

BANC D'ESSAI

III.1. Description du banc d'essai	38
III.1.1. Description des composants	38
III.1.2. Mesures de sécurité	51
III.1.3. Conclusion	54
III.2. Caractérisation des composants	55
III.2.1. Electrolyseur	55
III.2.2. Pile à Combustible	65
III.2.3. PMU	69
III.2.4. Conclusion	71
III.3. Performances du système de stockage par l'hydrogène	71
III.3.1. Performances actuelles	71
III.3.2. Perspectives	74
III.3.3. Conclusion	77
III.4. Conclusion	77

Ce chapitre est consacré à la description du banc d'essai et de ses performances. Nous présentons dans un premier temps, les composants et leur fonctionnement. Nous décrivons ensuite les résultats expérimentaux de l'électrolyseur, de la pile à combustible et de l'appareil de conversion et de gestion de l'énergie (PMU). Les performances du système de stockage par l'hydrogène sont finalement analysées dans la troisième partie et des évolutions sont proposées pour améliorer les rendements des composants électrochimiques.

L'annexe 3 montre l'installation complète construite sur le toit du laboratoire.

III.1. Description du banc d'essai

Nous décrivons dans un premier temps, les caractéristiques générales des composants, les performances annoncées par les fournisseurs et l'architecture hydraulique de l'installation ainsi que le fonctionnement de l'électrolyseur et de la pile à combustible. Ensuite, les dangers d'une telle installation sont analysés afin de définir les mesures de sécurité à prendre.

III.1.1. Description des composants

III.1.1.1. Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque est constitué de 36 modules PW1000 (Photowatt, France). Chaque module a une puissance maximale d'environ 100 Wc. La tension et l'intensité au point de puissance maximale sont 34,4 V et 2,9 A dans les conditions standards de tests⁵. Les modules sont fixés sur des structures métalliques mises à la terre. L'inclinaison des panneaux est de 45° car elle permet la meilleure captation d'énergie pour un fonctionnement annuel dans notre région.

Afin d'obtenir une tension importante pour réduire la perte dans le convertisseur, 6 branches de 6 modules en série, sont connectés en parallèle et protégés par des diodes Schottky. Cette mise en parallèle est réalisée dans la boîte de jonction (Annexe 3) qui contient un interrupteur pour isoler les modules et différentes sécurités (diodes anti-retour, parafoudres).

Les caractéristiques du champ photovoltaïque dans les conditions standards de tests sont décrites dans le Tableau III-1.

Tableau III-1 : Caractéristiques électriques du champ photovoltaïque du banc d'essai dans les conditions standards de tests – Données du constructeur

Puissance	3,6 kWc
Tension de circuit ouvert	259,2 V
Intensité de court circuit	17,4 A
Tension à MPP	206,4 V
Intensité à MPP	18 A

III.1.1.2. Composants électrochimiques

Les appareils électrochimiques sont constitués de cellules, cœur de la réaction, et d'un périphérique hydraulique assurant la gestion des gaz et du liquide. Chaque périphérique a été adapté à notre application et réalisé au laboratoire. Le fonctionnement des appareils électrochimiques et de leurs périphériques est assuré par un automate (Modicom TSX). Une interface homme/machine permet la communication avec l'automate (Marche/Arrêt des composants, Arrêt d'urgence, modification des paramètres de contrôle, voir Annexe 4).

⁵ Ensoleillement : 1000 W/m² – Température des cellules : 25 °C – AM : 1,5

III.1.1.2.1. Electrolyseur

Basé sur l'expérience de Hydrogen Systems, fournisseur des cellules, le périphérique hydraulique construit est très proche du procédé industriel mais adapté à la puissance des cellules.

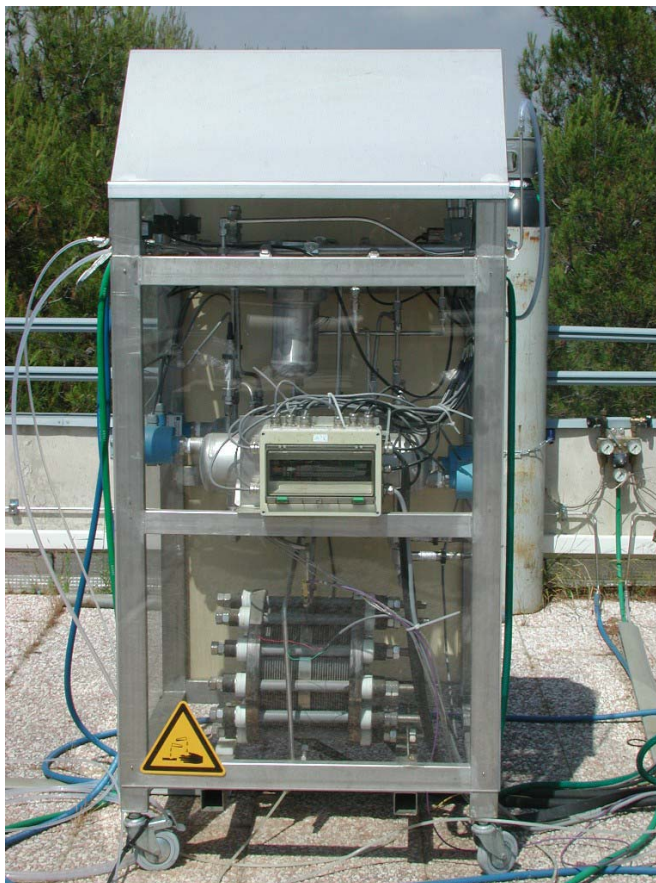


Figure III-1 : Electrolyseur du banc d'essai

III.1.1.2.1.1. Caractéristiques générales

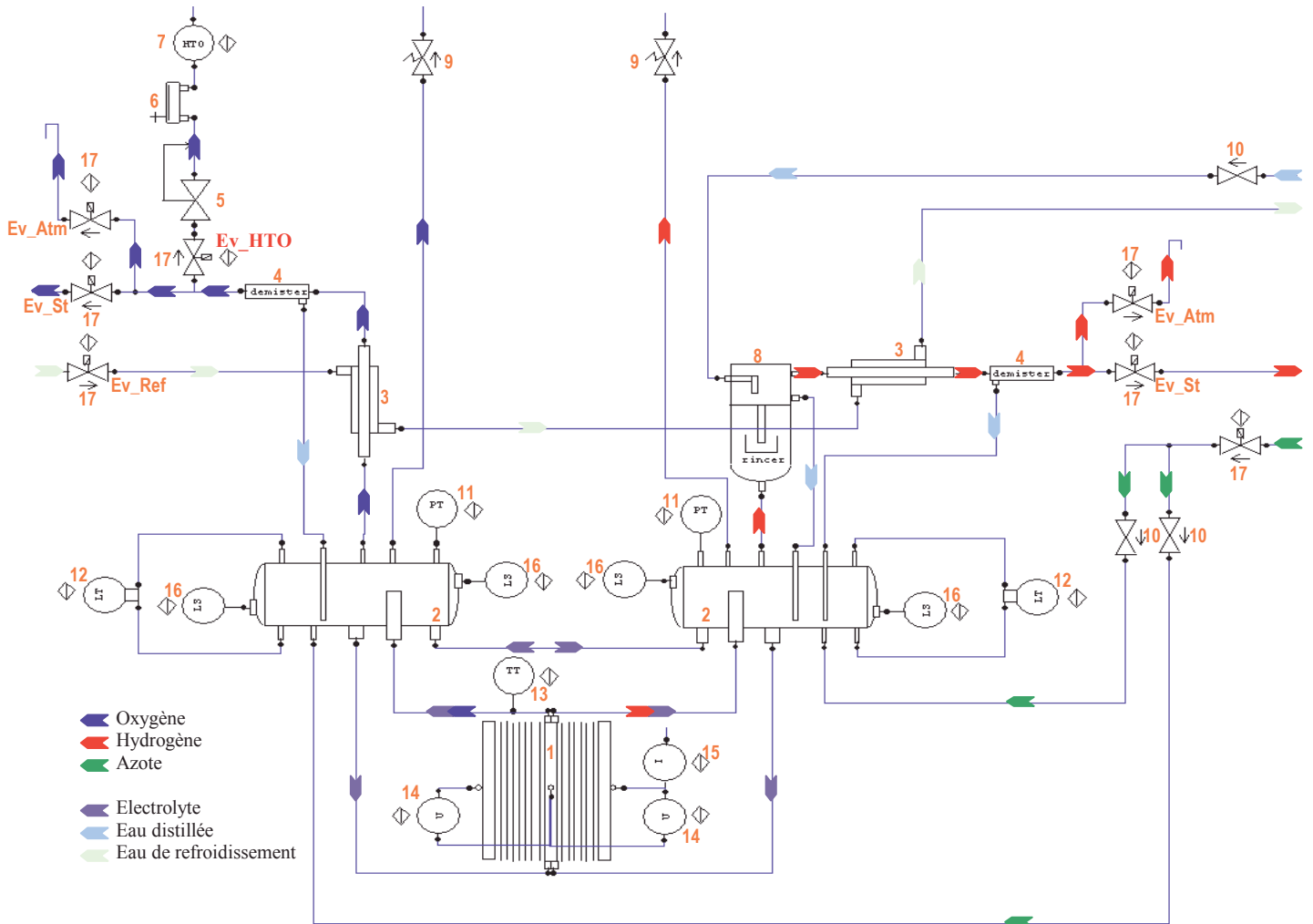
L'électrolyseur de 3,6 kW (Hydrogen Systems, Belgique) est constitué de 16 cellules en série de 300 cm², de technologie alcaline avancée, de géométrie « zéro gap ». L'électrolyte est de l'hydroxyde de potassium concentré à 30 % massique. La pression maximale de fonctionnement est 10 bar⁶. Le point nominal⁷ de l'électrolyseur est 29 V - 120 A à 72 °C. La production de gaz à 120 A est de 0,8 Nm³/h (rendement faradique de 99,7 %).

III.1.1.2.1.2. Description du périphérique

Le périphérique de l'électrolyseur est décrit à la Figure III-2. Il est constitué de 2 vases communicants, appelés séparateurs, car ils permettent la séparation des gaz produits et de l'électrolyte.

⁶ Bar relatif, pression relative à la pression atmosphérique ; on précise dans le cas où la pression est absolue Bar absolu ou Bar (abs).

⁷ Point de fonctionnement nominal : correspond à la puissance maximale du composant électrochimique.



Légende : 1. électrolyseur (16 cellules 300 cm²), 2. séparateur(2), 3. échangeur(2), 4. demister(2), 5. détendeur (1), 6. débitmètre (1), 7. mesure de concentration d'hydrogène dans l'oxygène (1), 8. rinçeur (1), 9. soupape de sécurité (2), 10. clapet anti-retour (2), 11. mesure de pression (2), 12. mesure de pression différentielle (2), 13. mesure de température (1), 14. mesure de tension (2), 15. mesure d'intensité (1), 16. alarme de niveau (4), 17. électrovanne (7). Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'éléments dans le périphérique.

Figure III-2 : Description du périphérique de l'électrolyseur.

Les séparateurs (n°2) sont placés au dessus des cellules (n°1) et sont remplis en partie par l'électrolyte liquide (KOH 30 %). L'électrolyte circule naturellement des séparateurs aux cellules, par effet « gas lift » : les gaz produits par les cellules montent dans les séparateurs et entraînent la circulation de l'électrolyte. Les gaz sont évacués par des électrovannes (n°17) vers le stockage (Ev_St) ou vers l'atmosphère (Ev_Atm).

L'oxygène, à la sortie du séparateur, est refroidi dans un échangeur double paroi (n°3) et passe ensuite dans un débrumiseur (n°4) afin de condenser la vapeur d'eau résiduelle et de ramener l'eau dans le périphérique. L'oxygène est évacué vers l'atmosphère ou vers le stockage. Les gaz sont évacués vers l'atmosphère en phase de purge, au démarrage pour évacuer l'azote de purge et dans le cas où le stockage est plein. Une dernière électrovanne (Ev_HTO), ouverte lorsque l'électrolyseur est alimenté, dirige le gaz vers un appareil de mesure de concentration de l'hydrogène dans l'oxygène via un détendeur (n°5) et un régulateur de débit (n°6) pour une mesure à basse pression et à faible débit. Le capteur de mesure de pureté de l'oxygène (n°7) est

en fait un catalyseur dont la température dépend de la quantité d'hydrogène. L'échelle maximale est 4 %, limite inférieure d'explosivité (LIE) d'hydrogène dans l'oxygène.

Cette mesure de sécurité va entraîner une fuite d'oxygène vers l'extérieur. Le rendement faradique de l'électrolyseur va donc dépendre du débit de mesure. De plus, cela va induire une perte de matière qui va se traduire par une consommation d'eau pure du système de stockage par l'hydrogène.

L'hydrogène subit le même traitement avec une étape supplémentaire. A la sortie du séparateur, le gaz passe dans un rinceur (n°8), l'obligeant ainsi à s'écouler le long de fibres d'acier baignant dans de l'eau distillée.

Des soupapes de sécurité (n°9) permet de ne jamais dépasser 10 bar dans le système.

L'électrolyseur consomme de l'eau distillée : l'électrolyte se concentre. L'eau pure entre dans le périphérique côté hydrogène, au niveau du rinceur, via une pompe à membrane de contre-pression de 12 bar. La concentration de l'électrolyte doit être conservée entre 27 % et 32 %, plage de conductivité ionique maximale.

L'azote, utilisé pour « l'inertage » de l'installation, est introduit en bas des séparateurs à une pression de 2 bar.

III.1.1.2.1.3. Mesure et contrôle

De nombreux capteurs sont reliés à un automate. Celui-ci assure le fonctionnement et le contrôle de l'électrolyseur.

Le contrôle de l'électrolyseur est développé autour de deux contraintes liées aux cellules :

1. La membrane ne supporte pas une différence de pression importante (< 250 mbar),
2. La pression maximale de résistance de l'appareil est de 10 bar.

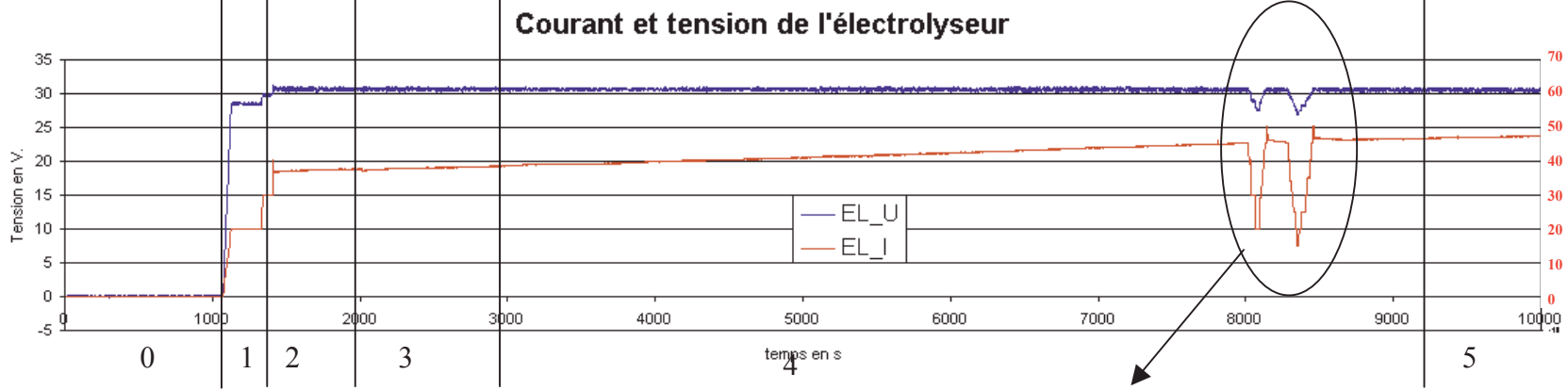
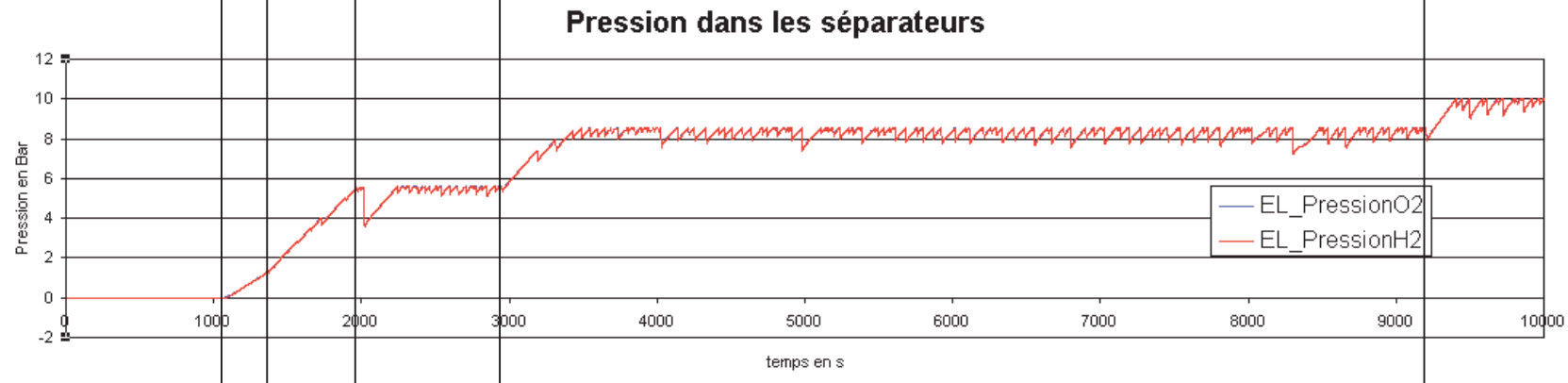
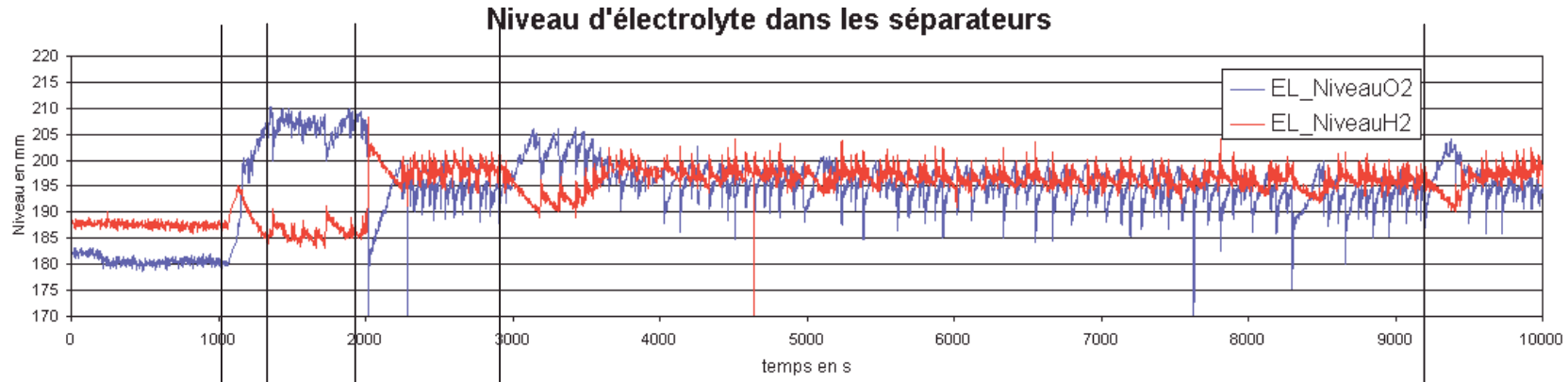
Les capteurs de pression (n°11) sont placés sur les séparateurs mais leur précision n'est pas suffisante pour la mesure de pression différentielle. Cette dernière se fait par la mesure de niveaux d'électrolyte dans les 2 séparateurs (capteur de pression différentielle (n°12) entre le bas et le haut des séparateurs). Dix millimètres de différence de niveaux correspondent alors à 1 mbar.

La Figure III-3 décrit l'évolution dans le temps des niveaux d'électrolyte et de la pression dans les séparateurs, du courant et de la tension de l'électrolyseur au démarrage de l'appareil.

Le système au repos est ouvert (étape 0).

Au démarrage (bouton ON, Annexe 4), l'installation est purgée (étape 1) : l'azote entre dans le système ouvert et un équilibre s'établit. La pression d'équilibre est maintenue pendant 30 secondes pour évacuer l'air contenu dans le périphérique. Ensuite, les électrovannes sont fermées, le système est clos.

Figure III-3: Evolution dans le temps des niveaux d'électrolyte et de la pression dans les séparateurs, du courant et de la tension de l'électrolyseur au démarrage de l'appareil.



- 0 : arrêt
- 1 : purge
- 2 : montée en pression
- 3 : fonctionnement normal (Pmax = 6 Bar)
- 4 : fonctionnement normal (Pmax = 8 Bar)
- 5 : fonctionnement normal (Pmax = 10 Bar)

Réalisation de courbes U-I

Lorsque l'électrolyseur est alimenté (étape 2), la pression augmente dans le système et il apparaît une différence de niveaux entre les deux séparateurs : les cellules produisent deux fois plus d'hydrogène que d'oxygène or les volumes gazeux côté cathodique et anodique ne sont pas exactement dans la même proportion. L'hydrogène ou l'oxygène est évacué par les électrovannes lorsque la différence de niveaux atteint la valeur de régulation (25 mm). Après ouverture d'une électrovanne, la différence de niveaux se réduit.

Les gaz produits sont évacués vers l'atmosphère tant que l'azote n'a pas été évacué du système ($P < 2$ bar). La pression du système monte rapidement. Les gaz sont ensuite stockés dans les bouteilles.

Lorsque la pression du périphérique atteint sa valeur maximale, les gaz sont évacués afin de ne pas dépasser cette pression. Les niveaux d'électrolyte sont alors pratiquement identiques. La pression maximale de fonctionnement est modifiable sur l'interface homme/machine de l'automate (étape 3 : 6 bar, étape 4 : 8 bar, étape 5 : 10 bar).

La température est mesurée (n°13) à la sortie des cellules côté O_2 . Cette température doit être inférieure à $72^\circ C$. Or, il n'y a pas d'échangeur de chaleur prévu pour le refroidissement car la puissance thermique évacuée par les cellules est faible. Si la température atteint $72^\circ C$, l'automate envoie un signal pour couper l'alimentation de l'électrolyseur.

Lorsque l'électrolyseur n'est plus alimenté, les électrovannes sont maintenues fermées. L'appareil est en veille mais le contrôle est maintenu afin de passer en phase de production si l'électrolyseur est à nouveau alimenté ou en phase de purge en cas d'anomalies (fuites, arrêt d'urgence, ...).

La phase d'arrêt d'urgence est activée par les capteurs d'alarme ou d'arrêt de l'appareil :

- niveaux d'alarme haut et bas de l'électrolyte dans les séparateurs (n°16)
- concentration d' H_2 dans O_2 (n°7)
- bouton d'alarme générale (Annexe 4)
- bouton d'arrêt de l'électrolyseur (Annexe 4)
- différence de niveaux d'électrolyte dangereuse pour les cellules (n°12)

Au cours de cette phase d'arrêt, les gaz sont évacués vers l'atmosphère. Lorsque la pression est inférieure à 2 bar, l'azote purge le système. Un équilibre de pression s'établit, il est maintenu 30 secondes. L'électrolyseur ne peut redémarrer que si les alarmes ont été réinitialisées et qu'un opérateur appuie sur le bouton ON.

III.1.1.2.1.4. Mise au point

La mise sous tension des cellules n'a été effectuée qu'après validation du programme de l'automate de sécurité. Pour cette phase, la production des gaz a été simulée par entrée d'azote dans les deux séparateurs. Les étapes de fonctionnement de l'électrolyseur ont été mises au point, testées et validées (temps de purge, pression de fin d'étape, valeurs de régulation et d'alarme...). Ensuite, les cellules ont été reliées hydrauliquement et électriquement. Après une étape de mise au point des sécurités liées aux cellules (tension, température), l'intensité délivrée à l'électrolyseur a ainsi pu être augmentée.

Le programme de l'automate n'est plus maintenant modifié. Seules les valeurs accessibles par l'interface homme/machine sont modifiables : pression de fonctionnement, niveau de régulation, d'alarme...

III.1.1.2.2. Pile à combustible

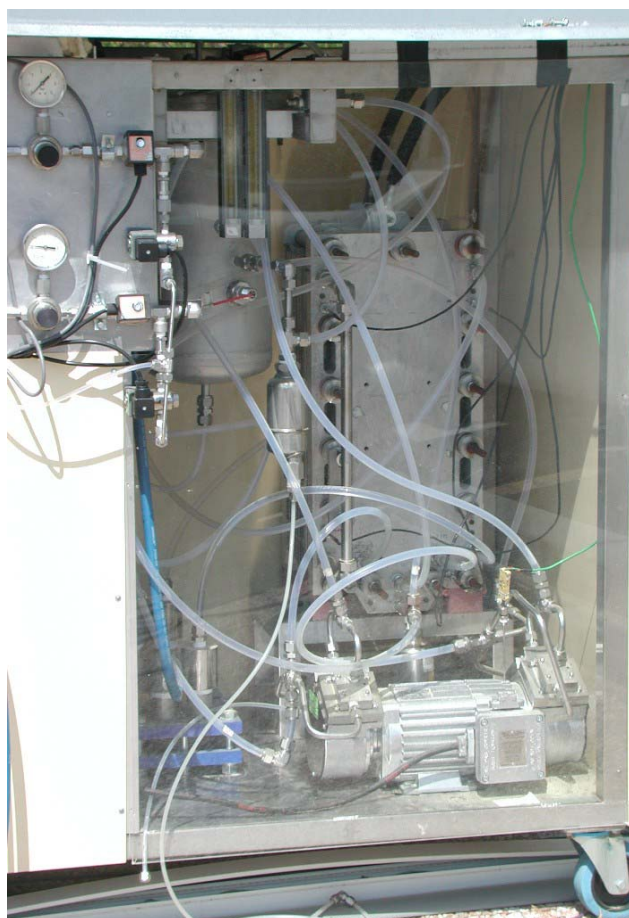


Figure III-4 : Pile à combustible du banc d'essai

III.1.1.2.2.1. Caractéristiques générales

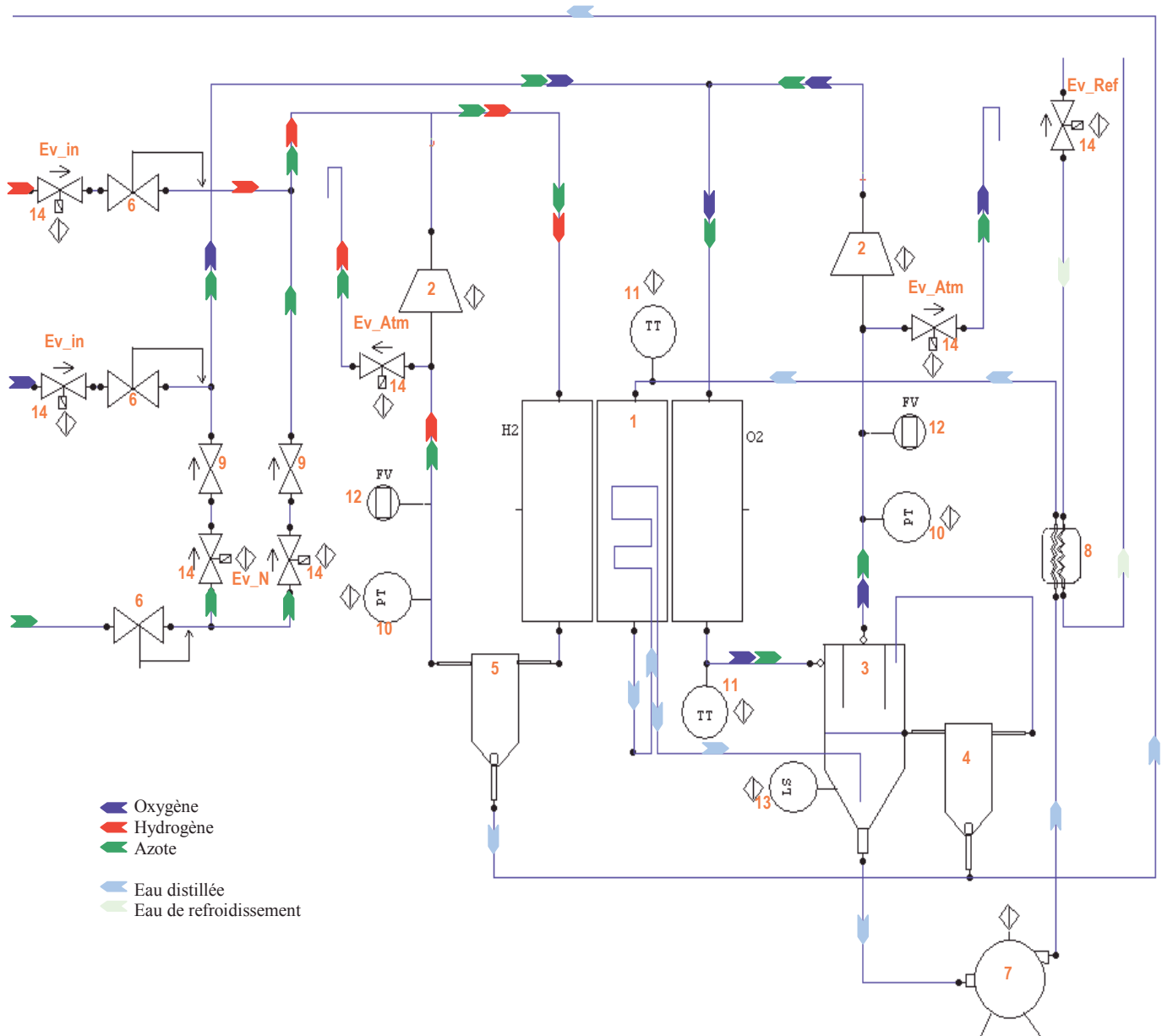
Une pile à combustible de 4 kW (De Nora, Italie) est constituée de 18 cellules en série de 900 cm², de type PEM. Ces cellules ne consomment pas d'oxygène pur pour des raisons de corrosion. La concentration d'oxygène dans le stack doit être inférieure à 70 %.

Ce module est parfaitement connu au laboratoire ayant été utilisé au cours de nombreuses études pendant 10 ans. Les caractéristiques électriques sont 11 V et 330 A au point de fonctionnement nominal pour une température de 35 °C, une pression côté hydrogène de 2,5 bar (abs) et côté air de 3 bar (abs). Ces performances correspondent à une alimentation en circuit ouvert avec une stoechiométrie de 1,5 côté anodique et de 2 côté cathodique.

III.1.1.2.2.2. Description du périphérique

Le périphérique sélectionné est basé sur la re-circulation des gaz et le mélange des gaz purs avec l'azote, des deux côtés de la membrane. La recirculation permet d'évacuer l'eau produite de la pile sans perte de gaz. Sans la recirculation, l'eau est évacuée par des purges régulières. L'oxygène est mixé avec de l'azote car les cellules ne supportent pas l'oxygène pur pour des raisons de corrosion. Or l'azote traverse la membrane et se retrouve côté anodique [3]. Nous avons donc choisi de mixer l'hydrogène avec l'azote dans les mêmes proportions que l'oxygène. La concentration en azote côté anodique n'affecte pas les performances des cellules en dessous de 80 % [3].

Le périphérique de la pile à combustible est décrit à la Figure III-5.



Légende : 1. pile à combustible (18 cellules 900 cm²), 2. pompe de re-circulation des gaz (1 moteur avec 2 têtes de pompe), 3. cyclone et vase de récupération de l'eau (1), 4. séparateur (1), 5. séparateur condenseur (1), 6. détendeur (3), 7. pompe de circulation de l'eau (1), 8. échangeur (1), 9. clapet anti-retour (2), 10. mesure de pression (2), 11. mesure de température (2), 12. mesure de débit (2), 13. alarme de niveau (1), 14. électrovanne (7). Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'éléments dans le périphérique.

Figure III-5 : Description du périphérique de la pile à combustible.

L'azote est amené dans le périphérique à une pression de 0,5 bar (détendeur réglable (n°6)) lorsque les électrovannes Ev_N sont ouvertes. Lors de la purge, si la pompe de re-circulation (n°2) est arrêtée (problème d'alimentation), le gaz inerte la pile (n°1) et le cyclone (n°3) avant d'être évacué vers l'atmosphère via l'électrovanne Ev_Atm. Le système est correctement purgé.

Lorsque les vannes Ev_in sont ouvertes, l'hydrogène et l'oxygène entrent dans le système à une pression de 2 bar. Les détendeurs (n°6) permettent de varier la pression dans le système ainsi que la quantité de gaz pur et d'azote.

La re-circulation des gaz est réalisée par deux pompes à membrane (n°2) activées par un seul moteur. Le gaz re-circulé passe dans la pile, le gaz chaud et humide est ensuite séparé de sa vapeur d'eau dans un cyclone (n°3) (O₂) ou dans un séparateur-condenseur (n°5) (H₂). Avant le retour dans la pompe, on effectue une mesure de pression (n°10) et de débit (n°12) (visuelle).

Le cyclone (n°3) (côté cathodique) permet la séparation de l'eau liquide du gaz dans sa partie haute et le stockage de l'eau distillée du système dans sa partie basse. Cette eau circule grâce à une pompe centrifuge (n°7). L'eau circule dans un échangeur eau/eau (n°8) puis dans le système de refroidissement de la pile et enfin dans les cellules d'humidification des gaz de la pile avant son retour dans le cyclone/réservoir. L'eau produite par la pile est récupérée côté cathodique par un système de trop plein (séparateur (n°4)) assurant un niveau constant d'eau dans le cyclone/réservoir (n°3). Le séparateur/condenseur (n°5) évacue automatiquement l'eau produite côté anodique. Cette solution technique permet d'avoir un seul circuit d'eau pour le refroidissement et l'humidification des gaz et de la membrane. Elle permet aussi une évacuation automatique de l'eau produite.

III.1.1.2.2.3. Mesure et contrôle

L'automate de sécurité permet le fonctionnement autonome de la pile à combustible. Le principal paramètre à contrôler est la différence de pression entre les côtés anodique et cathodique, qui doit restée inférieure à 500 mbar.

L'évolution dans le temps de la pression des gaz re-circulés, du courant et de la tension de la pile à combustible est décrite lors d'un essai à la Figure III-6.

Le système pile est ouvert à l'état initial (étape n°0).

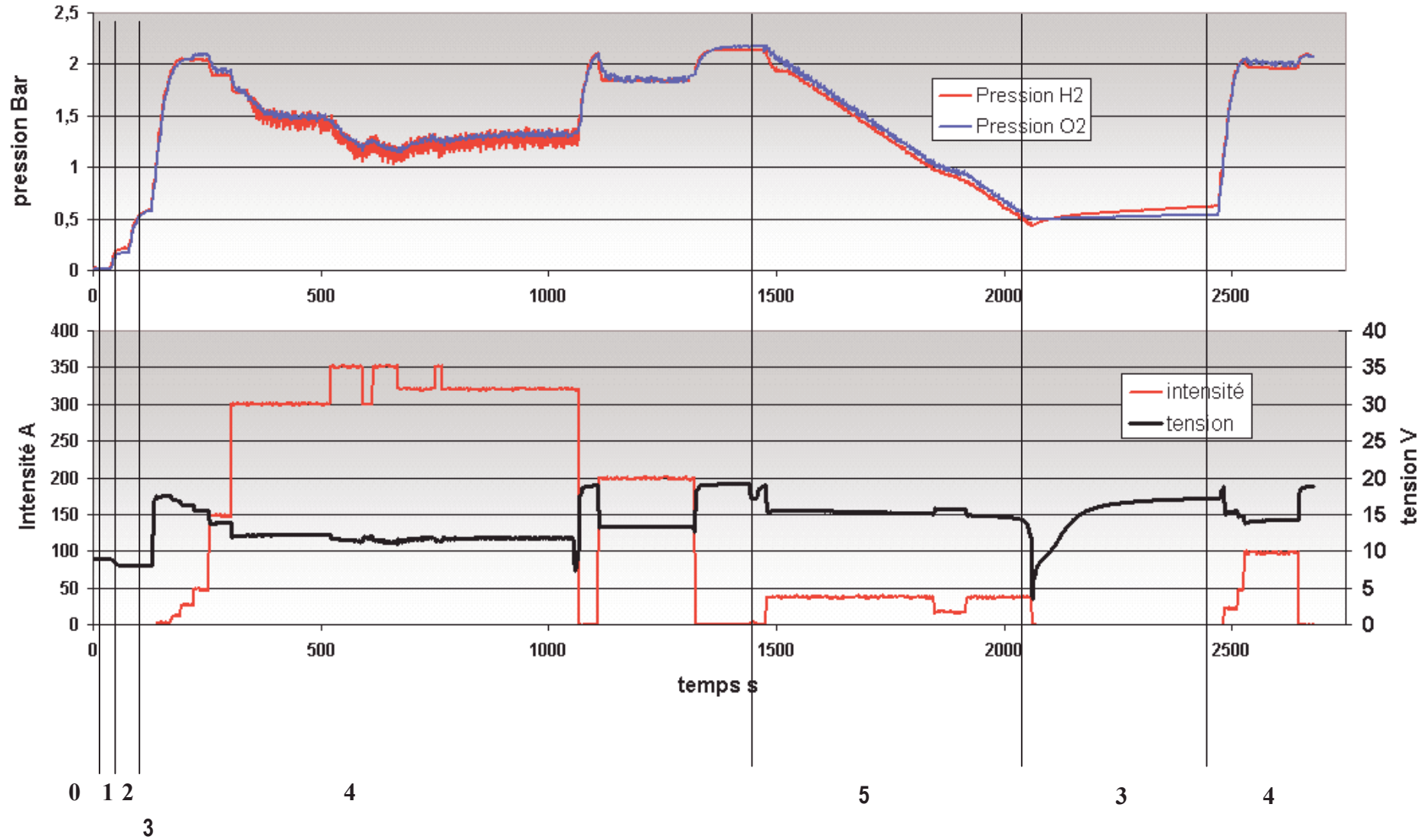
Lors du démarrage (étape n°1), le système est purgé. Le côté anodique étant moins volumineux, l'augmentation de pression est plus rapide côté H₂. La différence de pression est régulée par la limitation de l'entrée du gaz côté anodique via la fermeture de la vanne Ev_N. Un équilibre s'établit, la pression est maintenue pendant 30 secondes. La pompe de re-circulation fonctionne pendant cette phase à un régime minimal (fréquence = 5 Hertz, 10 % de puissance maximale).

Après la purge, le périphérique est rempli d'azote à une pression de 0,5 bar (variable) (étape n°2). On régule encore l'entrée d'azote côté anodique par la vanne Ev_N. La pompe est toujours en fonctionnement minimal.

Lorsque la pression est atteinte, la pompe de re-circulation est arrêtée, la pile à combustible est alors en phase de veille (étape n°3).

Si la pile doit fournir de l'énergie, les gaz purs entrent dans le système par ouverture des vannes Ev_in (étape n°4). La montée en pression est régulée par la fermeture des vannes d'entrée des gaz Ev_in. La pompe de re-circulation des gaz et la pompe à eau sont en fonctionnement : la vitesse des moteurs est proportionnelle à l'intensité (avec un régime minimal). La pile consomme les gaz purs, créant ainsi une dépression dans le système, rétablie par les détendeurs.

Figure III-6 : Evolution dans le temps de la pression des gaz recirculés, du courant, de la tension et de 2 températures de la pile à combustible au démarrage de l'appareil (0 : arrêt ; 1 : purge ; 2 : remplissage d'azote (P = 0,5 bar) ; 3 : veille ; 4 : entrée des gaz purs (Pmax = 2 bar) ; 5 : mise en veille – consommation des gaz purs).



Au cours de cette phase, la tension des cellules est mesurée. Normalement, chaque cellule doit être surveillée afin de prévenir de la défaillance des membranes. Dans notre système, la mesure s'effectue par bloc de 3 cellules. Ce système de mesure de tension a été utilisé sur des modules commercialisés (dans le système Ballard, mesure par bloc de 2 cellules).

La tension monte brutalement à 18 V, tension à vide, dès l'arrivée des gaz dans le système. Un courant peut être consommé dès que la tension atteint 18 V. Le temps de réponse de la pile est inférieur à 1,5 s, temps d'acquisition.

On observe que la pression du système diminue lorsque le courant augmente. Cette diminution s'explique par l'emplacement des transmetteurs de pression. Placés en amont de la pompe de recirculation des gaz, ils sont sensibles à la dépression créée par la pompe. On considère que la pression en entrée de la pile reste égale à 3 bar.

Lorsque la pile n'est plus sollicitée (étape n°5), les gaz purs sont consommés par les cellules, l'intensité demandée est faible (40A). Cette énergie sera consommée par les moteurs ou par la batterie. La pression diminue jusqu'à 0,5 bar.

La pile est ensuite en phase de veille, au cours de laquelle l'azote « consommé » au cours du fonctionnement, est remplacé (étape n°3).

La phase d'arrêt d'urgence est activée par différentes alarmes:

- niveaux d'alarme bas de l'eau dans le cyclone (n°13)
- bouton d'alarme générale (Annexe 4)
- bouton d'arrêt de la pile (Annexe 4)
- différence de pression dangereuse (350 mbar)
- tension basse d'une cellule (0,4 V)

Cette phase de purge, non présentée sur la Figure III-6, débute par l'évacuation des gaz par les vannes de sortie (Ev_Atm). La dépression étant plus rapide côté H₂, l'évacuation de l'hydrogène est limitée par la fermeture de la vanne Ev_Atm. Lorsque la pression est inférieure à 0,5 bar, l'azote entre dans le système. Un régime s'établit. Il est maintenu 30 secondes. La pile ne sera remise en marche qu'avec l'intervention d'un opérateur.

La température de la pile à l'entrée du refroidissement est régulée par l'ouverture de l'électrovanne de refroidissement (Ev_Ref) entraînant la circulation de l'eau dans l'échangeur. On mesure aussi la température de l'oxygène/azote à la sortie de la pile, car elle est la plus proche de celle du cœur de la pile [28].

III.1.1.2.2.4. Mise au point et validation du périphérique

De la même façon que pour l'électrolyseur, le périphérique de la pile à combustible a été mis au point et validé préalablement à la mise sous tension des cellules. Les détendeurs mécaniques ont été réglés ainsi que les pressions et les temps de maintien des différentes étapes. Une fois les cellules connectées, la mesure des tensions et du courant des cellules a posé un problème. Il s'avère que la mesure du courant par l'intermédiaire d'un shunt perturbe l'ensemble des mesures de tension. Il a donc été décidé de ne pas mesurer le courant qui sera fourni par la charge dans un premier temps, et à terme par le convertisseur d'énergie (PMU).

III.1.1.3. Système de refroidissement

Les 2 composants électrochimiques nécessitent un système de refroidissement soit pour assécher les gaz dans le périphérique de l'électrolyseur, soit pour évacuer la chaleur produite par la pile et limiter sa température de fonctionnement. L'eau de ville est utilisée pour le refroidissement. La chaleur évacuée n'est pour le moment que mesurée.

III.1.1.4. Stockage

Dans le banc d'essai, la partie électrochimique est close : toute matière produite par l'électrolyseur est stockée puis consommée par la pile à combustible (et vice versa). L'étude du système complet évaluera les éventuelles pertes de matière du système.

III.1.1.4.1. Stockage de l'hydrogène et de l'oxygène

Un stockage de 0,4 m³ d'hydrogène et de 0,2 m³ d'oxygène est installé. On a choisi de ne pas comprimer le gaz, pour éviter la consommation parasite d'un compresseur. Le stockage des gaz s'effectue donc à 10 bar maximum, pression de fonctionnement de l'électrolyseur. Le stockage est de 4 Nm³ d'hydrogène, soit 14,2 kWh d'énergie chimique (PCS).

La Figure III-7 décrit les éléments de l'unité de stockage : clapet anti-retour, mesure de pression. Les bouteilles connectées en parallèle : 8 bouteilles de 50 litres pour le stockage de l'hydrogène, 4 pour le stockage de l'oxygène.

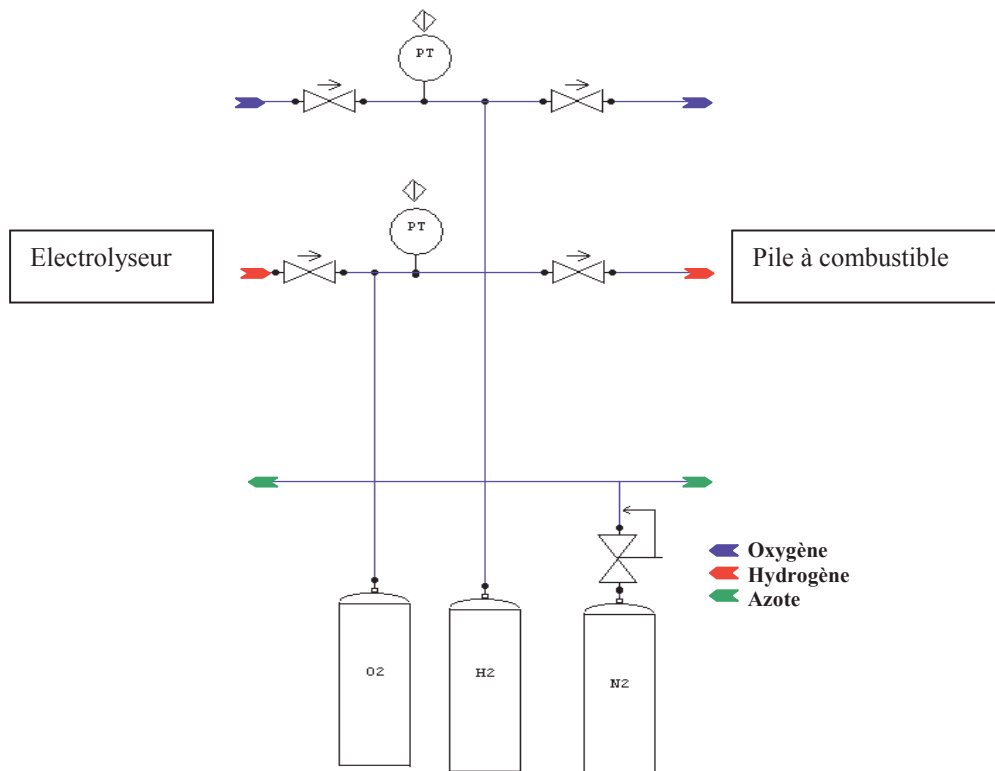


Figure III-7 : Stockage de l'oxygène et de l'hydrogène, produits par l'électrolyseur (à gauche) et consommés par la pile à combustible (à droite). Stockage de l'azote, consommable du système.

La mesure de pression dans les unités de stockage est nécessaire au fonctionnement de l'électrolyseur et de la pile à combustible. Elle permettra de plus, avec la mesure de température ambiante, d'évaluer la production et la consommation des gaz dans les deux appareils électrochimiques.

III.1.1.4.2. Stockage de l'eau

Le stockage tampon d'eau pure est de 3 litres. L'eau est produite par la pile et consommée par l'électrolyseur. La solution technique pour le stockage de l'eau n'est pas simple car l'eau produite par la pile peut contenir une certaine quantité de gaz (soluble). L'eau produite côté anodique et cathodique ne peut être stockée dans le même récipient sans traitement préalable. De plus, cette eau doit être protégée (notamment de l'atmosphère) pour conserver la pureté nécessaire au bon fonctionnement de l'électrolyseur.

Une solution a été testée et montre de bons résultats. Elle consiste en deux sacs à perfusion. Les deux entrées sont reliées aux deux séparateurs de la pile à combustible. Les deux sorties sont reliées ensemble à la pompe volumétrique propulsant l'eau vers l'électrolyseur. Un système de purge est ajouté dans la partie supérieure des sacs, afin d'évacuer l'hydrogène et l'oxygène dissous dans l'eau. Ce choix évite tout problème de surpression en aval de la pile à combustible et tout contact de l'eau avec l'atmosphère. Une entrée supplémentaire est nécessaire pour l'alimentation extérieure d'eau pure.

La consommation/production d'eau au cours des essais est évaluée par une mesure du poids de l'eau stockée.

III.1.1.4.3. Stockage de l'azote

Deux bouteilles de 50 litres à 200 bar sont connectées à un inverseur mécanique permettant le remplacement des bouteilles sans difficulté. Un détendeur permet d'amener l'azote à 2 bar au niveau de l'électrolyseur et de la pile à combustible (Figure III-7). Le contrôle du niveau de pression est visuel car la consommation n'est conséquente qu'en cas de purge des systèmes, c'est-à-dire avec la nécessité d'une intervention d'un opérateur.

L'azote peut être consommé lors du fonctionnement de la pile à combustible (fuite du système, évacuation par l'eau produite par la pile). Cette consommation devra être évaluée.

III.1.1.5. Batterie de sécurité

Deux batteries Fulmen de 12 V – 80 Ah sont connectées en série. Environ 2 kWh sont disponibles pour le démarrage et la sécurité ainsi que pour l'aide à la réponse transitoire du système.

III.1.1.6. PMU

Ce composant est décrit dans le chapitre II.4.2 et dans l'annexe 2. Il définit l'architecture électrique du système (bus DC 300V) et la stratégie de contrôle, c'est-à-dire le fonctionnement du système complet. Un automate intégré au module de conversion électrique

est programmé afin de contrôler les flux d'énergie au sein du système complet et d'optimiser l'utilisation de la production solaire.

Ce composant communique via des signaux digitaux avec l'automate de sécurité assurant le fonctionnement des appareils électrochimiques.

III.1.1.7. Acquisition de données

Le banc d'essai est instrumenté avec de nombreux capteurs : pressions, températures, tensions, intensités, ensoleillement. Chaque mesure est câblée à une boîte d'acquisition Agilent 34970A. Cette dernière est reliée à un ordinateur et scanne l'ensemble des 40 mesures en 0,5 secondes minimum. Un programme permet l'enregistrement de ces données et leur visualisation en temps réel sur l'écran de l'ordinateur. Les données sont scannées et enregistrées en 1,5 secondes minimum. Les données sont alors transférées et traitées sous Excel. Elles sont aussi utilisées par le logiciel Matlab/Simulink pour la validation des modèles (Chapitre IV).

III.1.1.8. Outils de contrôle

Alimentation de l'électrolyseur : Mircolab Power Supply, MXP, 30 V – 600 A.

Charge de la pile à combustible : Hocherl & Hackl, séries DS, 100 V – 400 A.

III.1.2. Mesures de sécurité

Les systèmes utilisant les technologies hydrogène ont une mauvaise image liée à l'hydrogène. Nous avons tenté dans ce chapitre de définir les dangers liés à ce système de production d'énergie. Trois types de dangers existent et la coexistence de ces dangers augmente leur importance. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre bibliographique, il n'existe pratiquement aucune norme imposée pour notre installation.

III.1.2.1. Dangers électriques

. Courant :

Le danger électrique provient de l'intensité traversant le corps. Elle dépend de la tension de contact et de la résistance du corps (loi d'Ohm). La résistance électrique du corps humain varie dans des proportions considérables (200 Ω à 6500 Ω) suivant l'état de la peau, les chaussures portées, la nature du sol, la tension de contact.

L'effet du courant électrique sur l'homme varie en fonction de son intensité et du temps de contact :

- 0,5 à 3 mA : perception de l'intensité (picotements) sans risques
- 10 à 15 mA pendant 2 mn : électrisation, crispation des muscles
- 25 à 30 mA pendant 35 s : électrisation, blocage de la cage thoracique, tétanisation des muscles, risque de mort
- 50 à 100 mA pendant 2 s : fibrillation du cœur, électrisation voire électrocution.

Pour déterminer les limites des tensions admissibles pour l'homme, en prenant en compte les effets physio-pathologiques du courant sur l'homme, la commission de normalisation de la norme NFC 15 100 a déterminé une courbe de sécurité dite courbe "S" (Figure III-8) qui fixe les limites des tensions de contacts applicables à l'homme en fonction des conditions d'influences externes (essentiellement de l'humidité) et du temps d'application de la tension de contact.

Elle définit une "tension limite de sécurité" (ULS) qui est la tension applicable à l'homme sans limite de temps. Ces niveaux de tension dépendent des conditions d'humidité et de la nature du courant : alternatif (AC) ou continu (CC).

- Pour les conditions normales : **ULS = 50 VAC** ou **120 VCC** (bureaux, pièces sans point d'eau, pièces non-carrelées)
- Pour les conditions humides : **ULS = 25 VAC** ou **60 VCC** (Salles de bains, pièces avec carrelages...)
- Pour les conditions de grande humidité : **ULS = 12 VAC** ou **30 VCC** (locaux de travail avec présence d'eau quasi permanente, locaux dont le nettoyage se fait aux jets d'eau régulièrement...)

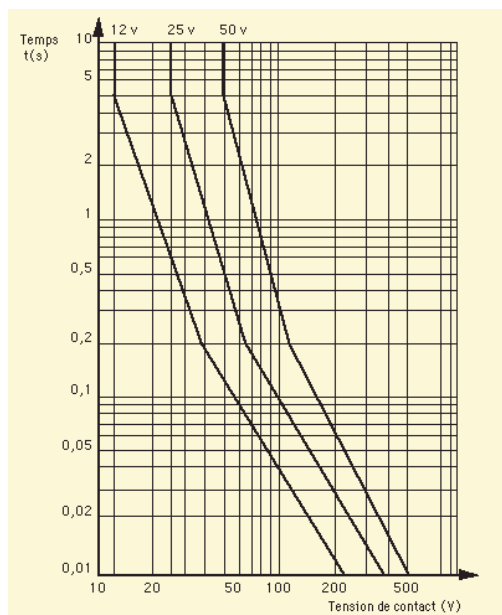


Figure III-8 : Courbe « S » de sécurité reliant la tension, le temps et les conditions de contact. [29]

Dans notre installation, les risques électriques existent et des précautions sont nécessaires. La pile à combustible et l'électrolyseur présentent un faible danger électrique car les tensions sont inférieures à 50 V. Par contre, la tension du champ solaire étant d'environ 200 V, il est nécessaire de prendre des mesures de sécurité (mise à la terre des châssis) et évidemment de manipuler prudemment les câbles (câblage de nuit).

• Source de points chauds et d'arcs électriques :

Dans un système contenant des gaz carburants (hydrogène), il est important de contrôler les sources d'allumage, c'est-à-dire les points chauds et les arcs électriques. Les appareils électriques en contact direct avec l'hydrogène doivent être choisis anti-déflagrant (ADF).

III.1.2.2. Dangers gazeux

Dans le système étudié, les risques gazeux sont nombreux : il y a production et stockage d'hydrogène et d'oxygène, utilisation d'une pile à combustible, ainsi que stockage haute pression d'azote utilisé pour la purge des appareils électrochimiques.

- **Hydrogène** : gaz inodore, incolore, inflammable et non toxique.

L'hydrogène a un pouvoir calorifique très élevé. Il brûle dans l'air dès qu'une source d'ignition est présente. Le danger devient important lorsque l'hydrogène et l'air se retrouvent dans des proportions comprises entre 4 % et 96 %. Si le mélange est dans ces proportions et qu'un point chaud apparaît, il y a inflammation voire explosion si le mélange atteint 60 à 70 % d'hydrogène dans l'oxygène dans un espace clos. Cette caractéristique est identique dans le cas de nombreux combustibles mais l'hydrogène nécessite une très faible quantité d'énergie pour s'enflammer.

Par contre, ce combustible a de nombreux avantages qui le rend moins dangereux que le gasoil ou le gaz naturel. L'hydrogène est plus léger que l'air et il monte donc rapidement dans l'atmosphère s'éloignant ainsi des zones humaines et des sources d'allumage. L'hydrogène en combustion a une très faible émissivité : la chaleur dégagée est donc faible. Une personne n'est brûlée que si elle est très proche de la flamme.

La mesure de sécurité la plus simple est d'utiliser et de stocker ce gaz dans un endroit bien ventilé. Les sources d'allumage doivent être maîtrisées. Le stockage doit être mis à la terre.

Matériaux conseillés : aucune contrainte, sauf joint souple.

- **Oxygène** : gaz inodore, incolore, oxydant et non toxique.

L'oxygène entretient la combustion. Les mesures de sécurité sont finalement plus nombreuses que dans le cas de l'hydrogène. Les composants utilisés sur la ligne oxygène ne doivent contenir ni graisse ni huile et doivent être nettoyés. En effet, les matières organiques peuvent brûler instantanément en atmosphère suroxygénée. Cette source de chaleur peut amorcer un « coup de feu » : combustion explosive d'une canalisation ou de ses composants. Les conséquences peuvent être graves (projections de métal en fusion). Il est aussi conseillé de ne pas comprimer l'oxygène brutalement (montée à haute température du gaz).

Les canalisations doivent donc être sélectionnées pour l'usage de l'oxygène. La manipulation de l'oxygène est délicate.

Matériaux conseillés : métal nettoyé, joint en Viton.

- **Azote** : gaz inodore, incolore, inerte et non toxique.

Outre, le risque d'asphyxie, ce gaz inerte n'est pas dangereux.

Matériaux conseillés : aucune contrainte, sauf joint souple.

- **Gaz sous pression** :

Les réservoirs sous pression sont de nos jours équipés afin d'éviter l'effet fusée ou tourbillon en cas de défaillance du robinet.

Normes : Il existe de nombreuses normes pour le stockage de gaz mais elles ne s'appliquent pas dans notre installation en raison de sa taille et de sa pression. Concernant la coexistence

du stockage de l'hydrogène et de l'oxygène, il est conseillé de séparer les deux stockages ou de placer un mur de séparation. De nouvelles normes doivent être édictées concernant l'hydrogène. En effet, un comité technique International Standard Organisation TC 197 « technologies de l'hydrogène » a été créé en 1990 afin d'élaborer des normes dans le domaine des systèmes et dispositifs pour la production, le stockage, le transport, le mesurage et l'utilisation de l'hydrogène.

III.1.2.3. Dangers chimiques

- **Potasse 30%** : liquide blanc, inodore, corrosif et toxique.

L'hydroxyde de potassium liquide est corrosif. Les lésions encourues dans le cas d'un contact avec la peau et les yeux sont des brûlures graves irréversibles voire une cécité. Il y a aussi un danger lors de l'inhalation de poussière et de l'ingestion. Pour toute manipulation de potasse, il est essentiel de porter un vêtement et des lunettes de protection. Après contact, se laver abondamment à l'eau.

Matériaux conseillés : acier inoxydable, joint en téflon ou PFA.

III.1.2.4. Pile à combustible et électrolyseur

Dans une pile à combustible, l'hydrogène et l'oxygène ne sont séparés que par une très fine membrane. Aucune norme n'est imposée dans le domaine de pile à combustible. Un comité technique International Electrotechnical Commission TC 105 « technologies des piles à combustible » a été créé en 1996 afin d'élaborer des normes pour les applications stationnaires et mobiles. Les électrolyseurs doivent être conformes aux normes imposées aux systèmes de production de gaz.

III.1.2.5. Conclusion

Plusieurs mesures de sécurité doivent être prises bien que peu de normes ne l'imposent. De nombreux groupes travaillent actuellement sur la normalisation des installations hydrogène et sur les piles à combustible. La mesure de précaution prise est l'accès limité à l'installation. Des gestes simples sont imposés lors de l'approche du système : distance de sécurité, port de lunettes de protection, pas de sources d'allumage.

III.1.3. Conclusion

Cette étape de réalisation du banc d'essai a été longue en raison de la faible disponibilité d'éléments de contrôle adaptés à notre application. Le banc d'essai est maintenant en place sur le toit du laboratoire. Les périphériques développés pour les composants électrochimiques sont parfaitement adaptés à leur utilisation dans un système autonome de génération d'énergie. En effet, une fois mis en route, l'électrolyseur et la pile à combustible fonctionnent automatiquement et ont une position de veille évitant l'arrêt complet du composant lorsqu'il n'est pas utilisé. Grâce à cette position de veille, le temps de réponse des composants est très court.

Finalement, l'appareil central du système qui assure la gestion et la conversion d'énergie au sein du système n'est pas encore livré. Le retard de livraison est notamment lié à la tension de la pile à combustible non adaptée à l'architecture électrique sélectionnée. L'analyse expérimentale suivante est donc basée sur les expérimentations réalisées au laboratoire sur les composants électrochimiques. Des résultats expérimentaux du PMU ont été délivrés par le fournisseur.

III.2. Caractérisation des composants

L'analyse des composants permet de définir le rendement du système de stockage d'électricité par l'intermédiaire de l'hydrogène et de l'oxygène. Elle fournit aussi les informations nécessaires à leur modélisation. Les données expérimentales du PMU ont été communiquées par le fournisseur.

III.2.1. Electrolyseur

La Figure III-9 montre les points de fonctionnement du module. Les triangles clairs correspondent aux essais réalisés au laboratoire. Les deux autres séries de points sont des points de fonctionnement du même module, intégré au banc test du fournisseur.

Le périphérique fabriqué au laboratoire, décrit au chapitre précédent, permet d'obtenir les mêmes performances que le périphérique industriel de Hydrogen Systems.

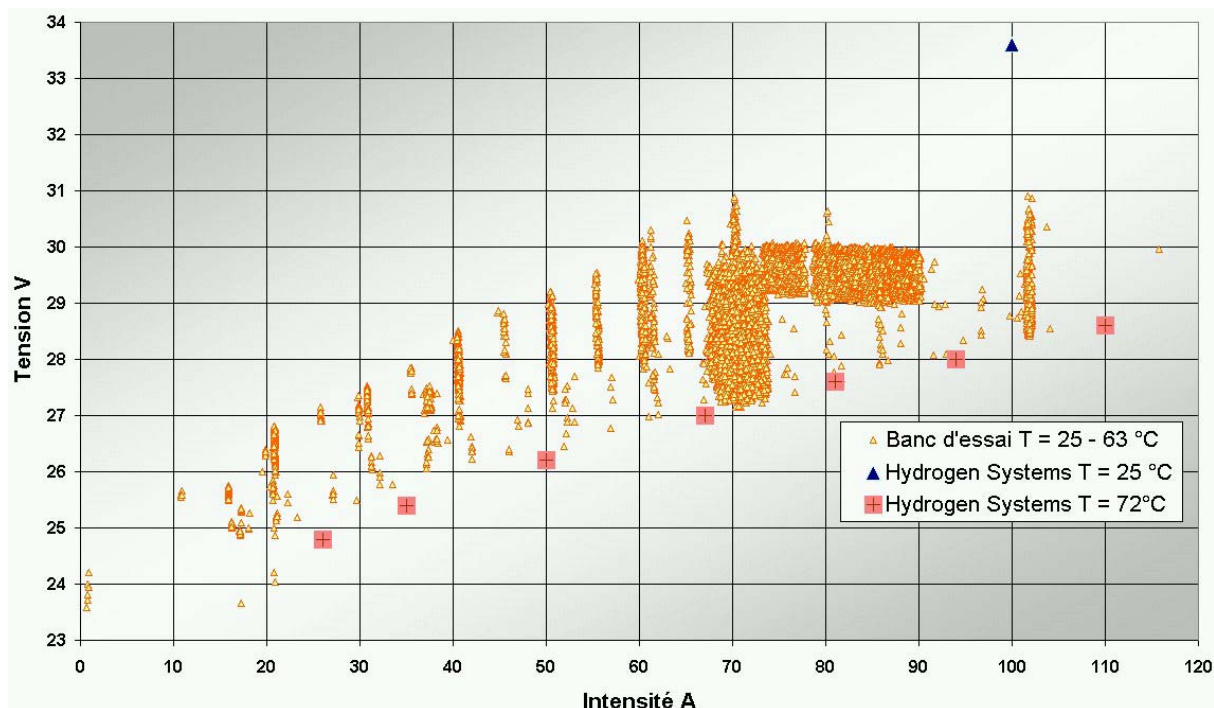


Figure III-9 : Point de fonctionnement du module d'électrolyseur de 3,6 kW du banc d'essai. Essais du fournisseur Hydrogen Systems (25 et 72 °C) et essais réalisés au laboratoire dans le périphérique développé (température comprise entre 25 et 63 °C).

III.2.1.1. Influence de la température

La Figure III-10 décrit les points de fonctionnement de l'électrolyseur pour différentes températures. La pression est de 4,6 bar.

La température de fonctionnement est la moyenne des températures mesurées aux entrées et sorties des cellules. La pression est la moyenne des pressions mesurées sur les séparateurs.

On observe tout d'abord un bruit très important au niveau de la mesure de la tension totale de l'électrolyseur, rendant très difficile l'analyse. En fait, cette tension provient de deux demi mesures que l'on ajoute, augmentant les bruits importants de chaque mesure. Nous n'avons pas pu résoudre ce problème. La tension affichée par l'alimentation est pourtant fixe ainsi que celle mesurée sur les cellules par un voltmètre. D'autres tests doivent être réalisés en utilisant la tension stable fournie par l'alimentation. Sur la figure, sont ajoutées les courbes U-I caractéristiques d'un électrolyseur.

Les performances de l'électrolyseur sont fonction de la température. La tension diminue lorsque la température augmente. L'influence de la température augmente avec l'intensité.

On observe la même influence de la température à toutes les pressions de fonctionnement testées (2 à 10 bar).

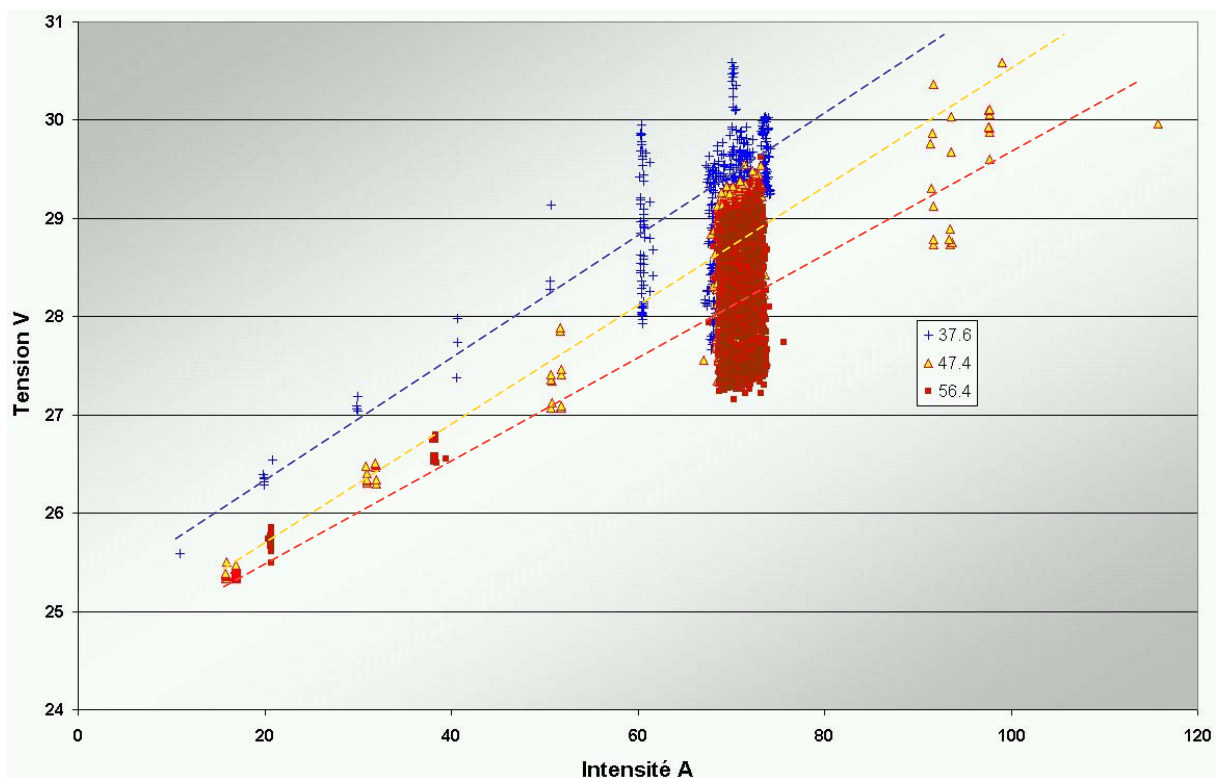


Figure III-10 : Performance de l'électrolyseur 3,6 kW du banc d'essai. Courbes U-I en fonction de la température de l'électrolyte – P = 4,6 bar – T = 37,6 °C, 47,4 °C et 56,4 °C.

III.2.1.2. Influence de la pression

Les Figure III-11 et Figure III-12 montrent les performances de l'électrolyseur pour différentes pressions à deux niveaux de température. La température n'étant pas contrôlée dans le périphérique, il est difficile d'obtenir deux courbes à température identique. L'influence importante de la température et le bruit important ne permettent pas de conclure de manière évidente de l'influence de la pression.

A 40-45°C, il semble que l'augmentation de la pression améliore les performances de l'électrolyseur. A 55-60 °C, l'électrolyseur ne semble pas affecté par la pression.

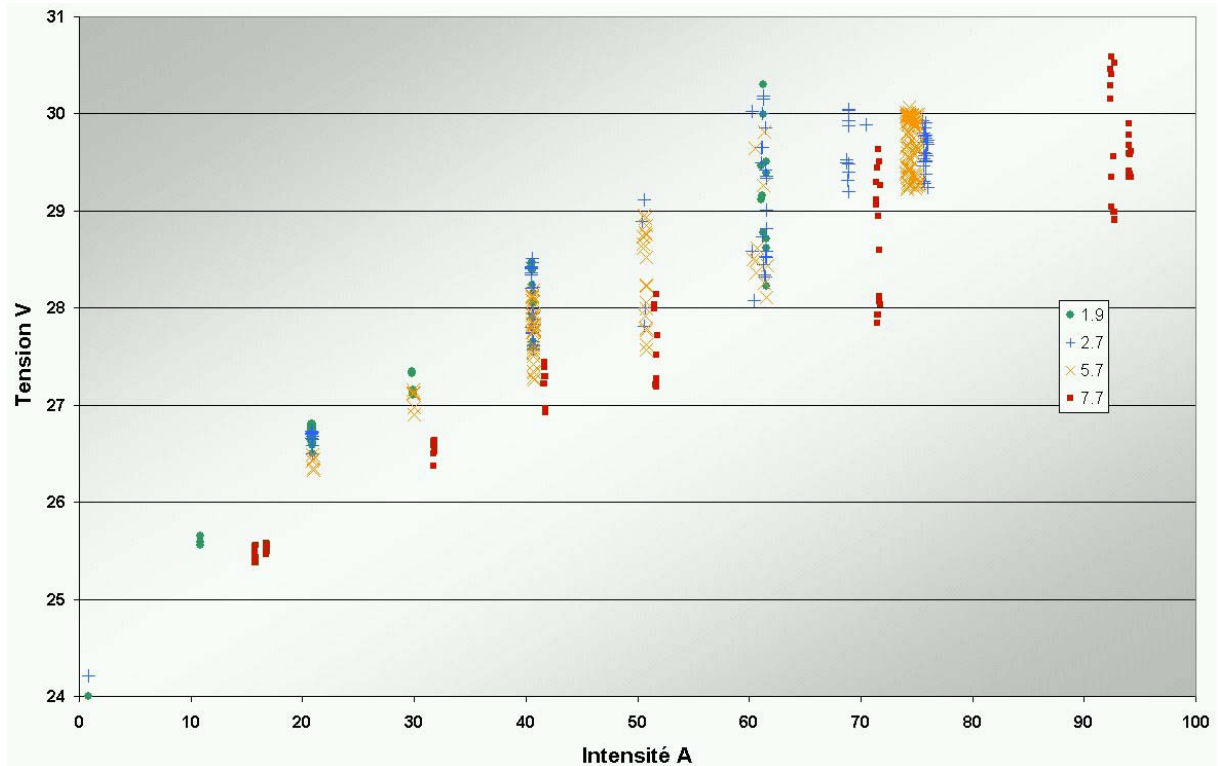


Figure III-11 : Performance de l'électrolyseur 3,6 kW du banc d'essai. Courbes U-I en fonction de la pression – T = 40 – 45 °C.

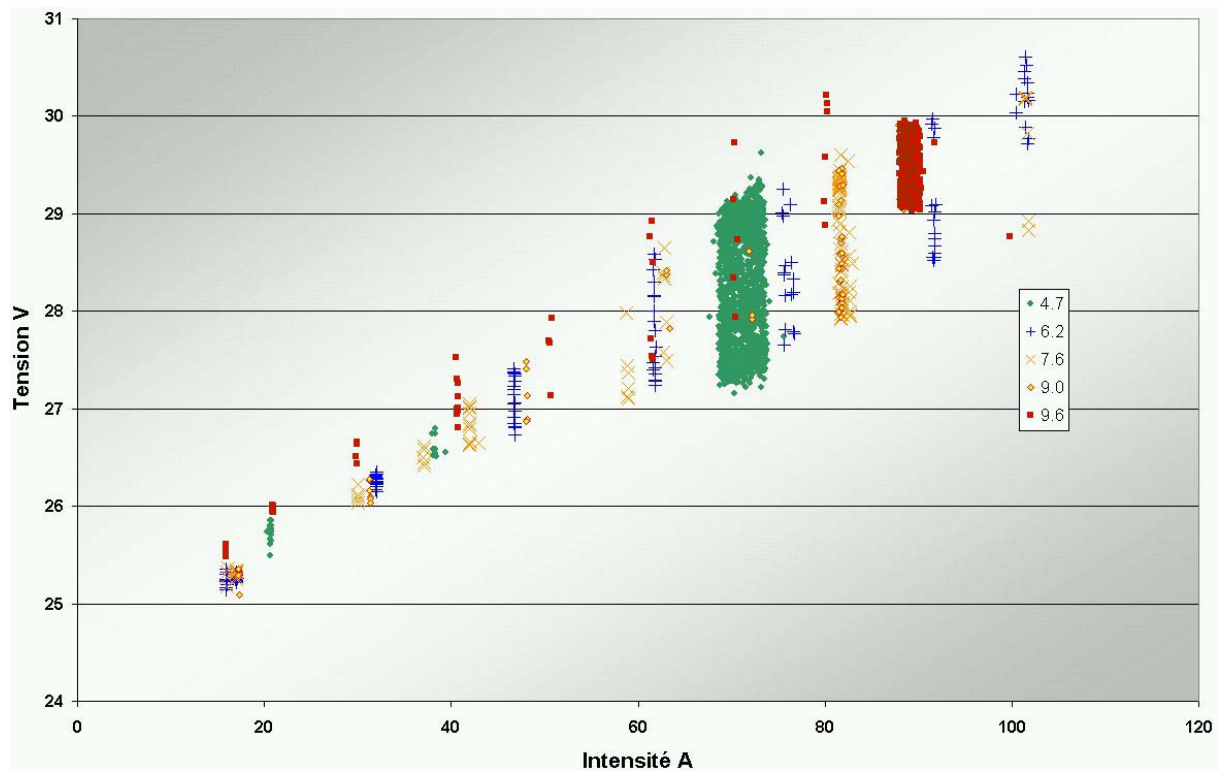


Figure III-12 : Performance de l'électrolyseur 3,6 kW du banc d'essai. Courbes U-I en fonction de la pression – T = 55 – 60 °C.

III.2.1.3. Essais thermiques

Des essais ont été réalisés à puissance thermique constante afin d'évaluer le comportement thermique de l'électrolyseur pour la modélisation.

La puissance thermique dégagée par un composant électrochimique se calcule simplement à partir de sa tension et de son intensité.

$$P_{th} = \pm n_c \times (U - U_{in}) \times I \quad \text{Équation III-1}$$

(+ pour l'électrolyseur, - pour la pile)

avec P_{th} puissance thermique (W)
 n_c nombre de cellules électrochimiques
 U tension par cellule (V)
 U_{th} potentiel thermoneutre (V)
 I intensité (A)

Deux températures sont mesurées (Figure III-13):

- La température de l'électrolyte, moyenne de 4 températures placées aux entrées et sorties des cellules.
- La seconde a été ajoutée en surface des cellules. Ce dernier thermocouple est placé en haut du module électrochimique, proche de la sortie de l'hydrogène.

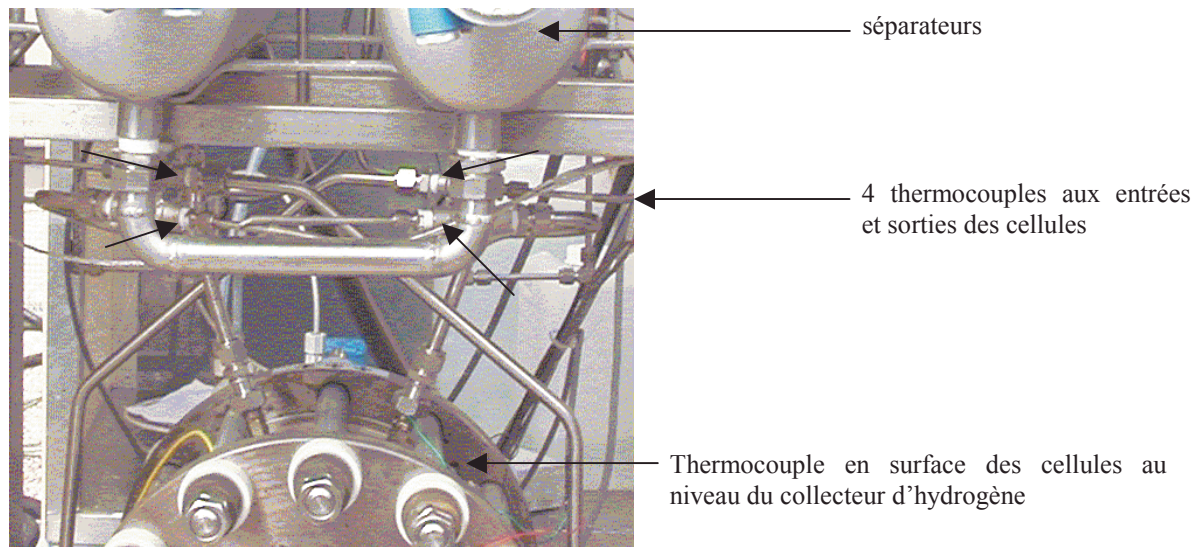


Figure III-13 : Emplacement des thermocouples de l'électrolyseur.

Sur la Figure III-14, entre 10h15 et 13h00, la puissance thermique imposée est de 500 W puis l'électrolyseur n'est plus alimenté jusqu'à 14h30. Ensuite, l'appareil est à nouveau alimenté avec une puissance thermique de 80 W jusqu'à 16h15 puis de 30 W jusqu'à la fin de l'essai.

Les deux températures évoluent de manière comparable lorsque l'appareil est alimenté. L'électrolyte circule lorsque des gaz sont produits, permettant ainsi l'homogénéisation de la température dans tout le périphérique.

Lorsque l'intensité est à zéro, la circulation s'arrête : le refroidissement de l'électrolyte n'est plus homogène. Au niveau du périphérique (courbe bleue), la température chute rapidement. Les 4 thermocouples sont placés sur les canalisations entre les cellules et les séparateurs. La surface d'échange avec l'extérieur est très importante. La température mesurée est donc plus faible au cours du refroidissement que la température moyenne du fluide. La température en surface des cellules refroidit lentement. Elle met en évidence la capacité thermique plus importante des cellules.

Lorsque vers 14h45, l'électrolyseur est à nouveau alimenté, l'électrolyte circule à nouveau. Les deux températures se rapprochent : la température dans l'électrolyseur s'homogénéise rapidement (5 mn). La température en surface diminue en raison d'entrée de fluide froid dans les cellules. La température mesurée en surface des cellules semblent être plus élevée que celle de l'électrolyte car elle correspond en fait à la température en sortie des cellules, côté hydrogène.

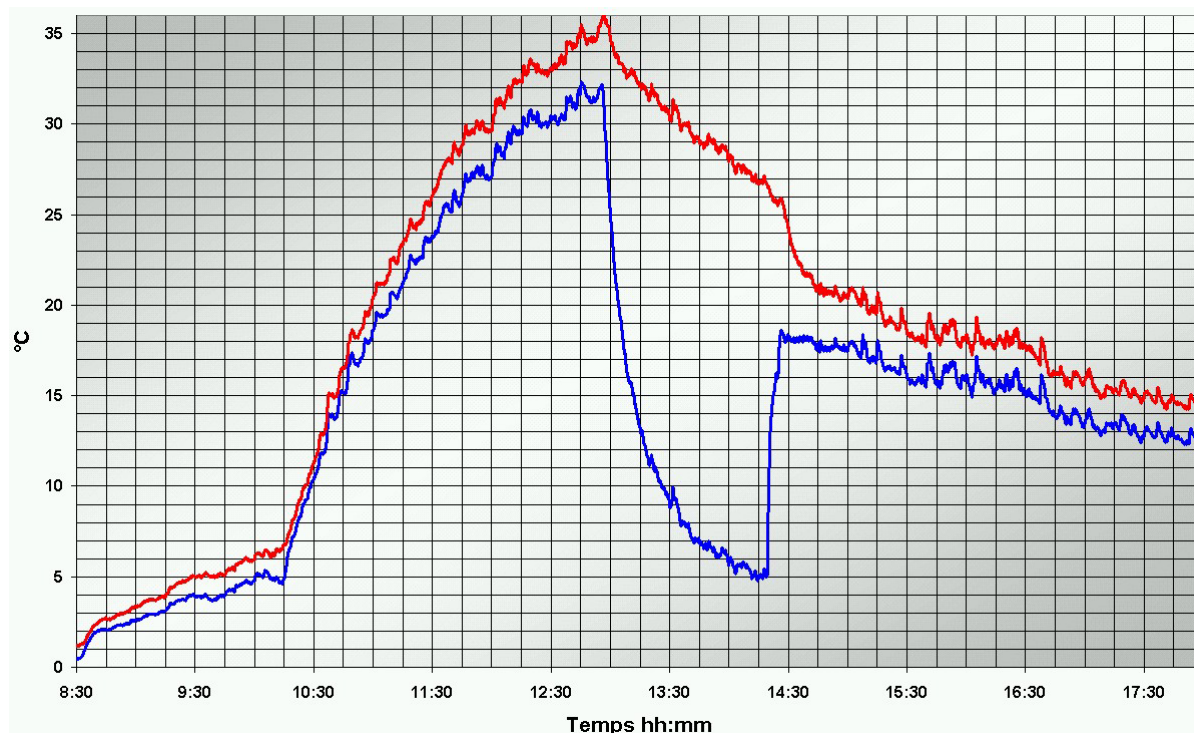


Figure III-14 : Evolution de la température de l'électrolyseur par rapport à la température ambiante au cours d'un essai à puissance thermique constante 500 W (rouge : température en surface des cellules ; bleu : température moyenne de l'électrolyte).

Cet essai montre que le fluide et les cellules ont un comportement thermique très différent. Mais l'échange entre les cellules et l'électrolyte est très important, permettant l'homogénéisation rapide de la température dans l'ensemble de l'électrolyseur lorsque il est alimenté. La température moyenne de l'électrolyte utilisée lors de la caractérisation électrique du composant est la plus représentative de la température du cœur des cellules. La température en surface du module correspond en fait à la température en sortie des cellules côté hydrogène.

III.2.1.4. Pureté des gaz

Ce paramètre dépend principalement de l'intensité et de la pression (Chapitre II). Seule l'influence de l'intensité a été mesurée.

Le protocole expérimental pour mesurer la pureté de l'oxygène est très long. Il est décrit à la Figure III-15. La courbe rouge correspond à l'intensité et la courbe verte au pourcentage de l'hydrogène dans l'oxygène.

Trois intensités sont testées : 85 A, 30 A et 17 A. La mesure de la pureté est effectuée ponctuellement toutes les 30 minutes par ouverture pendant 5 minutes de la vanne de mesure. Ce temps d'ouverture, déterminé au cours d'essais précédents, est nécessaire au renouvellement du gaz dans la ligne de mesure.

Lors des premières expérimentations, la vanne était constamment ouverte induisant une perte d'oxygène très importante ainsi qu'une consommation intrinsèque plus importante (la vanne est normalement fermée).

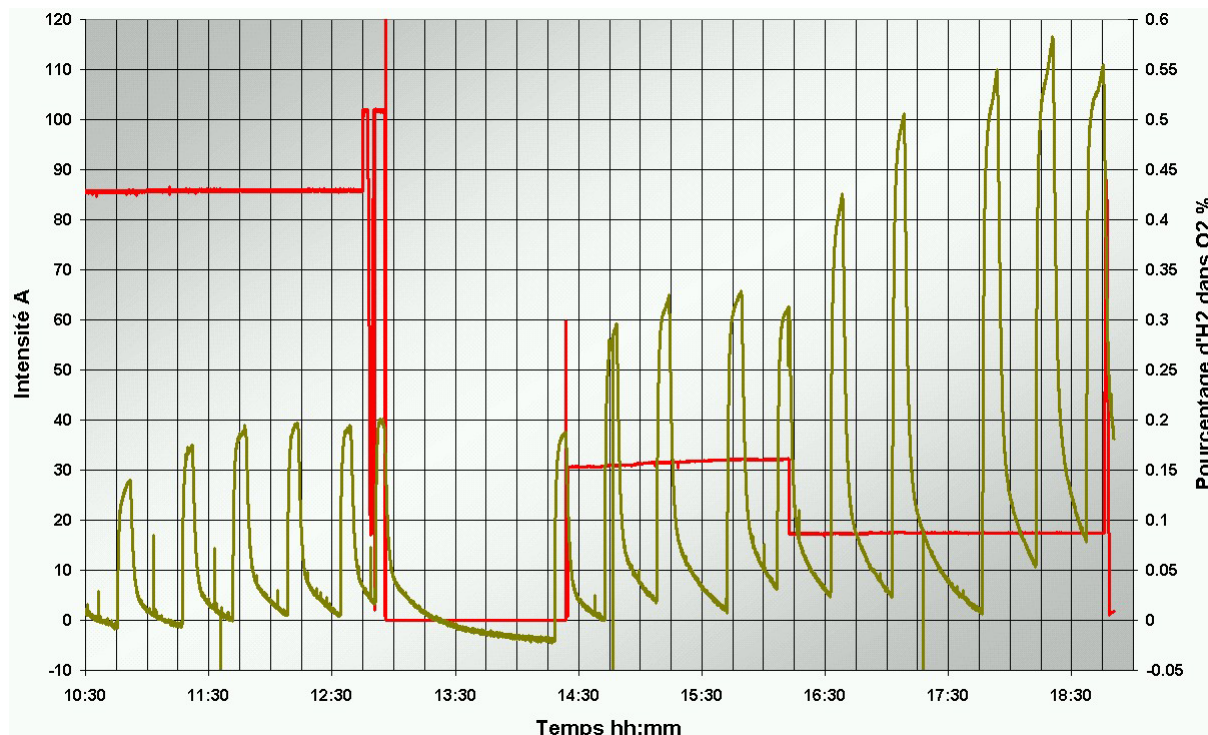


Figure III-15 : Evolution du pourcentage d'hydrogène dans l'oxygène au cours de l'essai de remplissage du stockage.

On observe sur la Figure III-15 que, lorsqu'on ouvre la vanne qui permet la mesure de pureté, la valeur mesurée monte rapidement à une valeur seuil. La pureté mesurée est alors celle de l'oxygène contenu dans le périphérique (côté oxygène). Elle dépend de l'état de fonctionnement de l'électrolyseur : au démarrage, après purge ou après avoir fonctionné à intensité variable.

La pureté de l'oxygène du périphérique évolue pendant un essai à intensité constante, jusqu'à atteindre une valeur constante correspondant à la pureté de l'oxygène produit par les cellules. Le temps de renouvellement du gaz contenu dans le périphérique est d'environ une heure et ne semble pas dépendre de l'intensité appliquée.

Influence de l'intensité :

La Figure III-16 montre les mesures relevées au cours des essais pour différentes intensités. Seules trois mesures correspondent à la pureté des gaz produits par les cellules. Les autres points sont la pureté du gaz contenu dans le périphérique, évacué vers le stockage.

On observe que la concentration de l'hydrogène dans l'oxygène diminue de manière exponentielle lorsque l'intensité augmente. La valeur maximale est de 0,55 % d'H₂ dans O₂ mesurée à 17 A, à 10 bar et 40 °C.

L'intensité minimale de l'électrolyseur étant 15 A, les gaz produits sont suffisamment purs pour être stockés.

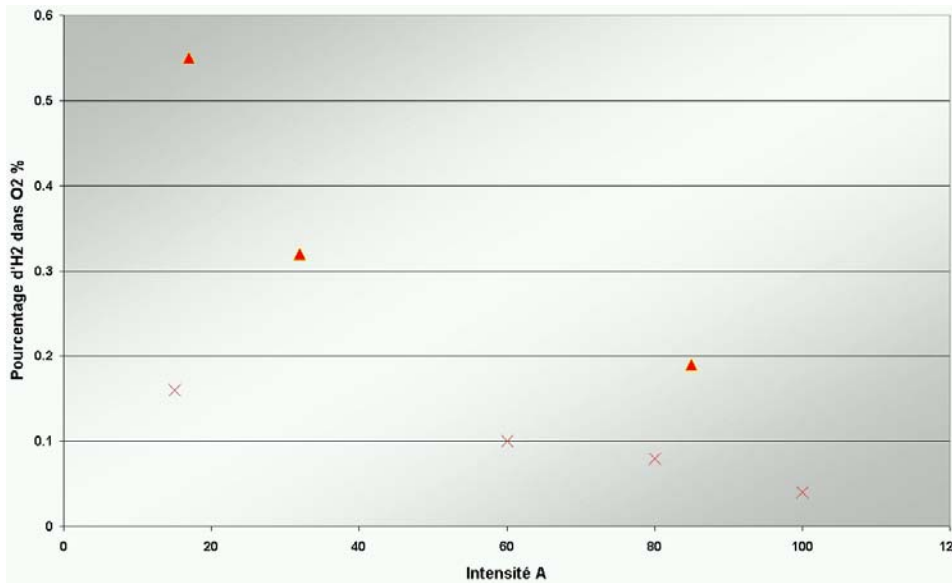


Figure III-16 : Influence de l'intensité sur la pureté de l'oxygène produit par électrolyse (Triangle : pureté du gaz produit par les cellules ; Croix : pureté du gaz contenu dans le périphérique).

Pour diminuer la perte d'oxygène, la mesure de concentration d'hydrogène dans l'oxygène est réalisée par intermittence. Or, cette mesure est une mesure de sécurité assurant de stocker un gaz suffisamment pure. L'appareil pour cette mesure doit permettre de réaliser une mesure en ligne, sans perte de gaz.

III.2.1.5. Rendement Faradique

La production de gaz de l'électrolyseur est calculée à partir des mesures de la pression dans le stockage et de la température ambiante. Le rendement faradique est calculé grâce à l'Équation II-5, en réalisant des essais à intensité constante.

Sur la Figure III-17, on observe l'évolution de la pression du stockage d'hydrogène et d'oxygène, réelle et théorique c'est-à-dire en considérant un rendement faradique de 100 %. L'intensité appliquée est 62 A.

On remarque que le rendement faradique η_F côté hydrogène est très proche de 1 ($\eta_F = 99\%$), tandis que les pertes d'oxygène sont beaucoup plus importantes ($\eta_F = 76\%$). Entre 16h50 et 17h25, la vanne permettant la mesure de pureté de l'oxygène est fermée. La pente de la montée en pression du stockage d'oxygène est modifiée pendant la période de fermeture de la vanne : elle est en fait parallèle à l'évolution théorique de la pression.

On peut donc considérer qu'au cours de cet essai, l'électrolyseur a un rendement faradique proche de 99 % et que le rendement faradique côté oxygène est diminué par la perte de gaz permettant la mesure de pureté.

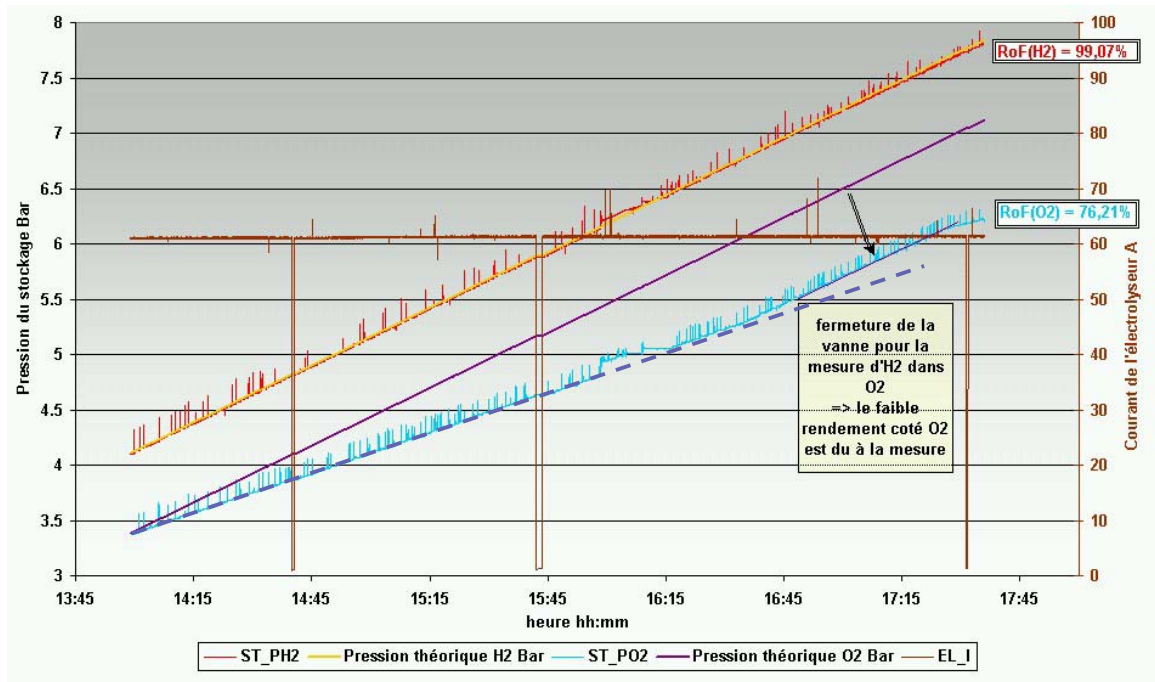


Figure III-17 : Essai de remplissage du stockage – Evolution de la pression du stockage, réelle et théorique (rendement faradique 100 %) – Essai à intensité d'électrolyse constante (62 A).

Influence de l'intensité :

Le rendement faradique dépend de l'intensité et de la température (Chapitre II.2.3.2). Des essais supplémentaires ont été réalisés mais l'influence des deux paramètres n'a pu être découplée. La température n'étant pas régulée par l'intermédiaire d'un échangeur, elle augmente lorsque l'on applique une intensité constante.

Le Tableau III-2 montre le rendement faradique mesuré pour différentes intensités.

Tableau III-2 : Mesures du rendement faradique anodique (Rof O2) et cathodique (Rof H2) de l'électrolyseur pour différentes intensités.

Intensité A	Rof H2	Rof O2	Mesure de pureté
17	97 %	90%	intermittente
32	95 %	83 %	intermittente
62	99 %	76 %	constante
82	100 %	99 %	intermittente
85	105 %	91 %	constante
100	100 %	98 %	intermittente

Le rendement faradique côté hydrogène varie entre 95 % et 105 %. Les valeurs supérieures à 100 % sont liées aux erreurs effectuées sur chaque mesure. Le calcul d'erreur est décrit ci-dessous (Équation III-2) :

$$\eta_F = \frac{d\left(\frac{P \times V}{R \times T_{amb}}\right)}{\frac{n_c \times I}{n \times F}} \quad \text{Équation III-2}$$

d'où
$$\frac{\Delta \eta_F}{\eta_F} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta T_{amb}}{T_{amb}} + \frac{\Delta I}{I}$$

avec	P	pression dans le stockage (Pa)
	V	volume du stockage (m ³)
	R	constante des gaz parfait (8,314 J.K ⁻¹ .mol ⁻¹)
	T _{amb}	température ambiante (K)
	t	temps (s)
	n _c	nombre de cellules d'électrolyse
	I	intensité (A)
	n	nombre de moles d'électrons échangées par mole d'eau (n = 2 pour l'hydrogène, n = 4 pour l'oxygène)
	F	constante de faraday (96 485 C.mol ⁻¹)

Les erreurs de mesure sont évaluées à :

- 1 % pour la pression
- 2 % pour le volume
- 0,5 % pour la température ambiante
- 1 % pour l'intensité

L'erreur sur le rendement faradique est donc de l'ordre de 5 %. De plus, la température à l'intérieur du stockage peut être légèrement différente de la température ambiante. Ces erreurs de mesure ne nous permettent pas de conclure de l'influence de l'intensité sur le rendement faradique. Côté oxygène, le rendement faradique dépend de la manière dont on effectue la mesure de concentration d'hydrogène dans l'oxygène.

Les valeurs moyennes de ces rendements faradiques sont donc évaluées à 99 %, coté H₂ et 93 %, coté O₂, lorsque la mesure est intermittente.

III.2.1.6. Consommation intrinsèque

Les périphériques des composants électrochimiques sont constitués d'appareil de mesure, d'électrovannes et de pompes. La consommation de la mesure et du contrôle n'a pas été dissociée entre l'électrolyseur et la pile. Sa valeur est inférieure à 10 W. Les autres consommations intrinsèques sont dissociées.

La consommation du périphérique de l'électrolyseur provient essentiellement des électrovannes. La pompe qui permet l'alimentation en eau fonctionne de manière ponctuelle (consommation faible : 10 W).

La Figure III-18 montre l'évolution de la consommation intrinsèque des électrovannes au cours d'un essai. La mesure d'hydrogène dans l'oxygène est aussi représentée afin de mettre en évidence la consommation intrinsèque liée à cette mesure de pureté. A l'arrêt, les électrovannes de l'électrolyseur consomment 35 W. En fonctionnement, la courbe de puissance présente de nombreux pics correspondant à l'ouverture et fermeture des électrovannes dont, notamment, celle de la mesure de sécurité. La consommation peut être considérée constante, égale à 114 W. En veille, les électrovannes consomment aussi 114 W.

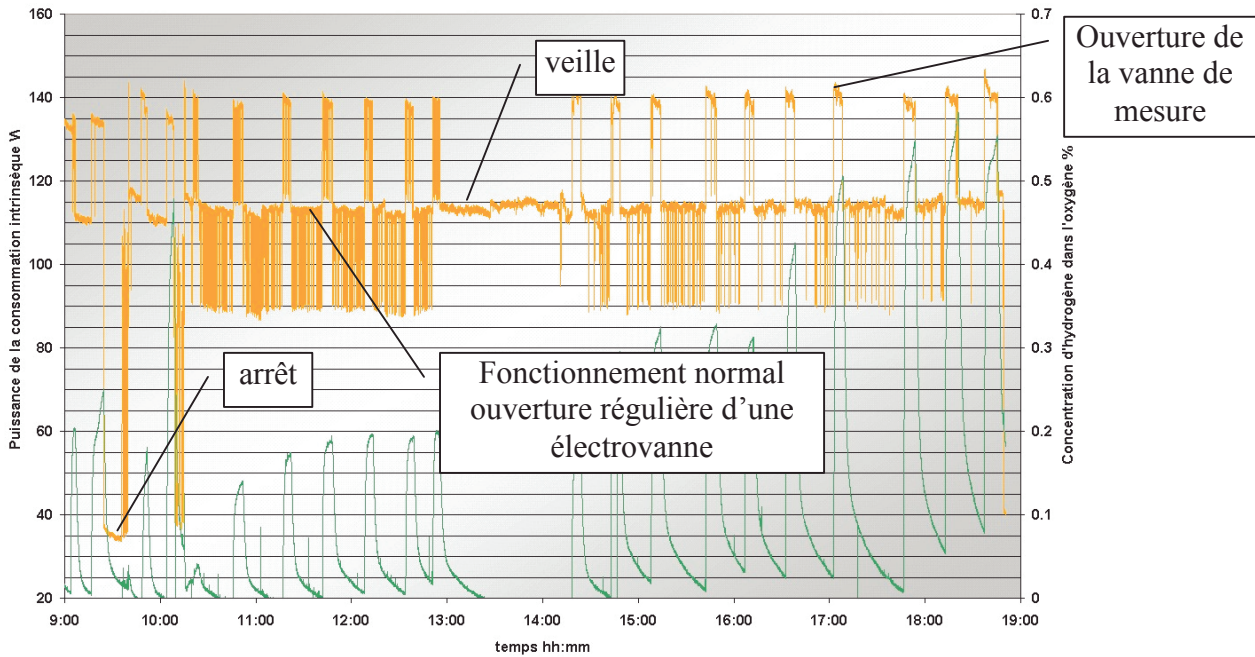


Figure III-18 : Consommation intrinsèque de l'électrolyseur.

Chaque électrovanne consomme en moyenne 20 W alors que les puissances théoriques annoncées sont 11,2 W ou 5,6 W selon l'électrovanne. Une étude doit être effectuée pour comprendre et résoudre ce problème. La consommation intrinsèque de l'électrolyseur était prévue à 16,8 W à l'arrêt, 72,8 W en fonctionnement et 61,6 W en veille. La consommation réelle est donc pratiquement deux fois plus importante.

III.2.2. Pile à Combustible

Les premiers essais réalisés permettent de déterminer l'influence des différents paramètres du système : la pression, la proportion de gaz purs dans le mélange gaz pur/azote et la température. L'influence de la pression n'a pas été évaluée. La pression est choisie à 2 bar car elle assure un réglage fin des détendeurs tout en permettant la consommation de 80 % de l'unité de stockage. Suite à ces essais, on a sélectionné les paramètres permettant d'obtenir les meilleures performances.

Les essais ont été limités car la pile à combustible a subi des dommages. D'importantes fuites au niveau des cellules empêchent maintenant toute manipulation. La cause de cette dégradation n'est pas bien définie. L'installation étant extérieure, elle est soumise aux fluctuations du temps. L'âge de la pile et les expériences très diverses réalisées pendant 10 ans de tests, peuvent aussi être mis en cause.

III.2.2.1. Influence du taux de concentration de gaz purs

Pour modifier le taux de concentration de gaz purs dans le système pile, on modifie la quantité d'azote introduite après la purge du composant.

Le calcul du taux de concentration des gaz purs dans le système est simple :

$$T_{GP} = \frac{P_{GP}}{P_{FC}} = 1 - \frac{P_{N_2}}{P_{FC}} \quad \text{Équation III-3}$$

avec T_{GP} taux de gaz purs (%)
 P_{GP} pression partielle des gaz purs (bar absolu)
 P_{FC} pression du système « pile » (bar absolu)
 P_{N_2} pression partielle d'azote (bar absolu)

On préférera parler de pressions partielles en hydrogène et en oxygène. La pression de fonctionnement est de 3 bar absolu.

Les résultats expérimentaux sont décrits à la Figure III-19. La pile est à 35 °C pour l'ensemble des points de fonctionnement. La température de la pile est la température mesurée à l'entrée du refroidissement.

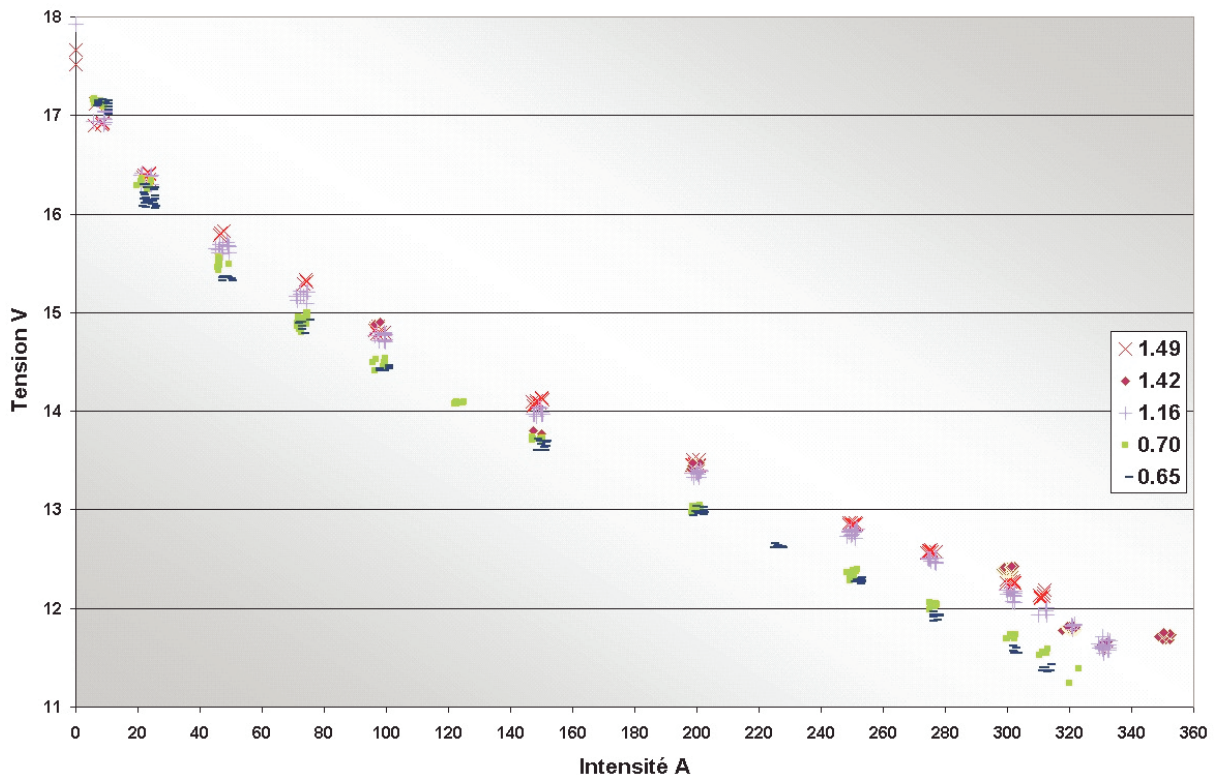


Figure III-19 : Influence de la pression partielle de gaz pur dans le système pile à combustible (P = 3 bar – T = 35°C).

On observe que la pression partielle en oxygène augmente la tension de la pile. L'influence de ce paramètre augmente avec l'intensité.

Dans la présentation des caractéristiques du composant (chapitre III.1.1.2.2.1), on annonce un point de fonctionnement dans le cas d'une alimentation en air et en H₂ pur, en mode ouvert. Les performances de la pile sont : 11 V – 330 A à 35 °C, avec une pression partielle en H₂ de 2,5 bar et en O₂ de 0,62 bar. Ce point de fonctionnement peut être comparé à la courbe (tiret bleu) correspondant à une pression partielle de 0,65 bar. Les performances sont comparables bien que les pressions partielles en hydrogène ne soient pas identiques pour les deux essais.

Ces expériences confirment que l'influence de la pression partielle en hydrogène sur les performances de la pile à combustible, est négligeable par rapport celle de la pression partielle en oxygène.

Conclusion

Le taux de gaz pur dans le système doit être choisi le plus élevé possible, sachant que la limite supérieure est 70 %. Par mesure de sécurité, le pourcentage de gaz pur dans le système est fixé à 50 %, soit 1,5 bar de pression partielle en gaz pur.

III.2.2.2. Influence de la température

La Figure III-20 et la Figure III-21 montrent les courbes U-I de la pile à combustible à différentes températures. La pression du système est de 3 bar absolu et le taux de gaz purs de 50 %.

Sur la Figure III-20, l'augmentation de température améliore les performances de la pile à combustible. Par contre, sur la Figure III-21, l'influence est inverse. La pile à combustible a une température optimale de fonctionnement. Un essai à intensité constante a montré que la tension de la pile augmentait jusqu'à 35°C, puis diminuait au dessus de cette valeur.

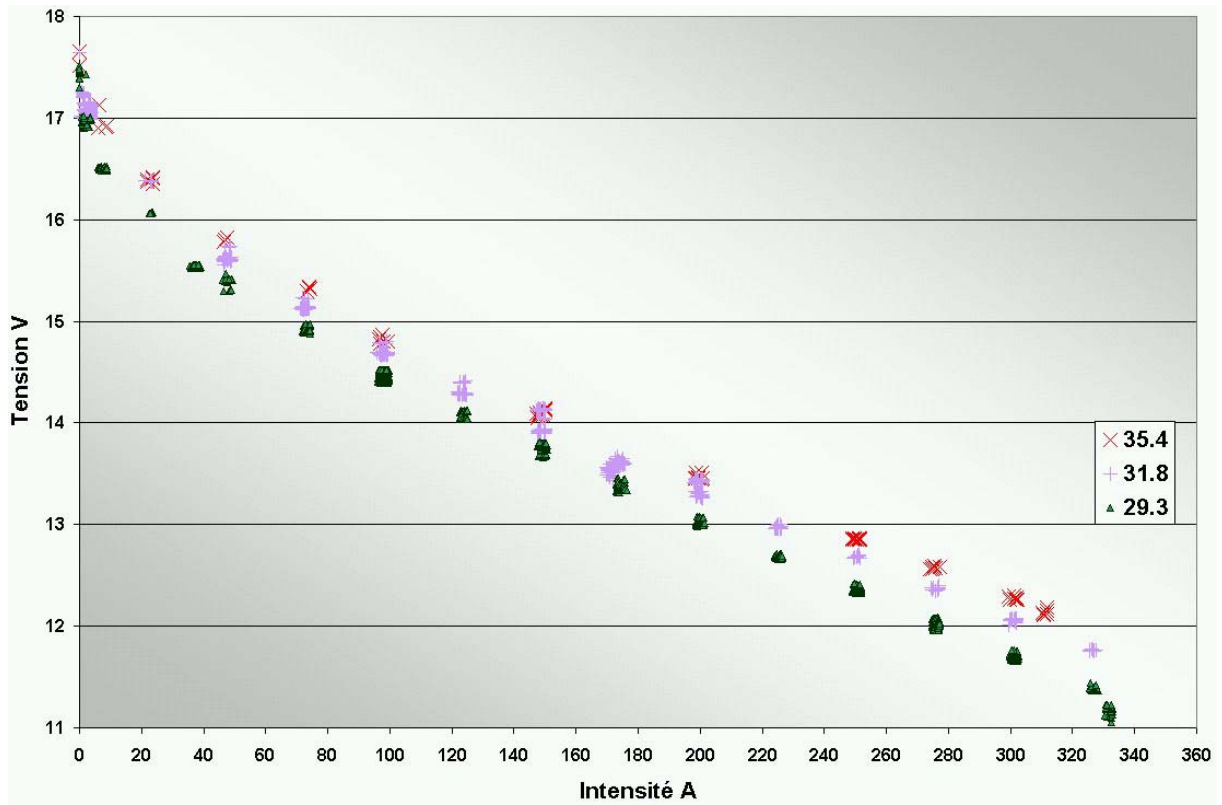


Figure III-20 : Influence de la température sur les performances de la pile à combustible (P = 3 bar abs. – P_{O₂} = 1,52 bar) – Températures inférieures à 35 °C.

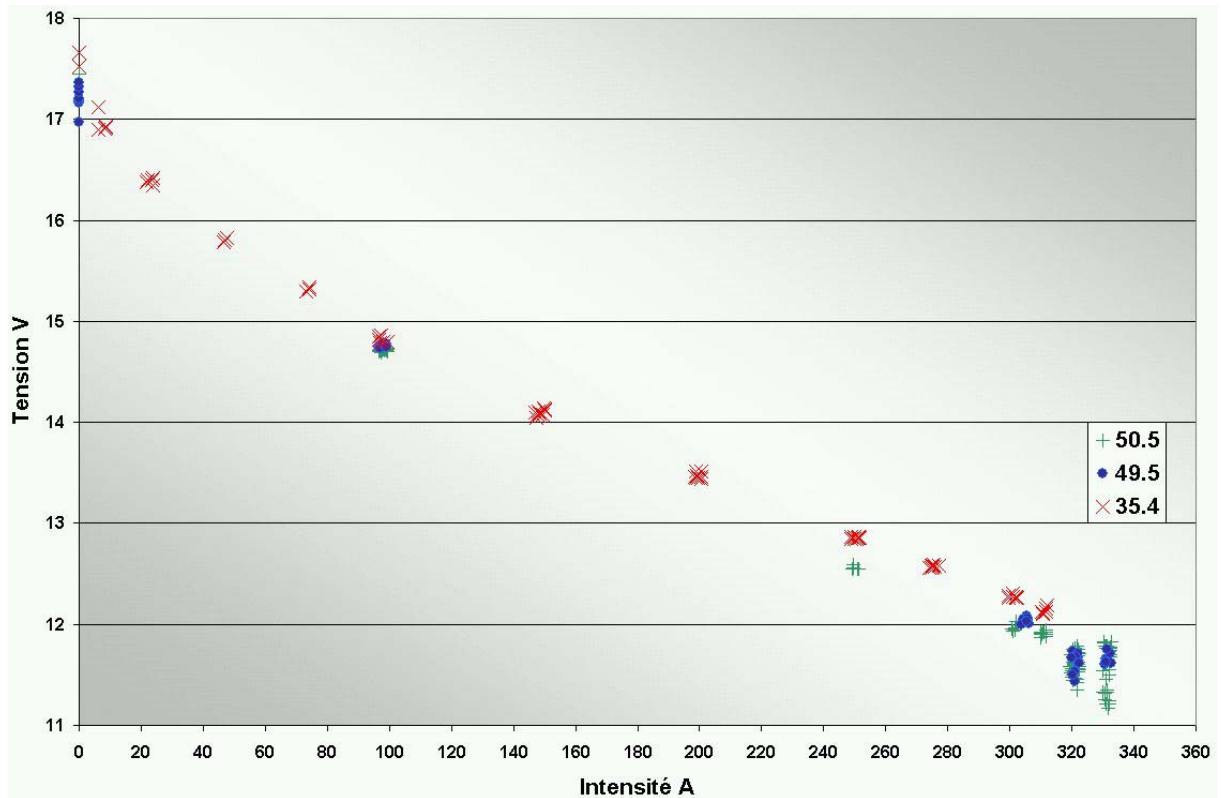


Figure III-21 : Influence de la température sur les performances de la pile à combustible (P = 3 bar abs. – P_{O₂} = 1,52 bar) – Températures supérieures à 35 °C.

III.2.2.3. Rendement faradique

Aucun essai n'a été réalisé pour mesurer ce facteur. Le rendement faradique de ce module est connu par les expériences précédentes : 99 % quelles que soient l'intensité et la température [28].

III.2.2.4. Consommation intrinsèque

La mesure de la consommation intrinsèque du périphérique de la pile à combustible n'a pas été effectuée. Seule la valeur à l'arrêt a été évaluée à 50 W.

Comme le fonctionnement de cet appareil est très proche de celui de l'électrolyseur (contrôle par électrovannes), la consommation des électrovannes peut être estimée. Elle devrait être de 100 W en veille et de 120 W en fonctionnement.

Comme pour l'électrolyseur, on peut calculer la consommation théorique des électrovannes, c'est-à-dire en considérant que la puissance consommée est égale à celle annoncée par le fournisseur. La consommation théorique du périphérique de la pile est de 34,2 W en veille et de 45 W en fonctionnement.

Il faut ajouter la consommation des pompes. La puissance des moteurs est de 30 W pour la pompe de circulation de l'eau et de 270 W pour la pompe de recirculation des gaz. Les 2 pompes sont régulées en fréquence diminuant leur consommation électrique en fonction de l'intensité demandée à la pile. Un régime minimal de puissance est imposé lorsque l'intensité est inférieure à 35 A, correspondant à 10 % de l'intensité maximale.

III.2.3. PMU

Les données expérimentales du PMU ont été fournies par le fabricant. Ces données couplées à leur connaissance industrielle des composants de conversion nous permettent de décrire le rendement des appareils de conversion de notre système.

Le rendement des convertisseurs dépend de la tension des composants et de la puissance délivrée par l'onduleur à la charge. Les équations sont formulées au chapitre IV.

Pour les deux générateurs, un survolteur est utilisé. Le rendement de conversion dépend de la tension d'entrée. Le champ photovoltaïque fonctionne à tension constante. La conversion de l'énergie solaire sur le Bus DC a donc un rendement constant, de l'ordre de 97 %. La pile à combustible fonctionne à une tension comprise entre 10 et 18 V mais cette tension s'est avérée trop faible pour être convertie sur le bus 300 VDC. Il a donc été décidé de remplacer la pile défectueuse par une pile dont la tension de fonctionnement est supérieure à 20 V. Dans ce cas, la Figure III-22 montre que le rendement de conversion augmente de 85 % à 20 V jusqu'à 96 % à 100 V.

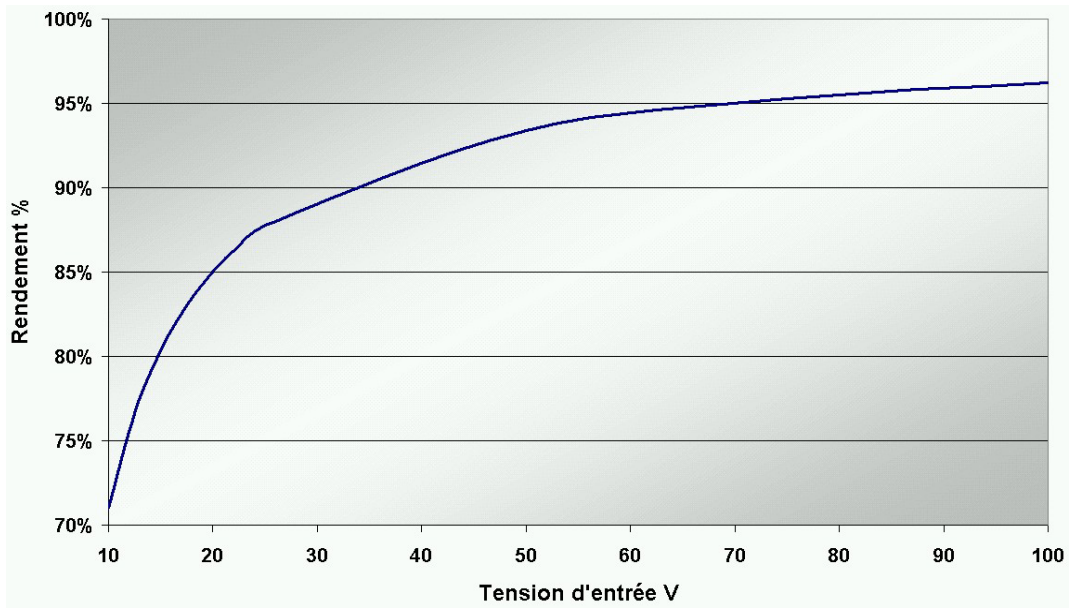


Figure III-22 : Rendement de conversion entre la pile à combustible et le Bus DC.

Entre le Bus DC et l'électrolyseur, l'élément de conversion est un abaisseur de tension. Son rendement dépend de la tension de sortie. La Figure III-23 montre que le rendement de conversion entre le bus DC et l'électrolyseur est presque constant de l'ordre de 92 %.

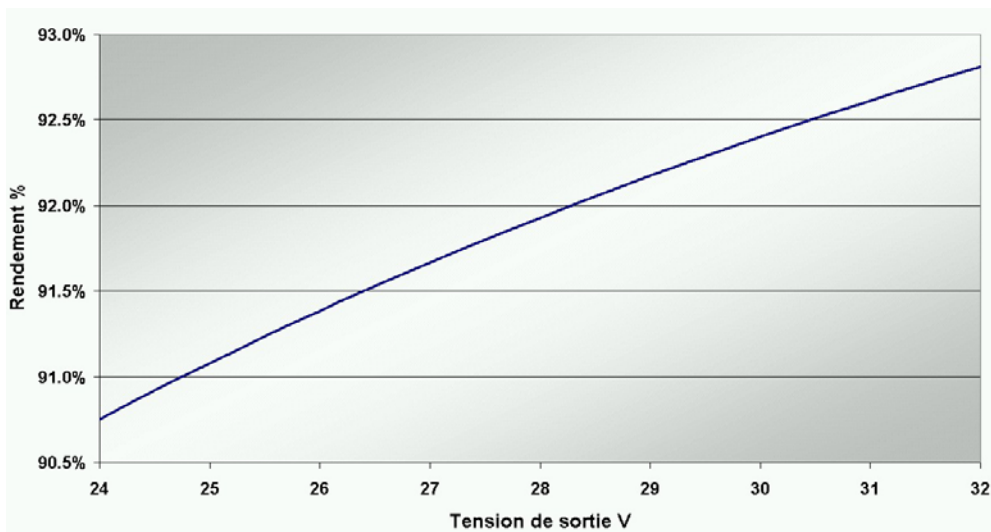


Figure III-23 : Rendement de conversion entre le Bus DC et l'électrolyseur.

Du Bus DC à la charge, plusieurs éléments de conversion sont nécessaires. Le rendement global dépend de la puissance nominale demandée par la charge. Pour le banc d'essai, la puissance nominale de l'onduleur a été choisie à 8 kW afin de pouvoir tester le couplage du champ solaire et de la pile à leur puissance maximale. Un tel onduleur a un rendement de 92 % à la puissance nominale et de 84 % à 10 % de cette puissance. En dessous de 800 W, le rendement s'écroule dramatiquement. Il apparaît donc que la puissance nominale de l'onduleur va être un paramètre essentiel du rendement global du système.

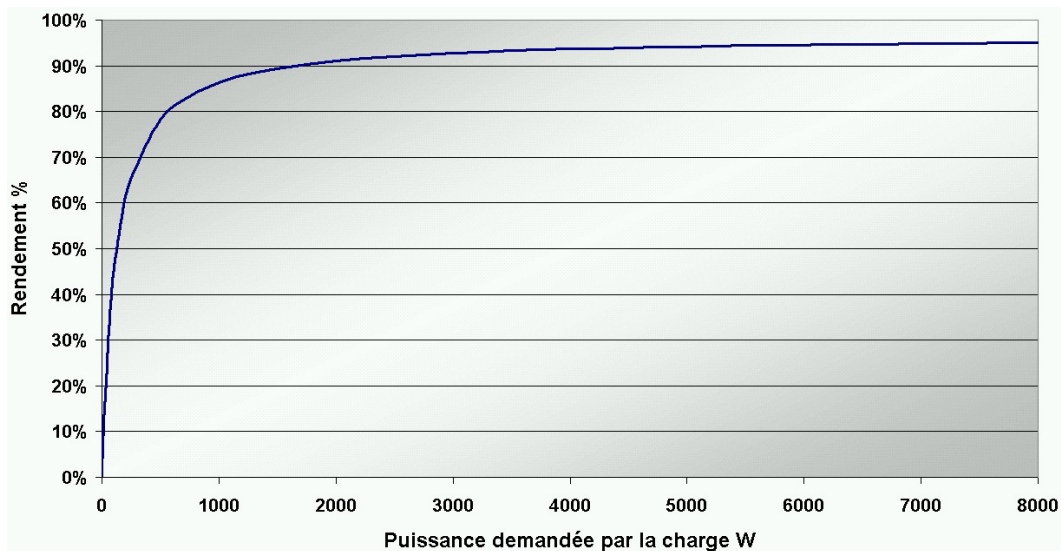


Figure III-24 : Rendement de conversion entre le Bus DC et la charge.

III.2.4. Conclusion

L'outil expérimental développé nous a permis de caractériser les composants et d'évaluer l'influence de leurs paramètres. Les paramètres optimaux des composants électrochimiques ont été définis. L'analyse des données expérimentales fournit les informations nécessaires au développement de l'outil de modélisation.

III.3. Performances du système de stockage par l'hydrogène

Dans ce paragraphe, les performances du système de stockage par l'hydrogène construit pour le banc d'essai sont évaluées. Nous proposons ensuite des améliorations possibles permettant l'optimisation des composants développés.

III.3.1. Performances actuelles

Le rendement du système de stockage par l'hydrogène est le rapport de l'énergie fournie par la pile à combustible sur l'énergie consommée par l'électrolyseur. Il se calcule en multipliant le rendement des deux composants.

Nous avons choisi d'utiliser le modèle développé et décrit dans le chapitre suivant, pour obtenir le rendement des composants électrochimiques sur l'ensemble des points de fonctionnement.

La Figure III-25 et la Figure III-26 décrivent les rendements de l'électrolyseur et de la pile, ainsi que le pourcentage de perte due à la consommation intrinsèque. On calcule ce pourcentage en divisant la puissance consommée par le périphérique par la puissance du composant. Les températures et pressions de fonctionnement sont les conditions optimales de fonctionnement de nos appareils.

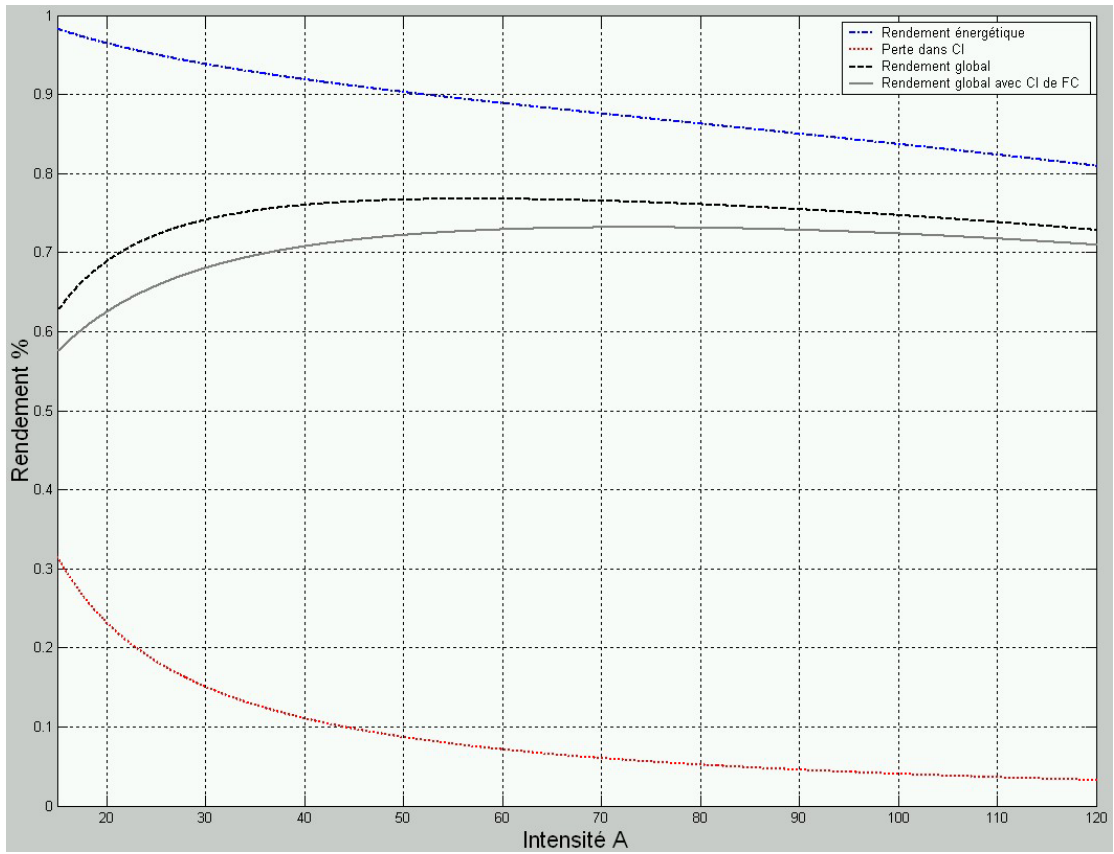


Figure III-25 : Rendements de l'électrolyseur du banc d'essai en fonction de l'intensité (T ~ 72 °C ; P = 10 bar)

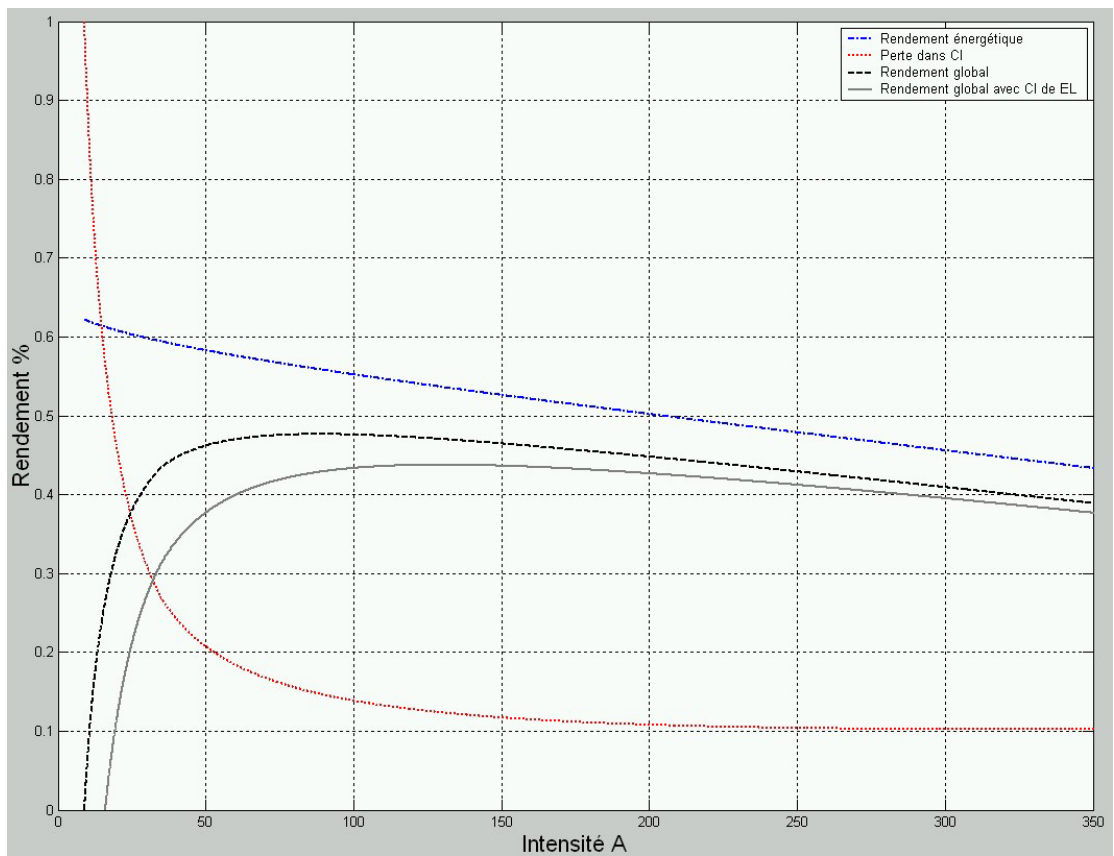


Figure III-26 : Rendements de la pile à combustible du banc d'essai en fonction de l'intensité (T ~ 35 °C ; P_{O2} = 1,52 bar)

Les rendements énergétiques des cellules dans les conditions optimales sont compris entre 44 % et 63 % pour la pile et entre 80 % et 98 % pour l'électrolyseur.

La perte due à la consommation intrinsèque est importante à faible intensité. A 15 A, le périphérique de l'électrolyseur consomme 30 % de l'énergie fournie à l'électrolyseur. Cette consommation est seulement de 3 % à intensité nominale. Pour la pile à combustible, la perte dans les auxiliaires varie entre 10 % à puissance nominale et 100 % à 10 A : la pile s'auto alimente.

Le rendement global est le produit des rendements énergétique, faradique et de perte due à la consommation intrinsèque. Le rendement faradique de l'électrolyseur est choisi à 93 % correspondant à celui du côté anodique. Celui de la pile est de 99 %.

Le rendement global varie entre 0 % à 10 A et 48 % à 90 A pour la pile et entre 63 % à 15 A et 78 % à 60 A pour l'électrolyseur. Pour les deux composants, il existe un point de fonctionnement optimal lié au rendement énergétique et à la consommation intrinsèque.

L'électrolyseur et la pile à combustible ne fonctionnent pas en même temps. Comme ces composants ont une consommation de veille, le rendement de chaque composant est encore diminué. La dernière courbe prend en compte cette consommation à vide de l'appareil en veille : c'est le rendement réel du composant intégré dans le système de stockage par l'hydrogène.

Les rendements réels des composants sont donc compris entre 0 % et 44 % pour la pile et entre 58 % et 73 % pour l'électrolyseur. Il est préférable de ne pas utiliser la pile en dessous de 30 A. Son rendement est alors compris entre 30 % et 44 %.

Si l'on considère un rendement de 100 % pour le stockage de gaz, le système de stockage par l'hydrogène du banc d'essai a un rendement maximum de 32 %. En fonctionnement nominal, le rendement est 27 %. Ces données varient légèrement avec la température de fonctionnement.

Nous avons montré dans le paragraphe précédent, la forte différence entre la consommation spécifiée et mesurée des électrovannes. En considérant que les électrovannes consomment la puissance spécifiée par le constructeur, le rendement global du système de stockage atteint alors un rendement maximal de 38 %.

Ces performances sont comparables à celles des installations précédemment construites (chapitre II.3.2.1). La consommation intrinsèque des périphériques est toujours un problème important pour le rendement des composants électrochimiques de notre installation, essentiellement lorsque les composants sont utilisés à faible puissance.

III.3.2. Perspectives

Une réflexion sur la marge possible de progrès sur chacun des composants est abordée, aboutissant aux performances idéales du système de stockage. Certaines améliorations pourront être évaluées sur les composants du banc d'essai.

III.3.2.1. Electrolyseur

Plusieurs facteurs permettent d'augmenter le rendement global de ce composant : la consommation intrinsèque, la mesure de pureté et la pression de fonctionnement.

Consommation intrinsèque

Le périphérique de l'électrolyseur est composé de 8 électrovannes de puissance théorique variant entre 5 W et 12 W. Le choix de ces électrovannes provient de l'expérience du fournisseur des cellules qui a testé de nombreuses électrovannes pour les intégrer aux périphériques industriels.

Ces électrovannes consomment la puissance maximale lorsqu'elles ne sont pas en position de repos. Or, leur position de repos a été choisie par rapport à la sécurité, c'est-à-dire de telle sorte que l'électrolyseur soit dépressurisé, purgé et refroidi lors d'une panne d'alimentation du périphérique. Ceci implique une importante consommation au cours du fonctionnement et de la veille de l'appareil.

Plusieurs solutions existent pour réduire la consommation intrinsèque de l'électrolyseur :

- Certaines électrovannes, dites bistables, ne consomment que lorsqu'elles sont activées (passage d'une position à une autre). Il serait donc intéressant de tester la fiabilité, la rapidité et l'étanchéité de ces électrovannes. Une étude de sécurité est en parallèle nécessaire pour évaluer les dangers dans des conditions exceptionnelles de coupure d'alimentation.
- Il est aussi possible de repenser totalement le contrôle de l'appareil. L'utilisation d'électrovannes permet une très bonne régulation de la différence pression autour de la membrane mais un contrôle utilisant des déverseurs mécaniques par exemple, permettrait une réduction importante de la consommation intrinsèque.

Mesure de pureté

Le second point faible de notre électrolyseur concerne le rendement faradique côté oxygène largement inférieur à celui côté hydrogène. Ce déficit dont les conséquences sont importantes dans notre application où l'oxygène est utilisé, est dû à la mesure de concentration d'hydrogène dans l'oxygène. L'idéal serait d'effectuer une mesure en ligne réduisant à zéro la fuite de gaz et éliminant une électrovanne. Le rendement faradique de l'électrolyseur serait alors de 99 %. Les produits permettant cette mesure en ligne sous pression ne sont pas nombreux ou surévalués et donc très chers (mesure infrarouge de la composition du gaz).

Pression de fonctionnement

La dernière amélioration proposée concerne la pression de fonctionnement. Dans notre installation, cette option permettrait de réduire la taille du stockage des systèmes PV-FC. Cette option réduirait peut être légèrement le rendement des cellules mais très peu comparé au gain énergétique de l'élimination d'un compresseur. Par contre, la consommation intrinsèque des électrovannes dépend de la pression de fonctionnement. Une étude complète doit être effectuée afin de d'évaluer les performances globales des électrolyseurs haute pression.

Conclusion

Jusqu'à présent, les applications des électrolyseurs n'ont jamais entraîné les fournisseurs à optimiser leurs produits dans ces directions.

Un électrolyseur ainsi conçu, sans prendre en compte la pression, pourrait atteindre un très haut niveau de rendement :

- 70 à 96 % de rendement potentiel,
- 99 % de rendement faradique,
- la consommation intrinsèque se réduirait à 10 W au cours du fonctionnement (électrovanne bistable de faible consommation) et la consommation en veille serait nulle.

Les performances optimales sont donc évaluées entre 75 % et 89 % dans le cas où les électrovannes sont optimisées et entre 80 % et 94 % dans le cas où on résout en plus, le problème de mesure de pureté de l'oxygène.

Il semble qu'il n'existe qu'un seul mode de fonctionnement pour les électrolyseurs alcalins. De nouvelles études doivent être réalisées pour repenser ces périphériques en terme de pureté des gaz, de sécurité mais aussi de rendement global.

De manière plus générale, les produits standards utilisés dans les procédés industriels ou dans la vie courante sont rarement des produits dits « basse consommation ». De nombreux progrès accessibles techniquement sont à attendre dans le domaine de la maîtrise de l'énergie.

III.3.2.2. Pile à combustible

Le système pile est aussi constitué de nombreuses électrovannes mais aussi de pompes assurant la circulation de l'eau et des gaz.

Consommation intrinsèque des électrovannes

Les mêmes remarques peuvent être formulées concernant le choix des électrovannes. De la même façon que pour l'électrolyseur, l'utilisation d'électrovannes ne consommant que lorsqu'elles sont actionnées, réduirait la consommation à 10 W en fonctionnement et à zéro en veille.

Moteurs

Concernant les pompes, le choix de moteurs triphasés régulés en fréquence permet de diminuer de manière conséquente la consommation du périphérique.

Un système sans moteur est aussi envisageable. On utilise la dépression due à la consommation des gaz par la pile pour évacuer l'eau qui s'accumule dans les cellules (brevet déposé par Air Liquide).

La Figure III-27 montre le schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible sans moteur mais avec recirculation pour éviter la perte de gaz lors des purges nécessaires à l'évacuation de l'eau. En fonctionnement, les deux électrovannes sont ouvertes : le détendeur permet l'approvisionnement en gaz pur consommé par la pile. Pour évacuer l'eau produite, les deux vannes sont fermées : la pile consomme les gaz, créant ainsi une dépression dans la pile et le séparateur gaz/liquide. La vanne n°1 est ouverte, la pression de fonctionnement est rétablie sauf dans le séparateur. On ouvre alors la vanne n°2 : une circulation s'établit permettant l'évacuation de l'eau accumulée dans les cellules.

On réalise ce schéma hydraulique du côté anodique et cathodique de la pile

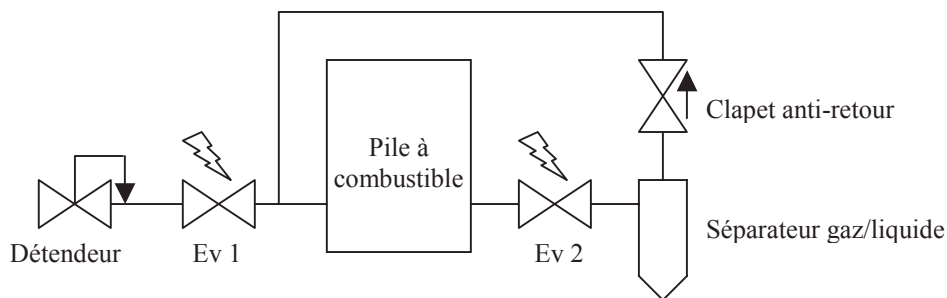


Figure III-27 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible sans moteur de recirculation (côté anodique ou cathodique du périphérique).

Pour éviter de créer une différence de pression importante autour de la membrane, les mêmes volumes de gaz, côté anodique et cathodique, doivent être identiques et la dépression créée doit être inférieure à la valeur limite supportée par la membrane.

En ce qui concerne le circuit de refroidissement, la pompe de recirculation peut être évitée si la circulation « thermosiphon » s'avère suffisante. La circulation par évaporation peut aussi être envisagée dans le cas où la pile fonctionne vers 100 °C.

Consommation de gaz pur

Un module électrochimique consommant des gaz purs est idéal car il permet d'augmenter le rendement énergétique ou de réduire la pression de fonctionnement. La diminution de la pression permet d'augmenter la capacité du volume de stockage et de diminuer le risque d'atteindre une différence de pression dangereuse pour la membrane.

Conclusion

Les performances de la pile à combustible atteignent 55 % dans le cas où la consommation des électrovannes a été réduite à 10 W en fonctionnement et à zéro en veille. Si le cœur électrochimique consomme des gaz purs et que le moteur de recirculation des gaz est éliminé, les performances de la pile à combustible atteignent 59 %. Au dessus de 2 A, le système pile à un rendement supérieur à 40 %.

Peu de systèmes industriels existent, mais ces auxiliaires sont généralement optimisés afin de réduire leur consommation parasite car le système pile est évalué par rapport au rendement global de l'appareil. Le système Ballard de 1,2 kW par exemple, a un rendement électrique global très compétitif compris entre 40 % et 50 %.

III.3.2.3. Lois d'échelle

Le périphérique de l'électrolyseur est très proche du procédé industriel. Utilisant le même mode de fonctionnement et les mêmes électrovannes, le périphérique développé pour une puissance de 30 kW consomme la même énergie. Le pourcentage de perte due à la consommation intrinsèque est donc moins important dans leur système de plus grande taille. L'augmentation de la puissance permet aussi d'envisager la cogénération pour ce composant. On voit ici apparaître un facteur essentiel des composants électrochimiques : les lois d'échelle.

III.3.3. Conclusion

Le système de stockage par l'hydrogène réalisé pour le banc d'essai est performant. Son rendement global est de 32 %. Les améliorations proposées permettraient d'augmenter ce rendement jusqu'à 55 %. Ces progrès ne seront réalisables que s'ils ne réduisent pas la sécurité des installations.

III.4. Conclusion

La réalisation du banc d'essai a été une étape très importante dans notre travail, à la fois au niveau du temps nécessaire à la conception et à la réalisation des composants mais aussi au niveau des informations qui en découlent. Les composants électrochimiques développés sont parfaitement adaptés à leur fonctionnement dans un système autonome de production d'énergie. Leurs performances permettent d'obtenir un système de stockage par l'hydrogène ayant un rendement maximal de 32 %. Le banc d'essai n'est pas finalisé en raison de la non délivrance de l'appareil de gestion et de conversion d'énergie, composant central de l'installation. Cette dernière étape permettra d'évaluer les performances du système PV-FC développé.

