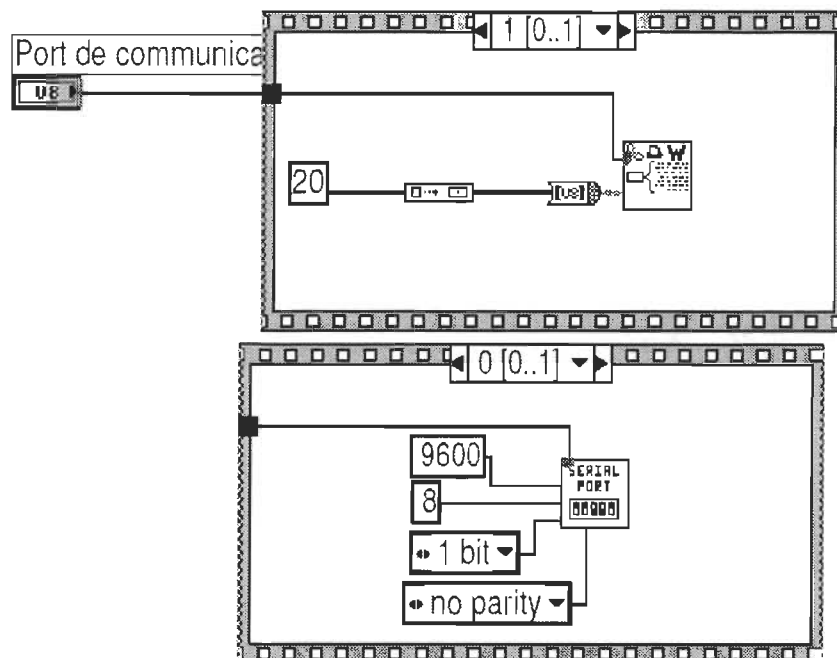
# Front Panel



# Controls and Indicators



# Block Diagram



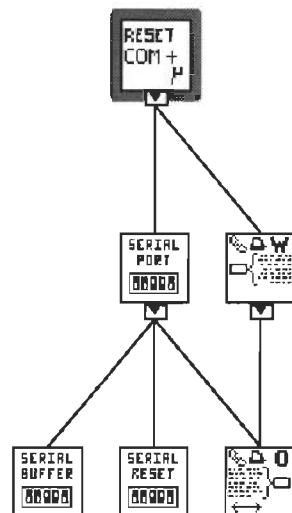
# Position in Hierarchy

reset.vi

C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.llb\reset.vi

Last modified on 02-11-21 at 14:51

Printed on 03-01-23 at 17:38



#### List of SubVIs



#### Serial Port Write.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Instr\Serial.llb\Serial Port Write.vi



#### Serial Port Init.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Instr\Serial.llb\Serial Port Init.vi

#### History

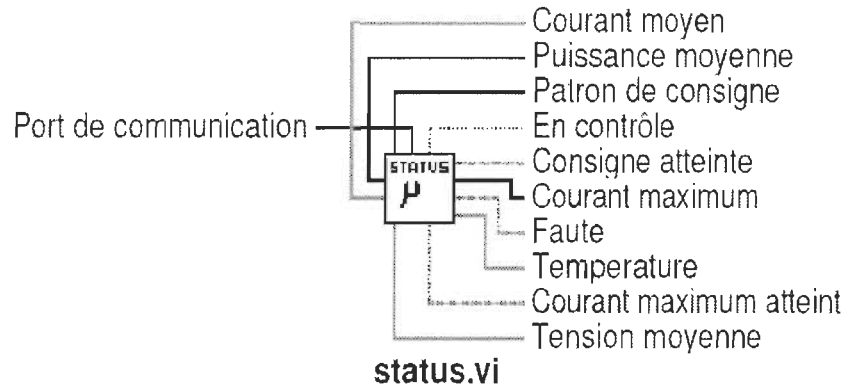
"reset.vi History"

Current Revision: 9

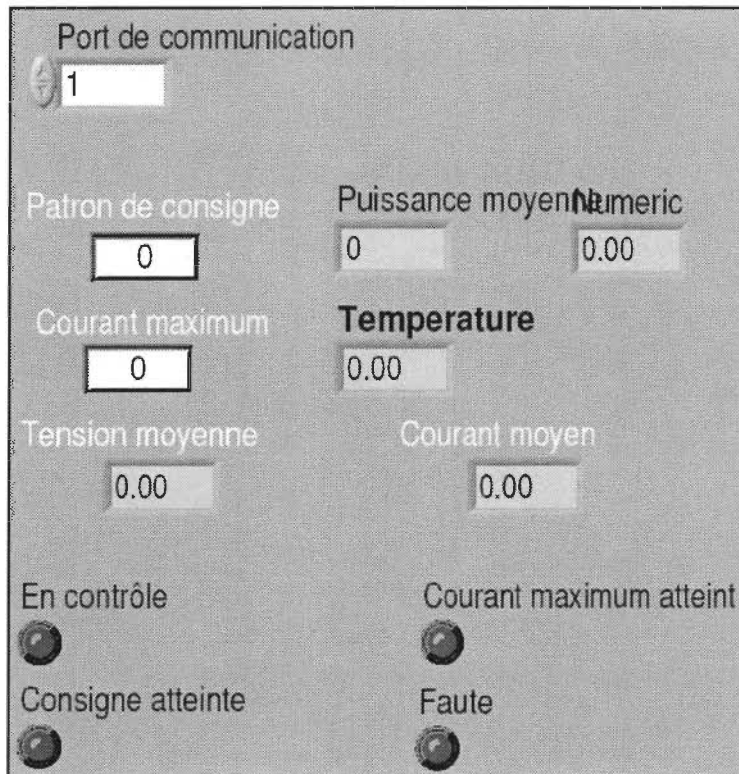
## **Annexe 5: Code du sous-programme Status.vi**

status.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\status.vi  
 Last modified on 02-12-17 at 16:56  
 Printed on 03-01-23 at 17:37

## Connector Pane



## Front Panel



The front panel displays the following controls and indicators:

- Port de communication:** A numeric control set to 1.
- Patron de consigne:** A numeric control set to 0.
- Courant maximum:** A numeric control set to 0.
- Tension moyenne:** A numeric display showing 0.00.
- Puissance moyenne:** A numeric display showing 0.00.
- Temperature:** A numeric display showing 0.00.
- Courant moyen:** A numeric display showing 0.00.
- En contrôle:** A circular indicator light.
- Consigne atteinte:** A circular indicator light.
- Courant maximum atteint:** A circular indicator light.
- Faute:** A circular indicator light.

status.vi













C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\status.vi

Last modified on 02-12-17 at 16:56

Printed on 03-01-23 at 17:37

---

## Controls and Indicators

	Port de communication
	Tension moyenne
	Courant moyen
	Faute
	Courant maximum atteint
	Consigne atteinte
	En contrôle
	Courant maximum
	Patron de consigne
	Puissance moyenne
	Numeric
	Temperature



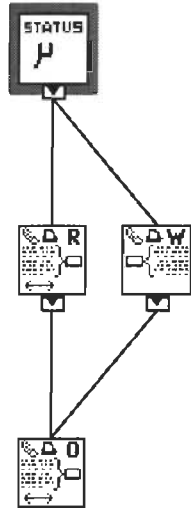
Printed on 03-01-23 at 17:37

[illegible]

Printed on 03-01-23 at 17:37



status.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.llb\status.vi  
 Last modified on 02-12-17 at 16:56  
 Printed on 03-01-23 at 17:37



#### List of SubVIs



##### Serial Port Write.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Instr\Serial.llb\Serial Port Write.vi



##### Serial Port Read.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Instr\Serial.llb\Serial Port Read.vi

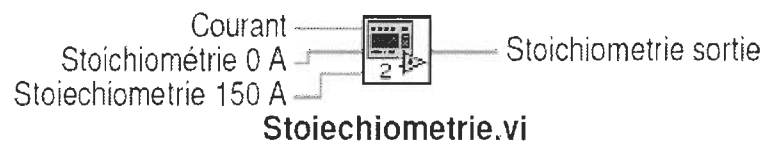
#### History

"status.vi History"  
 Current Revision: 20

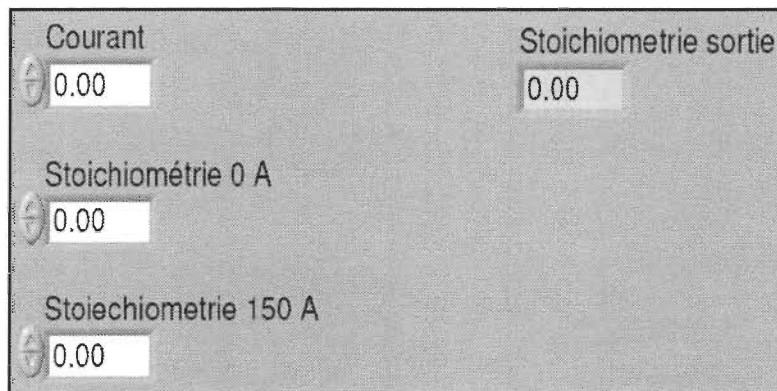
## **Annexe 6: Code du sous-programme Stoéchiometrie.vi**

Stoiechiometrie.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Stoiechiometrie.vi  
 Last modified on 02-11-21 at 14:50  
 Printed on 03-01-23 at 16:54





### Connector Pane



### Front Panel

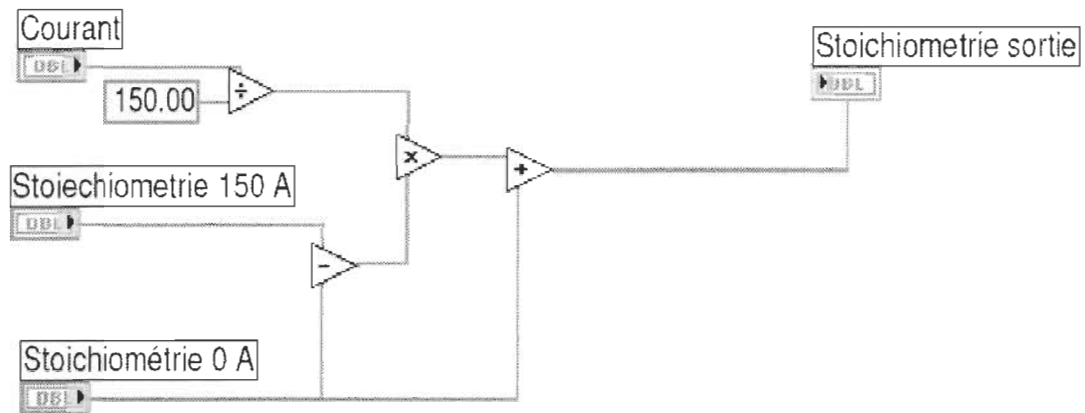


### Controls and Indicators

-  **Courant**
-  **Stoichiométrie 0 A**
-  **Stoiechiometrie 150 A**
-  **Stoichiometrie sortie**

Stoiechiometrie.vi  
 C:\Michae\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\Stoiechiometrie.vi  
 Last modified on 02-11-21 at 14:50  
 Printed on 03-01-23 at 16:54

### Block Diagram



### Position in Hierarchy



### List of SubVIs

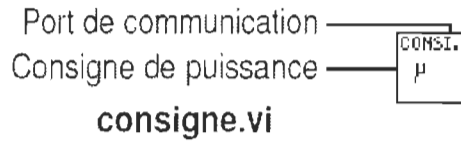
### History

"Stoiechiometrie.vi History"  
 Current Revision: 5

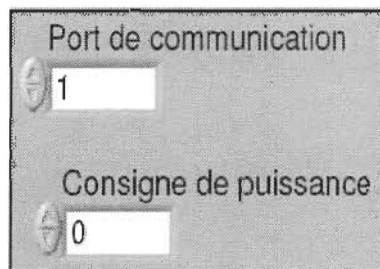
## **Annexe 7: Code du sous-programme Consigne.vi**

consigne.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\consigne.vi  
 Last modified on 02-11-21 at 14:51  
 Printed on 03-01-23 at 16:55



### Connector Pane



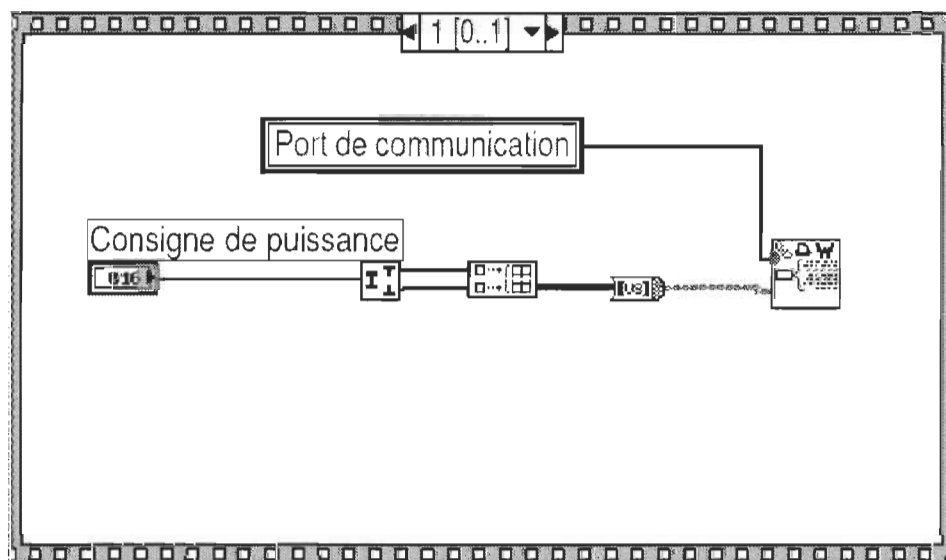
### Front Panel



### Controls and Indicators

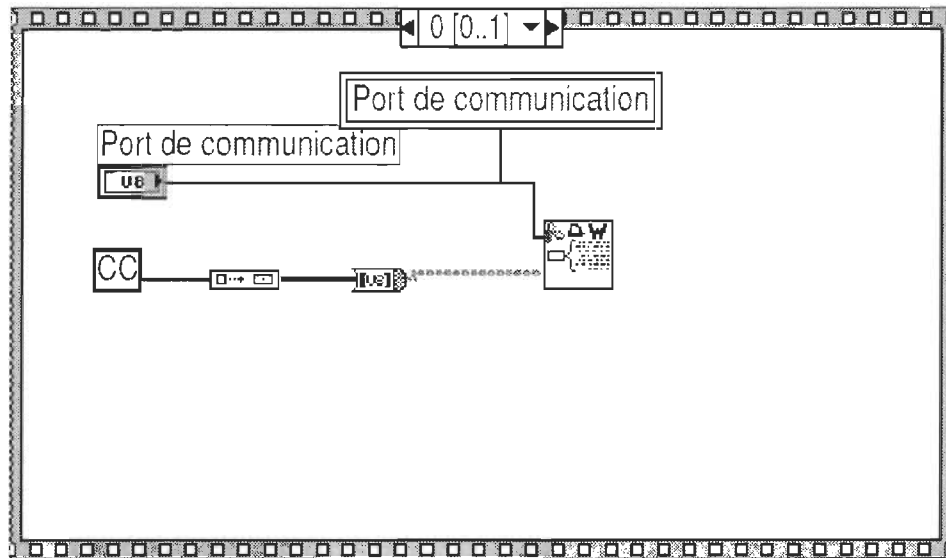
-  **Port de communication**
-  **Consigne de puissance**

### Block Diagram

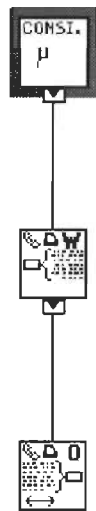




consigne.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\consigne.vi  
 Last modified on 02-11-21 at 14:51  
 Printed on 03-01-23 at 16:55



#### Position in Hierarchy



#### List of SubVIs



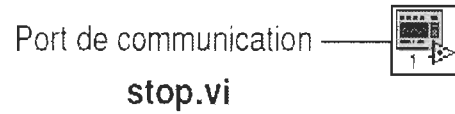
#### Serial Port Write.vi

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Instr\Serial.Ilb\  
 Serial Port Write.vi

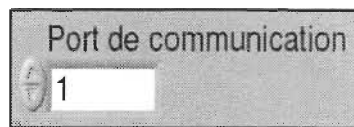
## **Annexe 8: Code du sous-programme Stop.vi**

stop.vi  
 C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.Ilb\stop.vi  
 Last modified on 02-11-21 at 14:50  
 Printed on 03-01-23 at 16:56

## Connector Pane



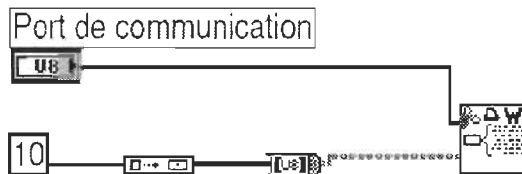
## Front Panel



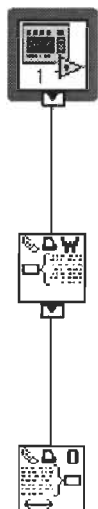
## Controls and Indicators



## Block Diagram



## Position in Hierarchy



stop.vi  
C:\Michael\Mémoire\Valise 4\PAC\_AUT2002.llb\stop.vi  
Last modified on 02-11-21 at 14:50  
Printed on 03-01-23 at 16:56

---

#### List of SubVIs



#### **Serial Port Write.vi**

C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 6.1\vi.lib\Instr\Serial.llb\  
Serial Port Write.vi

---

#### History

"stop.vi History"  
Current Revision: 4

## **Annexe 9: Article "Fuel Cell with Oxygen Enrichment"**

# Fuel Cell Operation with Oxygen Enrichment

M. Fournier, J. Hamelin\*, K. Agbossou, and T. K. Bose

Université du Québec à Trois-Rivières, Institut de Recherche sur l'Hydrogène, 3351, Boul. Des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières (QC), Canada G9A 5H7

Received 26.03.02, in revised form 11.10.02, accepted 11.10.02

## Abstract

Experimental results on the performance of a Ballard 5 kW proton exchange membrane fuel cell stack for different oxygen contents in the oxidant are presented. A description of the experimental setup is given. Polarization, power, and efficiency curves as a function of the current density, for different oxygen concentrations are presented. This detailed characterization of the fuel cell stack behavior is required in order to evaluate the effects of oxygen enrichment on the net power output of the stack. This investigation is done in the framework of a project on stand-alone power generation systems using renewable energy sources, and based on hydrogen production and storage. An electrolyzer, powered by the excess electrical energy from renewable energy sources,

produces hydrogen. The stored hydrogen could then be used to feed an energy conversion device, such as a fuel cell stack, which acts as a secondary power source in periods of high demand. Therefore, a second objective is to evaluate the possibility of using the oxygen produced by the electrolyzer for the enrichment. Other oxygen enrichment techniques such as membrane gas separation and pressure swing adsorption are also discussed. Net available power and system efficiency are used as comparison factors.

**Keywords:** Fuel Cell, Oxygen Enrichment, PSA, Electrolysis, Membranes

## 1 Introduction

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stacks have many characteristics, which make them attractive electrical generators for many applications. They are environmentally friendly, quiet, reliable, and represent an efficient means for converting energy [1–4]. PEMFCs operate at a relatively low temperature, which make them particularly attractive for small and medium scale applications. Unfortunately, the relatively high cost of the materials involved in assembling PEMFCs still limits their market penetration.

In order to reduce the cost per kilogram for manufacturing PEMFCs, great emphasis is put on increasing their power density. From the Nernst equation, it is clear that the use of oxygen instead of air as FC oxidant increases its efficiency, and hence its power density, as has been shown experimentally [5, 6]. Feeding a fuel cell with oxygen instead of air leads to handling concerns and additional cost and complexity. As an alternative, a comparison of on-site techniques to produce an oxidant with various oxygen contents is proposed. The techniques are pressure swing adsorption (PSA), membrane separation (MS), and the recuperation of oxygen as an electro-

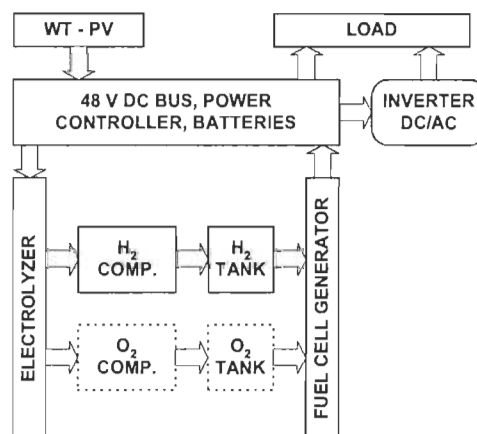


Fig. 1 Schematic of an application using renewable energy sources as the primary source of energy. WT stands for wind turbine and PV for photovoltaic array. Excess energy is converted into hydrogen via an electrolyzer and back to electricity via a fuel cell generator. Dotted boxes represent the modifications for EB technique.

[\*] Corresponding author, jean\_hamelin@uqtr.ca

lysis byproduct (EB). The last technique, EB, is of particular interest for stationary applications, like the one that has been developed at the Hydrogen Research Institute [7, 8], where the excess electrical energy produced from the renewable energy (RE) sources is converted into hydrogen, via an electrolyzer, for long-term storage. The application's schematic is shown in Figure 1. When not enough energy is available from the RE sources, the stored hydrogen is fed to a fuel cell generator that converts the energy contained in the hydrogen into electricity and heat.

To evaluate the effect of these techniques on the joint enrichment-FC system power balance, one should first obtain the FC performance curves as a function of the oxygen content in the oxidant. The FC electrical power can be obtained from these curves. Power consumption for each enrichment technique is then determined. Enrichment techniques are finally compared using the system power balance and efficiency as comparison factors.

## 2 PEMFC Characterization

The PEMFC generator used is a Ballard PGS-105B equipped with a 35 cell MK5-E stack that runs on UHP hydrogen. Each cell has an active electrode area of  $232 \text{ cm}^2$ . A more detailed description of this PEMFC was published in a previous paper [5]. The hydrogen fed to the stack is recirculated at the anode to reduce the stack inlet flow rate to the consuming reaction (if one neglects purge losses). The oxidant is either air or mixtures of oxygen and nitrogen and flows through the stacks cathode according to a specified stoichiometry. A mass flow controller regulates the oxidant flow rate whose pressure is kept constant by a backpressure regulator located at the stack cathode outlet. Both reactant gases are fed to the stack inlets at a pressure of 343 kPa. A 12 kW TDI-Dynaload programmable load, model WCL-488, is used to modulate the stack current. Figure 2 shows a schematic of the experimental setup.

Prior to each run, the stack was brought to an operating temperature of  $72 \pm 2^\circ\text{C}$  with air as the oxidant. Then, the air

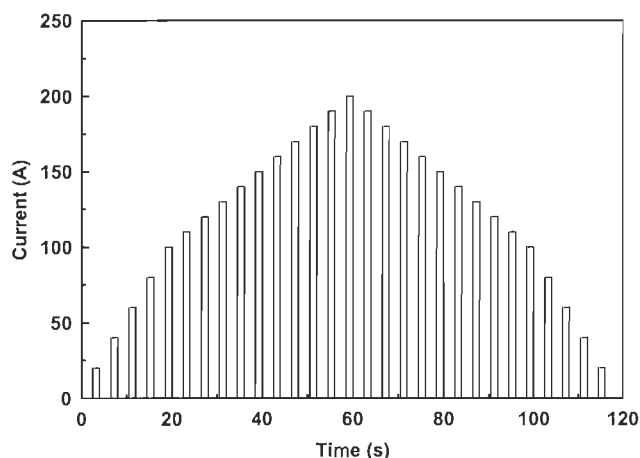


Fig. 3 Current pattern used for the 40% oxygen oxidant.

was changed to the oxidant under investigation. Five separate runs were carried out using, in turn, pure oxygen, and nitrogen/oxygen mixtures with oxygen concentrations of 80%, 60%, 40%, and air. The stack voltage was directly measured at the stack's electrical terminals and the current was obtained by measuring the voltage on a shunt resistance connected in series between one of the electrical terminals of the stack and the load. A histogram-like current pattern, shown in Figure 3, was used with a 275 standard liter per minute (slpm) constant oxidant flow rate. The combination of constant flow rate and intermittent load acts like a periodical oxidant purge. It addresses the stack water management issue that is highly stressed at the high current densities reached with enriched oxidant. A mean least-squared regression algorithm was used to fit the experimental data to a polynomial equation to plot the polarization, power, and efficiency curves.

Figure 4 shows the resulting polarization and power curves as a function of the current density for different oxygen contents in the oxidant. Stack efficiency as a function of current density for different oxygen concentrations in the oxidant is plotted in Figure 5. Stack efficiency is defined as the

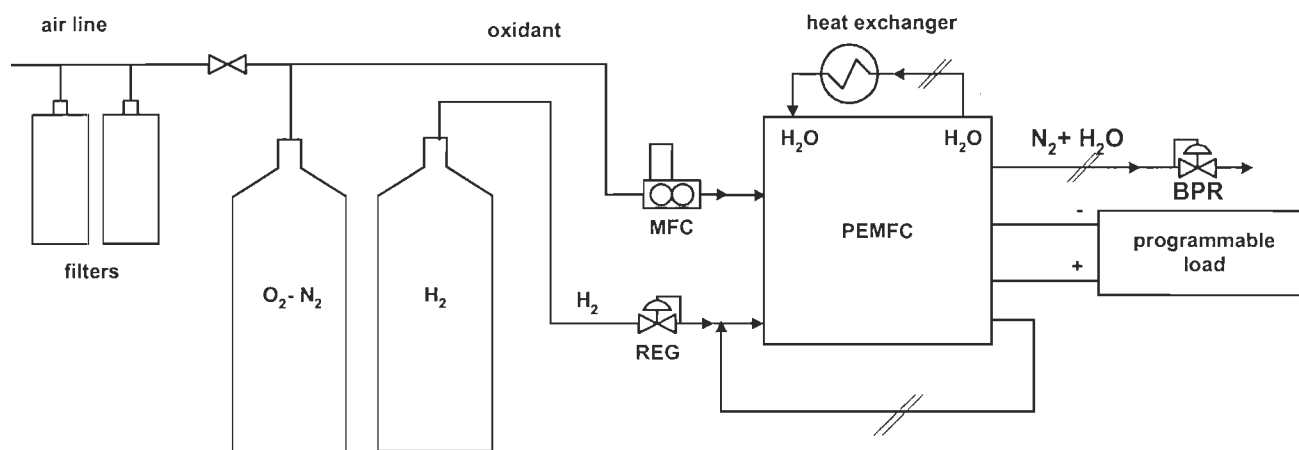


Fig. 2 Schematic of the fuel cell generator experimental setup.

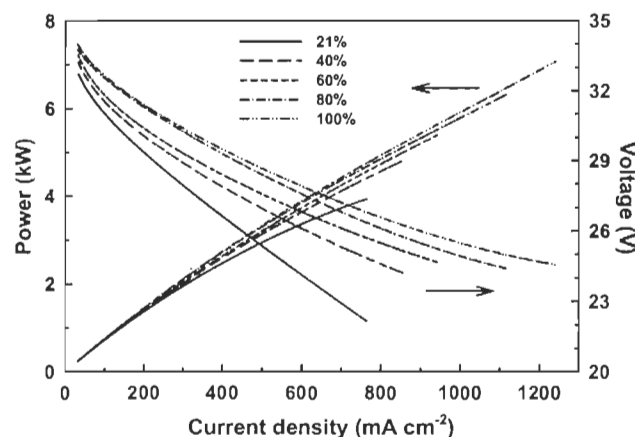


Fig. 4 Polarization and power curves as a function of current density for different oxygen concentrations.

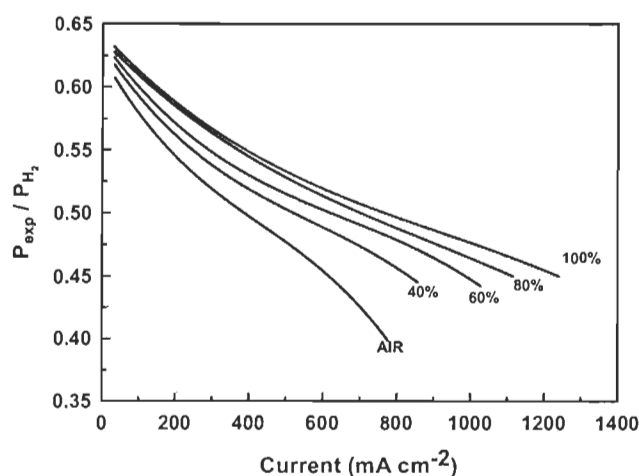


Fig. 5 Efficiencies as a function of current density for different oxygen concentrations.

ratio of stack produced electrical power over the theoretical power contained in hydrogen ( $P_{exp}/P_{H_2}$ ), which is defined as:

$$P_{H_2} = \frac{LHV \times N \times I}{2F} \quad (1)$$

where  $LHV$  is the lower heating value of hydrogen (241 kJ/mol),  $N$  is the number of cells in the stack,  $I$  is the measured stack current, and  $F$  is the Faraday constant.

The sharp voltage drop due to the concentration overvoltage occurs at higher current densities as the oxygen concentration increases due to the corresponding rise of the oxygen partial pressure in the oxidant. Consequently, higher current values can be obtained with the same stack. Alternatively, at a fixed current value an increase in voltage can be obtained resulting from improved stack efficiency. The best relative increase in voltage, power, and efficiency occurs with an oxygen concentration of between 21% and 40% and appears to be directly proportional to the current density.

### 3 Oxygen Sources

In industry, enrichment technologies vary greatly depending on application requirements. As they seem to be the most suitable technologies for small to medium scale PEMFC systems, PSA, MS and recuperation of oxygen as EB are compared with air feed system. In this section, each technology is exposed together with its compressive power requirements. The power consumed by the other systems ancillaries is separately termed as parasitic losses. They are extrapolated from the stack ancillaries consumption and foreseen additional equipment consumption. Parasitic losses are listed in Table 1 while compressive power requirements for a 140 A stack current are shown in Table 2.

Table 1 Estimated parasitic losses.

	Air	PSA	MS	EB	EB + recirculation
PGS-105B	200	200	200	200	200
Control	6	6	6	6	6
Mass flow controller	10	10	10	10	10
Valves	25	325	25	75	75
Recirculation pump	–	–	–	–	36
Total (W) :	241	541	241	291	327

Table 2 Compressive power details for a 140 A stack current.

	Air	PSA	MS	EB	EB + recirculation
$P_{in}$ (kPa)	101	101	101	101	101
$P_{stage1} / P_{stage2}$ (kPa)	–	385/138	104/32.4	791	791
$P_{stack}$ (kPa)	343	343	343	343	343
O <sub>2</sub> recovery	1.00	0.53	0.35	1.00	1.00
O <sub>2</sub> concentration	0.21	0.92	0.30	0.35	1.00
Compressive and (vacuum) power (W)	466	1077	386 (275)	327	94

#### 3.1 Air

Oxygen from air is the most commonly used oxidant to feed a fuel cell. Air contains about 78.03% nitrogen, 20.99% oxygen, and 0.94% argon [9]. Compressive power is used to bring air from atmospheric to stack operating pressure.

#### 3.2 Pressure swing adsorption (PSA)

This technology is commonly used for small-scale systems that separate oxygen from air [9]. The separation principle behind PSA air enrichment is the selective adsorption of nitrogen onto a solid adsorbent. Thus, a gas stream depleted in nitrogen, therefore enriched in oxygen, is obtained at the adsorbent bed outlet. Reducing the admission pressure, which also cleans the adsorbent for reuse, subsequently desorbs nitrogen. The likeliness of oxygen and argon adsorption properties limits the oxygen stream concentration to about 95% [9].

The PSA cycle studied [10] was tested by Sircar [11]. A schematic of such a system is shown in Figure 6 where A, B,



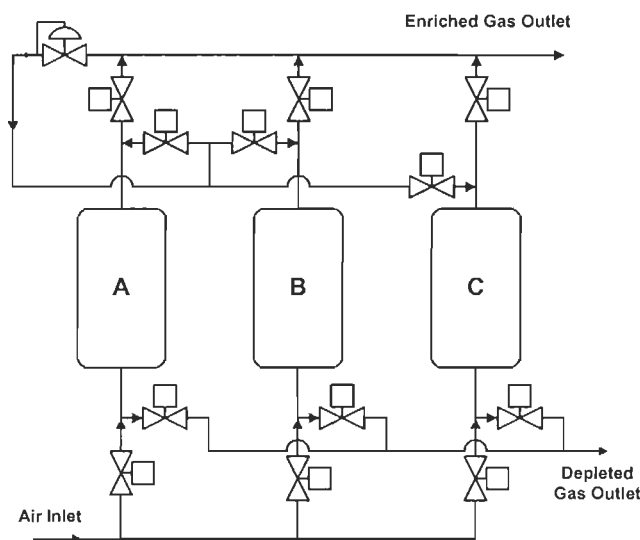


Fig. 6 Schematic for PSA where three adsorbent beds are connected with automated valves for pressurization from the air inlet, enriched gas withdrawal, countercurrent depressurization/depleted gas exhaust, and countercurrent purge with enriched gas.

and C are the three adsorbent beds required to produce a continuous feed. The cycle consists of six different steps: (1) Pressurization of the adsorbent bed from atmospheric to intermediate pressure by admission of air feed from the feed end and of oxygen-enriched gas from the other end. (2) Pressurization from intermediate pressure to high pressure by admission of feed air only. (3) Cocurrent depressurization to intermediate pressure. The expelled gas is the oxygen-enriched product and is partly used for step (1). (4) Depressurization to a still lower but not yet atmospheric pressure. A portion of the oxygen-enriched expelled gas is the product, the balance being used further for purge step (6). (5) Depressurization to atmospheric pressure in the countercurrent direction. Nitrogen-rich gas is discarded. (6) Further desorption (purge) by a countercurrent flow of oxygen-enriched gas obtained at step 4. Nitrogen-rich gas is still wasted at the feed end. Repeat from step 1.

Using zeolite 5A as adsorbent, an adsorption pressure of 385 kPa and a desorption pressure of 101 kPa, Sircar [11] obtained a 91.9% oxygen product released at 138 kPa and an oxygen recovery of 52.8%.

A modern PSA device may comprise of advanced purge and pressure equalization steps in order to improve product purity, recuperation level or efficiency [9]. QuestAir Technologies [12] is manufacturing such devices for fuel cell applications but power requirement data are kept confidential.

All the enrichment techniques studied require a significant amount of power in order to bring gases to working pressure. This power is referred to as compressive power. For this technique, compressive power is used to feed the PSA device with air at the adsorption pressure, and also, to match the product pressure to the fuel cell operating pressure. The air-flow rate,  $\dot{Q}_{air}$ , required to feed the PSA device is obtained from:

$$\dot{Q}_{air} = \frac{[O_2]_{oxi}}{r[O_2]_{air}} \dot{Q}_{oxi} \quad (2)$$

where  $\dot{Q}_{oxi}$  is the required oxidant flow rate for the stack and, equivalently, the product flow rate.  $[O_2]_{oxi}$  is the oxygen concentration in the oxidant,  $[O_2]_{air}$  is the oxygen concentration in the air and  $r$  is the oxygen recovery. Compressive powers are then computed using Eq. (12).

### 3.3 Membrane separation (MS)

Each gas has a characteristic permeation rate, which reflects its ability to dissolve and diffuse through a membrane. If the permeation rates of two gases are different enough, selective permeation allows their separation. The driving force of this process is the difference in species partial pressure on both sides of the membrane. Permeating membranes can be manufactured in modules and operated either in pressurized or vacuum mode. Although requiring more membrane area, vacuum mode is generally preferred to pressurized mode in order to take advantage of a 3 to 1 reduction in the energy requirement [13]. Compact Membrane Systems [14], has developed a hollow fiber membrane module that supplies a flow rate of 1,614 slpm with 30% oxygen enriched air at 32.4 kPa, when fed with an airflow rate of 6,512 slpm at slightly above atmospheric pressure. A schematic of the MS system is shown in Figure 7.

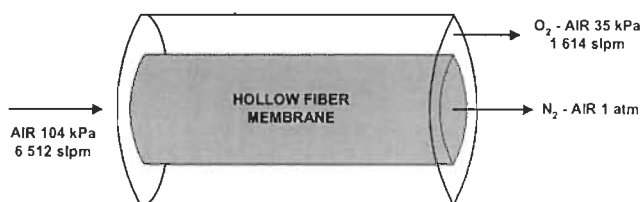


Fig. 7 Schematic of MS from Compact Membrane Systems.

For calculation purposes, Compact Membranes Systems data are used assuming constant inlet/outlet flow rate ratio. The estimated compressive power takes into account the energy required to generate a low positive pressure (104 kPa absolute) and a high flow rate that is delivered to the MS systems inlet, the energy required to generate a negative pressure (35 kPa absolute) at the MS systems oxygen enriched outlet, and the energy required to recompress the oxygen enriched stream to stack operating pressure.

### 3.4 Electrolysis byproduct (EB)

In such applications where an electrolyzer and a fuel cell generator are present, oxygen produced by the electrolyzer, but normally discarded, could be recuperated and stored in a pressurized tank (Figure 1). These applications normally use the fuel cell generator as a secondary energy source [15–17]. If the electrolyzer is modified in order to allow for oxygen recuperation, the stored oxygen can eventually be used as the fuel cell oxidant. As the produced oxygen is extremely pure,

oxidant recirculation into the stack could be envisioned, as is done with hydrogen for the PGS-105B. The recirculation pump would keep the oxidant flow rate high enough to ease water removal and will set an apparent stoichiometry greater than unity for oxygen reduction. A water trap and a deionizing filter would have to be installed at the cathode outlet to remove the ionized water produced from the stream before being redirected to the cathode inlet. Also, a periodic purge has to be programmed to prevent impurity buildup. Compressive power is used to bring the electrolytic oxygen to storage pressure, which has been set to 791 kPa to mimic hydrogen storage pressure from the literature [7, 8].

If the oxidant recirculation loop is not implemented, air should be added to the oxygen stream to reach the desired stoichiometry. The airflow rate is thus set by the following equation

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \frac{1}{[\text{O}_2]_{\text{air}}} \left( \frac{\text{stoichiometry}-1}{2} \right) \dot{Q}_{\text{H}_2}, \quad (3)$$

where  $\dot{Q}_{\text{H}_2}$  is the hydrogen flow rate. The oxygen concentration in the oxidant is given by

$$[\text{O}_2]_{\text{oxi}} = \frac{\dot{Q}_{\text{O}_2, \text{elec}} + [\text{O}_2]_{\text{air}} \cdot \dot{Q}_{\text{air}}}{\dot{Q}_{\text{O}_2, \text{elec}} + \dot{Q}_{\text{air}}}, \quad (4)$$

which results in a 34.7% oxygen concentration for a cathode stoichiometry of 2. In addition to storage requirements, power is required to compress the air stream to the stack operating pressure.

## 4 Power Balance and Efficiency

Available electrical power,  $P_{\text{avail}}$  (W), from the complete system is given by

$$P_{\text{avail}} = P_{\text{elec}} - P_{\text{comp}} - P_{\text{parasitic}}, \quad (5)$$

where  $P_{\text{elec}}$  is the electrical power produced by the stack and is given by

$$P_{\text{elec}} = V \cdot I, \quad (6)$$

where  $V$  and  $I$  are interpolated from Figure 4.  $P_{\text{comp}}$  represents the sum of compressive powers used for the oxidant feed and  $P_{\text{parasitic}}$  is the sum of the other parasitic losses. System efficiency,  $\eta_s$ , is given by the ratio

$$\eta_s = \frac{P_{\text{avail}}}{P_{\text{H}_2}}, \quad (7)$$

where  $P_{\text{H}_2}$  is the chemical power available from hydrogen as defined by Eq. (1). It can also be defined as

$$P_{\text{H}_2} = 179.3 \frac{\text{W}}{\text{slpm}} \times \dot{Q}_{\text{H}_2}. \quad (8)$$

Neglecting purges, the oxygen flow rate,  $\dot{Q}_{\text{O}_2}$ , is given by

$$\dot{Q}_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} \dot{Q}_{\text{H}_2} \cdot \text{stoichiometry}. \quad (9)$$

The oxidant flow rate,  $\dot{Q}_{\text{oxi}}$ , is then given by:

$$\dot{Q}_{\text{oxi}} = \frac{\dot{Q}_{\text{O}_2}}{[\text{O}_2]_{\text{oxi}}}. \quad (10)$$

From Eqs. (9) and (10) follows

$$\dot{Q}_{\text{oxi}} = \frac{\dot{Q}_{\text{H}_2} \cdot \text{stoichiometry}}{2 \cdot [\text{O}_2]_{\text{oxi}}}. \quad (11)$$

For calculations, a constant cathode stoichiometry of 2 is used for all cases except for EB with a recirculation loop, for which the oxidant stoichiometry is fixed to unity. However, the constant flow rate used experimentally to get the fuel cell performances results in stoichiometries varying from infinity to 2.4 for air at maximal current. The lower stoichiometry used for calculations is believed to mainly impair the performances at low oxygen concentrations and high current densities as it corresponds to the lowest oxygen partial pressure conditions.

Adiabatic compressive power is calculated from [18]

$$P_c = \frac{1}{60 \cdot \eta_c} \frac{p_{\text{in}} \dot{Q}_{\text{oxi}, p_{\text{in}}}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (12)$$

where the compression efficiency,  $\eta_c$ , (equal to 0.63) is the product of the compressor efficiency and the electrical motor efficiency,  $p_{\text{in}}$  is the absolute pressure at the compressor intake,  $\dot{Q}_{\text{oxi}, p_{\text{in}}}$  is the oxidant flow rate at  $p_{\text{in}}$  (slpm),  $k$  is a polytropic constant (equal to 1.4) and  $p_{\text{out}}$  is the absolute pressure at the compressor outtake. For vacuum operation, a somewhat lower compression efficiency is expected and a value of 0.5 is used.

This approach to approximate the power balance can be used for any current load and for all enrichment techniques. Obviously, practical systems will be optimized for a specific operating point and estimated power balance versus real power balance error will depend on current. However, estimated power balance is sufficient for the purpose of enrichment technique comparisons.

## 5 Results and Discussion

Before discussing the results, it is wise to recall the specificities of the stack for which data have been collected. It is a hydrogen fed, pressurized intake stack. As compressive power is a large part of the total losses, extrapolation to atmospheric pressure operating stacks is hazardous. In addition, as the compressive power is proportional to the flow rate, results are sensitive to the cathode stoichiometry value. Comparative calculation results are shown in Figure 8.

Compared with air, MS results in lower system efficiency. A slight improvement in the membranes permeating properties would suffice to make them advantageous. In fact, for the

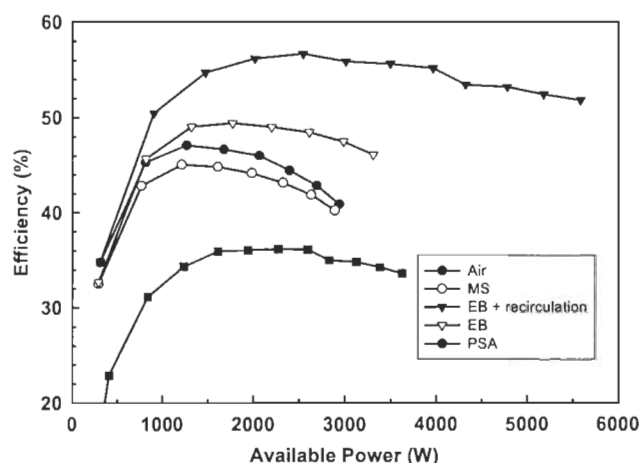


Fig. 8 Comparative calculation results.

same power requirements, if the module could supply 35% oxygen enriched air, it would actually increase system efficiency. As in the present case for MS, PSA devices using the above-described cycle are not suitable either because the required compressive power is greater than the power increase due to oxygen enrichment. Nevertheless, different results may arise from cycles producing a lower oxygen concentration by using smaller adsorption/desorption pressure ratios. Without modifying the fuel cell generator, the oxygen as EB enhances system efficiency by about 5%. If an oxidant recirculation system is implemented, efficiency is increased by 20% and available power is extended to 5.6 kW, about twice the available power with regular air feed.

## 6 Conclusion

From available data, none of the studied enrichment techniques would increase the available power or the efficiency of a portable PEMFC generator. Nevertheless, MS is to be considered in the near future since research activities keep improving membranes permeating properties, while traditional PSA cycles will remain detrimental. For stationary applications where hydrogen and oxygen are produced by electrolysis, significant PEMFC power and efficiency improvements are envisioned. Experimental demonstration of the electrolyzer modification and of the incorporation of an oxidant recirculation loop inside the PEMFC generator is required to further assess the option.

## Acknowledgements

This work was supported by the Ministère de la Recherche, de la Science et de la Technologie du Québec, Canada Foundation for Innovation and Fonds FCAR – Ministère des Ressources Naturelles du Québec. We would like to thank Ballard Power Systems for lending us the PEMFC generator.

## References

- [1] W. Smith, *J. Power Sources* 2000, 86, 74–83.
- [2] T. Susai, A. Kawakami, A. Hamada, Y. Miyake, and Y. Azegami, *J. Power Sources* 2000, 92, 131–138.
- [3] N. M. Sammes and R. Boersma, *J. Power Sources* 2000, 86, 98–110.
- [4] J. C. Amphlett, E. H. de Oliveira, R. F. Mann, P. R. Roberge, A. Rodrigues, and J. P. Salvador, *J. Power Sources* 1997, 65, 173–178.
- [5] J. Hamelin, K. Agbossou, A. Laperrière, F. Laurencelle, and T. K. Bose, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2001, 26, 625–629.
- [6] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, and T. K. Bose, *Fuel Cells*, 2001, 1, 66–71.
- [7] K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin, F. Laurencelle, A. Anouar, J.-M. St-Arnaud, and T. K. Bose, *J. Power Sources*, 2001, 96, 168–172.
- [8] K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin, F. Laurencelle, A. Anouar, J.-M. St-Arnaud, and T. K. Bose, *Int. J. Renewable Energy Engineering* 2000, 2, 254–259.
- [9] D. M. Ruthven, S. Farooq, and K.S. Knaebel, *Pressure Swing Adsorption*, VCH, New-York, 1994.
- [10] L. B. Batta, U.S. Patent 3 636 679, 1972.
- [11] S. Sircar, *Separation Science and Technology*, 1988, 23, 2379–2396.
- [12] Questair Technologies Inc., 6961 Russell Avenue, Burnaby (BC), Canada V5J 4R8.
- [13] A. Gollan, and M. H. Kleper, 1986 *Symposium on Industrial Combustion Technologies*, ASM Int., 179–185, 1986.
- [14] Compact Membrane Systems Inc., 325 Water Street, Wilmington, DE 19804 (USA), personal communication with K. Callaghan, Director, Engine Division.
- [15] P. S. Kauranen, P. D. Lund, and J. P. Vanhanen, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1993, 18, 383–390.
- [16] L. Barra and D. Coiante, *J. Hydrogen Energy*, 1993, 18, 685–693.
- [17] J.W. Hollenberg, E. N. Chen, K. Lakeram, and D. Modroukas, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1995, 20, 239–243.
- [18] E. Bolz and G. Tuve, Ed., *Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, 2<sup>nd</sup> Ed., CRC press, Cleveland, 1973.