

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
KOKOU MATTEWU ADEGNON

AMÉLIORATION DU RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE D'UNE PILE À  
COMBUSTIBLE DE TYPE PEM

AVRIL 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## Résumé

De nos jours, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) sont considérées comme étant une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses. Pour cette raison, maintenir à son optimum le rendement d'un système de pile à combustible (S-PAC) constitué non seulement de la pile mais aussi des auxiliaires utilisés pour l'opérer, représente un important axe de recherches dans le domaine. La plupart des algorithmes de contrôle développés pour atteindre cet objectif sont basés sur des modèles de pile à combustible (PAC) malgré le fait que jusqu'à ce jour, il n'existe pas encore de modèle complet pouvant décrire tous les phénomènes liés aux PAC. Dans ce travail de recherche, nous proposons un algorithme de contrôle basé sur une approche expérimentale visant à rechercher les paramètres d'opération (température de la pile, humidité relative d'air et rapport stœchiométrique d'air) qui optimisent le rendement du S-PAC. En effet, les études expérimentales menées au cours de ce travail ont montré que le rendement du système qui est fonction de la puissance électrique délivrée par la pile, de la puissance perdue dans les auxiliaires du système et du débit d'hydrogène, peut être optimisé en agissant sur ces paramètres d'opération. La méthode d'optimisation développée au cours de ce travail et qui est à la base de l'algorithme de contrôle proposé est dérivée de la méthode de recherche linéaire (line search method). La validité de cette méthode d'optimisation a été prouvée avec plusieurs fonctions test et l'algorithme de contrôle qui en a découlé, a par la suite, été implémenté dans l'interface de contrôle du S-PAC de l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH). Les résultats obtenus suite à l'implémentation ont permis de conclure que l'algorithme a atteint les objectifs visés.

## Remerciements

Mes remerciements vont en premier au professeur Kodjo Agbossou pour m'avoir offert la chance d'effectuer ce travail de recherche sous sa supervision, pour ses conseils, sa compréhension et surtout pour son accompagnement depuis la dernière année de mon baccalauréat. Je remercie également le professeur Yves Dubé pour ses bonnes idées, ses explications si bien données et pour m'avoir guidé au cours de ces deux années de ma maîtrise. Merci au professeur Mamadou Lamine Doumbia pour ses critiques constructives que j'ai vraiment appréciées ainsi que pour ses conseils. Je remercie également les autres membres de l'équipe (actuels et anciens) Daouda Fofana, Alben Cardenas Gonzalez, Dung Tran Khanh Viet, Ahmed Atoubi, Rachid Geraldo, Manouane Caza-Szoka, Cédric Lucas Proulx, Bruno Gagnon-Vivier, Sylvain Chupin, Julien Ramousse et Florent Brèque pour la bonne humeur et l'ambiance dans laquelle j'ai évolué.

Je dédie ce mémoire à ma famille qui n'a jamais cessé d'être à mes côtés et spécialement à ma copine Prisca Anthony en qui je trouve un soutien inestimable.

# Table des matières

	Page
Résumé.....	ii
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures .....	viii
Liste des abréviations et des symboles.....	x
Chapitre 1 - Introduction .....	1
1.1    La pile à combustible .....	1
1.2    Les utilisations possibles de la pile à combustible de type PEM .....	3
1.3    L'état de la recherche .....	4
1.4    Problématique et objectif.....	6
1.5    Méthodologie.....	7
1.5.1    Étude de sensibilité .....	7
1.5.2    Développement de l'algorithme de contrôle .....	8
1.5.3    Implémentation et analyse des résultats.....	8
Chapitre 2 - Description du banc d'essais utilisé .....	10
2.1    Banc d'essais de piles à combustible de l'IRH .....	10
2.2    Contrôle de la pression d'air par logique floue .....	16
2.2.1    Fuzzification des paramètres d'entrée.....	17
2.2.2    Règles d'inférence.....	19
2.2.3    Défuzzification du paramètre de sortie .....	20

2.2.4    Résultats de l'implémentation du contrôleur flou dans LabView.....	23
2.3    Conclusion sur le banc de test .....	25
Chapitre 3 - Étude de sensibilité .....	26
3.1    Méthode proposée pour évaluer le rendement du système.....	26
3.2    Présentation des résultats des mesures expérimentales.....	30
3.2.1    Influence de T <sub>p</sub> , HR et RS sur le rendement .....	31
3.2.2    Influence de la pression relative des réactifs P <sub>gaz</sub> sur le rendement.....	33
3.3    Conclusion sur l'étude de sensibilité.....	34
Chapitre 4 - Développement de l'algorithme de contrôle.....	36
4.1    Optimisation par la méthode de recherche linéaire (Line search method).....	36
4.2    Méthode d'optimisation globale développée .....	37
4.2.1    Test de validation de la méthode.....	39
4.2.2    Précision de la méthode en fonction du nombre maximal d'itérations.....	40
4.3    Algorithme de contrôle développé .....	41
4.3.1    Étape 1 : Initialisation de la base de données expérimentales .....	42
4.3.2    Étape 2 : Identification de la fonction d'approximation .....	44
4.3.3    Étape 3 : Identification des paramètres d'opérations optimaux .....	44
4.3.4    Étape 4 : Rendement expérimental pour les paramètres optimaux ..	45
4.3.5    Étape 5 : Mise à jour de la base de données expérimentales .....	45
4.3.6    Conclusion sur le développement de l'algorithme de contrôle .....	46
Chapitre 5 - Implémentation et test de l'algorithme de contrôle .....	47
5.1    Implémentation dans l'interface de contrôle .....	47
5.1.1    Base de données expérimentales pour le test d'implémentation.....	48
5.1.2    Sous-programme MATLAB effectuant les étapes 2 et 3 .....	50

5.1.3    Implémentation des étapes 4 et 5 .....	51
5.2    Comparaison des performances du système optimisé et du système non optimisé	53
5.3    Conclusion sur la validité de l'algorithme .....	56
Conclusion et recommandations .....	57
Références bibliographiques .....	59
Annexes.....	62
Annexe A : Code Matlab des étapes 2 et 3 de l'algorithme.....	62
Annexe B : Tableau complet des mesures effectuées pendant l'étude de sensibilité .....	65

## Liste des tableaux

	Page
Tableau 1-1 Caractéristiques des différentes piles à combustible .....	2
Tableau 1-2 Caractéristiques des différentes piles à combustible .....	5
Tableau 3-1 Influence de $T_p$ , $HR$ et $RS$ sur le rendement $\eta$ .....	31
Tableau 3-2 Influence de la pression des réactifs sur le rendement $\eta$ .....	33
Tableau 4-1 Tests de validation de la méthode d'optimisation .....	39
Tableau 4-2 Précision de la méthode versus le nombre maximal d'itérations .....	41
Tableau 4-3 Initialisation de la base de données expérimentales.....	43
Tableau 5-1 Base de données initiale pour le test d'implémentation .....	49
Tableau 5-2 Évolution du rendement pendant le test .....	55

## Liste des figures

	Page	
Figure 1.1	Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible [1] .....	3
Figure 1.2	Les principaux systèmes de contrôle d'une pile à combustible [8] .....	4
Figure 2.1	Banc d'essais de pile à combustible de l'IRH .....	10
Figure 2.2	Contrôleur de débit pour l'air en entrée de pile .....	11
Figure 2.3	Bulleur et son bain thermostat .....	11
Figure 2.4	Cordon chauffant augmentant la température de l'air à $T_{cord}$ .....	12
Figure 2.5	Commande du cordon chauffant pour l'humidité relative.....	12
Figure 2.6	Capteur et électrovanne de contrôle pour la pression d'air .....	13
Figure 2.7	Commande de l'électrovanne pour la pression d'air .....	13
Figure 2.8	Mesure du débit et de la pression d'hydrogène .....	14
Figure 2.9	Électrovalve de purge à l'anode.....	14
Figure 2.10	Interface LabView de contrôle du banc d'essais .....	15
Figure 2.11	Organigramme général de l'interface LabView du banc d'essais .....	16
Figure 2.12	Fuzzification du paramètre d'entrée $Err$ .....	18
Figure 2.13	Fuzzification du paramètre d'entrée $dErr/dt$ .....	19
Figure 2.14	Règles d'inférences.....	20
Figure 2.15	Défuzzification du paramètre de sortie $\Delta V_{vanne}$ .....	22
Figure 2.16	Implémentation du contrôleur flou dans LabView .....	22
Figure 2.17	Augmentation de la consigne de pression d'air .....	24
Figure 2.18	Diminution de la consigne de pression d'air .....	24

Figure 3.1	Baisse de la tension de pile et effet des purges.....	28
Figure 3.2	Influence des paramètres sur l'intervalle de temps entre deux purges .....	29
Figure 3.3	Influence de $T_p$ , $HR$ et $RS$ sur le rendement $\eta$ .....	32
Figure 3.4	Influence de $P_{gaz}$ sur le rendement $\eta$ : cas du courant de 10A .....	34
Figure 4.1	Organigramme de la méthode d'optimisation développée .....	38
Figure 4.2	Test d'identification du point optimal avec l'opposé de la fonction Beale ....	40
Figure 4.3	Organigramme de l'algorithme de contrôle proposé .....	42
Figure 5.1	Organigramme du code LabView après l'implémentation.....	48
Figure 5.2	Chargement de la base de données expérimentales.....	50
Figure 5.3	Sous-programme effectuant les étapes 2 et 3.....	51
Figure 5.4	Implémentation de l'étape 4 .....	52
Figure 5.5	Implémentation de l'étape 5 .....	53
Figure 5.6	Paramètres d'opération imposés initialement : $T_p$ de 40°C, $HR$ de 50% et $RS$ de 4.....	54
Figure 5.7	Évolution des paramètres d'opération et du rendement pendant l'exécution de l'algorithme.....	54
Figure 5.8	Évolution du rendement pendant le test.....	55

## Liste des abréviations et des symboles

PEM	Proton exchange membrane
PAC	Pile à combustible
S-PAC	Système de pile à combustible

$\dot{m}_{air}$	Débit d'air	slpm
$\dot{m}_{H_2}$	Débit d'hydrogène	slpm
$P_{air}$	Pression d'air	kPa
$P_{comp}$	Puissance consommée par le compresseur	W
$P_{elec}$	Puissance électrique délivrée par la pile	kPa
$P_{gaz}$	Pression relative des réactifs (air et hydrogène)	kPa
$HR$	Humidité relative de l'air	%
$T_{bulb}$	Température de l'air à la sortie du bulleur	°C
$T_{cord}$	Température de l'air à la sortie du cordon chauffant	°C
$T_p$	Température de pile	°C
$RS$	Rapport stœchiométrique d'air	

# Chapitre 1 - Introduction

L'utilisation continue des combustibles fossiles (qui couvrent 80% de l'énergie consommée dans le monde) et la croissance de la population mondiale provoquent l'épuisement de ces combustibles ainsi que la dégradation des conditions environnementales. En effet, d'après les estimations des compagnies pétrolières, la production du pétrole et des gaz naturels devrait atteindre son maximum entre les années 2015 et 2020 puis commencer à diminuer [1]. Quant aux dégâts environnementaux causés dans le monde, ils sont estimés à environ 5000 milliards de dollars par année [1]. Pour résoudre ces problèmes, des efforts sont faits pour éliminer les sources d'énergies à base de combustibles fossiles. La pile à combustible considérée comme une des solutions les plus prometteuses [1, 2] fait donc l'objet de recherches à travers le monde.

## 1.1 La pile à combustible

Une pile à combustible (PAC) est un convertisseur d'énergie électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en électricité sous forme de courant continu. Les réactifs qui sont typiquement utilisés sont l'hydrogène et l'oxygène présent dans l'air. Les sous-produits de la réaction ne sont que de l'eau et de la chaleur [1]. Les piles à combustible peuvent être scindées en deux grands groupes. On distingue :

- celles fonctionnant à de hautes températures :
  - SOFC (Solid oxyde fuel cell) : 600 – 1000 °C;
  - MCFC (Molten carbonate fuel cell) : 650 – 800 °C;

- PAFC (Phosphoric acid fuel cell) : 160 – 210 °C;
- celles fonctionnant à des basses températures :
  - AFC (Alkaline fuel cell) : 60 – 100 °C;
  - PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell) : 50 – 100 °C.

Parmi ces dernières, la pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane fuel cell) est considérée comme la plus prometteuse [3-6] à cause de sa densité de puissance plus élevée que celles des autres, sa rapidité à répondre à une variation brusque de la charge (voir le tableau 1-1 ci-dessous [3]) et la possibilité de l'intégrer dans des applications fonctionnant à basse température.

Tableau 1-1 Caractéristiques des différentes piles à combustible

	Densité de puissance (kW/m <sup>2</sup> )	Température d'opération (°C)	Temps de démarrage (min)
SOFC	1.5 – 2.6	800 – 1000	Heures
MCFC	0.1 – 1.5	650 – 800	Heures
PAFC	0.8 – 1.9	160 – 210	Heures
<b>PEMFC</b>	<b>3.8 – 6.5</b>	<b>50 – 100</b>	<b>Secondes – minutes</b>
AFC	0.7 – 8.1	60 – 100	Minutes
DMFC	---	50 – 200	---

La tension aux bornes d'une cellule de pile à combustible varie en fonction de la densité de courant que cette cellule délivre. La courbe de polarisation standard d'une cellule est présentée par la figure 1.1 [1].

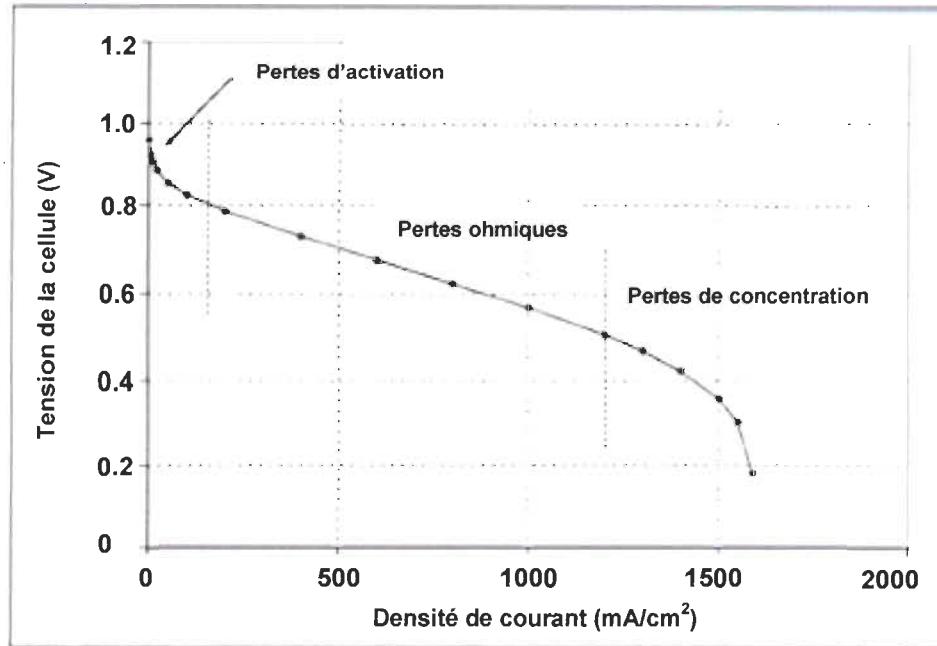


Figure 1.1 Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible [1]

## 1.2 Les utilisations possibles de la pile à combustible de type PEM

La pile à combustible de type PEM peut être utilisée pour alimenter des maisons, ou en modèle miniature comme batterie de téléphones mobiles ou d'ordinateurs portables [1, 6]. Mais elle est beaucoup plus développée dans le domaine automobile [7] car elle est plus efficace que le moteur à combustion interne qui lui est limité par le cycle de Carnot [2]. De plus, elle est non polluante et beaucoup plus silencieuse, sans oublier son aptitude à fonctionner à basse température et son temps de réponse très court. Dans un système de pile à combustible de type PEM, il existe quatre principaux systèmes de contrôle qui régulent : l'alimentation en air, l'alimentation en hydrogène, l'humidité relative des réactifs et la température de la pile. Ces quatre systèmes de contrôle sont présentés sur la figure 1.2 ci-dessous tirée de [8].

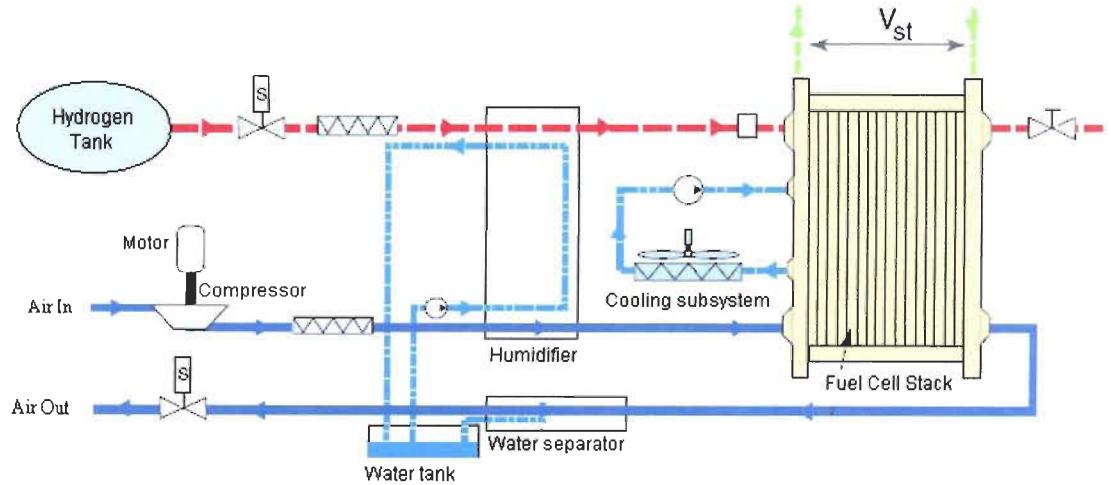


Figure 1.2 Les principaux systèmes de contrôle d'une pile à combustible [8]

### 1.3 L'état de la recherche

Il existe un grand nombre d'études expérimentales qui ont été faites sur les conditions de fonctionnement de la pile à combustible de type PEM. À l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) par exemple, une équipe de chercheurs a mené une étude sur les performances d'une pile de type PEM en variant le degré de pureté d'oxygène à la cathode. Les résultats de cette étude montrent que la puissance nette produite par la pile augmente considérablement lorsque de l'oxygène pur est utilisé à la cathode plutôt que de l'air [9]. Ailleurs dans le monde, d'autres études expérimentales faites sur les conditions de fonctionnement de la pile montrent qu'une augmentation de la pression des réactifs fait croître la tension aux bornes de la pile [6, 10-12]. Certaines de ces études [4, 12, 13] montrent aussi qu'augmenter le débit d'air fait croître la tension. Mais ces deux actions ont un effet négatif qui est l'augmentation de l'énergie consommée par les compresseurs, ce qui affecterait le rendement du système de pile à combustible (S-PAC). Parmi ces études, certaines montrent aussi qu'avec des réactifs plus humidifiés, la tension de la pile est plus

élevée [4, 6, 12]. Mais ceci peut également provoquer un noyage des cellules de la pile, ce qui amoindrirait leurs performances. D'autres études encore montrent qu'une augmentation de la température de la pile améliore ses performances [4, 6, 10, 12]. Mais une température trop élevée peut provoquer un assèchement de la membrane de la pile, ce qui amoindrirait également ses performances. Des recherches faites à l'IRH mettent en évidence des chutes de tension plus importantes dans certaines cellules de la pile ayant des températures plus élevées que d'autres. Les différentes observations peuvent être résumées dans le tableau 1-2 suivant :

Tableau 1-2 Caractéristiques des différentes piles à combustible

Actions menées	Effet positif	Effet négatif
Oxygène pur à la cathode au lieu de l'air	Augmentation de la puissance nette	
Augmentation de la pression des réactifs	Augmentation de la tension	Augmentation de la puissance consommée par le compresseur
Augmentation du débit d'air	Augmentation de la tension	Augmentation de la puissance consommée par les compresseurs
Augmentation de l'humidité relative des réactifs	Augmentation de la tension	Possibilité de noyage des cellules
Augmentation de la température de la pile	Augmentation de la tension	Assèchement de la membrane de la pile

Des stratégies de contrôle ont donc été développées pour ces différents sous-systèmes. Ainsi, un contrôle du débit d'air et de la pression d'air a été réalisé en utilisant l'algorithme LQG (Linear Quadratic Gaussian) [14]. Un contrôleur linéaire à une entrée – une sortie

(SISO) pour le rapport stœchiométrique d'air a été conçu en utilisant aussi l'algorithme LQG [7, 8]. Un contrôle par logique floue a été réalisé pour un prototype miniature de la pile à combustible de type PEM [15]. Un contrôle par réseaux de neurones a été appliqué au système d'alimentation en hydrogène [16]. Un contrôle de l'impédance interne de la pile de type PEM par des réseaux de neurones avec logique floue a été développé [17]. Un contrôleur adaptatif à logique floue a été conçu pour la température d'une pile à combustible de type MC [18]. Un contrôleur multivariable linéaire (LQG) ainsi qu'un contrôleur multivariable adaptatif non linéaire (MPC : Model Predictive Controller) pour le rapport stœchiométrique d'air, la pression d'air et la différence de la pression entre la cathode et l'anode ont été développés [19]. À l'IRH, un modèle d'état a été développé pour le système d'alimentation en air dans le but de concevoir un contrôleur efficace pour le débit et la pression de l'air à la cathode mais ce modèle a été validé uniquement en considérant une ouverture complète de l'électrovanne à la sortie de la cathode [20]. Le présent travail de recherche va dans le même sens puisqu'il poursuit l'objectif principal qui est le développement d'un algorithme de contrôle pour le système de pile à combustible.

#### 1.4 Problématique et objectif

La plupart des stratégies citées plus haut se focalisent uniquement sur l'amélioration de la tension de la pile elle-même et ne tiennent donc pas compte de la puissance consommée par les auxiliaires et de la consommation d'hydrogène. Il en existe tout de même quelques unes qui se focalisent sur l'amélioration du rendement du système au complet en tenant compte, non seulement de la puissance délivrée par la pile, mais aussi de la puissance consommée par les auxiliaires et de la consommation d'hydrogène [21, 22]. Toutefois, elles

sont basées sur des modèles de la PAC malgré le fait que jusqu'à ce jour, il n'existe pas encore de modèle complet pouvant décrire tous les phénomènes de la pile [23].

Dans le présent travail de recherche, nous nous intéressons également au rendement du système entier. Cependant, à la différence des autres stratégies exposées dans la littérature, nous proposons un algorithme basé sur une approche expérimentale visant à maintenir à son optimum le rendement du S-PAC. Pour atteindre cet objectif, les sous objectifs suivants sont définis :

- l'étude de sensibilité sur le rendement du système;
- le développement de l'algorithme de contrôle;
- l'implémentation de l'algorithme et l'analyse des résultats.

## 1.5 Méthodologie

### 1.5.1 Étude de sensibilité

Pour concevoir un algorithme de contrôle efficace, il est primordial d'effectuer une étude de sensibilité afin de ne prendre en compte que les paramètres qui sont nécessaires. En éliminant ainsi ceux qui ne sont pas nécessaires, on limite le nombre de paramètres à contrôler, ce qui a pour avantage d'alléger l'algorithme et de le rendre plus rapide.

Pour identifier les paramètres qui influencent réellement le rendement du S-PAC, une étude de sensibilité s'avère donc nécessaire. Elle consiste à analyser à l'aide des résultats expérimentaux l'effet des paramètres suivants sur le rendement réel du système pour un courant de charge constant:

- la température de la pile;
- l'humidité relative de l'air;
- le rapport stœchiométrique d'air;
- la pression des réactifs (air et hydrogène).

Cette étude a montré que pour un courant de charge constant, le rendement du S-PAC peut être optimisé si les valeurs des paramètres sont judicieusement choisies. Le chapitre 3 exposera les résultats expérimentaux obtenus suite à cette étude de sensibilité ainsi que les principales observations faites qui nous ont conduit à cette conclusion. Mais auparavant, le chapitre 2 présentera en détails le banc d'essais qui a été utilisé pour les expérimentations.

### *1.5.2 Développement de l'algorithme de contrôle*

Suite aux conclusions de l'étude de sensibilité, un algorithme d'optimisation du rendement basé sur des mesures expérimentales provenant du système et sur une action directe sur les paramètres influents a été élaboré. En bref, cet algorithme met continuellement à jour une base de données expérimentale qui lui permet d'estimer (au fur et à mesure que le système fonctionne) les paramètres d'opération (température de pile, humidité relative et rapport stœchiométrique d'air) qui donnent un rendement optimal. Le chapitre 4 sera consacré aux différentes étapes de l'élaboration de cet algorithme et donnera une explication plus détaillée de son fonctionnement.

### *1.5.3 Implémentation et analyse des résultats*

La validation de l'algorithme développé passe d'abord par une implémentation qui a été faite sur le banc d'essais de pile à combustible de l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH). Pour tester la validité, le système a été démarré avec des conditions non optimales,

puis en appliquant l'algorithme, une amélioration du rendement suivi de son maintien à une valeur optimale est observée. Le processus d'implémentation et les résultats qui en découlent sont présentés plus en détails dans le chapitre 5.

## Chapitre 2 - Description du banc d'essais utilisé

### 2.1 Banc d'essais de piles à combustible de l'IRH

Le banc d'essais de pile à combustible de l'IRH qui a été mis au point par l'équipe du professeur Kodjo Agbossou et qui a servi de matériel de base pour ce travail de recherche est illustré par la figure 2.1 ci-dessous.

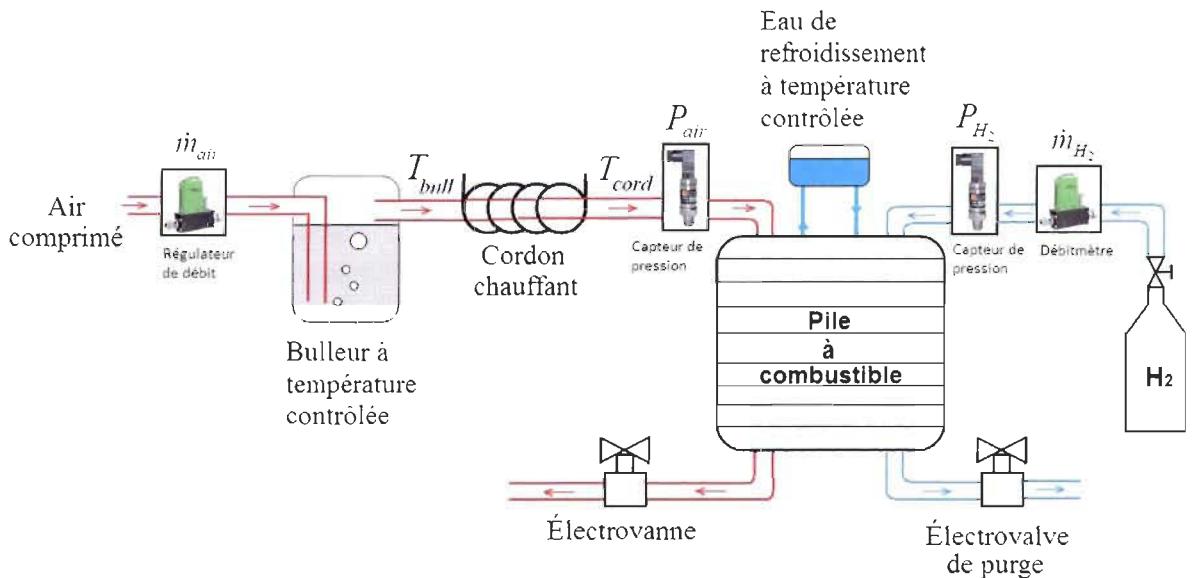


Figure 2.1 Banc d'essais de pile à combustible de l'IRH

Dans le circuit d'alimentation en air, le banc dispose d'une source d'air comprimé (figure 2.2.a) dont le débit est contrôlé par un régulateur de débit externe (figure 2.2.b). Ce dernier permet par la même occasion de varier le rapport stœchiométrique d'air  $RS$  (débit d'air fourni  $\dot{m}_{air}$  par rapport au débit d'air nécessaire) à l'entrée de la pile.



a) Détendeur et valve d'air

b) Contrôleur de débit d'air

Figure 2.2 Contrôleur de débit pour l'air en entrée de pile

Dans le but de contrôler l'humidité relative de l'air à la cathode, le banc dispose d'un bulleur qui humidifie d'abord l'air à 100% à une température  $T_{bull}$  contrôlé par un bain thermostat externe (figure 2.3). En augmentant ensuite la température de l'air à une valeur  $T_{cord}$  grâce à un cordon chauffant (figure 2.4), l'humidité relative  $HR$  est ainsi régulée d'après l'expression 2.1 suivante [24]:

$$HR = 100\% \times \exp\left(\frac{5096.23}{T_{cord}} - \frac{5096.23}{T_{bull}}\right) \quad (2.1)$$

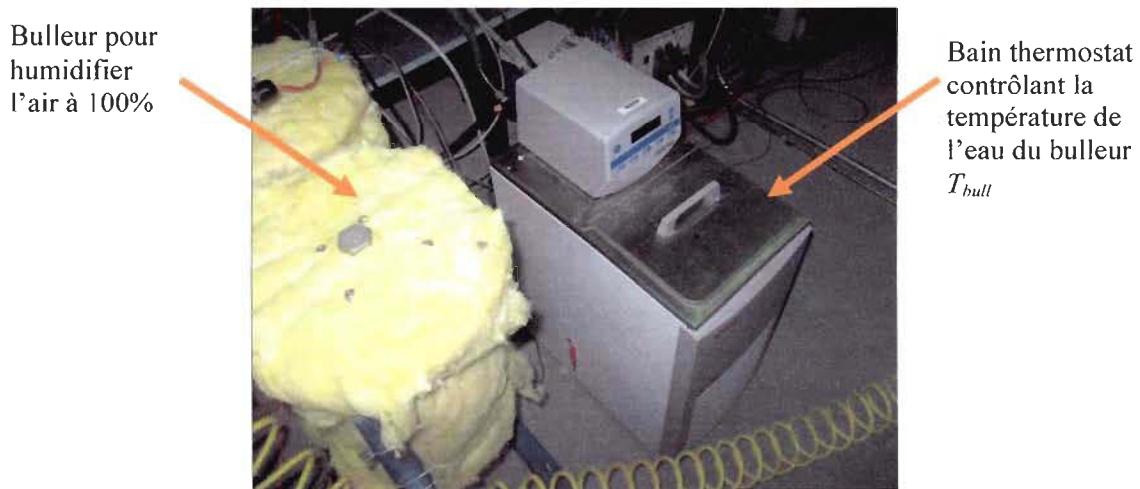
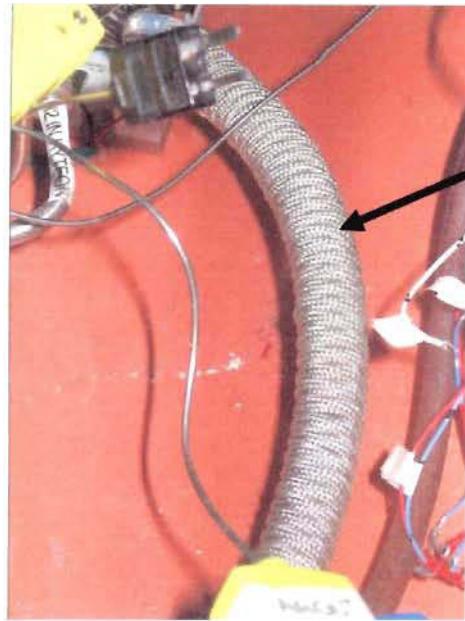


Figure 2.3 Bulleur et son bain thermostat



Cordon chauffant entourant le tuyau d'air entre le bulleur et la cathode de la pile

Figure 2.4 Cordon chauffant augmentant la température de l'air à  $T_{cord}$

Le cordon chauffant ne disposant pas de système de refroidissement, le contrôle de la température  $T_{cord}$  et par conséquent de l'humidité relative  $HR$  s'avère plus difficile. La stratégie de contrôle utilisée pour asservir l'humidité relative est basée sur la mesure de l'erreur  $\Delta T_{cord}$  et de sa variation dans le temps. Selon ces deux valeurs, le cordon est soit éteint, soit légèrement chauffé, ou soit fortement chauffé par application d'une tension moyenne de chauffage  $V_{cord}$ . Cette stratégie est illustrée par la figure 2.5 suivante :

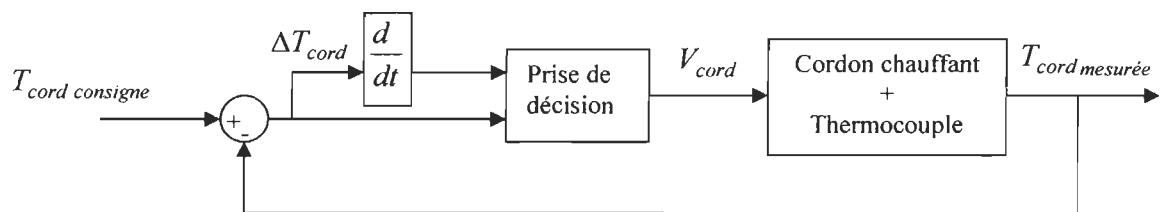


Figure 2.5 Commande du cordon chauffant pour l'humidité relative

Ensuite, un capteur placé à l'entrée de la cathode (figure 2.6.a) permet de mesurer la pression d'air  $P_{air}$  qui est contrôlée par l'électrovanne de sortie (figure 2.6.b).

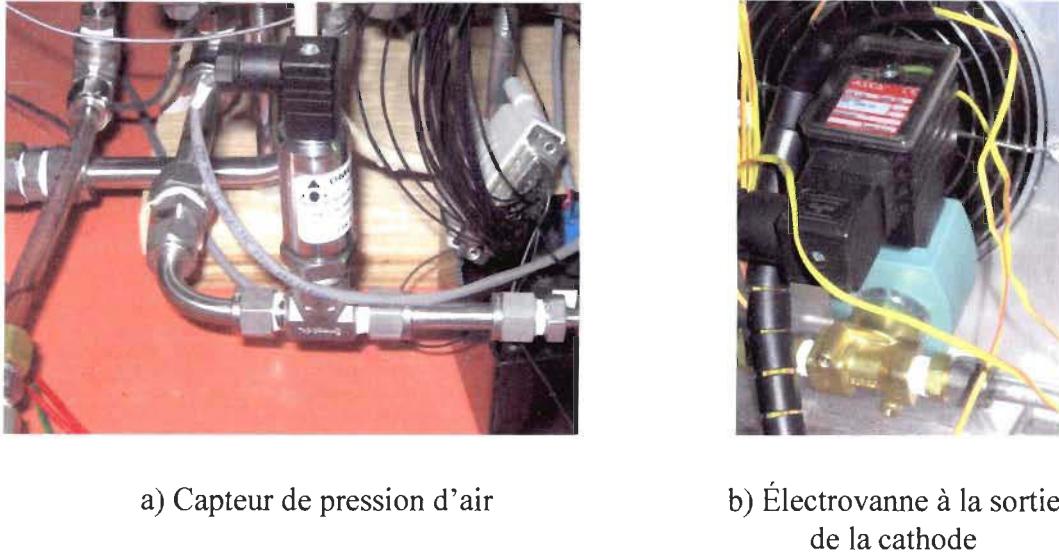


Figure 2.6 Capteur et électrovanne de contrôle pour la pression d'air

La stratégie de commande de l'électrovanne est basée sur la logique floue (figure 2.7).

Le contrôleur à logique floue détermine le niveau de tension  $V_{vanne}$  à appliquer à l'électrovanne pour annuler l'erreur  $\Delta P_{air}$ . L'élaboration de ce contrôleur par logique est présentée plus en détails à la section 2.2.

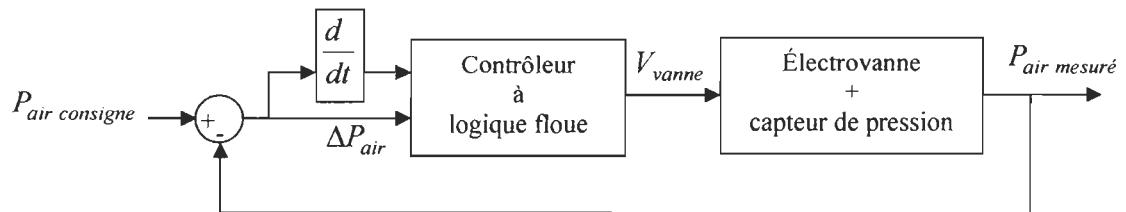


Figure 2.7 Commande de l'électrovanne pour la pression d'air

Dans le circuit d'alimentation en hydrogène, le débit et la pression sont mesurés à l'aide d'un débitmètre (figure 2.8.a) et d'un capteur de pression (figure 2.8.b).

L'électrovalve de purge placée (figure 2.9) à la sortie de l'anode permet de maintenir celle-ci en mode « canal fermé » c'est-à-dire que seule la quantité d'hydrogène nécessaire est consommée par la pile.



a) Débitmètre pour l'hydrogène



b) Capteur de pression d'hydrogène

Figure 2.8 Mesure du débit et de la pression d'hydrogène



Figure 2.9 Électrovalve de purge à l'anode

Le banc dispose également d'un bain thermostat (même type que celui du bulleur) qui permet de réguler la température de la pile. Il s'agit d'un accessoire qui possède son propre système de commande PID.

Pour contrôler les conditions expérimentales ainsi que le banc d'essais, un programme LabView (développé également par l'équipe du professeur Kodjo Agbossou) communiquant avec les différents capteurs et accessoires (cités dans les lignes ci-dessus) est utilisé. L'interface utilisateur de ce programme est présentée à la figure 2.10.

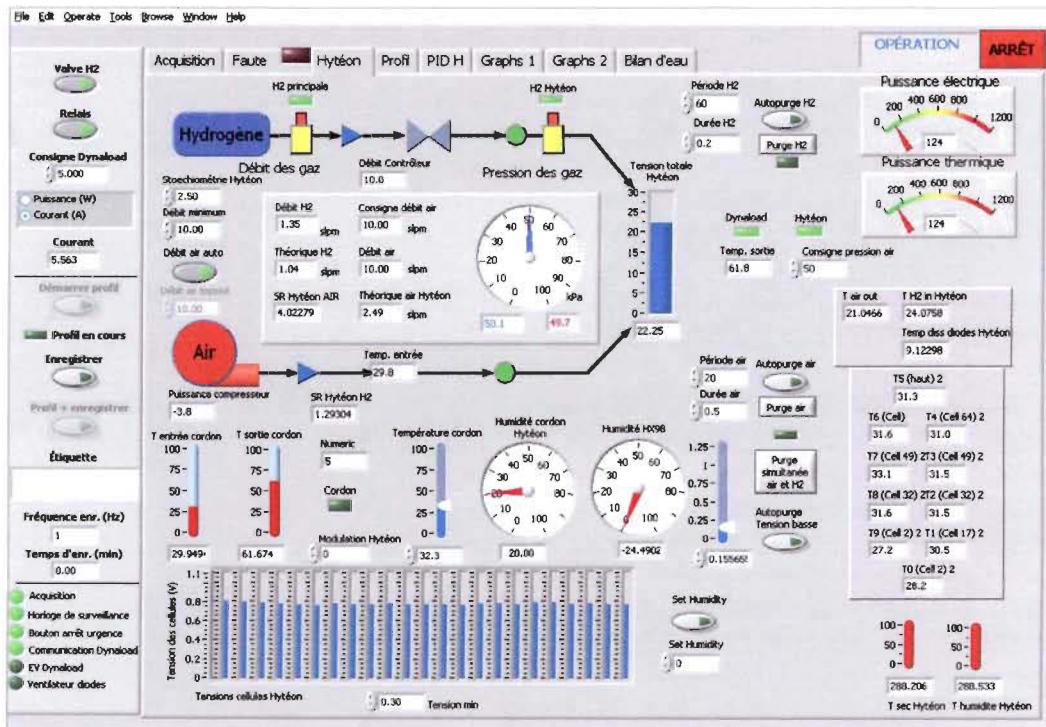


Figure 2.10 Interface LabView de contrôle du banc d'essais

L'organigramme général de ce programme LabView est présenté à la figure 2.11.

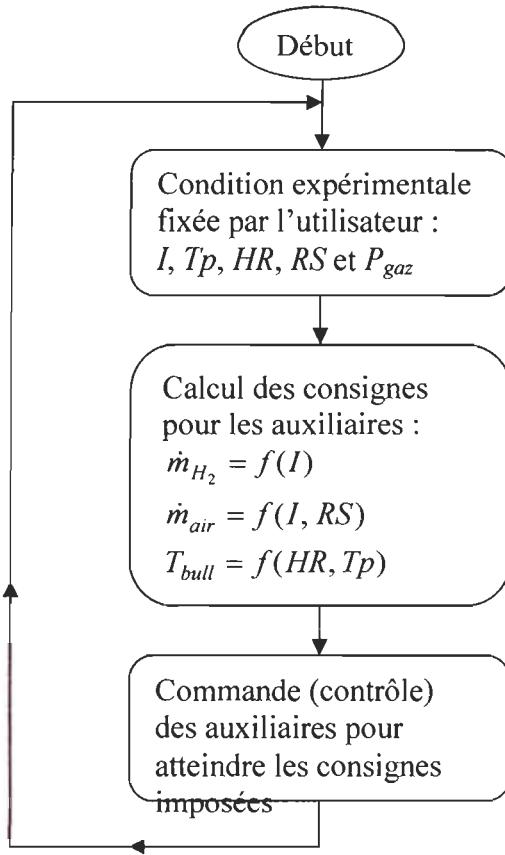


Figure 2.11 Organigramme général de l'interface LabView du banc d'essais

## 2.2 Contrôle de la pression d'air par logique floue

La pression relative d'air étant l'un des paramètres sur lesquels porte l'étude de sensibilité qui sera présentée au chapitre 3, il s'est avéré nécessaire de concevoir un contrôleur efficace qui puisse fixer la pression relative d'air à la valeur désignée en agissant sur l'électrovanne placée à la sortie de la cathode. En réalité, le but recherché n'est pas seulement de fixer la pression d'air à la valeur désirée mais de garder en même temps le débit d'air aussi constant que possible puisque nous ne désirons varier qu'un seul paramètre à la fois. La stratégie de contrôle utilisée pour atteindre cet objectif est basée sur la logique floue (figure 2.7) étant donné que cette méthode ne nécessite pas de modèle sur la variation

du débit d'air et de la pression d'air lorsqu'on agit sur l'électrovanne. Les paramètres d'entrées utilisés pour le contrôleur flou sont l'erreur de pression  $\Delta P_{air}$  (différence entre la consigne de pression et la pression mesurée) et le taux de variation de cette erreur dans le temps. Étant donné qu'en augmentant la tension appliquée à l'électrovanne, l'ouverture de son orifice s'agrandit diminuant ainsi la pression d'air, le paramètre de sortie du contrôleur est donc le niveau de tension  $\Delta V_{vanne}$  (positif ou négatif) à ajouter à la tension  $V_{vanne}$  précédemment appliquée à l'électrovanne. La conception du contrôleur flou est scindée en trois parties qui sont la fuzzification des paramètres d'entrées, l'établissement des règles d'inférences et la défuzzification du paramètre de sortie.

### 2.2.1 Fuzzification des paramètres d'entrée

Cette étape consiste à passer des valeurs numériques aux valeurs linguistiques. Nous attribuons donc à chaque paramètre d'entrée des variables linguistiques auxquelles sont associées des intervalles numériques. Dans notre cas, pour le premier paramètre d'entrée qui est l'erreur  $\Delta P_{air}$  encore notée  $Err$ , les variables linguistiques sont (figure 2.12) :

- Grand++ : la pression mesurée est supérieure à la consigne de pression d'au moins 40kPa;
- Grand+ : la pression mesurée est supérieure à la consigne de pression de 16kPa;
- Zéro : la pression mesurée est égale à la consigne de pression;
- Petit+ : la pression mesurée est inférieure à la consigne de pression de 16kPa;
- Petit++ : la pression mesurée est inférieure à la consigne de pression d'au moins 40kPa.

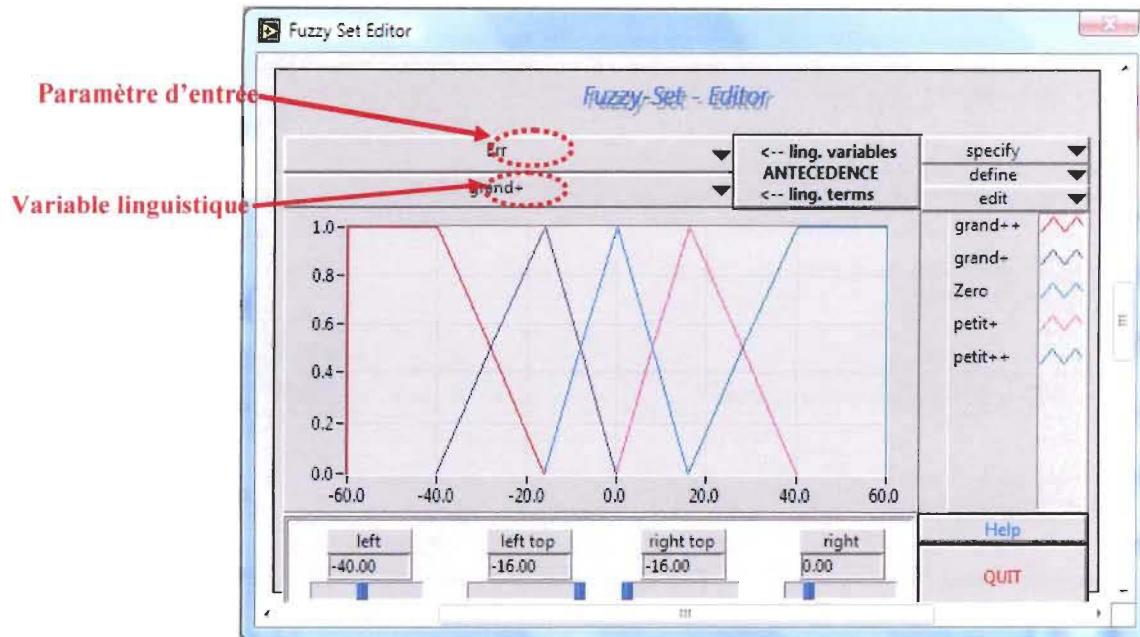


Figure 2.12 Fuzzification du paramètre d'entrée *Err*

Pour le deuxième paramètre d'entrée qui est le taux de variation de l'erreur notée  $d\text{Err}/dt$ , les variables linguistiques sont (figure 2.13) :

- diminue ++ : la pression mesurée actuellement est inférieure à la pression mesurée précédemment d'au moins 3.6kPa;
- diminue + : la pression actuelle est inférieure à la pression précédente de 1.2kPa;
- constante : la pression est actuelle est égale à la pression précédente;
- augmente + : la pression actuelle est supérieure à la pression précédente de 1.2kPa;
- augmente ++ : la pression actuelle est supérieure à la pression précédente d'au moins 3.6kPa.

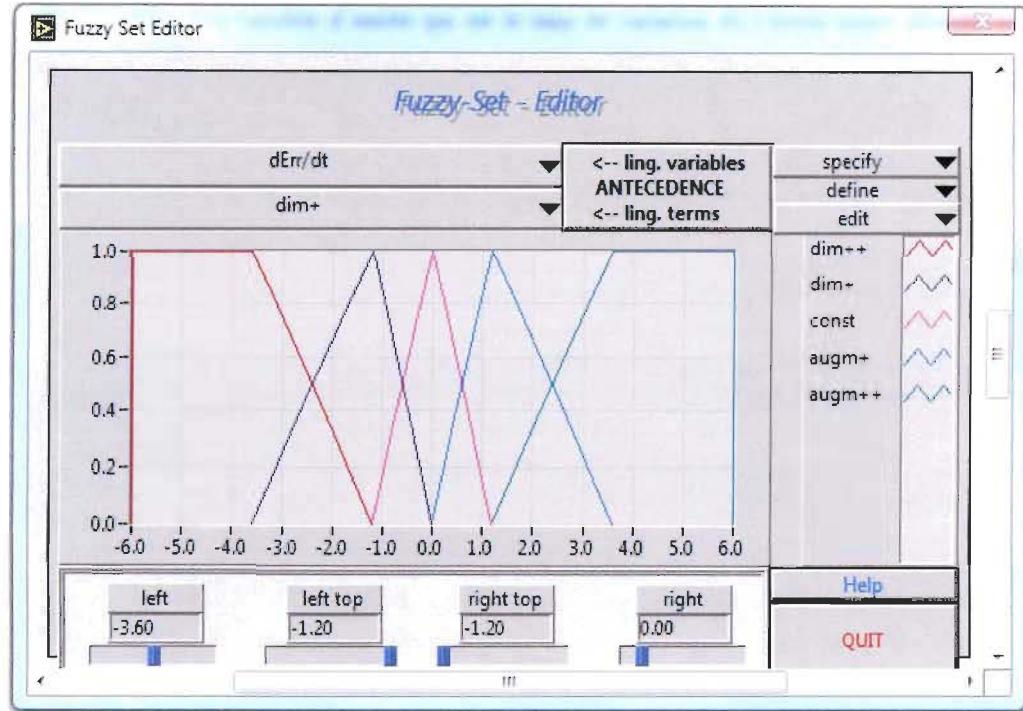


Figure 2.13 Fuzzification du paramètre d'entrée  $dErr/dt$

## 2.2.2 Règles d'inférence

Cette étape consiste à créer des règles qui définiront l'action à effectuer selon l'importance de l'erreur  $\Delta P_{air}$  et de sa variation dans le temps. Par exemple, si la pression mesurée est constante et égale à la consigne de pression alors il ne faut effectuer aucune action, ou encore si la pression mesurée est trop élevée mais qu'elle ne diminue pas alors il faut ouvrir grandement la vanne pour «beaucoup diminuer» la pression. Dans la figure 2.14, cette action de grande diminution est représentée par l'abréviation anglaise «Lg neg» pour «Large negative». Cette notation sert également de variable linguistique pour le paramètre de sortie du contrôleur noté ici «vit. augm.» pour «vitesse d'augmentation du niveau de tension». Étant donné qu'il existe 5 variables linguistiques pour chaque paramètre d'entrée, il y a donc 25 combinaisons possibles donc 25 règles d'inférences à établir.

Rule-Nr.	IF	THEN	With	Up	Defuzzification Method
	Err	dErr/dt	vit. augm.	DoS	Center of Gravity
1	grand++	dim++	Sm neg	1.00	default term
2	grand++	dim+	Med neg	1.00	No change
3	grand++	const	Lg neg	1.00	if no rule is active
4	grand++	augm+	Med neg	1.00	Take last value
5	grand++	augm++	Lg neg	1.00	Inference Method
6	grand+	dim++	Sm neg	1.00	Max-Min
7	grand+	dim+	No	1.00	Select form of Rulebase
8	grand+	const	Sm neg	1.00	normal Rulebase
9	grand+	augm+	Med neg	1.00	total rules 25
10	grand+	augm++	Lg neg	1.00	used rules 25
11	Zero	dim++	Med pos	1.00	default DoS 1.00
12	Zero	dim+	Sm pos	1.00	Help
13	Zero	const	No	1.00	Quit
14	Zero	augm+	Sm neg	1.00	
15	Zero	augm++	Med neg	1.00	

Figure 2.14 Règles d'inférences

### 2.2.3 Défuzzification du paramètre de sortie

C'est l'action inverse à la fuzzification qui consiste à repasser des valeurs linguistiques aux valeurs numériques. Nous associons donc à chaque variable linguistique du paramètre de sortie un intervalle numérique. Par exemple, si l'action à effectuer est de ne rien faire, alors on ne change pas le niveau de tension appliquée à l'électrovanne ( $\Delta V_{vanne} = 0$ ). Les variables linguistiques et les niveaux de tensions qui leurs sont associées sont décrites comme suit (figure 2.15); il est à noter que pour faciliter la compréhension, nous avons fixé  $\Delta V_{vanne}$  comme étant l'opposé de ces niveaux de tension étant donné que pour diminuer la pression d'air, l'action d'ouvrir plus grandement l'électrovanne consiste à augmenter la tension de l'électrovanne (figure 2.16) :

- large negative : diminuer le niveau de tension d'au moins 0.2V autrement dit augmenter la tension appliquée à l'électrovanne d'au moins 0.2V;
- medium negative : diminuer le niveau de tension de 0.12V autrement dit augmenter la tension appliquée à l'électrovanne de 0.12V;
- small negative : diminuer le niveau de tension de 0.04V autrement dit augmenter la tension appliquée à l'électrovanne de 0.04V;
- no change : ne pas changer le niveau de tension autrement dit garder constante la tension appliquée à l'électrovanne;
- small positive : augmenter le niveau de tension de 0.04V autrement dit diminuer la tension appliquée à l'électrovanne de 0.04V;
- medium positive : augmenter le niveau de tension de 0.12V autrement dit diminuer la tension appliquée à l'électrovanne de 0.12V;
- large positive : augmenter le niveau de tension d'au moins 0.2V autrement dit diminuer la tension appliquée à l'électrovanne d'au moins 0.2V.

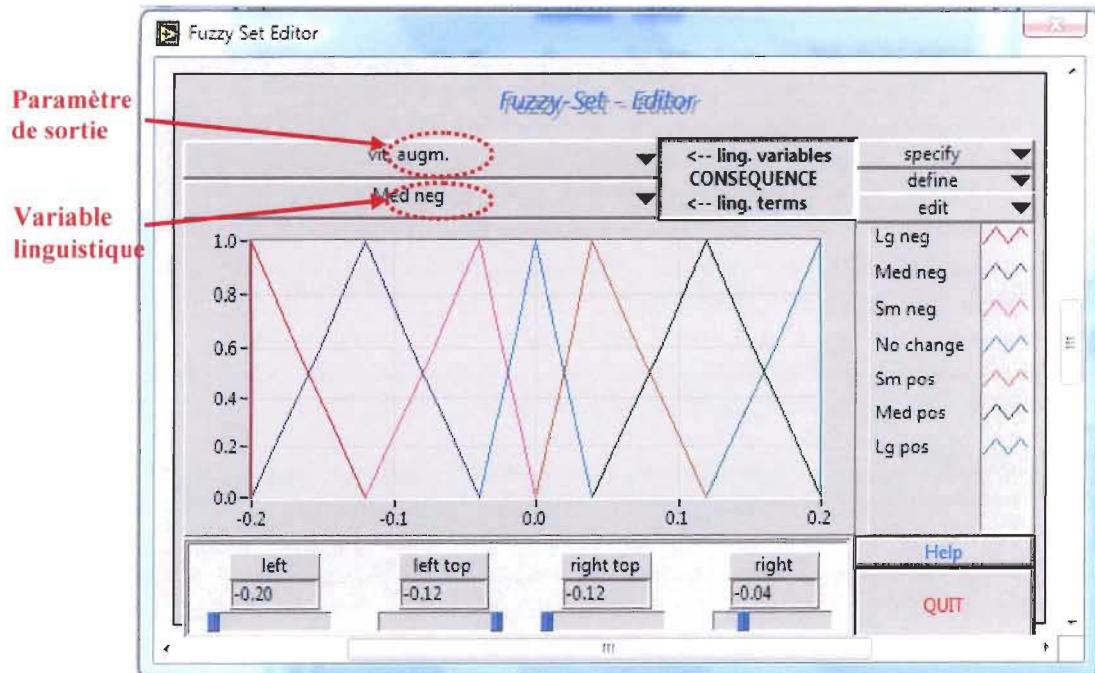


Figure 2.15 Défuzzification du paramètre de sortie  $\Delta V_{vanne}$

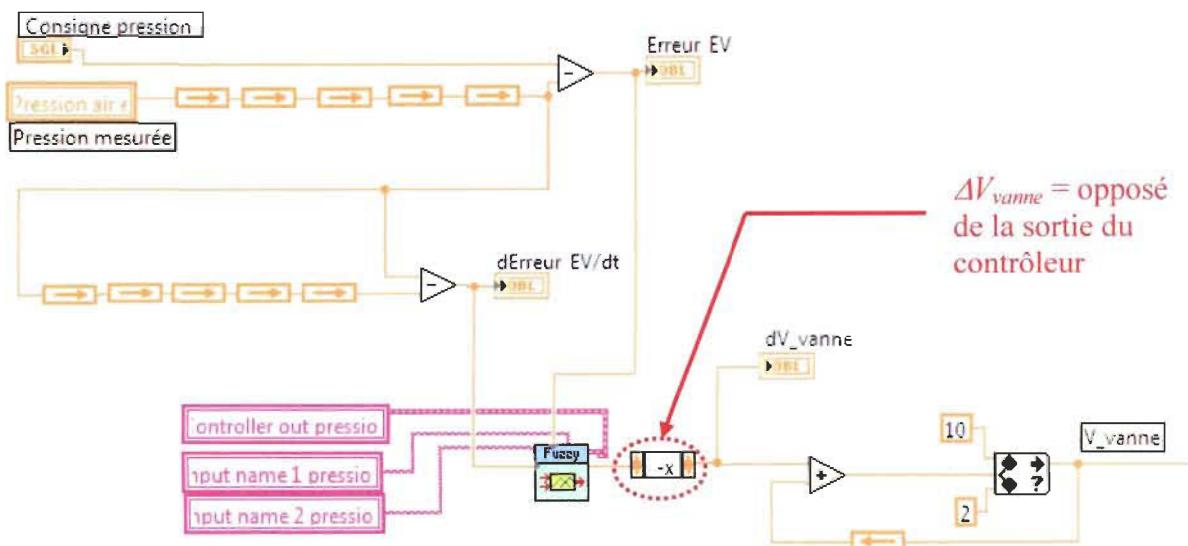


Figure 2.16 Implémentation du contrôleur flou dans LabView

#### 2.2.4 *Résultats de l'implémentation du contrôleur flou dans LabView*

Cette section présente les résultats obtenus suite à l'implémentation du contrôleur flou dans LabView. Nous pouvons constater d'après la figure 2.17 qu'en imposant une consigne de 40kPa à partir d'une consigne plus basse de 10kPa, la pression d'air arrive à se stabiliser à la valeur demandée après une durée d'environ 2 minutes et que le débit d'air reste très constant pendant cette période transitoire. Ce régime transitoire quelque peu long est attribuable à l'électrovanne qui réagit plus lentement lorsqu'on commande la fermeture progressive de son orifice.

Nous pouvons également constater d'après la figure 2.18 qu'en imposant une consigne de 10kPa alors que le précédent est de 40kPa, la pression d'air arrive aussi à se stabiliser à la valeur demandée après une durée d'environ 2 minutes et que le débit d'air reste très constant pendant cette période transitoire malgré un très léger dépassement (d'environ 4%). Ici nous remarquons bien que l'électrovanne réagit plus rapidement lorsqu'on commande l'ouverture progressive de son orifice mais que sa lenteur dans le sens inverse diminue la rapidité du contrôleur. Cette conclusion sur la rapidité de l'électrovanne à l'ouverture et sa lenteur à la fermeture se base sur le fait que le contrôleur flou qui a été conçu applique des règles inverses et des niveaux de tensions identiques mais opposés dans les deux sens (fermeture et ouverture).

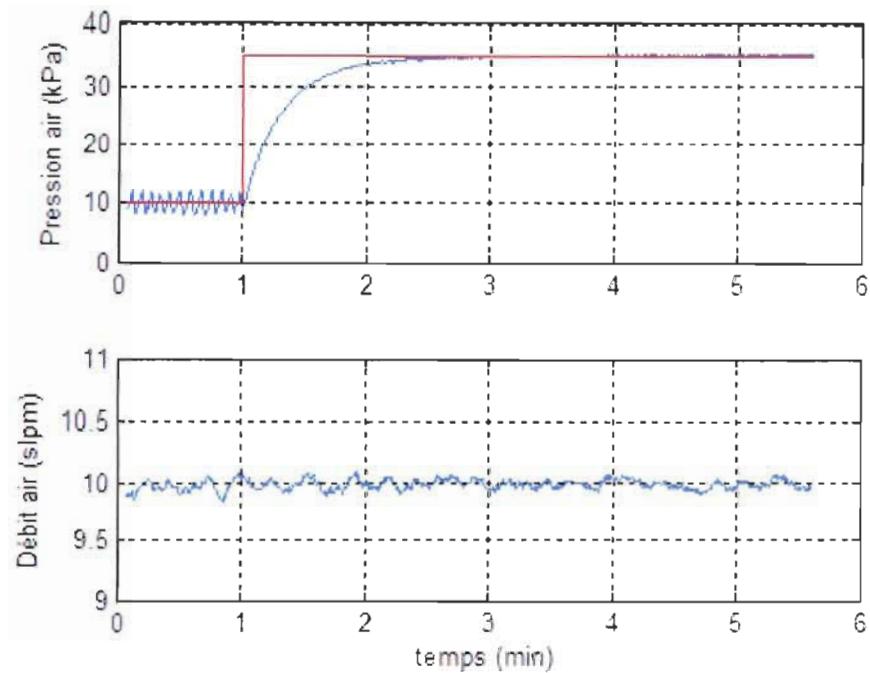


Figure 2.17 Augmentation de la consigne de pression d'air

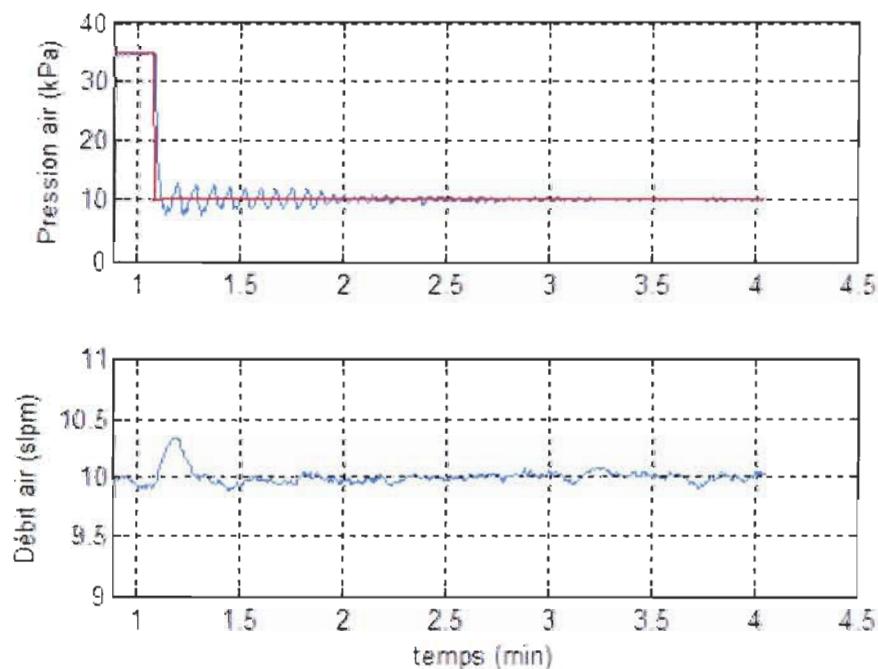


Figure 2.18 Diminution de la consigne de pression d'air

### **2.3 Conclusion sur le banc de test**

Dans ce chapitre, nous avons décrit le banc de test utilisé pour ce travail de recherche, les fonctionnalités de chaque accessoire ainsi que les stratégies de contrôle utilisées pour contrôler l'alimentation en air et en hydrogène, l'humidification de l'air en entrée de pile et la température de la pile. En dehors de l'humidité relative qui est quelque peu difficile à asservir, le banc permet un contrôle assez efficace des paramètres qui nous intéressent et qui font l'objet du chapitre 3 portant sur l'étude de sensibilité.

## Chapitre 3 - Étude de sensibilité

### 3.1 Méthode proposée pour évaluer le rendement du système

Dans un système de pile à combustible, la puissance perdue dans les auxiliaires est en grande partie consommée par le compresseur [21]. Le rendement instantané  $\eta(t)$  d'un S-PAC peut donc s'écrire d'après l'expression 3.1 comme suit [9]:

$$\eta(t) = \frac{P_{elec}(t) - P_{comp}(t)}{212.8 \text{ W} \cdot \text{slpm}^{-1} \times \dot{m}_{H_2}(t)} \quad (3.1)$$

où

$P_{elec}(t)$  représente la puissance électrique générée par la pile;

$P_{comp}(t)$  représente la puissance consommée par le compresseur;

$\dot{m}_{H_2}(t)$  représente le débit d'hydrogène consommé par la pile.

La constante  $212.8 \text{ W} \cdot \text{slpm}^{-1}$  provient de la puissance disponible dans l'hydrogène. En effet, cette puissance (en watts) est le produit de la vitesse de consommation d'hydrogène (en g/s) par son contenu en énergie  $\Delta H$  (environ 142 000 J/g) [5]. Montrons qu'un débit d'hydrogène de 1 slpm produit une puissance de 212.8W :

$1 \text{ slpm} = 1 \text{ litre/min} = 0.0167 \text{ litre/s}$  or 1 litre d'hydrogène pèse 0.0893 g (car  $m/M = V/V_m$ )

donc  $1 \text{ slpm} = 0.0167 \text{ litre/s} = 1.491 \times 10^{-3} \text{ g/s}$

d'où  $1.491 \times 10^{-3} \text{ g/s} \times 142000 \text{ J/g} = 211.7 \text{ W} \approx 212.8 \text{ W}$

La puissance  $P_{elec}(t)$  est évaluée avec l'expression 3.2 suivante :

$$P_{elec}(t) = v_{pile}(t) \times i_{pile}(t) \quad (3.2)$$

Étant donné que le système PAC utilisé pour nos recherches n'inclue pas de compresseur à air, pour estimer la puissance électrique  $P_{comp}$  que consommerait un compresseur standard ayant un rendement d'environ 50%, nous avons utilisé l'expression 3.3 [21]. La pression et le débit d'air à la sortie du compresseur sont représentés dans notre cas par la pression  $P_{air}$  et le débit  $\dot{m}_{air}$  de l'air comprimé fourni.

$$P_{comp}(t) = 2 \times 0.024 \times \dot{m}_{air}(t) \times \frac{g}{g-1} \frac{RT_{atm}}{M} \left[ \left( \frac{P_{air}(t)}{P_{atm}} \right)^{\frac{g-1}{g}} - 1 \right] \quad (3.3)$$

où

$g$  est l'exposant isentropique de l'air d'une valeur de 1.4;

$M$  est la masse molaire de l'air d'une valeur de 28,97 g.mol<sup>-1</sup>;

$R$  est la constante des gaz parfaits d'une valeur de 8,31 J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>;

$P_{atm}$  et  $T_{atm}$  sont la pression et la température atmosphérique;

Les toutes premières expérimentations faites dans le but d'étudier l'influence des paramètres d'opération sur le rendement du système ont permis d'observer deux principaux phénomènes qui ont conduit à la proposition d'une méthode d'évaluation du rendement plus adéquate. Ces observations peuvent être résumées comme suit :

- la tension de pile et par conséquent la puissance électrique générée baisse avec le temps; ce phénomène est probablement dû à l'accumulation d'eau dans la pile qui diminue graduellement ses performances;
- une purge à l'anode arrête temporairement cette baisse et redonne une tension maximale aux bornes de la pile; ce phénomène est probablement dû à la forte poussée de gaz (causée par la purge) qui expulse d'un coup l'eau accumulée.

Ces deux observations sont illustrées par la figure 3.1 où les conditions d'opération sont un courant asservi à 10A, une température de pile de 50°C, une humidité relative d'air de 100%, un rapport stœchiométrique d'air de 2 et une pression relative des réactifs de 50kPa.

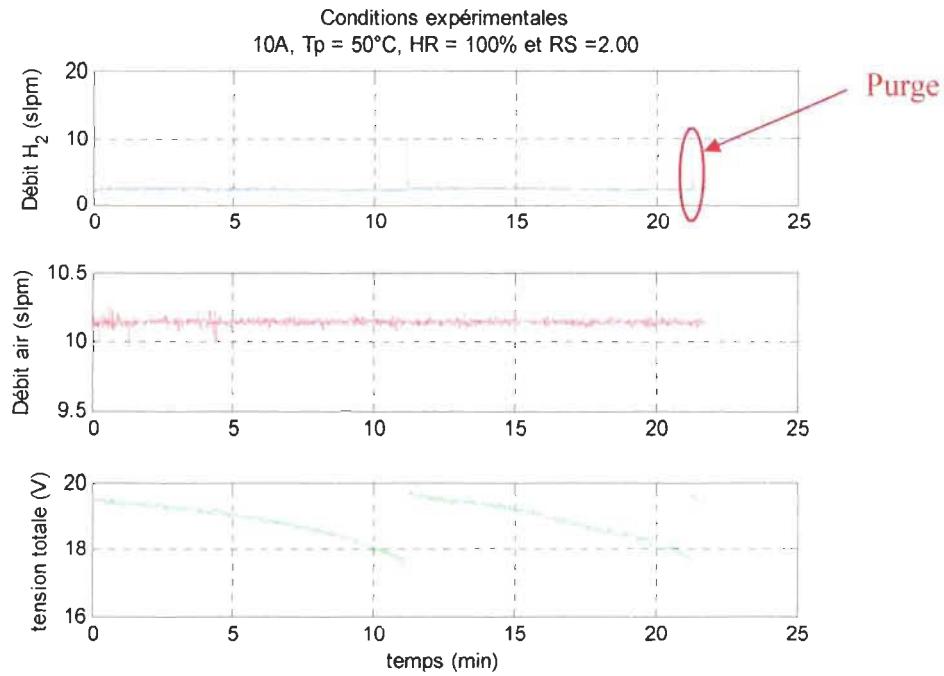


Figure 3.1 Baisse de la tension de pile et effet des purges

La valeur de la tension maximale observée étant quasiment la même à chaque purge, le phénomène peut donc être décrit comme étant cyclique, ce qui fait ainsi intervenir les notions de fréquence de purges et taux d'ondulation de tension.

De plus, pour un même taux d'ondulation, une autre importante observation faite est l'influence des paramètres d'opérations ( $T_p$ , HR, RS et  $P_{gaz}$ ) sur l'intervalle de temps entre deux purges consécutives (figure 3.2.a et figure 3.2.b). En effet, sur la figure 3.2.a qui présente le cas où les valeurs du courant, de  $T_p$ , de HR, de RS et  $P_{gaz}$  sont respectivement de 10A, 40°C, 50%, 1.75 et 50kPa, cette durée  $T$  est d'environ une minute tandis que sur la

figure 2.6.b où  $HR$  et  $RS$  ont été changés à 100% et 2.25 respectivement, la durée  $T$  d'environ 20 minutes est beaucoup plus élevée.

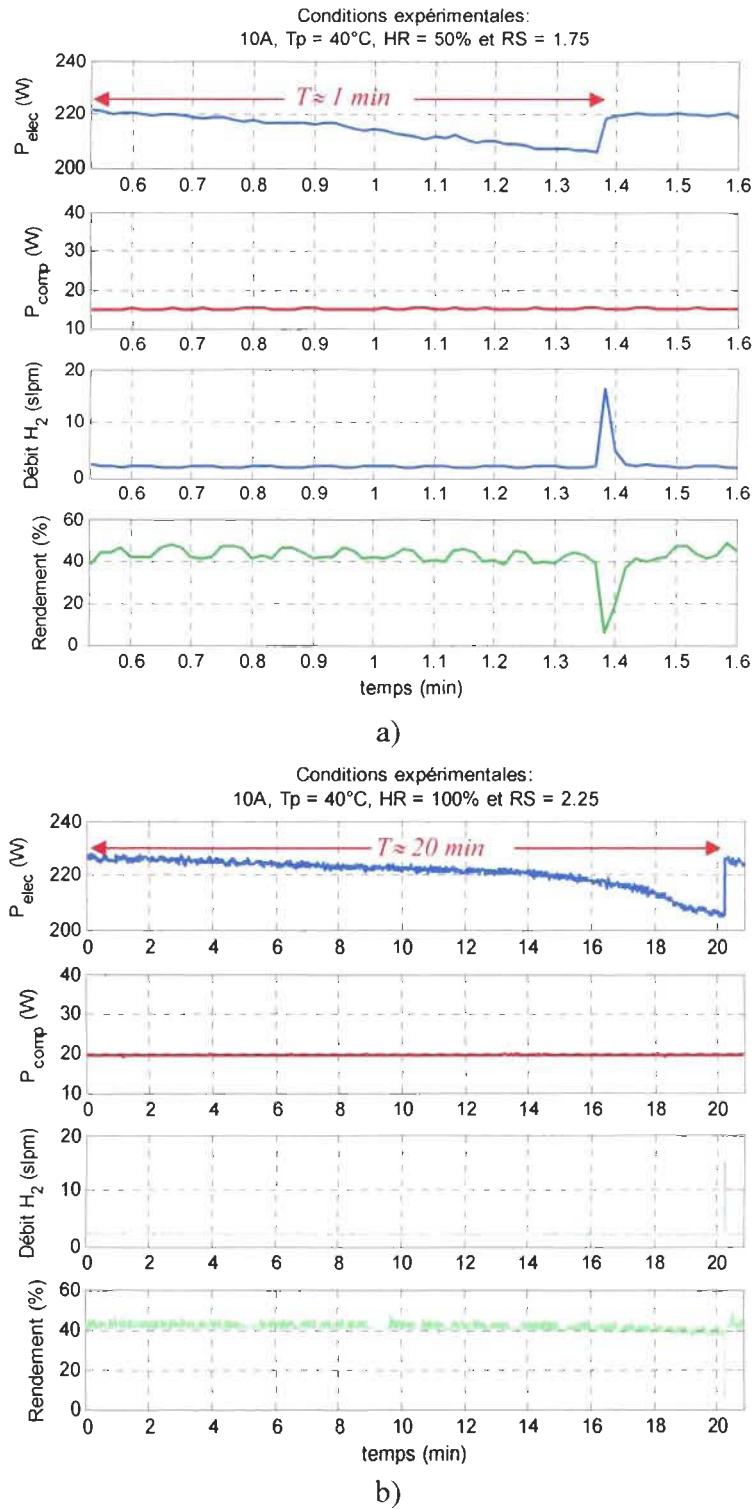


Figure 3.2 Influence des paramètres sur l'intervalle de temps entre deux purges

Au vu de ces observations, il devient difficile de comparer efficacement le rendement expérimental du système pour diverses conditions expérimentales. Une manière adéquate d'arriver à cette fin est d'utiliser la notion de valeur moyenne. Le rendement moyen  $\eta_{mean}$  pour une condition expérimentale donnée sera donc évalué par l'expression 3.4 suivante :

$$\eta_{mean} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \eta(t) dt \quad (3.4)$$

où

$T$  représente l'intervalle de temps entre deux purges consécutives;

$\eta(t)$  représente la valeur instantané du rendement du système.

Étant donné que les mesures faites par les capteurs procurent des données échantillonnées et donc disponibles uniquement sous forme de valeurs discrètes (non continues), le rendement moyen  $\eta_{mean}$  peut être approximé en utilisant la méthode des trapèzes par l'expression 3.5 suivante [25] :

$$\eta_{mean} \approx \frac{1}{n} \left( \frac{\eta(t_0) + \eta(t_0 + T)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \eta\left(t_0 + k \frac{T}{n}\right) \right) \quad (3.5)$$

où  $t_0$  représente l'instant où la première purge débute.

### 3.2 Présentation des résultats des mesures expérimentales

En se basant sur la méthode expérimentale d'évaluation du rendement proposé à la section précédente, des mesures sont faites pour différentes conditions expérimentales afin de déterminer l'influence des paramètres d'opération ( $T_p$ ,  $HR$ ,  $RS$  et  $P_{gaz}$ ) sur le rendement du système. En réalité, deux séries de mesure ont été faites, une première pour étudier

l'influence de  $T_p$ ,  $HR$  et  $RS$ , puis une seconde pour étudier l'influence de la pression des réactifs  $P_{gaz}$ .

### 3.2.1 Influence de $T_p$ , $HR$ et $RS$ sur le rendement

Différentes conditions expérimentales ont été testées en variant la température de pile  $T_p$ , l'humidité relative  $HR$  et le rapport stœchiométrique d'air  $RS$  pour un courant de charge donné. La pression des réactifs  $P_{gaz}$  a été gardée constante durant ces mesures. Le tableau 3 -1 résume quelques cas où des rendements optimaux ont été observés. Les figures 3.3.a et 3.3.b présentent 2 de ces cas qui montrent l'influence de  $T_p$ ,  $HR$  et  $RS$ . Pour la figure 3.3.a par exemple, à un courant de charge de 20A et à une température de pile de 40°C, le rendement maximal (37.21%) est obtenu lorsque l'humidité relative est de 50% et que le rapport stœchiométrique est de 2. Pour ce même courant de 20A, en augmentant à la température de pile à 50°C, un rendement maximal (34.23%) plus petit que dans le premier cas (d'environ 3%) est maintenant obtenu pour une humidité relative de 30% et un rapport stœchiométrique de 2.75 (figure 3.3.b).

Tableau 3-1 Influence de  $T_p$ ,  $HR$  et  $RS$  sur le rendement  $\eta$

Courant (A)	$T_p$ . (°C)	$HR$ (%)	$RS$	T purges (min)	$\eta$ (%)
10	60	100	2.00	3.82	39.88
10	50	50	2.75	1.60	41.33
<b>10</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b>2.25</b>	<b>20.32</b>	<b>41.65</b>
15	60	100	2.00	1.60	33.53
15	50	75	2.50	1.27	37.66
<b>15</b>	<b>40</b>	<b>75</b>	<b>2.00</b>	<b>5.30</b>	<b>40.86</b>
20	60	100	2.00	1.27	26.49
20	50	30	2.75	1.15	34.23
<b>20</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>2.00</b>	<b>3.20</b>	<b>37.21</b>

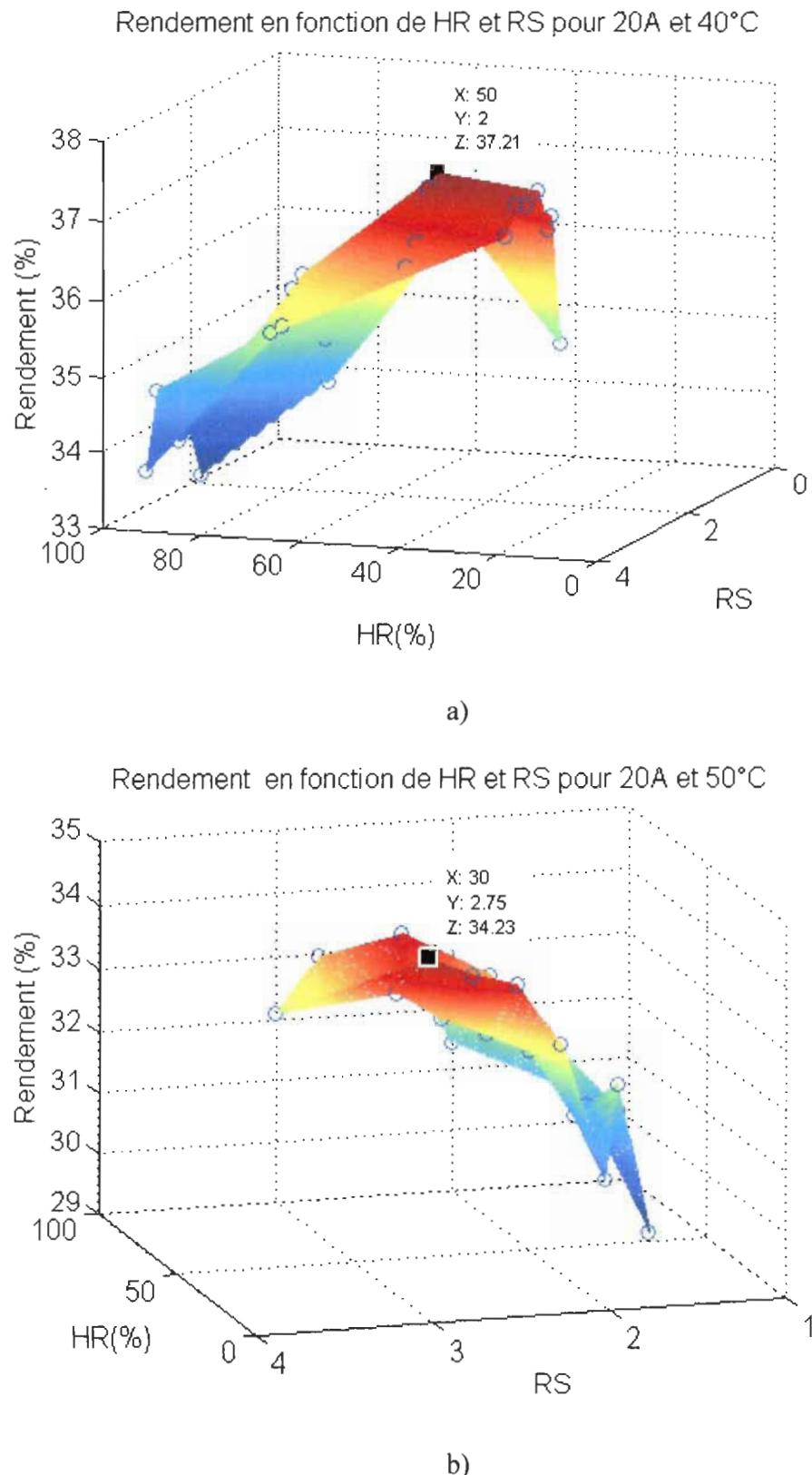


Figure 3.3 Influence de  $T_p$ , HR et RS sur le rendement  $\eta$ .

Ces résultats permettent de conclure que  $T_p$ ,  $HR$  et  $RS$  ont une influence considérable sur le rendement du système due à leurs effets sur la puissance électrique produite par la pile, sur la puissance consommée par le compresseur et sur la quantité d'hydrogène consommée.

### 3.2.2 Influence de la pression relative des réactifs $P_{gaz}$ sur le rendement

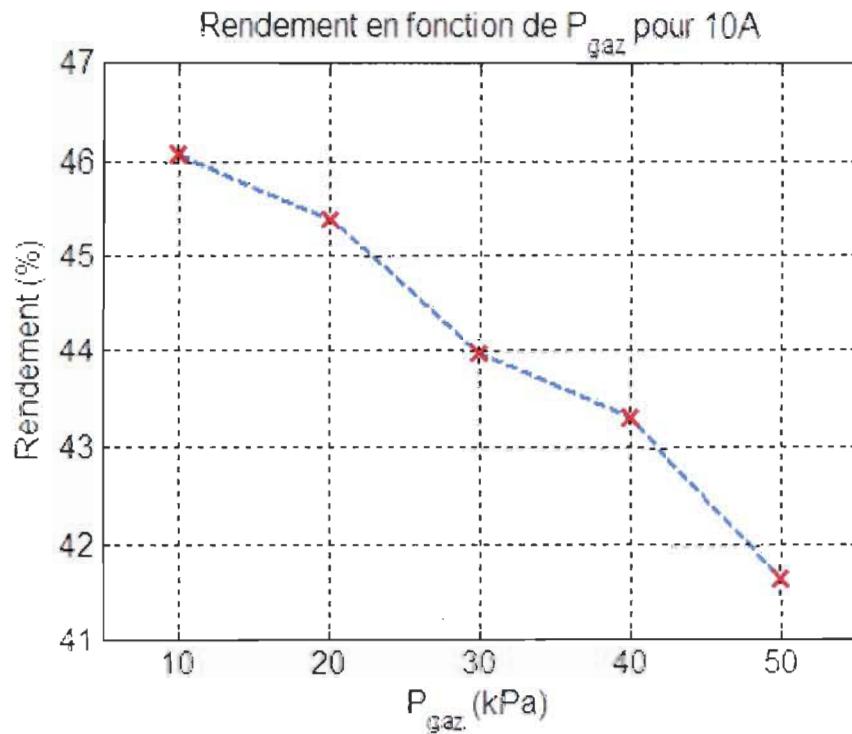
La seconde série de mesures effectuée consiste à étudier l'influence de la pression des réactifs  $P_{gaz}$  sur le rendement  $\eta$  en variant cette pression et en gardant constants les autres paramètres d'opération. La pression d'hydrogène a été maintenue égale à la pression d'air uniquement dans le but de ne pas endommager la membrane de la pile. Les résultats obtenus et présentés par le tableau 3-2 et la figure 3.4 montrent que le rendement est généralement plus élevé pour des pressions faibles. En effet, plus la pression d'air est basse et plus la puissance consommée par le compresseur est réduite. Pour la suite du travail de recherche, les expérimentations ont donc été faites avec la pression  $P_{gaz}$  minimale nécessaire d'une valeur d'environ 10kPa (en pression relative).

Tableau 3-2 Influence de la pression des réactifs sur le rendement  $\eta$

Courant (A)	$T_p$ . (°C)	$HR$ (%)	$RS$	$P_{gaz}$ (kPa)	T purges (min)	$\eta$ (%)
<b>10</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b>2.25</b>	<b>10</b>	<b>11.17</b>	<b>46.08</b>
10	40	100	2.25	20	8.05	45.41
10	40	100	2.25	30	10.15	43.97
10	40	100	2.25	40	7.09	43.29
10	40	100	2.25	50	20.32	41.65
15	40	75	2.00	10	7.99	41.18
<b>15</b>	<b>40</b>	<b>75</b>	<b>2.00</b>	<b>20</b>	<b>7.10</b>	<b>42.02</b>
15	40	75	2.00	30	8.47	41.31
15	40	75	2.00	40	7.53	40.72
15	40	75	2.00	50	5.30	40.86
<b>20</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>1.68</b>	<b>10</b>	<b>4.92</b>	<b>40.90</b>
20	40	50	1.68	20	5.22	40.46

Tableau 3-2 (suite)

Courant (A)	<i>Tp.</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>RS</i>	<i>P<sub>gaz</sub></i> (kPa)	T purges (min)	$\eta$ (%)
20	40	50	1.68	30	5.83	40.42
20	40	50	1.68	40	8.37	40.15

Figure 3.4 Influence de  $P_{\text{gaz}}$  sur le rendement  $\eta$  : cas du courant de 10A

### 3.3 Conclusion sur l'étude de sensibilité

L'objectif visé par cette étude de sensibilité a été atteint puisqu'elle a permis d'observer l'influence de la température de pile *Tp*, de l'humidité relative d'air *HR*, de la stoechiométrie d'air *RS* et de la pression des réactifs *P<sub>gaz</sub>* sur le rendement  $\eta$  du système.

Pour obtenir la meilleure performance possible pour le système PAC, il est donc nécessaire de trouver les conditions expérimentales optimales qui ne sont pas forcément une température de pile maximale ou une humidité relative d'air de 100% ou encore une

stœchiométrie d'air la plus grande possible, d'où l'importance de développer un algorithme de contrôle pour faire fonctionner le S-PAC à son optimum en temps réel en agissant sur les auxiliaires.

## Chapitre 4 - Développement de l'algorithme de contrôle

### 4.1 Optimisation par la méthode de recherche linéaire (Line search method)

La méthode ‘Line search’ est une des approches itératives classiques permettant de trouver un minimum local  $x^*$  d’une fonction  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . La méthode des gradients qui est une particularité de la méthode ‘Line search’ se décrit par le pseudo code suivant [26] :

- i) Mettre le compteur d’itération  $k$  à 0 et fixer un minimum de départ  $x_0$
- ii) Calculer une direction de descente  $p_k$
- iii) Choisir un pas  $\alpha_k$  de façon à minimiser  $\phi(\alpha) = f(x_k + \alpha.p_k)$  avec  $\alpha \in \mathbb{R}$
- iv) Mettre à jour  $x_{k+1} = x_k + \alpha_k.p_k$  et  $k = k+1$
- v) Si  $\|\nabla f(x_k)\| < \text{tolerance}$  alors STOP

Sinon retour à ii.

Dans l’étape iii) on peut minimiser exactement  $\phi$ , en résolvant  $\phi'(\alpha_k) = 0$ , ou bien minimiser faiblement, en n’imposant qu’une décroissance suffisante de  $\phi$ . Cette dernière approche peut être réalisée en utilisant les critères de Wolfe [26], ce qui peut s’avérer être une tâche ardue. Une version modifiée proposée par [27] (efficace et simple à programmer) essaie à chaque nouvelle itération un pas aléatoire  $s_k$  et une direction aléatoire  $p_k$  tous deux compris entre -1 et 1 jusqu’à ce que le nouveau point  $f(x_k + s_k.p_k)$  soit plus petit que  $f(x_k)$ . De plus, au lieu de partir d’un seul point, cette approche ‘Line search’ modifiée est appliquée à N points générés au départ dans l’espace de recherche, ce qui permet d’obtenir une meilleure approximation du point optimal  $x^*$  qui minimise la fonction  $f$ .

## 4.2 Méthode d'optimisation globale développée

La méthode ‘Line search’ modifiée [27] approxime le plus possible le point optimal  $\mathbf{x}^*$  en se basant soit sur la vraie valeur minimale  $f(\mathbf{x}^*)$  connue qui est souvent la valeur zéro (diminution itérative de l'erreur jusqu'à une valeur infime), soit effectuant un nombre d'itérations donné.

Dans notre cas, nous désirons approximer le vecteur de points optimaux  $(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \mathbf{x}_3^*, \dots)$  qui maximise une fonction à plusieurs variables  $f(x_1, x_2, x_3, \dots)$  dont le maximum global est inconnu. Pour atteindre cet objectif, nous avons développé, en partant de [27], une méthode d'optimisation d'abord pour une fonction à une variable (organigramme présenté par la figure 4.1) qui a ensuite été généralisée à une fonction à plusieurs variables (code Matlab présenté dans l'annexe A).

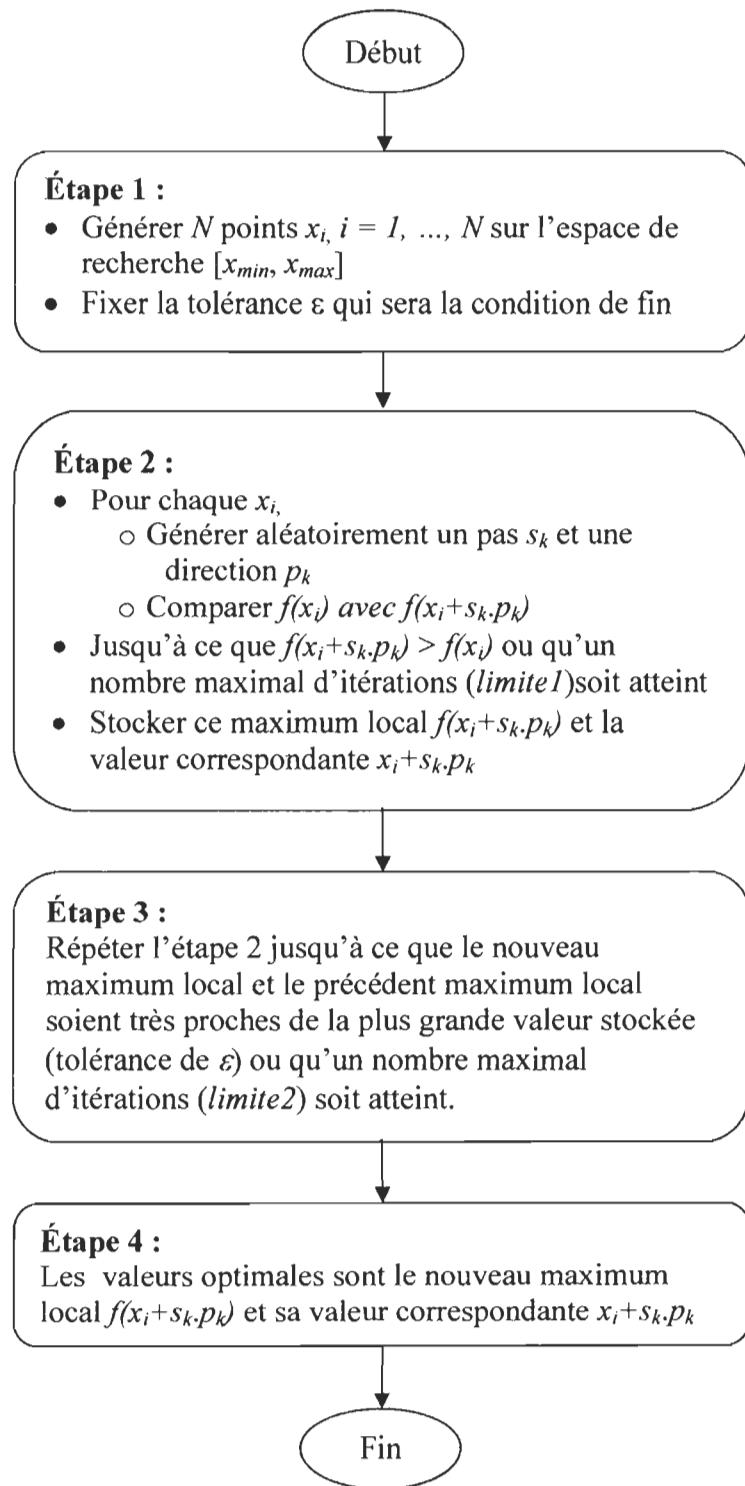


Figure 4.1 Organigramme de la méthode d'optimisation développée

#### 4.2.1 Test de validation de la méthode

En pratique, les variables  $N$ ,  $\varepsilon$ ,  $limite1$  et  $limite2$  ont respectivement pour valeurs 10, 0.001, 1000 et 5000. Des tests effectués sur les opposés de quelques fonctions typiques décrites ci-dessous (les fonctions ont été multipliées par -1) dont les minimums sont connus ont permis de valider le bon fonctionnement de la méthode (tableau 4-1 et figure 4.2).

- Fonction Beale : minimum global  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  avec  $\mathbf{x}^* = (3, 0.5)$

$$f(x_1, x_2) = (1.5 - x_1 + x_1 x_2)^2 + (2.25 - x_1 + x_1 x_2^2)^2 + (2.625 - x_1 + x_1 x_2^3)^2$$

- Fonction sphère : minimum global  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  avec  $\mathbf{x}^* = (0, 0, \dots, 0)$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \text{avec } n = 3$$

- Fonction Colville : minimum global  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  avec  $\mathbf{x}^* = (1, 1, 1, 1)$

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 + 90(x_4 - x_3^2)^2 + (1 - x_3)^2 \\ + 10.1[(x_2 - 1)^2 + (x_4 - 1)^2] + 19.8(x_2 - 1)(x_4 - 1)$$

Tableau 4-1 Tests de validation de la méthode d'optimisation

Opposé de la fonction	Maximum global obtenu	$x_1$ optimal obtenu	$x_2$ optimal obtenu	$x_3$ optimal obtenu	$x_4$ optimal obtenu	Nombre d'itérations
Beale	$-8.19883 \times 10^{-7}$	2.99974	0.499748	-----	-----	290
Sphère	$-4.20483 \times 10^{-7}$	$-4.65 \times 10^{-4}$	$-4.39 \times 10^{-4}$	$-1.05 \times 10^{-4}$	-----	5000
Colville	-0.000226972	1.00133	1.00397	0.997151	0.994845	5000

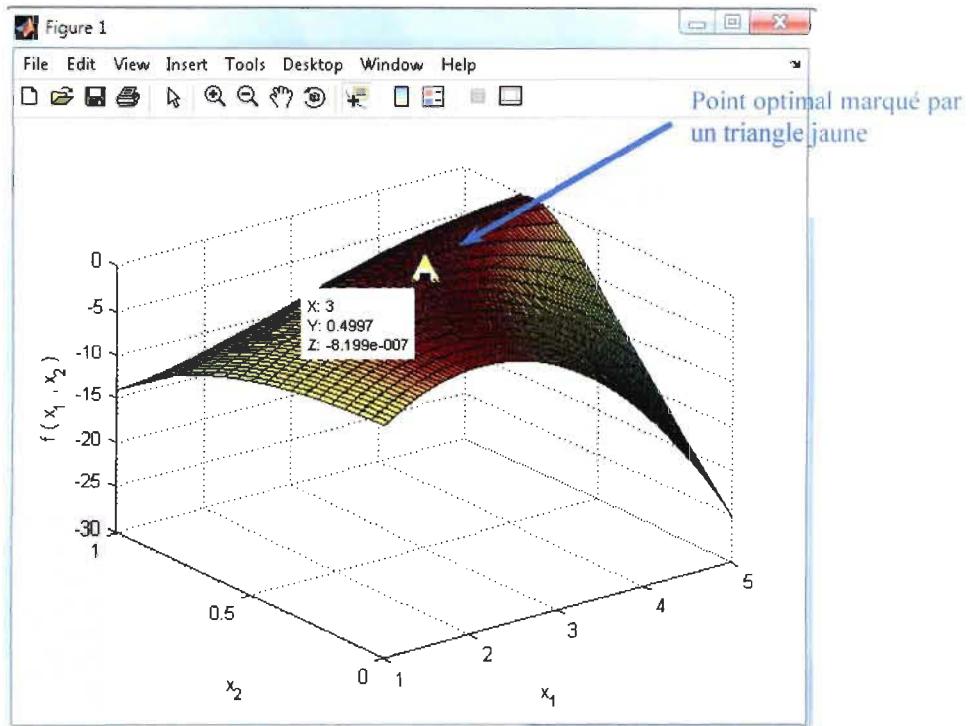


Figure 4.2 Test d'identification du point optimal avec l'opposé de la fonction Beale

#### 4.2.2 *Précision de la méthode en fonction du nombre maximal d'itérations*

En diminuant le nombre maximal d'itérations que la méthode peut effectuer avant de fournir une estimation du maximum global et des variables ( $x_1, x_2, x_3, \dots$ ) qui correspondent à ce maximum, l'observation faite est que ces valeurs optimales estimées sont de moins en moins précises par rapport aux valeurs optimales théoriques. La méthode gagne ainsi en rapidité mais perd en précision. Le tableau 4-2 présente le cas de l'opposé de la fonction «Colville» où la précision des résultats est calculée en fixant successivement comme nombre d'itérations maximal 5000, 3000, 1000 et 500.

Tableau 4-2 Précision de la méthode versus le nombre maximal d'itérations

Nombre d'itérations	Valeurs	Maximum global	$x_1$ optimal	$x_2$ optimal	$x_3$ optimal	$x_4$ optimal
5000	Théorique	0	1	1	1	1
5000	Obtenu	-0.00023	1.00133	1.00397	0.99715	0.99485
5000	Précision (%)	-----	0.13%	0.40%	0.28%	0.52%
3000	Théorique	0	1	1	1	1
3000	Obtenu	-0.00238	1.00671	1.01569	0.99675	0.99579
3000	Précision (%)	-----	0.67%	1.57%	0.32%	0.42%
1000	Théorique	0	1	1	1	1
1000	Obtenu	-0.01689	1.01318	1.02051	1.00001	1.00759
1000	Précision (%)	-----	1.32%	2.05%	0.001%	0.76%
500	Théorique	0	1	1	1	1
500	Obtenu	-0.06531	0.92607	0.86386	1.09431	1.19597
500	Précision (%)	-----	7.39%	13.61%	9.43%	19.60%

Pour les étapes subséquentes, le nombre maximal d'itérations de 5000 a été choisi étant donné la précision obtenue pour les valeurs optimales estimées.

### 4.3 Algorithme de contrôle développé

En se basant sur la méthode d'optimisation globale présentée à la section 4.2, un algorithme de contrôle a été élaboré dans le but de maintenir le rendement du S-PAC à son optimum. L'organigramme de cet algorithme est présenté par la figure 4.3 et les différentes étapes qui le composent sont expliquées dans les lignes qui suivent.

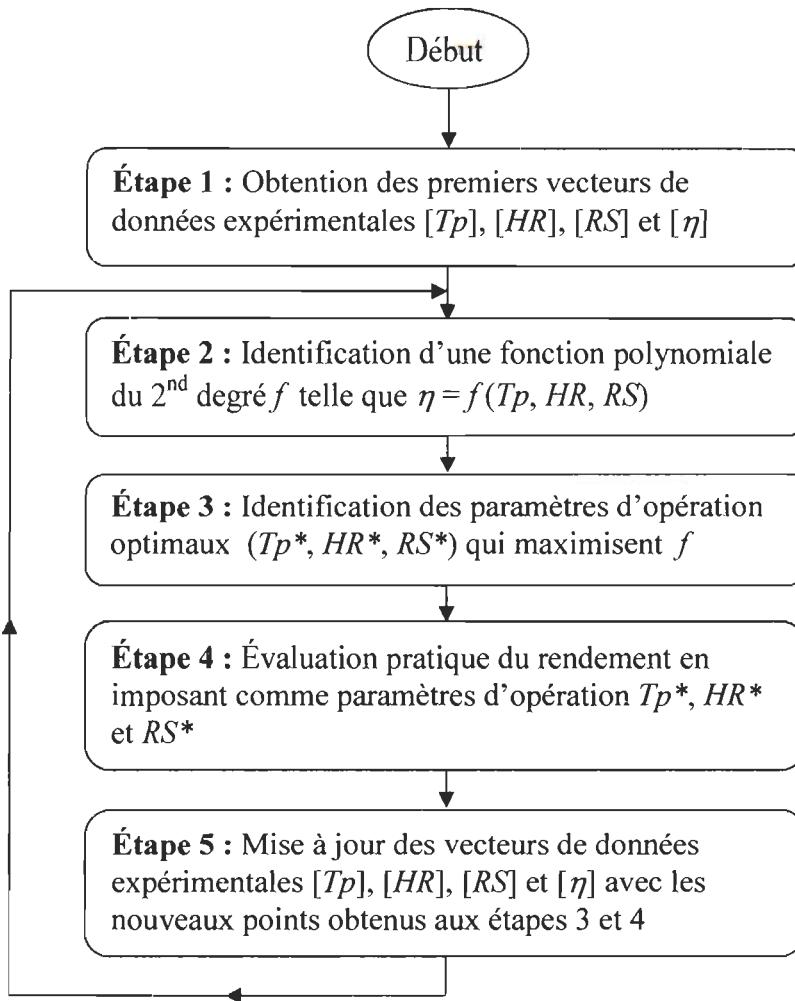


Figure 4.3 Organigramme de l'algorithme de contrôle proposé

Comme l'indique la figure 4.3, l'algorithme est constitué de cinq (5) principales étapes qui sont détaillés dans les lignes qui suivent.

#### 4.3.1 Étape 1 : Initialisation de la base de données expérimentales

Cette étape consiste à initialiser les premiers vecteurs de données expérimentales [ $Tp$ ], [ $HR$ ], [ $RS$ ] et [ $\eta$ ] qui serviront de base pour l'algorithme. La plage du courant étant  $[0, I_{max}]$ , pour des courants  $I_i$  choisis à pas régulier dans cette plage, l'algorithme testera

plusieurs conditions expérimentales ( $Tp$ ,  $HR$  et  $RS$ ) et évaluera le rendement  $\eta$  du système pour chacune de ces conditions. Les valeurs choisies pour les paramètres d'opération seront réparties de manière à couvrir le domaine d'opération spécifique à la pile utilisée. Si nous prenons l'exemple du tableau 4-3, ce domaine d'opération qui est limité par les intervalles  $[Tp_l, Tp_k]$ ,  $[HR_l, HR_m]$ ,  $[RS_l, RS_n]$ . Les vecteurs de même taille  $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$  sont donc obtenus à partir des triplets ( $Tp$ ,  $HR$  et  $RS$ ) et du rendement  $\eta$  correspondant. Par l'implémentation et le test de l'algorithme présenté au chapitre 4,  $m$ ,  $n$  et  $k$  ont pour valeur 3.

Tableau 4-3 Initialisation de la base de données expérimentales

		Conditions expérimentales	
		$RS_l$	$(Tp_l, HR_l, RS_l)$
		$\dots$	$\dots$
$Tp_l$	$HR_l$	$RS_n$	$(Tp_l, HR_l, RS_n)$
		$\dots$	$\dots$
		$\dots$	$\dots$
	$HR_m$	$RS_l$	$(Tp_l, HR_m, RS_l)$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$(Tp_l, HR_m, RS_n)$
$I_i$	$HR_l$	$RS_l$	$\dots$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$\dots$
		$RS_l$	$\dots$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$\dots$
	$HR_m$	$RS_l$	$\dots$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$\dots$
	$HR_l$	$RS_l$	$(Tp_k, HR_l, RS_l)$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$(Tp_k, HR_l, RS_n)$
		$RS_l$	$\dots$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$\dots$
$Tp_k$	$HR_m$	$RS_l$	$(Tp_k, HR_m, RS_l)$
		$\dots$	$\dots$
		$RS_n$	$(Tp_k, HR_m, RS_n)$

#### 4.3.2 Étape 2 : Identification de la fonction d'approximation

Avec un nombre suffisant de points dans les vecteurs obtenus à l'étape 1, une fonction polynomiale du second degré suffit à représenter la tendance d'évolution du rendement  $\eta$  en fonction de  $Tp$ ,  $HR$  et  $RS$ . Cette fonction à identifier se présentant sous la forme décrite par l'équation 4.1, l'étape 2 consiste donc à estimer les coefficients  $c_1$  à  $c_{10}$  tels que l'équation 4.2 soit satisfaite.

$$f(x_1, x_2, x_3) = c_1 + c_2x_1 + c_3x_2 + c_4x_3 + c_5x_1x_2 + c_6x_1x_3 + c_7x_2x_3 + c_8x_1^2 + c_9x_2^2 + c_{10}x_3^2 \quad (4.1)$$

$$\eta = f(Tp, HR, RS) \quad (4.2)$$

Connaissant les vecteurs de données expérimentales  $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$ , cette opération est réalisée aisément avec la fonction "mldivide" de Matlab.

#### 4.3.3 Étape 3 : Identification des paramètres d'opérations optimaux

En appliquant, la méthode d'optimisation globale (section 4.2) à la fonction d'approximation identifiée à l'étape 2, nous obtenons une estimation des paramètres optimaux ( $Tp^*$ ,  $HR^*$  et  $RS^*$ ) qui maximisent le rendement du système lorsque le courant  $I_i$  est débité par la pile.

#### 4.3.4 Étape 4 : Rendement expérimental pour les paramètres optimaux trouvés

Après avoir approximé les données expérimentales disponibles ( $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$ ) par une fonction  $f$  telle que  $\eta = f(Tp, HR, RS)$  et trouvé les paramètres  $Tp^*$ ,  $HR^*$  et  $RS^*$  optimisant cette fonction, ces paramètres théoriques deviennent en pratique les nouveaux paramètres d'opération du système. Le rendement expérimental du système est alors évalué avec ces paramètres. Le nouveau quadruplet expérimental ( $Tp$ ,  $HR$ ,  $RS$  et  $\eta$ ) constitue une nouvelle donnée expérimentale qui rendra encore plus précise la fonction d'approximation et nous approchera de plus en plus de la condition expérimentale optimale.

#### 4.3.5 Étape 5 : Mise à jour de la base de données expérimentales

Cette étape consiste à ne conserver en mémoire que les  $p$  données expérimentales les plus récentes, ce qui permettra de garder l'information la plus récente sur le système de pile à combustible. L'algorithme pourra ainsi maintenir les paramètres optimaux en ne tenant compte que des performances actuelles du système et non de celles d'il y a une année par exemple. Autrement dit, même si les performances de la pile diminuent avec les années (ce qui est quasi-certain), à partir de ces  $p$  données expérimentales les plus récentes, l'algorithme d'optimisation donnera toujours une très bonne estimation des paramètres optimaux. Un autre avantage de conserver une fenêtre mobile de données est d'éviter une utilisation de plus en plus croissante de mémoire au fur et à mesure que le système fonctionne.

#### 4.3.6 Conclusion sur le développement de l'algorithme de contrôle

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté la méthode d'optimisation que nous avons développée. Des tests ont été faits pour montrer que la méthode arrive effectivement à détecter le maximum global d'une fonction sur un espace de recherche donné. La précision de la méthode versus sa rapidité a également été évaluée. Ce chapitre présente aussi les différentes étapes de l'algorithme de contrôle proposé. L'implémentation de cet algorithme sur le banc d'essais de pile à combustible de l'IRH fera l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 5 - Implémentation et test de l'algorithme de contrôle

Dans ce chapitre, nous présentons comment l'algorithme a été implémenté dans l'interface de contrôle du banc d'essais de pile à combustible de l'IRH. Pour valider le fonctionnement de l'algorithme, il a été testé pour un courant de charge de 2.1A. Les résultats expérimentaux obtenus suite à ce test de validation sont également présentés.

### 5.1        **Implémentation dans l'interface de contrôle**

Pour le test de validation, l'algorithme a été implémenté dans le code LabView original qui contrôle le banc d'essais de telle manière que l'utilisateur puisse choisir de l'exécuter ou non. L'organigramme du code LabView après l'implémentation est présenté par la figure 5.1. À l'exception de l'étape 1, toutes les étapes de l'algorithme ont été automatisées dans le code Labview. Ceci a permis d'effectuer le test dans un laps de temps plus court étant donné que nous disposions déjà d'une base de données expérimentales conséquente dont nous pouvions nous servir au départ.

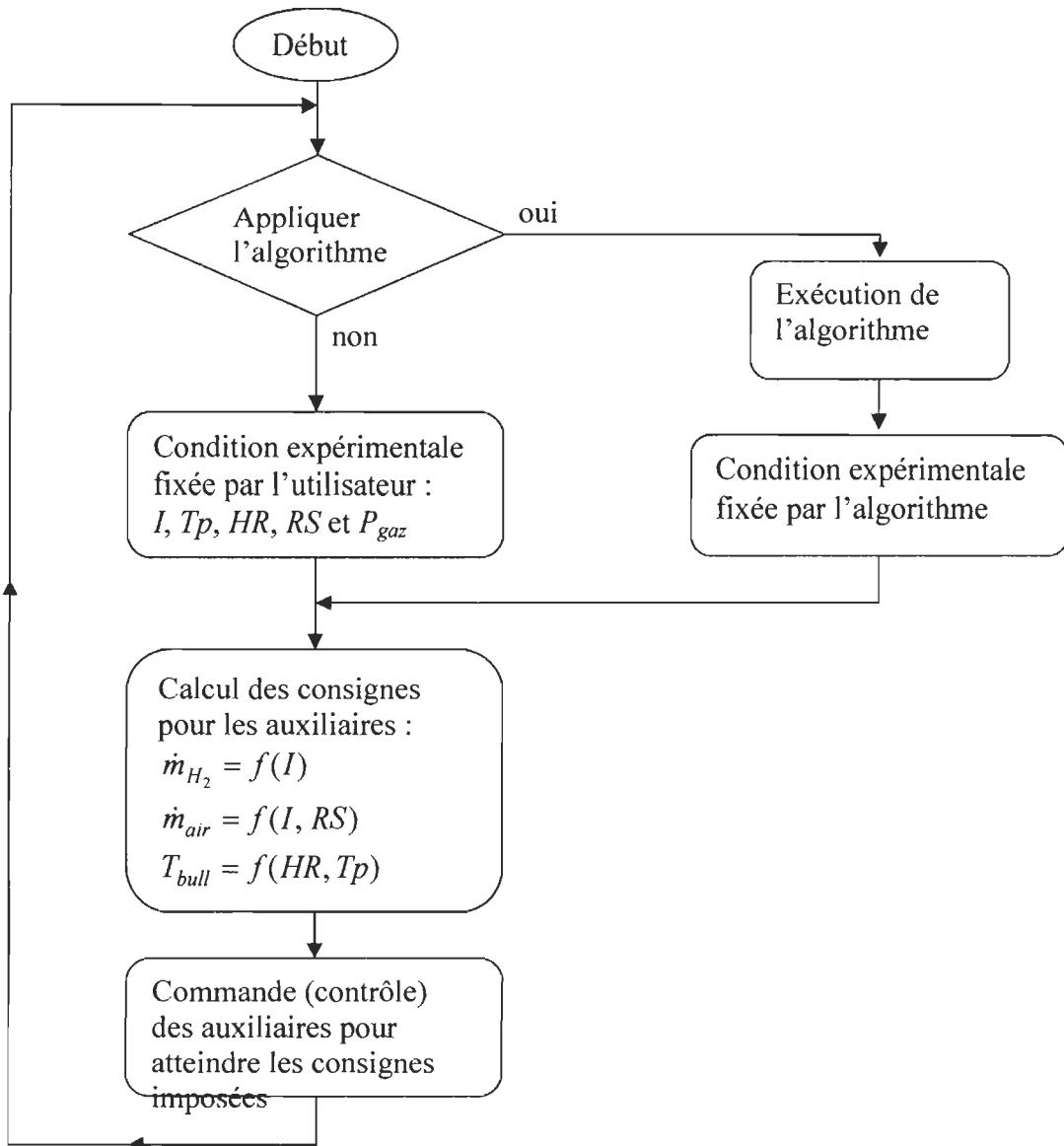


Figure 5.1 Organigramme du code LabView après l'implémentation

### 5.1.1 Base de données expérimentales pour le test d'implémentation

Comme dit dans les lignes ci-dessus, pour l'étape 1 de l'algorithme qui consiste à initialiser la base de données expérimentales pour le courant de charge demandé, nous avons utilisé des données obtenues au préalable pour un courant de 2.1A. Ces données représentant les vecteurs de départ  $[T_p]$ ,  $[H_R]$ ,  $[R_S]$  et  $[\eta]$  sont présentées par le tableau 5-1.

Ces données sont peu nombreuses et le courant de charge a été réduit à 2.1A car la pile présentait des défauts qui ont considérablement diminué ses performances. C'est pour cette même raison que la plage de variation du rapport stœchiométrique d'air (entre 4 et 6) est beaucoup plus élevée qu'à la normale (1.75 à 3). Ceci s'est avéré nécessaire pour éviter des arrêts brusques du système et pour lui permettre de fonctionner d'une manière stable sur une longue durée.

Tableau 5-1 Base de données initiale pour le test d'implémentation

Température de pile Tp (°C)	Humidité relative d'air HR (%)	Rapport stœchiométrique d'air RS	Rendement $\eta$ (%)
40	60	4	37.151
40	60	5	39.449
40	60	6	38.202
40	75	4	35.634
40	75	5	37.355
40	75	6	38.343
40	100	4	38.737
40	100	5	39.689
40	100	6	39.107
45	60	4	36.553
45	60	5	36.095
45	60	6	35.956
45	75	4	36.698
45	75	5	36.762
45	75	6	36.017
45	100	4	37.477
45	100	5	39.632
45	100	6	38.321
50	60	4	36.535
50	60	5	37.142
50	60	6	35.747
50	75	4	40.560
50	75	5	38.641
50	75	6	36.522
50	100	4	36.176
50	100	5	36.200
50	100	6	37.575

Dans le code LabView, le fichier texte contenant ces données est scanné et les vecteurs de départ  $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$  sont récupérés. Cette partie initiale de l'implémentation est illustrée par la figure 5.2 suivante :

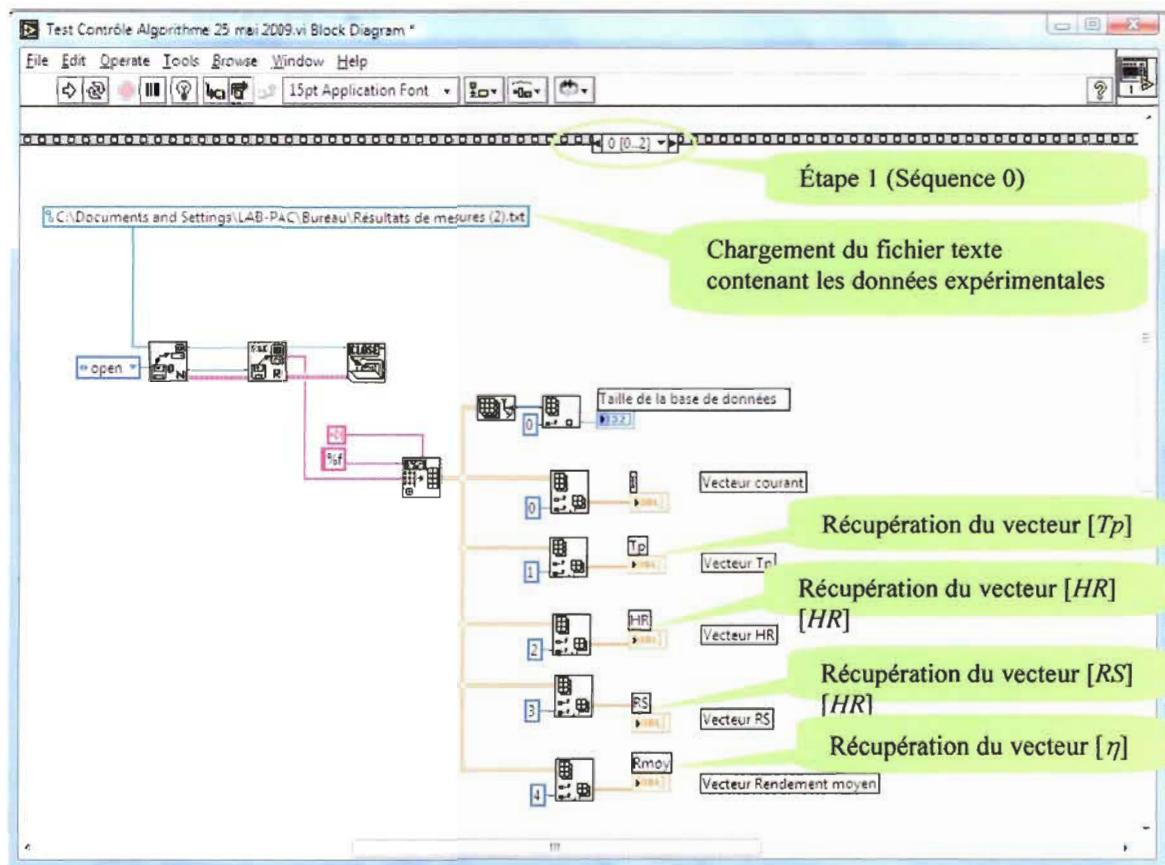


Figure 5.2      Chargement de la base de données expérimentales

### 5.1.2      Sous-programme MATLAB effectuant les étapes 2 et 3

L'implémentation des étapes 2 et 3 a été faite grâce à l'outil MATLAB Script qui permet d'exécuter du code Matlab à l'intérieur d'un code LabView et qui fournit les résultats de l'exécution sous forme de sorties compatibles avec LabView. Les variables d'entrée dans notre cas sont les 4 vecteurs de données expérimentales  $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$ . À partir de ces 4 vecteurs, le programme MATLAB développé (annexe A) qui n'est

qu'une transcription des étapes 2 et 3 fournit comme variables de sortie, les paramètres optimaux  $Tp_{opt}$ ,  $HR_{opt}$ ,  $Tp_{opt}$  et  $\eta_{opt}$  (figure 5.3).

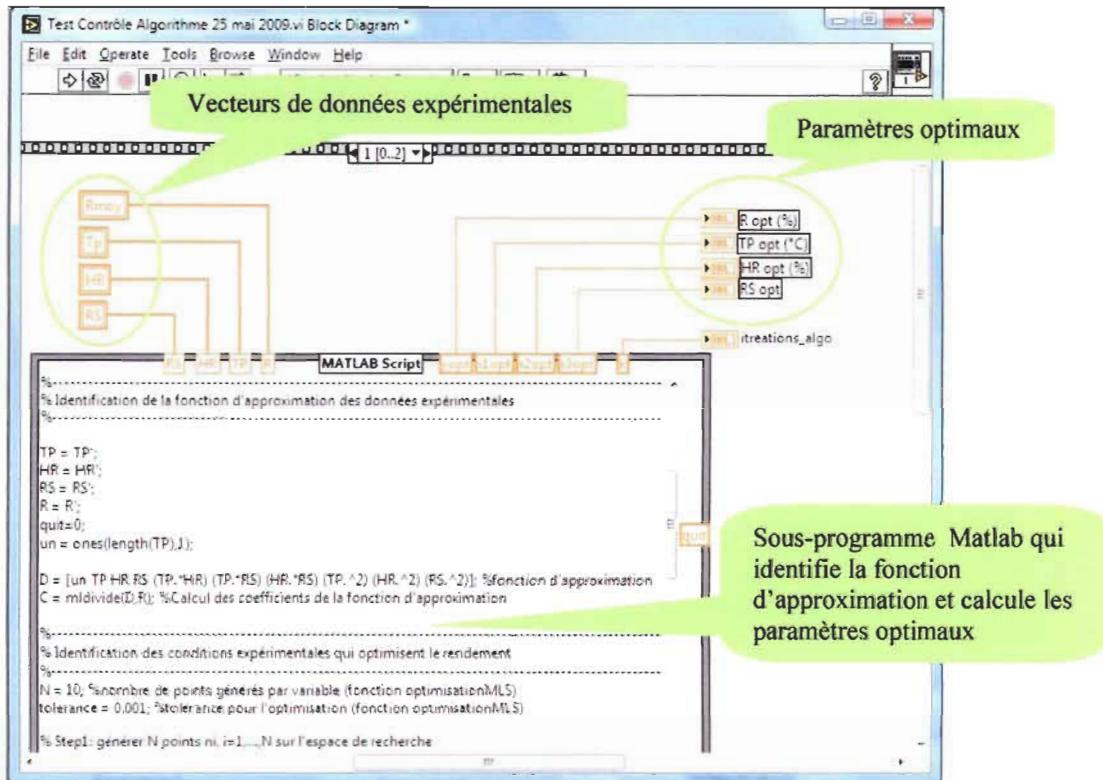
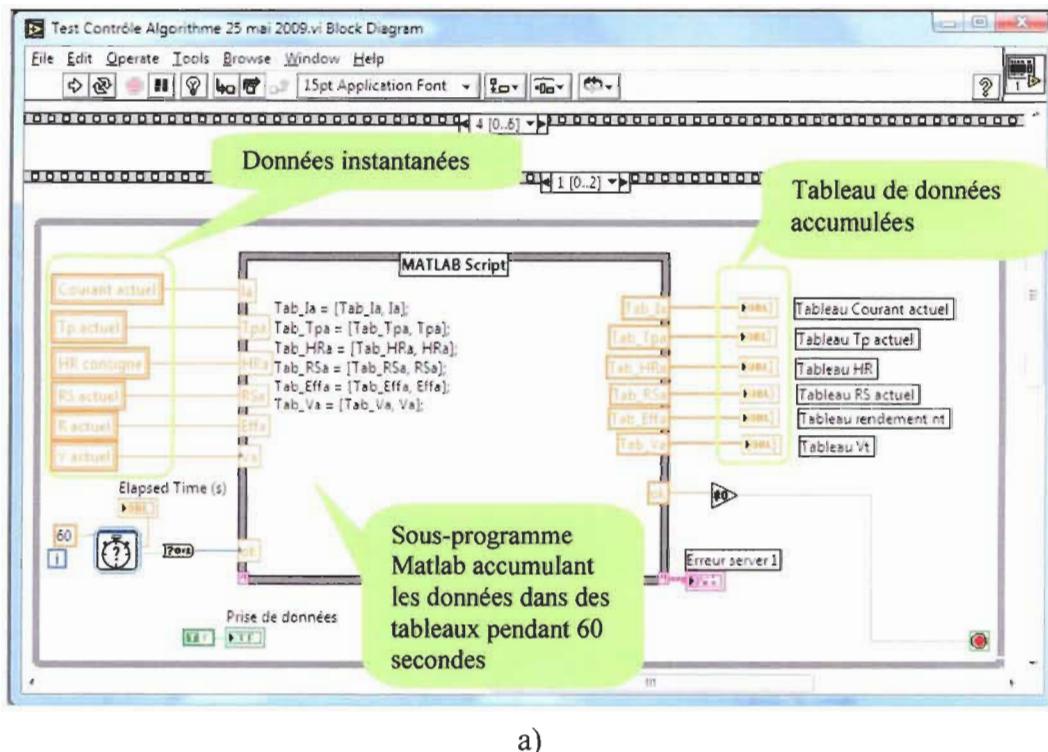


Figure 5.3     Sous-programme effectuant les étapes 2 et 3

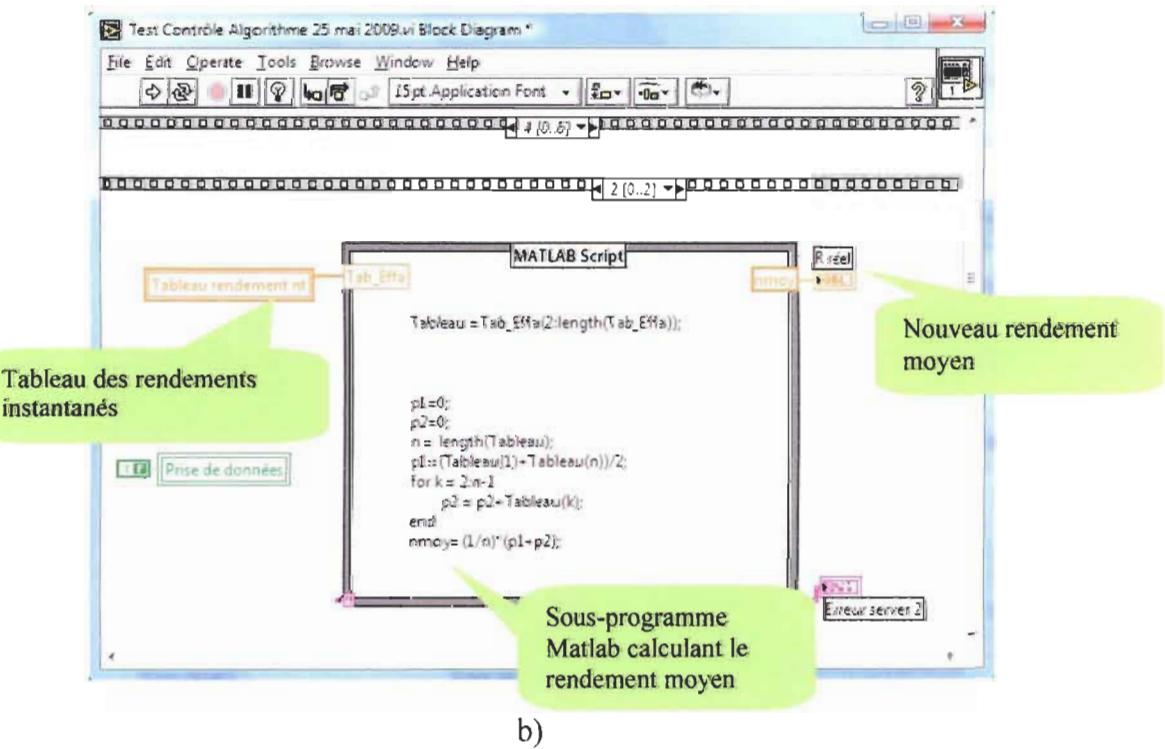
#### 5.1.3     *Implémentation des étapes 4 et 5*

Pour l'implémentation de l'étape 4, la partie consistant à imposer en pratique les paramètres d'opération trouvés à l'étape 3 s'effectue en calculant les consignes pour les auxiliaires et en commandant ces auxiliaires de telle manière que les consignes soient atteintes. Pour alléger le document, le code LabView de cette partie qui est assez volumineux ne sera pas présenté. La seconde partie de l'étape 4 qui consiste à évaluer le nouveau rendement expérimental a été implémentée en créant un tableau qui accumule le rendement instantané pendant une durée  $T$  puis en calculant le rendement moyen à l'aide de

l'expression 3.4 (section 3.1). Pour le test, la durée T était de 60 secondes (figure 5.4.a et figure 5.4.b).



a)



b)

Figure 5.4     Implémentation de l'étape 4

Pour l'implémentation de l'étape 5, si les vecteurs de données expérimentales  $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$  contiennent  $n$  données, la mise à jour de la base de données consiste alors à conserver les  $n-1$  derniers points des vecteurs  $[Tp]$ ,  $[HR]$ ,  $[RS]$  et  $[\eta]$  et à ajouter les nouvelles données obtenues après l'étape 4 (figure 5.5).

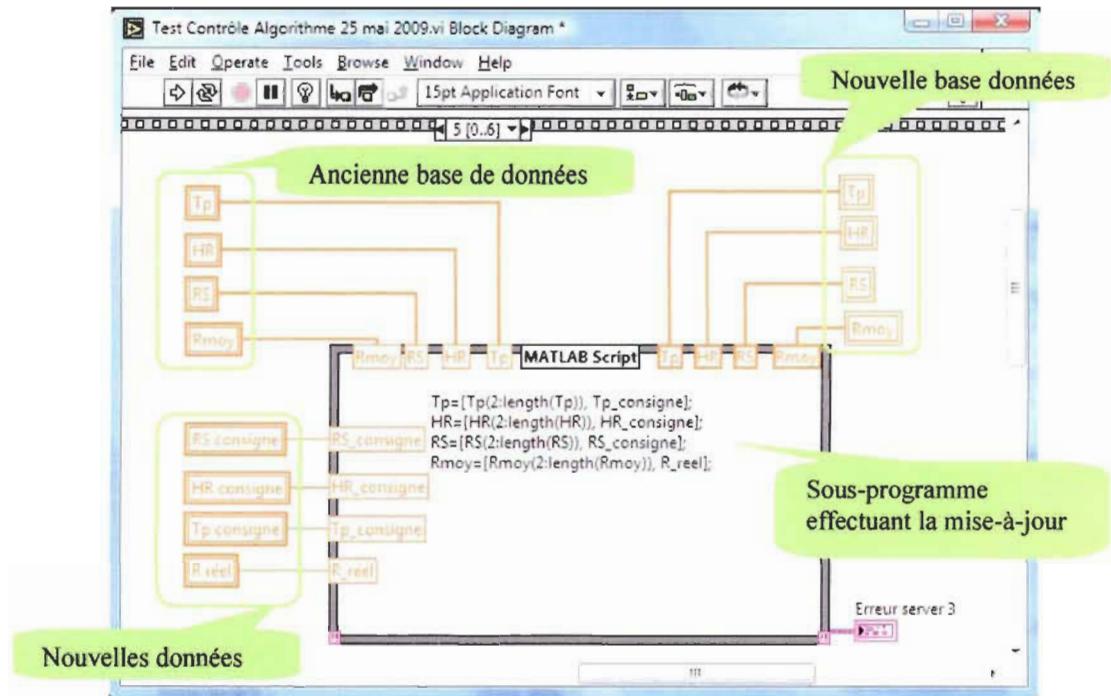


Figure 5.5     Implémentation de l'étape 5

## 5.2     Comparaison des performances du système optimisé et du système non optimisé

Pour tester l'algorithme, le système a été démarré avec des conditions expérimentales non optimales soit une température de 40°C, une humidité relative d'air de 75% ainsi qu'un rapport stœchiométrique d'air de 4 (figure 5.6), le but étant de vérifier si l'algorithme calculera automatiquement les nouvelles conditions optimales et si le rendement réel (expérimental) sera amélioré puis maintenu à une valeur optimale. Les différentes phases du test sont présentées à la figure 5.7 ci-dessous.

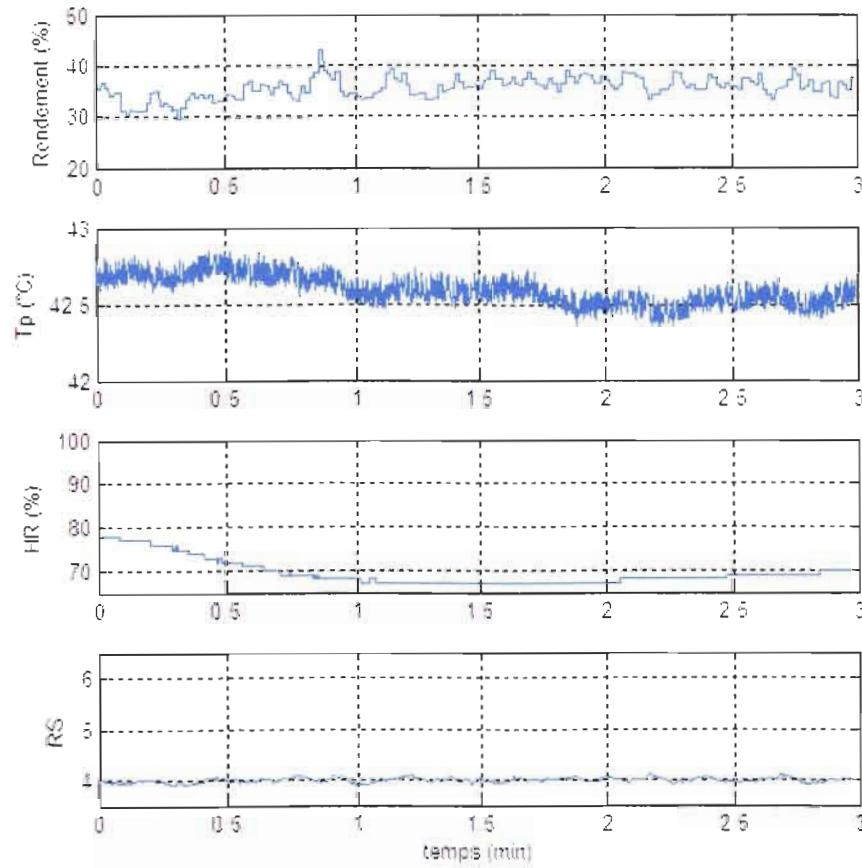


Figure 5.6 Paramètres d'opération imposés initialement :  
Tp de 40°C, HR de 50% et RS de 4

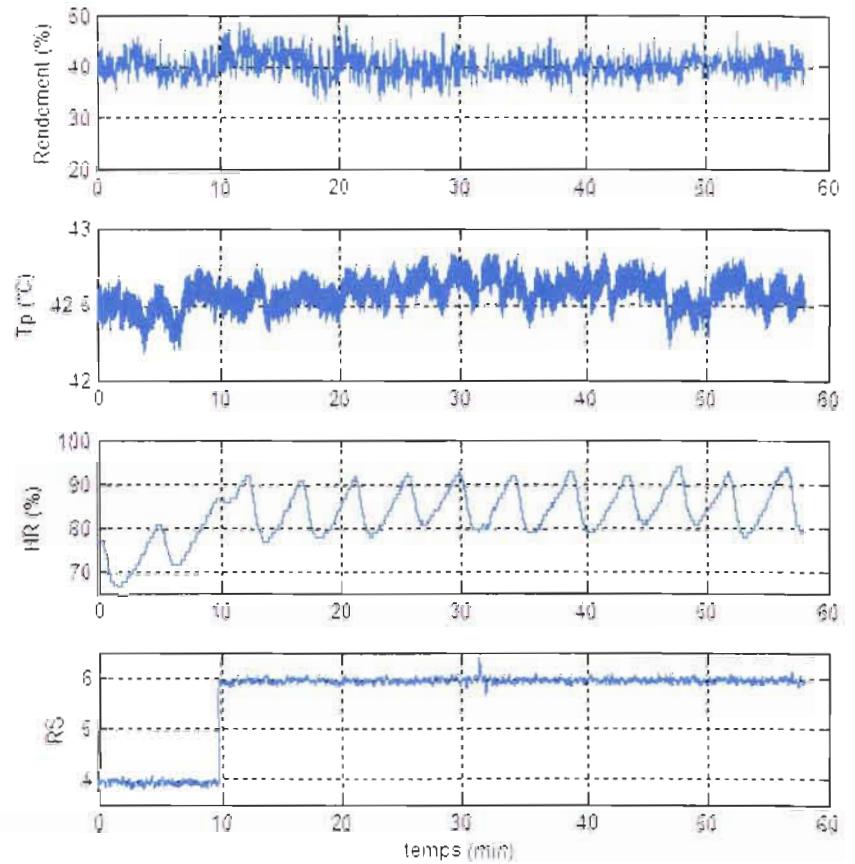


Figure 5.7 Évolution des paramètres d'opération et du rendement pendant l'exécution de l'algorithme

La figure 5.7 montre qu'en appliquant l'algorithme, les conditions expérimentales changent tranquillement après le premier calcul d'optimisation. Après une durée de 10 minutes, l'humidité relative est passée à 85% (malgré que ce soit une humidité de 100% qui est imposée comme consigne après le premier calcul d'optimisation) et le rendement est légèrement amélioré. Au cours des 50 dernières minutes, les calculs d'optimisation qui ont suivi ont estimé les mêmes conditions comme optimales. Par contre, le rendement optimal estimé est corrigé après la mise à jour de la base de données expérimentales. Nous pouvons aussi observer d'après la figure 5.8 et le tableau 5-2 que ce rendement optimal estimé est approximativement obtenu dans la réalité.

Tableau 5-2 Évolution du rendement pendant le test

Conditions imposées	Tp (°C)	HR (%)	RS	$\eta_{\text{estimé}} (\%)$	$\eta_{\text{réel}} (\%)$
Initiale	40	75	4	---	35.6340
Après 1ère optimisation	40.0031	99.9991	5.9974	40.3343	43.1039
Après 2è optimisation	40.0004	99.9917	5.9993	41.1718	40.8926
Après 3è optimisation	40.0007	99.9859	5.9971	41.0637	39.7912
Après 4è optimisation	40.0004	99.9936	5.9984	40.8155	39.4082
Après 5è optimisation	40.0005	99.9920	5.9995	40.6006	40.3926

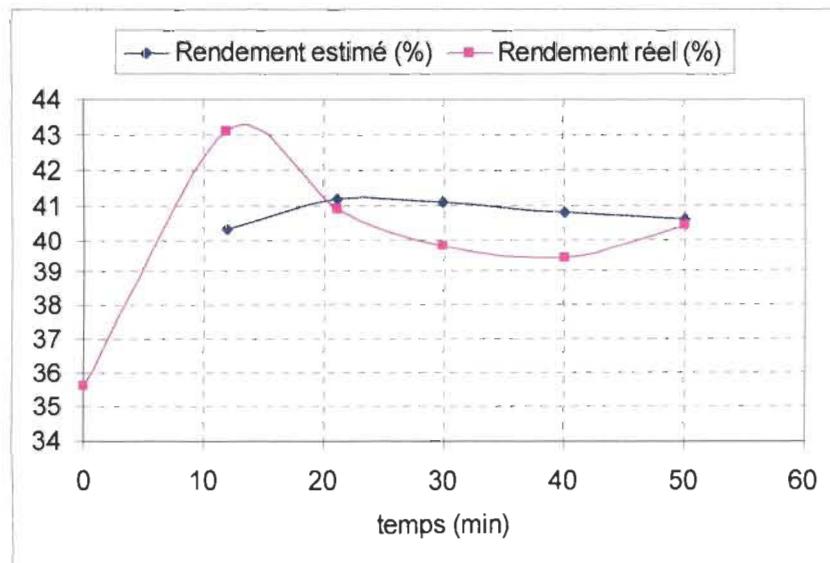


Figure 5.8 Évolution du rendement pendant le test

### 5.3 Conclusion sur la validité de l'algorithme

Dans ce chapitre, les résultats obtenus lors du test de l'algorithme développé ont été présentés. Ces résultats montrent qu'au fur et à mesure que le système fonctionne, le rendement optimal estimé par l'algorithme tend de plus en plus vers le rendement expérimental obtenu dans la réalité. Ces résultats montrent également que l'algorithme arrive à augmenter légèrement le rendement du système. En effet, l'algorithme mène tranquillement le rendement expérimental du système d'une valeur non-optimale (environ 36%) à une valeur plus élevée qui tourne en moyenne autour de 40% dans les 30 dernières minutes du test. Cependant la hausse du rendement jusqu'à une valeur de 43% puis sa baisse pour se stabiliser autour de 40% est un phénomène que nous ne pouvons pour le moment expliquer. Des tests supplémentaires pourraient être faits dans un futur travail de recherche pour observer si ce phénomène se répète et pour trouver sa cause.

## Conclusion et recommandations

Dans ce travail de recherche, une approche expérimentale a été proposée dans le but de maintenir le rendement du système PAC à son optimum. Cette approche basée sur l'étude de l'influence des paramètres d'opération ( $T_p$ ,  $HR$ ,  $RS$  et  $P_{gaz}$ ) sur le rendement  $\eta$  du système a abouti tout d'abord au développement d'une méthode d'évaluation du rendement, puis au développement d'une méthode d'optimisation globale. À partir de ces deux méthodes qui ont été proposées, un algorithme de contrôle a été élaboré dans le but d'atteindre l'objectif visé qui de maintenir le système PAC dans des conditions d'opérations optimales. Pour valider cet algorithme, il a été implémenté puis testé dans l'interface de contrôle du banc d'essais de pile à combustible de l'IRH. Les résultats obtenus suite à l'implémentation ont permis de conclure que le rendement optimal estimé par l'algorithme tend de plus en plus vers le rendement expérimental obtenu dans la réalité. L'algorithme a également permis d'augmenter le rendement du système d'une valeur non-optimale (environ 36%) à une valeur légèrement plus élevée (environ 40%). Cependant, une des observations faites durant ce test d'implémentation qui est l'augmentation puis la baisse du rendement pour se stabiliser autour de 40% n'a pu être expliquée. Ce phénomène pourrait être étudié plus en profondeur dans un futur travail de recherche.

Dans le but de rendre l'algorithme encore plus complet, certaines fonctionnalités pourraient y être intégrées telles que l'interpolation des paramètres optimaux pour les valeurs de courant ne figurant pas dans la base de données expérimentales ou encore l'automatisation des tests de mesures pour la création de la base de données initiale (étape 1 de l'algorithme). Pour ce dernier point, il serait également très intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser un plan d'expérience (DOE) pour réduire le nombre de mesures et

augmenter la rapidité de l'algorithme. Des tests pourraient également être faits pour des valeurs de courant plus élevées dans la limite du possible avec une pile ayant de meilleures performances que celle utilisée lors du test d'implémentation. Enfin, pour améliorer le fonctionnement du banc d'essais, une recherche pourrait être faite dans le but de trouver un autre moyen de contrôler l'humidité relative de l'air en entrée de pile ou tout simplement améliorer l'efficacité du système d'humidification actuel.

## Références bibliographiques

- [1] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Academic Press ed., 2005.
- [2] T. V. Nguyen and M. W. Knobbe, "A liquid water management strategy for PEM fuel cell stacks," *Journal of Power Sources* vol. 114 pp. 70-79, 2003.
- [3] M. R. von Spakovsky and B. Olsommer, "Fuel cell systems and system modeling and analysis perspectives for fuel cell development," *Energy Conversion and Management* vol. 43 pp. 1249-1257, 2002.
- [4] D. Chu and R. Jiang, "Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks: Part I. Evaluation and simulation of an air-breathing PEMFC stack," *Journal of Power Sources*, vol. 83, pp. 128–133, 1999.
- [5] F. Barbir and T. Gómez, "Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, pp. 1027-1037, 1997.
- [6] L. Wang, A. Husar, T. Zhou, and H. Liu, "A parametric study of PEM fuel cell performances," *International Journal of Hydrogen Energy* vol. 28, pp. 1263-1272, 2003.
- [7] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Modeling and control for PEM fuel cell stack system," in *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, AK, 8-10 May 2002.
- [8] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Control of fuel cell breathing," *IEEE Control Syst Mag* vol. 24(2), pp. 30-46, 2004.
- [9] M. Fournier, J. Hamelin, K. Agbossou, and T. K. Bose, "Fuel cell performance with oxygen enrichment," in *11th Canadian Hydrogen Conference* Victoria, BC, 17-20 June 2001.
- [10] Y. M. Ferng, Y. C. Tzang, B. S. Pei, C. C. Sun, and A. Su, "Analytical and experimental investigations of a proton exchange membrane fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, pp. 381-391, 2004.
- [11] R. K. A. M. Mallant, "PEMFC systems: the need for high temperature polymers as a consequence of PEMFC water and heat management," *Journal of Power Sources* vol. 118, pp. 424-429, 2003.
- [12] L. Wang and H. Liu, "Performance studies of PEM Fuel cells with interdigitated flow fields," *Journal of Power Sources*, vol. 134, pp. 185-196, 2004.

- [13] S. Kim, S. Shimpalee, and J. W. Van Zee, "The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change," *Journal of Power Sources* vol. 135, pp. 110-121, 2004.
- [14] P. Rodatz, G. Paganelli, and L. Guzzella, "Optimizing air supply control of a PEM fuel cell system," in *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, CO, June, 2003, pp. 2043–2048.
- [15] J. O. Schumacher, P. Gemmar, M. Denne, and al, "Control of miniature proton exchange membrane, fuel cells based on fuzzy logic," *Journal of Power Sources*, vol. 129, pp. 143-151, 2004.
- [16] L. C. Iwan and R. F. Stengel, "The application of neural networks to fuel processors for fuel-cell vehicles," *IEEE Trans Vehic Technol* vol. 50(1), pp. 125-143, 2001.
- [17] Y. H. Chen, G. Y. Cao, and X. J. Zhu, "Neural network modeling and control of proton exchange membrane fuel cell," *J. Cent, South Univ. Technol*, vol. 01-0084-04, 2007.
- [18] C. Shen, G. Y. Cao, and X. J. Zhu, "Nonlinear modeling and adaptive fuzzy control of MCFC stack," *J Process Control* vol. 12, pp. 831-839, 2002.
- [19] C. Bao, M. G. Ouyang, and B. L. Yi, "Modeling and control of air stream, hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system—II. Linear and adaptive nonlinear control," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, pp. 1897 – 1913, 2006.
- [20] N. Hassanaly, K. Agbossou, Y. Dubé, and K. P. Adzakpa, "Air supply state model for a proton exchange membrane fuel cell control," in *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vancouver, BC, 22-26 April 2007.
- [21] A. Giustiniani, G. Petrone, C. Pianese, M. Sorrentino, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "PEM Fuel Cells Control by means of the Perturb and Observe Technique," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 4349-4354.
- [22] A. Di Domenico, A. Miotti, M. Alhetairshi, Y. G. Guezennec, S. S. V. Rajagopalan, and S. Yurkovich, "Multi-variable control for an automotive traction PEM fuel cell system," in *American Control Conference, 2006*, 2006, p. 6 pp.
- [23] A. Biylkoglu, "Review of proton exchange membrane fuel cell models," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 1181-1212, 2005.
- [24] K. P. Adzakpa, J. Ramousse, K. Agbossou, Y. Dube, N. Hassanaly, and F. Zemmar, "Experimental Validation of a State Model for PEMFC Auxiliaries Control," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, 2008, pp. 1-5.

- [25] J. F. Epperson, "An Introduction to Numerical Methods and Analysis," Wiley-Interscience, Ed., 2007, p. 66.
- [26] N. I. M. Gould and S. Leyffer, "An introduction to algorithms for nonlinear optimization," in *Frontiers in Numerical Analysis* Berlin: Springer Verlag, 2003, pp. 109-197.
- [27] C. Grosan and A. Abraham, "Modified Line Search Method for Global Optimization," in *Modelling & Simulation, 2007. AMS '07. First Asia International Conference on*, 2007, pp. 415-420.

## Annexes

### Annexe A : Code Matlab des étapes 2 et 3 de l'algorithme

```

*****  

**  

% Algorithme d'optimisation du rendement d'un système de pile à  

% combustible  

% Par Kokou Mattewu ADEGNON, ing. jr  

% Étudiant en maîtrise génie électrique  

%  

% Programme nécessitant 4 vecteurs (y, x1, x2 et x3) en entrées qui sont:  

% y : vecteur rendement expérimental R  

% x1 : vecteur température de pile TP  

% x2 : vecteur humidité relative d'air HR  

% x3 : vecteur rapport stoechiométrique d'air RS  

%  

% Les variables de sortie sont les conditions expérimentales optimales :  

% yopt : rendement optimal  

% xlopt : température de pile optimale  

% x2opt : humidité relative d'air optimale  

% x3opt : rapport stoechiométrique d'air optimal  

*****  

**  

-----  

--  

% Identification de la fonction d'approximation des données  

% expérimentales  

-----  

--  

TP = TP';  

HR = HR';  

RS = RS';  

R = R';  

quit=0;  

un = ones(length(TP),1);  

D = [un TP HR RS (TP.*HR) (TP.*RS) (HR.*RS) (TP.^2) (HR.^2) (RS.^2)];  

%fonction d'approximation  

C = mldivide(D,R); %Calcul des coefficients de la fonction  

d'approximation  

-----  

--  

% Identification des conditions expérimentales qui optimisent le  

rendement  

-----  

--  

N = 10; %nombre de points générés par variable (fonction optimisationMLS)

```

```

tolerance = 0.001; % tolérance pour l'optimisation (fonction
optimisationMLS)

% Step1: générer N points ni, i=1,...,N sur l'espace de recherche
x1min = min(TP);
x1max = max(TP);
x2min = min(HR);
x2max = max(HR);
x3min = min(RS);
x3max = max(RS);

x1 = (x1min:(x1max-x1min)/(N-1):x1max)';
x2 = (x2min:(x2max-x2min)/(N-1):x2max)';
x3 = (x3min:(x3max-x3min)/(N-1):x3max)';

k=0;

% Step2: boucles
while (1) %boucle n°1
    for i=1:N
        k=k+1;
        nb_iter1=0;
        while (1) %boucle n°2
            nb_iter1 = nb_iter1 + 1;

            pk1 = 2*rand-1;
            pk1 = pk1*((-1)^(i));
            sk1 = 2*rand-1;
            x1prime(i) = x1(i)+pk1*sk1;

            pk2 = 2*rand-1;
            pk2 = pk2*((-1)^(i));
            sk2 = 2*rand-1;
            x2prime(i) = x2(i)+pk2*sk2;

            pk3 = 2*rand-1;
            pk3 = pk3*((-1)^(i));
            sk3 = 2*rand-1;
            x3prime(i) = x3(i)+pk3*sk3;

            if
                (x1prime(i)>x1min)&&(x1prime(i)<x1max)&&(x2prime(i)>x2min)&&(x2prime(i)<x
                2max)&&(x3prime(i)>x3min)&&(x3prime(i)<x3max)

                f = C(1) + C(2).*x1(i) + C(3).*x2(i) + C(4).*x3(i) +
                C(5).*x1(i).*x2(i)+ C(6).*x1(i).*x3(i)+ C(7).*x2(i).*x3(i) +
                C(8).*(x1(i)).^2 + C(9).*(x2(i)).^2 + C(10).*(x3(i)).^2;

                fprime = C(1) + C(2).*x1prime(i) + C(3).*x2prime(i) +
                C(4).*x3prime(i) + C(5).*x1prime(i).*x2prime(i) +
                C(6).*x1prime(i).*x3prime(i)+ C(7).*x2prime(i).*x3prime(i) +
                C(8).*(x1prime(i)).^2 + C(9).*(x2prime(i)).^2 + C(10).*(x3prime(i)).^2;

                if (fprime>f) %condition de sortie de la boucle n°2:
                    valeur plus grande
            end
        end
    end
end

```

```

        solution(k,:) = [fprime x1prime(i) x2prime(i)
x3prime(i)];
        x1(i)=x1prime(i);
        x2(i)=x2prime(i);
        x3(i)=x3prime(i);

            break
        end
    end
    if (nb_iter1>1000) %condition de sortie de la boucle n°2:
coincé à un minimum local
        solution(k,:) = [f x1(i) x2(i) x3(i)];
        break
    end
end

if solution(k,1)>max(solution(1:k-1,1))
    %Conditions optimales
    yopt = solution(k,1);
    x1opt = solution(k,2);
    x2opt = solution(k,3);
    x3opt = solution(k,4);
end
fprintf('\n k = %5.0f',k)
    %condition de sortie de la boucle n°1: gradient très faible
if k>5
    erreur(k,1) = sqrt((solution(k-1,1)-
max(solution(:,1)))^2+(solution(k-2,1)-max(solution(:,1)))^2+(solution(k-
3,1)-max(solution(:,1)))^2);
    if (erreur(k,1)<tolerance) || (k>=5000)
        break
    end
end
if (erreur(k,1)<tolerance) || (k>=5000)
    break
end
end
quit=1;
nb_it = k;

```

## Annexe B : Tableau complet des mesures effectuées pendant l'étude de sensibilité

Étude de l'influence des paramètres d'opération  $T_p$ ,  $HR$  et  $RS$  sur le rendement  $\eta$  du système PAC

I (A)	$T_p$ (°C)	HR (%)	RS	$\eta$ (%)	$P_{pile}$ (W)	$P_{comp}$ (W)	$P_{nette}$ (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	$I_{moy}$ (A)	$T_{p,moy}$ (A)	$HR_{moy}$ (%)	$RS_{moy}$	t0 (min)	t1 (min)	$U_{max}$ (V)	$U_{min}$ (V)	dU/U (%)
10	60	100	2.00	39.88	213.86	20.78	193.08	2.45	19.93	10.73	55.71	101.00	2.40	3.98	7.80	21.39	18.34	7.64
10	60	100	2.25	38.55	207.85	19.45	188.41	2.41	18.62	11.16	60.60	101.00	2.24	24.00	29.18	19.16	18.00	3.11
10	60	100	2.50	38.84	213.17	21.61	191.57	2.39	19.00	11.22	58.28	101.00	2.49	20.17	30.05	19.56	18.35	3.18
10	60	100	3.00	36.51	205.26	25.96	179.31	2.42	18.44	11.13	57.45	101.00	3.00	11.97	16.32	18.96	18.09	2.37
10	60	50	2.00	28.72	182.93	22.66	160.26	2.81	15.94	11.48	61.72	45.69	2.24	13.33	14.93	19.12	15.26	12.10
10	60	50	2.25	27.17	165.68	21.84	143.84	2.55	15.05	11.01	59.62	52.24	2.25	3.20	6.80	16.08	14.59	4.95
10	60	50	2.50	26.43	168.31	24.89	143.43	2.69	14.78	11.39	63.28	53.19	2.50	14.83	17.10	16.32	13.20	10.55
10	60	50	2.75	30.19	188.68	26.90	161.77	2.63	16.85	11.20	62.51	46.96	2.75	11.70	14.33	17.42	16.24	3.48
10	60	50	3.00	28.24	177.55	28.82	148.73	2.52	16.09	11.04	62.98	46.21	2.99	3.18	6.23	16.73	15.45	3.96
10	50	100	2.00	38.84	208.04	17.66	190.37	2.32	18.90	11.01	51.19	99.86	2.00	11.28	21.33	19.77	17.64	5.65
10	50	100	2.25	38.17	208.09	19.87	188.22	2.35	18.89	11.02	49.24	101.00	2.25	18.37	28.33	20.18	17.48	7.16
10	50	100	2.50	37.81	208.86	22.09	186.76	2.33	19.01	10.99	49.75	100.93	2.50	10.10	29.10	20.58	18.02	6.73
10	50	100	2.75	38.69	214.39	24.30	190.09	2.33	19.49	11.00	51.76	100.98	2.75	12.87	25.88	20.27	18.33	4.98
10	50	100	3.00	37.54	209.57	26.47	183.10	2.30	19.07	10.99	49.48	101.00	2.99	3.90	18.20	20.07	17.82	5.89
10	50	75	2.00	40.24	217.43	17.85	199.58	2.35	19.60	11.09	50.72	71.31	2.00	4.37	12.30	20.15	19.16	2.53
10	50	75	2.25	39.43	215.03	20.05	194.99	2.34	19.39	11.09	51.43	70.83	2.25	10.45	20.33	19.89	18.75	2.96
10	50	75	2.50	40.42	224.03	22.32	201.72	2.36	20.24	11.07	52.50	70.63	2.50	0.00	12.63	21.02	19.59	3.52
10	50	75	2.75	38.95	218.96	24.52	194.44	2.36	19.82	11.05	51.46	73.41	2.75	0.00	18.07	20.69	18.57	5.34
10	50	75	3.00	39.27	221.29	26.77	194.51	2.34	20.04	11.04	52.68	68.76	3.00	0.00	16.63	21.16	18.93	5.55
10	50	50	1.68	39.01	202.82	17.93	184.89	2.33	18.63	10.89	52.07	45.50	2.06	2.03	4.33	21.46	16.48	13.36
10	50	50	1.75	41.14	214.21	18.44	195.77	2.34	19.59	10.94	50.44	48.48	2.11	4.65	7.33	21.42	17.65	9.61

I (A)	T <sub>p</sub> (°C)	HR (%)	RS	η (%)	P <sub>pile</sub> (W)	P <sub>comp</sub> (W)	P <sub>nette</sub> (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	I <sub>moy</sub> (A)	T <sub>p,moy</sub> (A)	HR <sub>moy</sub> (%)	RS <sub>moy</sub>	t0 (min)	t1 (min)	U <sub>max</sub> (V)	U <sub>min</sub> (V)	dU/U (%)
10	50	50	2.00	39.94	207.37	17.41	189.96	2.38	18.89	10.98	50.97	46.37	2.01	1.85	4.07	19.43	17.42	5.30
10	50	50	2.25	40.41	209.19	19.43	189.76	2.25	19.15	10.92	53.27	43.38	2.24	2.58	4.82	19.75	17.62	5.55
10	50	50	2.50	40.08	212.34	21.62	190.72	2.32	19.39	10.95	53.15	44.78	2.49	1.58	5.47	19.93	17.92	5.18
<b>10</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>2.75</b>	<b>41.33</b>	<b>218.83</b>	<b>23.79</b>	<b>195.04</b>	<b>2.42</b>	<b>20.01</b>	<b>10.94</b>	<b>52.38</b>	<b>46.65</b>	<b>2.74</b>	<b>0.00</b>	<b>1.60</b>	<b>20.62</b>	<b>18.63</b>	<b>4.97</b>
10	50	30	1.50	30.38	170.39	17.20	153.19	2.71	15.68	10.86	52.90	26.88	1.99	0.45	0.98	22.27	10.37	37.91
10	50	30	1.68	38.10	198.74	15.86	182.89	2.34	18.19	10.93	53.58	26.47	1.83	0.13	2.32	21.85	17.40	12.22
10	50	30	1.75	37.51	201.14	16.89	184.25	2.50	18.45	10.90	50.93	29.39	1.94	0.00	2.55	21.75	16.94	13.04
10	50	30	2.00	38.89	207.16	17.41	189.75	2.31	18.97	10.92	51.17	27.64	2.01	0.00	7.88	19.62	17.62	5.26
10	50	30	2.25	39.00	209.51	19.44	190.07	2.31	19.19	10.92	53.70	26.11	2.24	0.00	8.33	20.00	17.88	5.54
10	50	30	2.50	39.14	212.28	21.61	190.67	2.31	19.52	10.87	52.56	27.30	2.49	8.10	17.07	20.16	18.12	5.20
10	50	30	2.75	38.11	203.10	23.78	179.32	2.26	19.24	10.56	50.45	28.64	2.74	0.30	7.68	19.88	17.69	5.67
10	40	100	1.75	41.03	213.18	15.17	198.00	2.29	19.63	10.86	42.22	101.00	1.75	0.00	18.07	20.49	18.18	5.89
10	40	100	2.00	41.26	220.67	17.67	203.01	2.32	19.94	11.07	41.53	101.00	2.00	5.43	34.47	20.39	18.69	4.27
10	40	100	2.25	41.65	220.75	19.46	201.29	2.29	20.35	10.85	42.43	101.00	2.24	0.00	20.32	20.96	18.93	5.00
10	40	100	2.50	40.28	221.04	22.08	198.95	2.33	20.01	11.05	40.73	101.00	2.50	19.80	46.62	20.53	18.56	4.92
10	40	100	2.75	40.72	218.87	23.80	195.07	2.27	20.22	10.82	42.65	101.00	2.75	0.00	32.32	21.11	18.91	5.44
10	40	100	3.00	40.75	221.64	25.97	195.67	2.27	20.50	10.81	42.56	101.00	3.00	0.00	22.68	21.00	18.84	5.27
10	40	75	1.50	36.42	196.00	15.47	180.53	2.46	17.96	10.92	39.38	75.60	1.78	0.90	2.42	22.53	17.13	15.03
10	40	75	1.68	40.37	212.03	15.33	196.70	2.35	19.52	10.87	39.33	76.30	1.77	10.38	14.88	22.16	18.50	9.37
10	40	75	1.75	41.04	215.25	15.16	200.09	2.33	19.72	10.92	39.53	74.74	1.75	8.85	16.62	20.39	18.36	5.15
10	40	75	2.00	41.57	218.62	17.33	201.29	2.30	20.07	10.89	39.40	76.93	2.00	5.12	13.72	20.67	18.64	5.07
10	40	75	2.25	41.22	215.89	19.45	196.44	2.28	19.84	10.88	39.43	77.70	2.24	0.00	7.03	20.68	18.62	5.18
10	40	75	2.50	40.99	217.34	21.63	195.72	2.28	20.00	10.87	39.51	78.30	2.49	0.00	6.00	20.79	18.85	4.83
10	40	75	2.75	41.10	218.30	23.79	194.50	2.24	20.24	10.79	39.46	78.55	2.74	9.90	17.50	21.02	19.01	4.96
10	40	50	1.50	38.95	200.27	18.39	181.89	2.37	18.15	11.04	40.30	53.47	2.10	0.53	1.30	21.73	16.01	15.77
10	40	50	1.68	40.79	208.95	14.51	194.44	2.42	19.04	10.97	40.31	54.59	1.67	0.98	1.90	19.84	18.06	4.66

I (A)	T <sub>p</sub> (°C)	HR (%)	RS	η (%)	P <sub>pile</sub> (W)	P <sub>comp</sub> (W)	P <sub>nette</sub> (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	I <sub>moy</sub> (A)	T <sub>p<sub>moy</sub></sub> (A)	HR <sub>moy</sub> (%)	RS <sub>moy</sub>	t0 (min)	t1 (min)	U <sub>max</sub> (V)	U <sub>min</sub> (V)	dU/U (%)
10	40	50	1.75	41.98	214.45	15.17	199.28	2.48	19.57	10.96	40.26	54.67	1.75	0.53	1.43	20.15	18.77	3.54
10	40	50	2.00	41.45	212.32	17.33	194.99	2.31	19.27	11.02	40.24	54.39	2.00	0.00	1.53	19.83	18.16	4.33
10	40	50	2.25	41.67	215.46	19.46	196.01	2.26	19.53	11.03	40.21	54.71	2.24	0.00	1.90	20.09	18.40	4.33
10	40	50	2.50	41.68	216.84	21.63	195.21	2.25	19.71	11.00	40.15	55.45	2.49	0.00	2.12	20.23	18.61	4.09
10	40	50	2.75	41.77	218.58	23.80	194.78	2.24	19.91	10.98	40.20	54.77	2.74	1.37	3.72	20.50	18.74	4.44
15	60	100	2.00	33.53	271.73	30.41	241.32	3.83	16.78	16.19	61.13	101.00	2.35	3.32	4.92	18.84	16.07	8.25
15	60	100	2.50	32.19	259.06	32.45	226.62	3.51	16.10	16.09	60.67	101.00	2.50	5.50	8.10	16.89	15.41	4.60
15	60	100	3.00	29.41	245.88	38.94	206.95	3.44	15.31	16.07	60.71	101.00	3.00	11.28	14.17	15.69	14.81	2.86
15	60	50	2.00	24.68	214.48	28.21	186.27	3.59	13.32	16.10	62.73	44.36	2.00	10.68	12.78	13.89	12.95	3.53
15	60	50	2.25	25.95	227.62	31.60	196.02	3.62	14.09	16.15	60.21	51.34	2.25	12.13	15.02	14.80	13.35	5.14
15	60	50	2.50	26.72	237.24	35.07	202.17	3.57	14.72	16.12	63.10	46.06	2.50	10.43	12.77	15.36	14.36	3.42
15	60	50	2.75	26.80	238.31	38.35	199.96	3.54	14.88	16.01	61.25	50.02	2.75	9.95	12.53	15.51	14.55	3.22
15	60	50	3.00	25.15	228.40	41.58	186.82	3.56	14.32	15.95	61.43	46.27	3.00	6.98	10.68	15.20	14.04	4.05
15	50	100	2.00	35.56	278.84	26.31	252.53	3.36	17.45	15.98	51.12	101.00	2.00	15.98	26.82	18.59	16.34	6.43
15	50	100	2.25	34.59	275.89	29.62	246.27	3.36	17.25	15.99	51.49	101.00	2.25	11.40	18.60	18.41	16.29	6.13
15	50	100	2.50	33.35	269.83	32.89	236.94	3.38	16.88	15.99	51.13	101.00	2.50	3.40	9.47	18.13	15.86	6.73
15	50	100	2.75	33.83	278.01	36.22	241.79	3.39	17.38	15.99	51.26	101.00	2.75	7.38	15.40	18.23	16.32	5.48
15	50	100	3.00	33.50	278.94	39.49	239.45	3.37	17.43	16.00	51.11	101.00	3.00	8.88	17.22	18.94	15.79	9.05
15	50	75	1.68	36.09	272.89	21.79	251.10	3.45	17.11	15.95	47.01	78.11	1.68	1.00	2.05	17.81	15.83	5.80
15	50	75	1.75	36.22	274.38	22.74	251.64	3.32	17.24	15.92	47.07	79.18	1.75	1.85	2.92	18.29	15.11	9.23
15	50	75	2.00	36.19	278.01	25.95	252.06	3.35	17.41	15.97	47.07	77.96	2.00	2.10	3.65	18.02	15.95	5.97
15	50	75	2.25	35.97	277.43	29.22	248.21	3.35	17.43	15.92	47.08	78.13	2.25	1.15	2.58	18.06	16.10	5.63
15	50	75	2.50	37.66	291.51	32.47	259.04	3.36	18.31	15.92	46.68	80.18	2.50	1.63	2.90	18.87	16.94	5.29
15	50	75	2.75	37.25	292.67	35.70	256.97	3.40	18.37	15.94	47.02	79.71	2.75	2.40	4.10	19.12	16.37	7.48
15	50	75	3.00	37.62	298.84	38.98	259.85	3.36	18.71	15.97	46.64	80.09	3.00	0.00	1.27	19.19	17.81	3.68
15	50	50	1.50	33.23	260.38	26.57	233.81	3.54	16.29	15.98	50.16	49.33	2.02	1.77	2.67	20.09	13.27	20.94

I (A)	T <sub>p</sub> (°C)	HR (%)	RS	η (%)	P <sub>pile</sub> (W)	P <sub>comp</sub> (W)	P <sub>nette</sub> (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	I <sub>moy</sub> (A)	T <sub>p<sub>moy</sub></sub> (A)	HR <sub>moy</sub> (%)	RS <sub>moy</sub>	t0 (min)	t1 (min)	U <sub>max</sub> (V)	U <sub>min</sub> (V)	dU/U (%)
15	50	50	1.68	35.51	267.98	21.81	246.17	3.37	16.80	15.95	51.00	48.29	1.68	0.78	1.58	18.32	14.92	10.12
15	50	50	1.75	35.36	271.10	22.73	248.37	3.60	17.02	15.93	51.67	46.64	1.75	1.07	1.78	17.69	15.65	5.99
15	50	50	2.00	36.32	280.15	25.96	254.18	3.59	17.52	15.99	52.18	45.98	2.00	1.07	1.92	18.10	16.27	5.20
15	50	50	2.25	36.22	284.52	29.25	255.26	3.61	17.82	15.97	53.23	43.82	2.25	0.70	1.70	18.36	16.54	5.13
15	50	50	2.50	36.65	286.55	32.46	254.09	3.39	17.98	15.94	53.65	43.62	2.50	1.97	2.95	18.61	16.64	5.48
15	50	50	2.75	36.14	288.07	35.72	252.35	3.50	18.03	15.98	53.17	45.58	2.75	0.00	1.25	18.68	16.72	5.41
15	50	30	1.50	33.33	259.94	24.22	235.72	3.43	16.34	15.91	50.37	28.19	1.86	1.98	2.68	20.36	14.47	18.01
15	50	30	1.68	35.50	275.69	26.61	249.08	3.39	17.28	15.95	49.26	29.98	2.04	1.02	1.85	19.96	15.84	11.94
15	50	30	1.75	35.96	283.61	28.25	255.36	3.62	17.78	15.95	49.93	28.46	2.17	1.98	2.80	19.98	16.33	10.24
15	50	30	2.00	36.07	278.56	25.96	252.60	3.43	17.49	15.92	51.29	27.88	2.00	0.80	1.90	18.00	16.28	4.93
15	50	30	2.25	36.32	282.75	29.23	253.53	3.35	17.72	15.96	51.94	27.10	2.25	1.10	2.48	18.37	16.34	5.74
15	50	30	2.50	36.68	284.70	32.48	252.22	3.26	17.89	15.92	53.09	26.43	2.50	1.37	2.97	18.53	16.62	5.32
15	50	30	2.75	36.08	285.44	35.69	249.75	3.31	17.93	15.92	53.93	26.58	2.75	0.12	2.55	18.61	16.85	4.89
15	40	100	1.68	37.77	279.93	21.80	258.13	3.25	17.57	15.94	40.85	101.00	1.68	3.75	6.52	18.14	16.27	5.32
15	40	100	1.75	37.08	276.95	22.74	254.21	3.29	17.38	15.94	40.96	101.00	1.75	2.45	5.60	18.05	16.06	5.73
15	40	100	2.00	38.36	291.76	26.29	265.48	3.32	18.11	16.11	40.82	101.00	2.00	16.73	21.15	18.72	17.17	4.29
15	40	100	2.25	37.98	294.08	29.60	264.48	3.30	18.20	16.16	40.91	101.00	2.25	5.12	10.70	18.79	16.98	4.99
15	40	100	2.50	37.54	294.37	32.89	261.48	3.31	18.18	16.19	40.93	101.00	2.50	9.42	14.68	18.76	17.01	4.83
15	40	100	2.75	37.14	293.87	36.22	257.65	3.28	18.15	16.19	40.98	101.00	2.75	0.00	4.77	18.81	16.82	5.48
15	40	100	3.00	36.87	290.32	38.99	251.33	3.24	18.20	15.95	40.94	101.00	3.00	2.00	7.70	18.86	16.96	5.24
15	40	75	1.50	36.04	290.82	27.21	263.60	3.61	18.17	16.00	39.33	74.68	2.06	0.68	1.28	21.56	17.14	12.15
15	40	75	1.68	39.65	299.83	23.13	276.70	3.34	18.74	16.00	39.29	76.03	1.78	5.58	8.72	20.97	18.30	7.13
15	40	75	1.75	40.53	314.50	22.71	291.79	3.42	19.65	16.01	39.37	75.75	1.75	1.82	6.82	20.04	19.18	2.19
<b>15</b>	<b>40</b>	<b>75</b>	<b>2.00</b>	<b>40.86</b>	<b>321.12</b>	<b>25.94</b>	<b>295.18</b>	<b>3.44</b>	<b>20.05</b>	<b>16.01</b>	<b>39.25</b>	<b>77.62</b>	<b>2.00</b>	<b>0.00</b>	<b>5.30</b>	<b>20.60</b>	<b>19.79</b>	<b>2.02</b>
15	40	75	2.25	39.20	313.00	29.23	283.78	3.42	19.59	15.98	39.38	76.90	2.25	4.17	9.32	19.77	19.42	0.89
15	40	75	2.50	39.22	315.71	32.47	283.24	3.45	19.77	15.97	39.31	76.01	2.50	17.00	22.03	19.97	19.62	0.87

I (A)	T <sub>p</sub> (°C)	HR (%)	RS	η (%)	P <sub>pile</sub> (W)	P <sub>comp</sub> (W)	P <sub>nette</sub> (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	I <sub>moy</sub> (A)	T <sub>p,moy</sub> (A)	HR <sub>moy</sub> (%)	RS <sub>moy</sub>	t0 (min)	t1 (min)	U <sub>max</sub> (V)	U <sub>min</sub> (V)	dU/U (%)
15	40	75	2.75	39.12	317.25	35.69	281.55	3.40	19.87	15.96	39.98	76.57	2.75	28.60	33.77	20.26	19.03	3.09
15	40	50	1.50	34.14	259.57	19.45	240.12	3.38	16.13	16.09	40.56	56.60	1.50	1.07	1.93	16.66	15.40	3.92
15	40	50	1.68	36.50	276.51	21.79	254.72	3.39	17.24	16.04	40.50	54.05	1.68	8.82	10.48	17.81	16.70	3.22
15	40	50	1.75	38.12	293.33	22.73	270.60	3.43	18.25	16.08	40.37	53.51	1.75	5.12	8.25	18.80	17.78	2.81
15	40	50	2.00	39.01	303.55	25.97	277.58	3.36	18.85	16.10	40.32	53.33	2.00	2.95	6.17	19.53	18.51	2.70
15	40	50	2.25	39.30	311.63	29.23	282.40	3.47	19.35	16.11	40.32	52.95	2.25	3.00	5.75	19.85	19.02	2.14
15	40	50	2.50	39.45	314.00	32.47	281.53	3.38	19.49	16.11	40.27	53.47	2.50	0.25	4.83	20.11	18.97	2.92
15	40	50	2.75	39.12	314.08	35.69	278.39	3.40	19.51	16.10	40.35	52.53	2.75	0.00	3.15	20.04	18.99	2.69
20	60	100	2.00	26.49	289.07	39.49	249.58	4.78	13.80	20.94	61.91	101.00	2.29	7.67	8.93	16.65	12.87	13.72
20	60	100	2.25	23.09	255.40	38.94	216.46	4.68	12.04	21.21	60.25	101.00	2.25	5.47	7.90	13.06	10.96	8.71
20	60	100	2.50	23.85	264.99	43.48	221.50	4.58	12.59	21.05	62.00	101.00	2.50	9.08	10.63	13.40	11.87	6.10
20	60	50	2.50	20.08	235.91	44.63	191.27	4.54	11.60	20.34	62.26	46.41	2.50	13.85	15.45	11.95	11.24	3.07
20	60	50	3.00	20.19	245.07	52.32	192.74	4.59	12.20	20.09	60.61	51.50	3.00	2.35	2.93	12.56	11.80	3.12
20	50	100	2.00	31.46	325.64	34.80	290.84	4.36	15.59	20.88	51.59	101.00	2.00	4.30	12.50	16.77	14.79	6.35
20	50	100	2.25	32.75	341.10	39.15	301.95	4.35	16.32	20.90	50.72	101.00	2.25	0.00	9.63	17.32	15.37	5.98
20	50	100	2.50	32.61	343.59	43.52	300.06	4.33	16.46	20.88	49.92	101.00	2.50	0.00	10.50	17.53	15.36	6.57
20	50	100	2.75	32.94	353.23	47.87	305.36	4.38	16.91	20.88	52.16	100.98	2.75	11.50	22.72	17.78	15.88	5.62
20	50	100	3.00	32.10	348.46	52.20	296.26	4.36	16.69	20.88	49.34	101.00	3.00	0.15	9.08	17.49	15.72	5.29
20	50	75	2.00	32.98	335.64	34.65	300.98	4.36	16.03	20.94	47.04	78.68	2.00	1.08	1.75	16.65	14.97	5.25
20	50	75	2.25	33.36	343.08	39.00	304.08	4.47	16.40	20.92	46.97	79.25	2.25	1.30	2.13	16.99	15.18	5.52
20	50	75	2.50	33.73	347.91	43.31	304.60	4.27	16.60	20.95	47.17	79.54	2.50	2.12	3.12	17.19	15.30	5.69
20	50	50	1.50	31.18	336.68	39.54	297.13	5.04	16.05	20.98	53.18	43.54	2.28	1.37	1.75	18.93	13.96	15.47
20	50	50	1.68	31.29	319.67	29.12	290.55	4.58	15.26	20.94	52.20	47.04	1.68	0.50	0.95	15.79	14.15	5.39
20	50	50	1.75	31.12	326.75	30.30	296.45	4.99	15.59	20.95	51.44	50.87	1.75	1.12	1.60	16.18	14.36	5.84
20	50	50	2.00	32.24	337.99	34.64	303.35	4.85	16.12	20.97	49.99	51.06	2.00	0.80	1.35	16.74	14.90	5.72
20	50	50	2.25	32.57	344.18	39.00	305.18	4.83	16.40	20.98	49.38	51.50	2.25	0.52	1.17	16.95	15.23	5.22

I (A)	Tp (°C)	HR (%)	RS	$\eta$ (%)	P <sub>pile</sub> (W)	P <sub>comp</sub> (W)	P <sub>nette</sub> (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	I <sub>moy</sub> (A)	Tp <sub>moy</sub> (A)	HR <sub>moy</sub> (%)	RS <sub>moy</sub>	t0 (min)	t1 (min)	U <sub>max</sub> (V)	U <sub>min</sub> (V)	dU/U (%)
20	50	50	2.50	32.87	348.00	43.36	304.64	4.64	16.62	20.94	49.48	52.06	2.50	0.73	1.52	17.21	15.40	5.45
20	50	50	2.75	33.31	353.61	47.61	306.01	4.56	16.87	20.96	49.70	49.88	2.75	1.18	1.98	17.55	15.57	5.85
20	50	30	1.50	29.57	311.41	32.88	278.53	4.66	14.85	20.98	52.23	26.84	1.90	0.88	1.28	18.85	12.49	21.44
20	50	30	1.68	32.01	338.84	38.89	299.96	4.72	16.17	20.95	52.66	25.68	2.24	3.13	3.58	18.65	14.38	13.21
20	50	30	1.75	30.44	319.54	30.30	289.25	4.93	15.22	20.99	52.92	25.29	1.75	1.13	1.58	15.85	14.23	5.32
20	50	30	2.00	32.72	336.95	34.65	302.31	4.52	16.06	20.98	53.46	26.23	2.00	1.03	1.60	16.67	14.93	5.42
20	50	30	2.25	33.72	347.00	39.00	308.00	4.40	16.57	20.94	53.34	26.44	2.25	1.17	1.95	17.22	15.51	5.16
20	50	30	2.50	33.92	354.33	43.32	311.02	4.49	16.89	20.98	52.56	27.69	2.50	0.82	1.72	17.44	15.82	4.81
<b>20</b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>2.75</b>	<b>34.23</b>	<b>360.47</b>	<b>47.61</b>	<b>312.86</b>	<b>4.44</b>	<b>17.19</b>	<b>20.97</b>	<b>51.58</b>	<b>28.47</b>	<b>2.75</b>	<b>1.58</b>	<b>2.73</b>	<b>17.76</b>	<b>16.05</b>	<b>4.96</b>
20	40	100	1.68	34.03	334.36	29.12	305.24	4.23	16.00	20.90	41.23	101.00	1.68	1.23	3.75	16.69	14.83	5.80
20	40	100	1.75	33.02	327.42	30.29	297.12	4.24	15.67	20.90	41.19	101.00	1.75	2.02	4.60	16.18	14.53	5.27
20	40	100	2.00	33.68	336.99	34.67	302.32	4.24	16.12	20.91	41.17	101.00	2.00	3.03	6.03	16.61	15.07	4.76
20	40	100	2.25	33.62	342.31	39.00	303.31	4.27	16.39	20.89	41.13	101.00	2.25	3.12	6.62	16.92	15.15	5.41
20	40	100	2.50	33.82	346.68	43.35	303.33	4.23	16.66	20.81	41.42	101.00	2.50	3.57	7.47	17.24	15.47	5.31
20	40	100	2.75	34.46	356.65	47.61	309.04	4.23	17.05	20.92	41.10	101.00	2.75	3.25	6.90	17.59	15.82	5.20
20	40	100	3.00	33.44	351.19	51.95	299.23	4.22	16.77	20.94	41.06	101.00	3.00	0.00	3.30	17.35	15.68	4.97
20	40	75	1.50	35.49	366.78	35.10	331.69	4.80	17.45	21.02	39.56	74.77	2.05	0.78	1.28	19.87	15.75	11.79
20	40	75	1.68	34.36	360.62	37.64	322.98	4.91	17.16	21.01	39.54	76.77	2.18	1.18	1.67	19.22	15.75	10.11
20	40	75	1.75	34.94	354.58	30.32	324.26	4.59	16.91	20.97	39.50	73.59	1.75	0.67	1.13	17.65	15.65	5.91
20	40	75	2.00	35.63	363.40	34.64	328.77	4.59	17.32	20.98	39.41	75.43	2.00	2.97	3.85	18.13	16.24	5.46
20	40	75	2.25	35.91	372.57	38.90	333.67	4.67	17.73	21.02	39.23	77.30	2.25	0.35	1.00	18.69	16.80	5.33
20	40	75	2.50	35.81	373.11	43.32	329.79	4.58	17.78	20.99	39.34	77.55	2.50	1.38	2.10	18.54	16.81	4.86
20	40	75	2.75	35.42	374.49	47.61	326.88	4.63	17.83	21.01	39.23	75.20	2.75	0.70	1.50	18.67	16.50	6.09
20	40	75	3.00	35.41	377.63	51.98	325.64	4.55	17.97	21.02	39.51	75.71	3.00	1.43	2.28	18.69	16.86	5.09
20	40	50	1.50	36.50	363.68	27.72	335.97	4.39	17.47	20.82	41.21	51.01	1.59	7.02	9.60	19.92	16.83	8.85
20	40	50	1.68	36.93	373.99	29.09	344.90	4.45	17.77	21.05	40.87	51.97	1.68	8.65	12.97	18.16	17.30	2.41

I (A)	T <sub>p</sub> (°C)	HR (%)	RS	η (%)	P <sub>pile</sub> (W)	P <sub>comp</sub> (W)	P <sub>nette</sub> (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	U (V)	I <sub>moy</sub> (A)	T <sub>p<sub>moy</sub></sub> (A)	HR <sub>moy</sub> (%)	RS <sub>moy</sub>	t <sub>0</sub> (min)	t <sub>1</sub> (min)	U <sub>max</sub> (V)	U <sub>min</sub> (V)	dU/U (%)
20	40	50	1.75	36.94	375.04	30.29	344.74	4.45	17.78	21.09	40.77	52.21	1.75	2.95	6.38	18.24	17.38	2.42
<b>20</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>2.00</b>	<b>37.21</b>	<b>382.83</b>	<b>34.62</b>	<b>348.21</b>	<b>4.47</b>	<b>18.13</b>	<b>21.12</b>	<b>40.60</b>	<b>52.15</b>	<b>2.00</b>	<b>3.33</b>	<b>6.53</b>	<b>18.55</b>	<b>17.66</b>	<b>2.43</b>
20	40	50	2.25	37.11	384.41	38.97	345.44	4.41	18.20	21.13	40.60	52.67	2.25	3.33	6.85	18.84	17.71	3.10
20	40	50	2.50	36.49	383.02	43.35	339.67	4.39	18.14	21.12	40.51	53.33	2.50	3.58	7.30	18.77	17.43	3.69
20	40	50	2.75	36.26	385.47	47.63	337.84	4.42	18.25	21.12	40.50	53.01	2.75	0.00	3.53	18.82	17.70	3.05
20	40	30	1.50	35.00	353.11	25.96	327.15	4.42	16.75	21.08	42.33	29.85	1.50	3.40	6.63	17.51	15.73	5.31
20	40	30	1.68	36.66	373.50	29.12	344.38	4.44	17.71	21.09	41.69	30.64	1.68	3.45	7.28	18.05	17.25	2.25
20	40	30	1.75	36.51	376.29	30.32	345.97	4.52	17.83	21.11	41.18	31.26	1.75	2.92	6.28	18.03	17.57	1.29
20	40	30	2.00	37.06	382.23	34.61	347.63	4.44	18.14	21.07	40.68	31.56	2.00	6.02	11.42	18.37	17.77	1.67
20	40	30	2.25	36.96	383.48	38.98	344.50	4.40	18.26	21.00	40.00	32.26	2.25	0.00	7.73	18.49	17.94	1.51
20	40	30	2.50	37.03	386.09	43.31	342.78	4.37	18.48	20.89	39.81	32.42	2.50	0.00	6.62	18.68	18.26	1.12
20	40	30	2.75	36.71	383.29	47.60	335.69	4.34	18.57	20.64	39.97	31.87	2.75	0.00	4.17	18.83	18.14	1.85

Étude de l'influence de la pression relative des réactifs  $P_{gaz}$  sur le rendement  $\eta$  du système PAC

Conditions	I (A)	$P_{gaz}$ (kPa)	$\eta$ (%)	$P_{pile}$ (W)	$P_{comp}$ (W)	$P_{nette}$ (W)	$\dot{m}_{H_2}$ (slpm)	Tpurges (min)	U (V)	I (A)	$T_{p moy}$ (A)	$HR_{moy}$ (%)	$RS_{moy}$	t0 (min)	t1 (min)	$U_{max}$ (V)	$U_{min}$ (V)	dU/U (%)
Tp = 40°C HR = 100% RS = 2,25	10	10	46.08	224.46	4.36	220.10	2.27	11.17	20.44	10.98	39.74	101.00	2.24	6.733	17.900	20.79	19.89	2.19
	10	20	45.41	226.33	8.46	217.87	2.27	8.05	20.62	10.98	39.57	101.00	2.24	13.800	21.850	20.78	20.38	0.96
	10	30	43.97	226.03	12.32	213.71	2.30	10.15	20.59	10.98	39.39	101.00	2.24	0.000	10.150	20.77	20.37	0.97
	10	40	43.29	227.97	15.97	212.00	2.32	7.09	20.77	10.98	39.33	101.00	2.24	33.380	40.470	20.89	20.65	0.58
Tp = 40°C HR = 75% RS = 2,00	10	50	41.65	220.75	19.46	201.29	2.29	20.32	20.35	10.85	42.43	101.00	2.24	0.000	20.320	20.96	18.93	5.00
	15	10	41.18	293.17	5.82	287.34	3.30	7.99	18.42	15.91	40.38	75.68	2.00	3.283	11.270	18.87	17.90	2.63
	15	20	42.02	306.94	11.29	295.65	3.32	7.10	19.18	16.00	40.36	76.57	2.00	5.650	12.750	19.55	18.43	2.91
	15	30	41.31	310.29	16.44	293.85	3.37	8.47	19.34	16.04	40.38	76.87	2.00	7.350	15.820	19.70	18.70	2.57
Tp = 40°C HR = 50% RS = 1,68	15	40	40.72	311.98	21.32	290.66	3.38	7.53	19.44	16.05	40.36	76.82	2.00	6.717	14.250	19.80	18.67	2.92
	15	50	40.86	321.12	25.94	295.18	3.44	5.30	20.05	16.01	39.25	77.62	2.00	0.000	5.300	20.60	19.79	2.02
	20	10	40.90	383.95	6.54	377.41	4.35	4.92	18.28	21.00	40.92	46.67	1.68	0.000	4.917	18.62	17.65	2.65
	20	20	40.46	389.80	12.66	377.14	4.40	5.22	18.56	21.00	40.58	47.12	1.68	0.000	5.217	18.86	18.13	1.97
HR = 50% RS = 1,68	20	30	40.42	396.12	18.45	377.67	4.40	5.83	18.86	21.00	40.30	48.21	1.68	13.370	19.200	19.19	18.40	2.09
	20	40	40.15	397.19	23.89	373.30	4.40	8.37	18.98	20.93	40.63	45.76	1.68	10.930	19.300	19.40	18.23	3.07
	20	50	36.93	373.99	29.09	344.90	4.45	4.32	17.77	21.05	40.87	51.97	1.68	8.650	12.970	18.16	17.30	2.41