

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Polycopié de cours.

TITRE :

*Stockage de l'énergie et pile à
combustible.*

2ème année master électrotechnique.

Options :

Energies Renouvelables.

Préparé par : Dr ELAGUAB MOHAMMED

Année Universitaire 2021/2022

Table des Matières

Chapitre 1. Les systèmes de stockage d'énergie

<i>Introduction</i>	1
<i>Localisation du stockage au sein du système électrique</i>	2
<i>Les différents modes de stockage d'énergie</i>	3
<i>Stockage par air comprimé en caverne hybridé par turbine à gaz</i> ...	4
<i>Volants d'inertie</i>	5
<i>Le stockage électrochimique</i>	6
<i>Les supercondensateur</i>	8

Chapitre 2. Stockage électrochimique

<i>Introduction</i>	10
<i>Historique</i>	10
<i>Les Batteries</i>	11
<i>Modélisation du système de stockage batterie</i>	15
<i>Supra condensateurs</i>	19

Chapitre 3. Piles à Combustible (P.A.C.)

<i>Historique</i>	26
<i>Modélisation de la pile à combustible</i>	34
<i>Les différents types de piles : AFC, PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC</i>	27
<i>Circuit d'alimentation en hydrogène</i>	40
<i>Conclusion</i>	43

Chapitre 1

Les systèmes de stockage d'énergie

1- introduction

« L'électricité ne se stocke pas » est une affirmation fréquente, tant de la part d'enseignants que de celle de politiques, mais elle est fautive. L'énergie électrique se stocke bel et bien, rarement directement, souvent indirectement mais sans (ou quasiment sans) limite théorique de rendement énergétique. Elle se convertit alors en formes intermédiaires parfaitement stockables (potentielle gravitaire, cinétique, chimique...). Les excellents rendements de conversion dans les deux sens de transformation, aussi bien lors de la charge que de la décharge, permettent de la restituer, dans la plupart des cas sans limite thermodynamique. En effet si les transformations ne sont pas trop rapides ni excessivement lentes, les pertes énergétiques peuvent être suffisamment faibles pour considérer un stockage à haut niveau de réversibilité, le rendement, infine, résulte juste d'un dimensionnement optimisé pour répondre à une question technico-économique

Pourquoi stocker de l'énergie ?

Le stockage de l'énergie est utilisé pour répondre à trois besoins principaux :

- Le besoin de se déplacer avec sa propre source d'énergie, c'est le besoin d'autonomie.
- Le besoin de compenser le décalage temporel entre la demande en énergie et la possibilité de production.
- Le besoin de compenser les fluctuations d'intensité du courant délivré sur le réseau électrique, par exemple dans le cas des éoliennes

2 - Localisation du stockage au sein du système électrique

Le stockage de l'énergie électrique peut trouver sa place tout au long de la chaîne depuis la production jusqu'au lieu de consommation (figure 1).

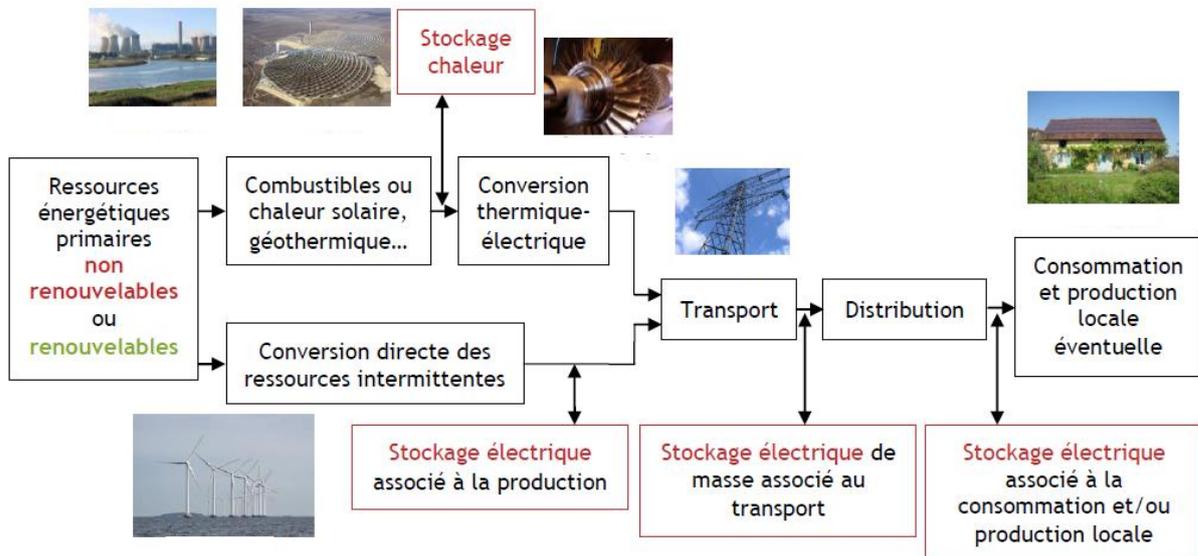


Figure 1.1 : Synoptique du potentiel d'applications du stockage dans le système de production - transport - distribution électrique, s

2.1 - Au niveau des générateurs (sources)

Si la présence quasi-systématique d'une interface électronique de puissance entre les sources modernes (éoliennes ou photovoltaïques) permet le réglage de la puissance réactive, utile notamment pour la participation au réglage de la tension, les degrés de liberté concernant le réglage de la puissance active (associé au réglage de la fréquence) est beaucoup plus contraint vu que la production est associée aux conditions météorologiques.

2.2 - Au niveau du réseau de transport

Au niveau du réseau de transport (généralement en haute tension HTB), des systèmes de stockage peuvent jouer un rôle important pour ajuster l'équilibre production/consommation. Si les stations de pompage-turbinage ou STEP (la technologie de stockage d'énergie électrique la plus utilisée au monde et de très loin) permettaient à l'acteur unique (avant l'ouverture aux marchés) de bénéficier d'un degré de flexibilité supplémentaire pour la gestion du réseau,

dans le système actuel, les STEP sont hélas plus considérées comme des outils de production flexible que comme des moyens de stockage.

En 2013, la capacité de stockage mondiale installée, exprimée en puissance maximale, valait environ de 170 GW sur un total de 5 300 GW de capacités de production.

2.3 - Au niveau des consommateurs

Placé au bout de la chaîne, le stockage permet une sûreté d'approvisionnement, mais également les possibilités d'un lissage ou d'un écrêtage de consommation et donc un meilleur dimensionnement du réseau de distribution. En outre, la possibilité d'îlotage de longue durée devient possible si une production locale existe (PV par exemple). Des telles applications se rencontrent déjà dans un rôle de secours (batteries électrochimiques, volants d'inertie, souvent en assistance de groupes électrogènes).

3- Les différents modes de stockage d'énergie

3.1 - Le stockage mécanique

3.1.1 - Stockage hydraulique gravitaire (STEP)

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage sont des installations constituées de réservoirs d'eau positionnés à des altitudes différentes et d'un dispositif de pompage réversible permettant le transfert de masses d'eau entre ces réservoirs, et ainsi d'exploiter de façon réversible leur énergie potentielle (figure 1). L'énergie stockée s'exprime par :

$$E = MgH$$

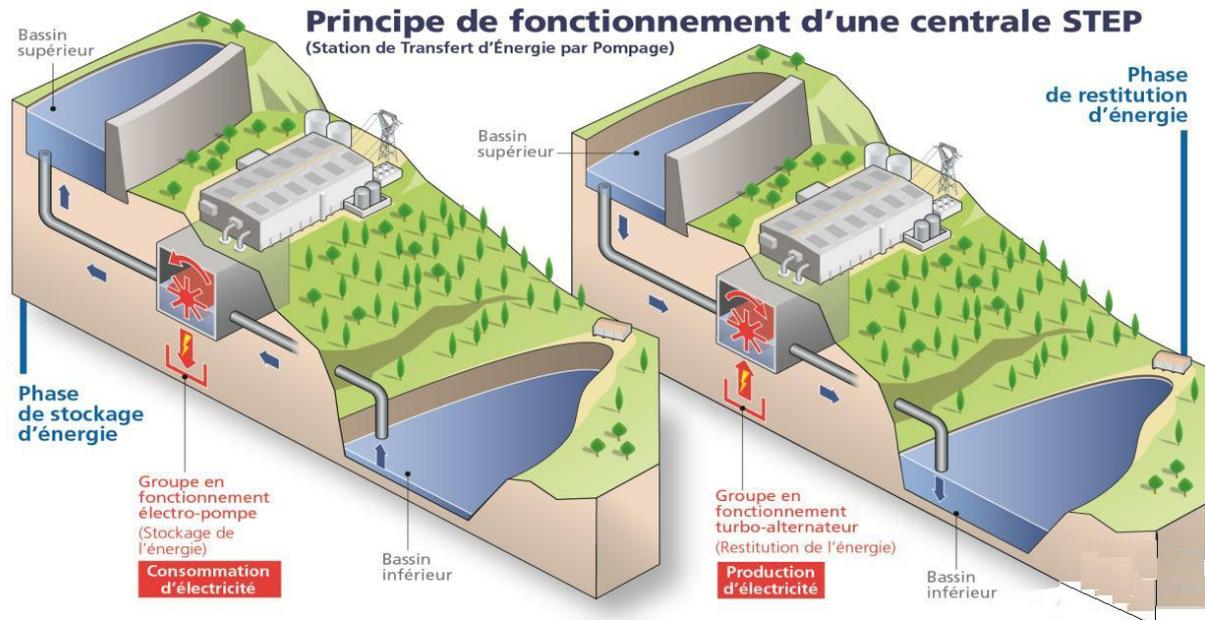


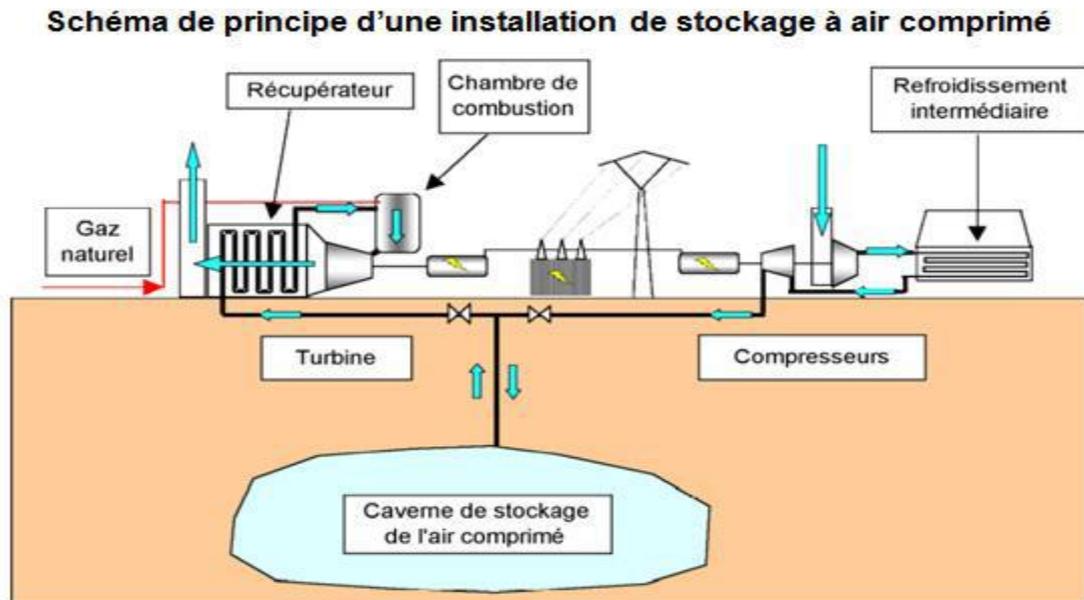
Figure1. 2 : Schéma du principe d'une STEP en cycle fermé

Centrales	Pays	Hauteur chute d'eau [m]	Puissance de pompage [MW]	Puissance de turbinage [MW]	Année de mise en service
Ludington	États-Unis	113		1 872	1973
Vianden	Luxembourg	266 à 291	850	1 096	1976
Dinorwig	Royaume-Uni	?	1 650	1 728	1984
Grand Maison	France	822 à 955	1 160	1 790	1987
Guangzhou	Chine	? à 535	?	2 400	2000
Goldisthal	Allemagne	302	≈ 1 000	1 060	2003
Bath County	États-Unis	353 à 403	2 876	3 000	2004

Tableau1.1 : Quelques exemples de STEP de plus de 1 000 MW en turbinage, source [8]

3.1.2-Stockage par air comprimé en caverne hybridé par turbine à gaz (CAES) (Compressed Air Energy Storage)

Dans cette technologie de stockage de masse, peu répandue (deux grandes installations au monde : en Allemagne et aux USA), le cycle de fonctionnement consiste à utiliser de l'énergie électrique bon marché (disponible en heures creuses) pour comprimer de l'air, via un compresseur électrique de grande puissance, au sein de cavernes profondes (anciennes mines de sel). Lors de la décharge (déstockage), la détente de l'air vient alimenter le compresseur d'une turbine à gaz dans laquelle du gaz naturel est brûlé au moment où la demande électrique est forte (heures de pointe).



Source : ECRIN Jacaues RUER -SAIPEM
Figure 1.3 : Schéma du principe d'un CAES

3.1.3- Volants d'inertie

Les volants d'inertie stockent l'énergie sous forme cinétique. Ils sont constitués d'une masse en rotation autour d'un axe.

Les volants d'inertie sont des dispositifs qui se chargent et se déchargent sur quelques secondes à une minute. Ils sont donc réservés à des applications où les cycles de stockage sont de courte durée.

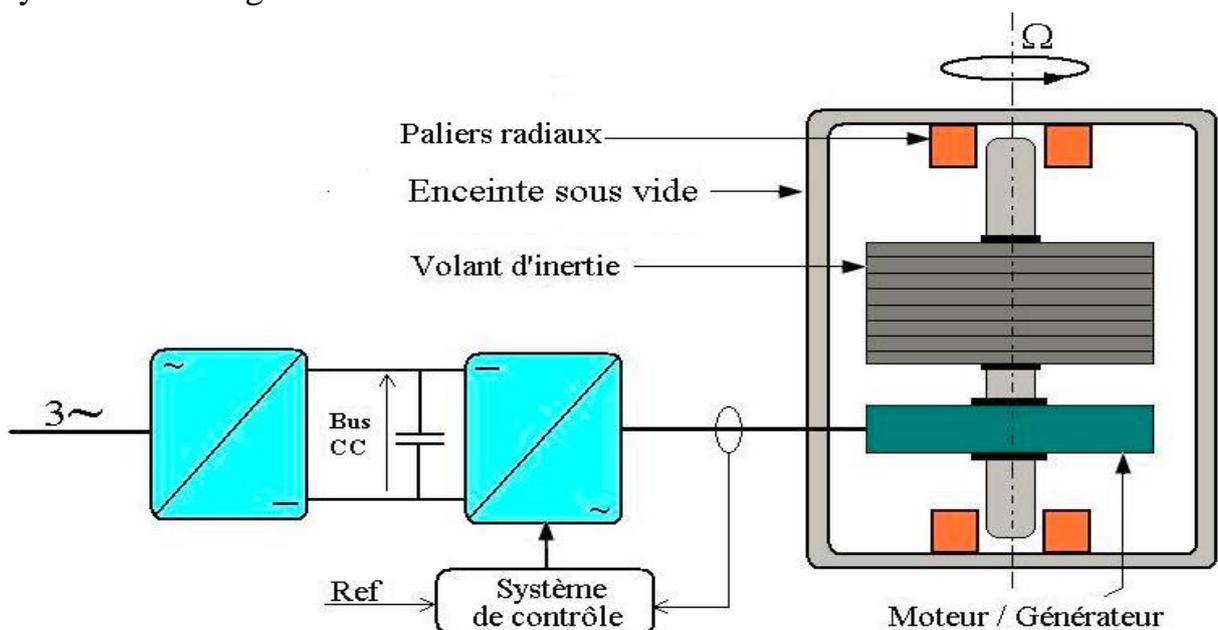


Figure 1.4 : Schéma du principe d'un Volants d'inertie

Considérons un volant d'inertie de masse m_v et d'inertie J_v tournant à une vitesse Ω_v ; l'énergie cinétique emmagasinée dans le volant vaut :

$$E_v = \frac{1}{2} J_v \Omega_v^2$$

L'équation montre que pour augmenter la quantité d'énergie pour une inertie de volant donnée, il faut augmenter la vitesse de rotation de ce dernier. Par ailleurs, pour une énergie donnée, augmenter la vitesse permet de réduire le poids et le volume du volant, grâce à la diminution de son moment d'inertie J_v . Actuellement, certains prototypes de volant d'inertie ont déjà été réalisés avec des vitesses de rotation de plus de 60 000 rpm .

3.2 - Le stockage électrochimique

L'électricité ne peut pas être stockée directement. Il est donc indispensable de convertir l'énergie sous d'autres formes afin de la stocker.

3.2.1- les batteries

L'utilisation de batteries permet de stocker l'énergie électrique sous forme électrochimique.

3.2.1.1- L'ACCUMULATEUR

L'accumulateur est un dispositif physique qui transforme l'énergie chimique stockée en une énergie électrique par le biais d'une réaction chimique appelée oxydoréduction.

Dans ce type de réactions les électrons se déplacent d'un matériau à un autre à travers un circuit électrique simple. Une batterie accumulateurs peut être composée d'une ou plusieurs éléments appelés cellule électrochimique.

A- La réaction d'oxydoréduction

La réaction d'oxydoréduction se divise en deux parties : une oxydation et une réduction. En général dans une réaction oxydoréduction, le réducteur est l'élément qui perd un ou plusieurs électrons. L'oxydant est l'élément qui gagne un ou plusieurs électrons.

B - Cellule électrochimique

Une cellule électrochimique est l'élément de base de la batterie d'accumulateurs. Elle est constituée des éléments suivants : deux électrodes, un électrolyte et un séparateur.

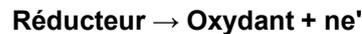
B .1 Cathode

La cathode, appelée aussi l'électrode (ou plaque) positive, est le siège de la réaction de réduction qui consomme des électrons. Elle est constituée d'un corps oxydant, qui a la possibilité d'attirer des électrons.



B .2 Anode

L'anode, appelée aussi l'électrode (ou plaque) négative, est le lieu de la réaction d'oxydation. Elle est constituée d'un corps réducteur qui a la possibilité de céder des électrons.



B .3. L'électrolyte

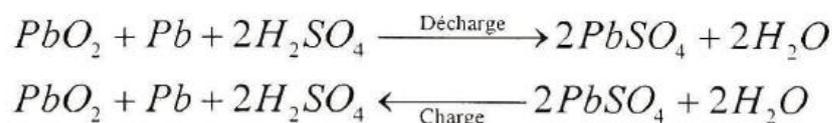
L'électrolyte est le milieu ionique conducteur dans lequel la cathode et l'anode baignent. La réaction entre la solution et les deux électrodes est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans le milieu ionique. Le déplacement de la charge électrique dans l'électrolyte est assuré par les ions. Les ions négatifs se déplacent en sens inverse du courant, et les ions positifs circulent dans le sens du courant.

B .4. Exemple de cellule électrochimique

Dans le cas d'un accumulateur au plomb, le couple oxydoréduction est le plomb-acide. et la matière active présente au sein des deux électrodes est :

- Électrode positive : l'oxydant est le dioxyde de plomb (PbO₂).
- Électrode négative : le réducteur est le plomb (Pb).
- Electrolyte : mélange d'eau et acide sulfurique (H₂SO₄).

Les réactions chimiques produites pendant la charge et la décharge au sein des deux électrodes sont les suivantes :



3.2.2 Les supercondensateur

L'utilisation de condensateurs ou de supercondensateurs permettent de stocker l'énergie électrique sous forme électrostatique.

La capacité électrique d'un condensateur ou d'un super condensateur est déterminée essentiellement par la géométrie des armatures et la nature du, ou des, isolant(s). La formule simplifiée suivante est souvent utilisée :

$$C = (\epsilon.S)/e$$

avec :

C : capacité en farads (F)

S : surface des armatures (m²)

ϵ : permittivité du diélectrique (F/m)

e : distance entre les armatures (m)

Conclusion

Les précédents paragraphes ont présenté quelques techniques de stockage de l'électricité. Parmi ces techniques, quelques-unes ont atteint une maturité dans le sens de leur exploitation, pendant que d'autres comme par exemple le stockage thermique sont en cours de développement. Chacune de ces techniques est capable de répondre à un besoin particulier, en fonction de la situation rencontrée. Certes le stockage de l'énergie électrique a un coût d'une part, il apporte un service d'autre part. Le recours à des sources d'énergie renouvelables est, et sera dans un avenir proche, un des moteurs de développement des techniques de stockage d'énergie électrique. On sait en effet que ces énergies dites vertes constituent un moyen de réduction des gaz à effet de serre : il serait alors intéressant, en fonction de l'enjeu, d'étudier les systèmes complets stockage et transformations, pour optimiser les différentes techniques en termes de coût, de rendement, de fiabilité, de maintenance, etc.

Chapitre 2

Stockage électrochimique

1- Introduction

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. Le stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques est généralement assuré par des batteries et cela pour ses différents avantages. La batterie est le principal élément dans un système photovoltaïque, par où transite l'énergie électrique fournie par le générateur.

Dans les systèmes PV résidentiels, les batteries au plomb sont les plus utilisées car elles ont le rapport prix/durée de vie le plus convenable pour ce type de systèmes.

Dans ce chapitre, en plus du volet batteries au plomb, on va aborder les Super condensateurs et leurs applications dans le domaine de stockage d'énergie en énergies renouvelables. Ces deux types de stockage peuvent être utilisés comme stockage hybride.

2- Historique

Volta, physicien italien du début du 19ème siècle fut le premier à générer un courant électrique grâce à un phénomène électrochimique. Quelques années plus tard, toujours au 19ème siècle, Gaston Planté mit au point la première batterie rechargeable. Les batteries que l'on trouve aujourd'hui sont basées sur le même principe.

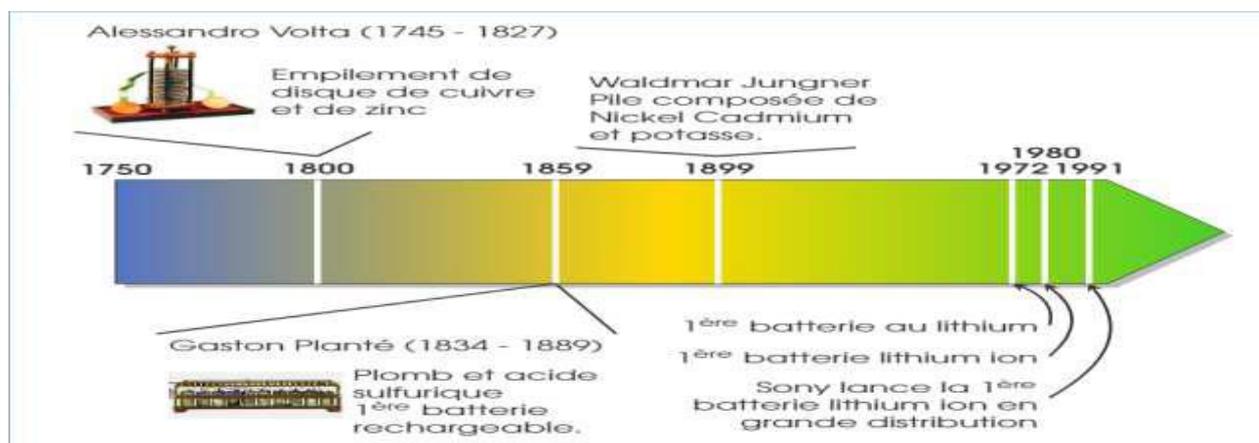


Figure 2.1 historique de la batterie

3. les Batteries

3.1- Description d'une Batterie

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement

3.2 Batterie à usage solaire

3.2.1 Tâches

Dans un système photovoltaïque, la batterie doit remplir trois fonctions importantes :

- **Autonomie.** Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge.** Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension.** Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les fluctuations de tension causées par le champ PV.

3.2.2 Mode de fonctionnement (fig. 2.2)

A) Phase de décharge

Pendant la période de décharge, une partie de l'acide sulfurique réagit avec l'électrode négative en formant le sulfate de plomb ($PbSO_4$) tout en libérant de l'hydrogène. Une autre partie de l'acide sulfurique réagit avec l'électrode positive en formant aussi du $PbSO_4$. Cette réaction libère les molécules de O_2 présentes dans le dioxyde de plomb. L'oxygène et l'hydrogène se combinent pour former de l'eau. L'électrolyte devient délié.

B) Phase de charge

Pendant la charge, la réaction est inversée. Les ions de SO_4^{2-} se combinent avec de l'hydrogène pour former de l'acide sulfurique. En fin de charge, si l'on prolonge le passage du courant il est possible d'observer un dégagement d'oxygène de l'électrode positive et d'hydrogène à l'électrode négative. L'électrolyte se concentre avec une perte de l'eau.

La figure 2.2 montre un schéma du processus de charge et décharge d'une batterie au plomb.

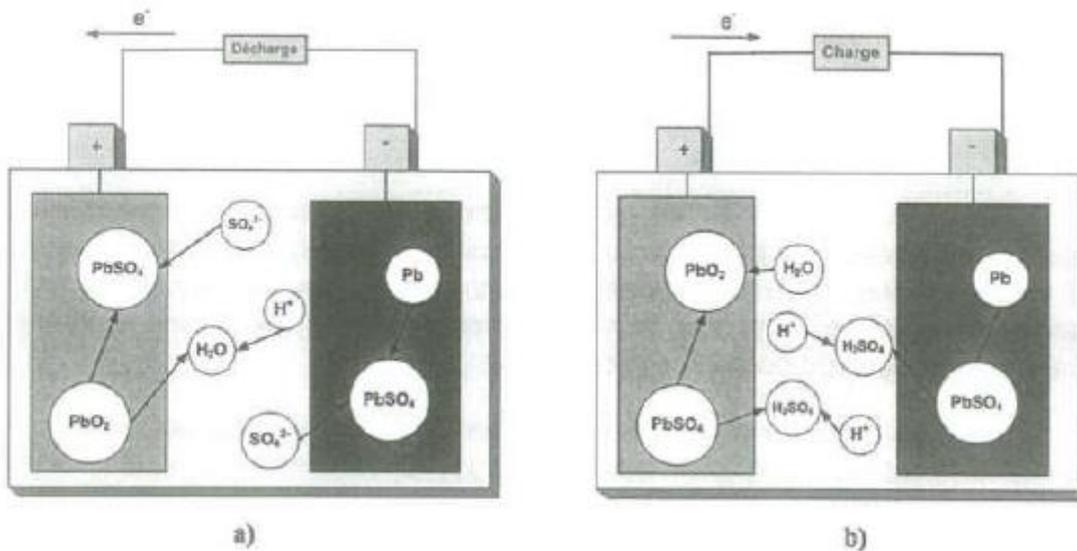


Figure. 2.2 Processus de charge et décharge d'une batterie au plomb

3.2.3 Technologie de la batterie

Les batteries utilisées dans les systèmes PV sont dites batteries stationnaires ou batteries à décharge profonde. Elles sont conçues pour restituer un courant stable pendant de longues périodes de décharge, tout en conservant leurs aptitudes à la recharge pendant un nombre élevé de cycles. Ces batteries repartissent en deux types (fig. 2.3):

- batteries ouvertes ;
- batteries étanches.

A) Batteries ouvertes

Dans cette catégorie on a les batteries à plaques classiques et batteries à plaques tubulaires. Cette catégorie se caractérise par la nécessité d'entretien du niveau de l'électrolyte (acide sulfurique dilué à une densité de 1.324kg/l à 1.28kg/l). Ces batteries ont des parois transparentes qui facilitent le contrôle du niveau de l'électrolyte.

B) Batteries étanches

Cette catégorie ne nécessite pas d'entretien du niveau de l'électrolyte et facile pour le transport. La qualité de l'électrolyte est contrôlée par le constructeur. Elle contient deux modèles les batteries à électrolyte libre et les batteries à électrolyte gélifié. Ce dernier modèle présente l'avantage de mieux supporter les variations de températures. Néanmoins quelques désavantages peuvent être mentionnés :

- un cout de fabrication légèrement plus élevé ;
- danger de séchage si la régulation n'est pas bien adaptée (éviter les surcharges).



Figure. 2.3 Différentes types de batteries : a) ouvertes et b) étanches

3.2.4 Caractéristiques d'un accumulateur au Plomb acide

3.2.4.1 Tension

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

A) Phase de charge

Pendant la charge, la batterie est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel aux bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V. En fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V ou 2,7 V en charge cyclique (fig. 2.4a).

En cas de surcharge, la batterie perdra de l'eau qui devra être remplacée. Si une partie des plaques n'est pas recouverte d'électrolyte, des dommages irréversibles peuvent apparaître.

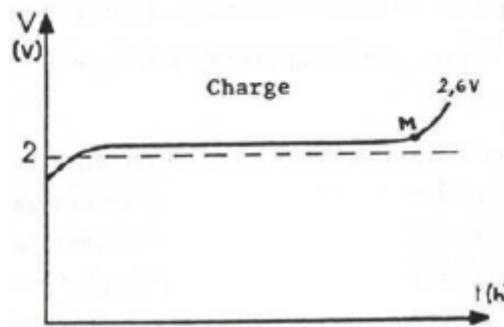


Figure. 2.4 a: Tension de charge de la batterie

B) Phase de décharge.

La décharge est la transformation du PbO_2 et du Pb (dits matériaux actifs) en PbSO_4 accompagné par l'absorption d'acide de l'électrolyte. Cette absorption d'acide augmente R_{bi} ce qui contribue à faire baisser V_b (Fig. 2.4b). Cette caractéristique varie avec l'âge de la batterie. Pendant la décharge, la force électromotrice varie en fonction du temps. Elle reste remarquablement constante à la valeur de 2 V environ pendant une assez longue durée d'utilisation. A partir du point N (fig. 2.2b), elle diminue brusquement (1,8 V). La décharge profonde et la non reproduction de la charge de la batterie font que le sulfate des plaques tend à former de grands cristaux permanents qui empêcheront le courant de passer.

Ce phénomène, s'il est partiel, va faire baisser la capacité de la batterie, mais s'il est important peut alors complètement bloquer tout courant : on parle de batterie sulfatée.

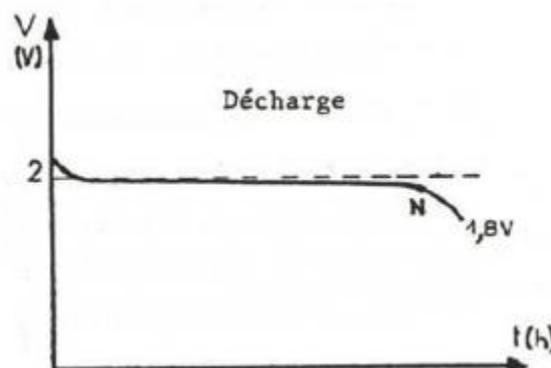


Fig. 2.4b Tension de décharge de la batterie

4. Modélisation du système de stockage batterie

Le stockage de l'énergie pour un système photovoltaïque autonome a été l'objet de plusieurs publications.

Actuellement, la technologie de stockage la plus répondue dans un système PV autonome est celle du plomb acide.

Vu le compromis entre les avantages de la disponibilité, de la fiabilité et du coût.

4.1 Description du modèle CIEMAT

Ce modèle est basé sur un schéma électrique. Il définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de quelques paramètres tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge, tout en intégrant la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène) qui est un phénomène propre aux batteries au plomb, provoquant une importante élévation de la tension en fin de charge (M. B. Camara, 2007). Les phénomènes d'autodécharge et de vieillissement n'ont pas été pris en compte.

Dans ce modèle, pour nb cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = nb \times E_b \pm nb \times R_{bat} \times I_{bat} \quad (3)$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de la batterie, E_b est la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_{bat} sa résistance interne. La description du comportement de la batterie selon le modèle CIEMAT, nécessite trois équations correspondantes aux trois régimes de fonctionnements : le régime de décharge, le régime de charge et le régime de surcharge de la batterie.

L'ensemble de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité C_{bat} de la batterie. L'état de charge EDC de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge

4.2 Modélisation de la capacité

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge I_{bat} . Cette capacité est donnée par

$$C_{bat} = \frac{1.67C_{10}}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005 \times \Delta T)$$

Avec :

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{nom} = C_{10} = 10 \times I_{10}$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{bat} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m .

L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Q_m = I_{bat} \times t$$

Où t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} .

L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}}$$

La quantité de charge Q_{bat} à un instant t , s'obtient en fonction de la valeur du courant I_{bat} , des rendements Faradiques (η_{charge} et $\eta_{décharge}$) et de l'état de charge EDC calculé à l'instant précédent Q_{t-1} , selon :

$$Q_{bat} = \begin{cases} Q_{t-1} + \eta_{charge} \times Q_{ech}(t) & \text{si } I_{bat} > 0 \\ Q_{t-1} + \eta_{décharge} \times Q_{ech}(t) & \text{si } I_{bat} < 0 \end{cases}$$

4.3 Modélisation du rendement faradique

Pour le modèle CIEMAT, le rendement Faradique est pris en compte dans le cas de la charge et il est supposé égal à 1 en régime de décharge.

$$\eta_{décharge} = 1$$

Le rendement Faradique en charge dépend du taux de charge, il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis, il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge. η_{charge} est donné par la relation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[\frac{20,73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0,55} \cdot (EDC - 1) \right]$$

4.4 Modélisation de la décharge de la batterie

En régime de décharge, la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par

$$R_{b-déch} = R_{bat} \frac{E_{b-déch} = 1.965 + 0.12 EDC}{= \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T)}$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat-déch} = n_b \times E_{b-déch} - n_b \times R_{b-déch} \times |I_{bat}| \Rightarrow$$

$$V_{bat-déch} = n_b \times (2,085 + 0,12 \cdot (1 - EDC)) - n_b \times \frac{I_{bat}}{C_{10}} \times (1 - 0,007\Delta T)$$

$$\times \left(0,02 + \frac{4}{1 + (I_{bat})^{1,3}} + \frac{0,27}{(1 - EDC)^{1,5}} \right)$$

4.5 Modélisation de la charge de la batterie

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{b-char} = 2 + 0,16 EDC$$

$$R_{b-char} = R_{char}$$

$$= \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + (I_{bat})^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) (1 - 0,025\Delta T)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge

$$V_{bat-char} = n_b \times E_{b-char} - n_b \times R_{b-char} \times I_{bat}$$

4.6 Modélisation de la surcharge de la batterie

Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par l'équation

$$V_{bat-surch} = n_b \times V_g + n_b \times (V_{ec} - V_g) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_g}{\tau_g}\right) \right]$$

Avec : t_g l'instant où commence le « gassing ». Ainsi $(t - t_g)$ est la durée pendant laquelle s'opère le gassing.

La constante de temps τ_g s'exprime suivant :

$$\tau_g = \frac{1,73}{1 + 852 \times \left(\frac{I_{bat}}{C_{10}}\right)^{1,67}}$$

La tension de gassing V_g et la tension de fin de charge V_{ec} ont pour expression :

$$V_g = \left[2,24 + 1,97 \times \ln\left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}}\right) \times (1 - 0,002 \times \Delta T) \right]$$

$$V_{ec} = \left[2,45 + 2,011 \times \ln\left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}}\right) \times (1 - 0,002 \times \Delta T) \right]$$

4.7 Durée de vie.

La profondeur de décharge influe beaucoup sur la durée de vie de la batterie (fig. 2.4). Plus que la profondeur de décharge est importante plus que la durée de vie diminue. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 40 %, les accumulateurs étant souvent surdimensionnés afin d'augmenter leur durée de vie. On estime la durée de vie des accumulateurs au Pb à 6 ou 7 ans.

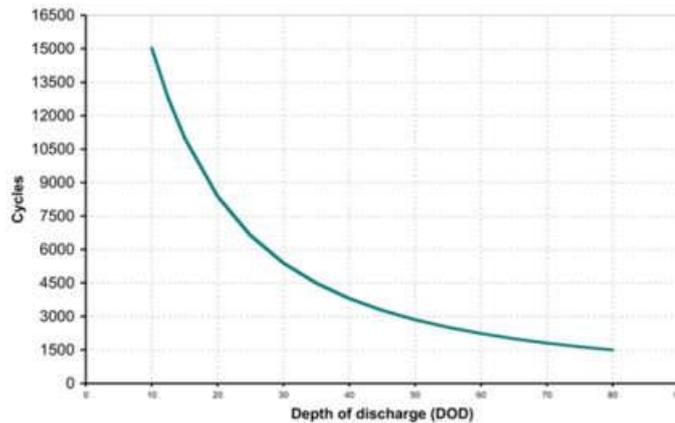


Figure. 2.5 Durée de vie d'une batterie

4.8 Vieillessement

Parmi les causes principales du vieillissement de la batterie on a (fig 2.6):

- La sulfatation

La sulfatation c'est un phénomène, causé par la décharge, associé à l'accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes qui se développe à chaque décharge et se dissout normalement lors d'une recharge.

Cependant, sous certaines conditions (décharge prolongée ou trop profonde, température importante, gazéification de l'électrolyte), des îlots stables de sulfate de plomb apparaissent et ne sont plus dissous lors de la charge. Ceci présente une faible conductivité électrique, le sulfate de plomb ainsi généré démunie la capacité de la batterie en limitant les réactions sur l'électrode.

- La surcharge

Lors de la charge, la formation des gaz O₂ et H₂ est au détriment de l'eau de l'électrolyte. Pour une surcharge, l'eau diminue et une partie des électrodes est exposé à la corrosion. La fig. 2.6 montre les différents paramètres causant le vieillissement de la batterie.

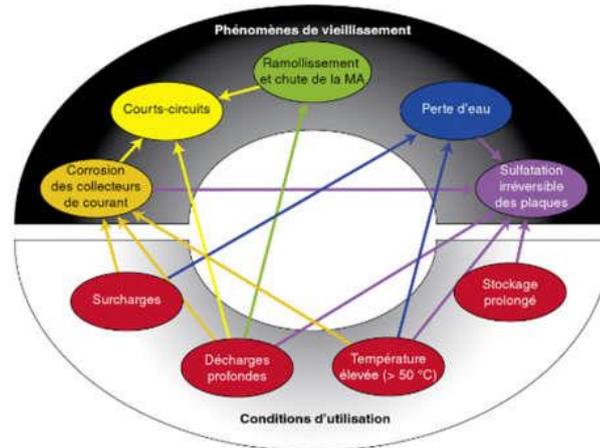


Fig. 2.6 Différents paramètres intervenant sur le vieillissement de la batterie

5. Supra condensateurs

5.1 Rappel sur les condensateurs

Un condensateur plan est un composant électrique constitué de deux armatures conductrices parallèles séparées par un milieu diélectrique (fig.2.7).

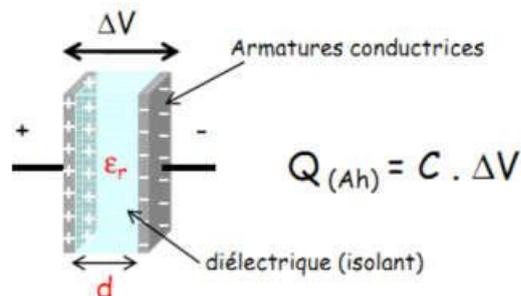


Fig. 2.7 Structure d'un condensateur plan

L'expression de la capacité C d'un condensateur, dont les armatures en regard sont planes, est donnée par :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide, ϵ_r la permittivité relative du diélectrique, S la surface de chaque électrode et d l'épaisseur du diélectrique.

L'énergie emmagasinée, proportionnelle au carré de la différence de potentiel V entre les électrodes, s'exprime par :

$$E = \frac{1}{2} C \times V^2$$

Les relations précédentes montrent qu'il existe deux approches permettant d'accroître la capacité et donc la quantité d'énergie stockée. La première consiste à utiliser un matériau diélectrique possédant une permittivité relative élevée et une tension de service importante. La seconde, à l'origine du développement des supercondensateurs, elle est basée sur l'accroissement du rapport S/d par le recours à des diélectriques très minces et à des armatures gravées présentant d'importantes surfaces.

5.2 Présentation d'un supercondensateur ou condensateurs double couche

5.2.1 Définition

Un supercondensateur (ou supercapacité) est un condensateur permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie beaucoup plus élevées que les condensateurs électrolytiques classiques.

La technique utilisée repose sur la technique Electric Double Layer qui, grâce à l'utilisation d'électrodes en carbone en lieu et place des classiques électrodes métalliques, permettent d'atteindre des épaisseurs de diélectrique inférieures au nanomètre ($< 0,001$ mm). Pour un même volume, la capacité est 100 fois plus élevée que celle de condensateurs à diélectrique traditionnels.

5.2.2 Constitution

Un supercondensateur est formé de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique (pouvant atteindre plusieurs centaines ou milliers de m^2 par gramme de matière) plongeant dans un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) et d'une membrane de séparation poreuse (figure 2.8a).

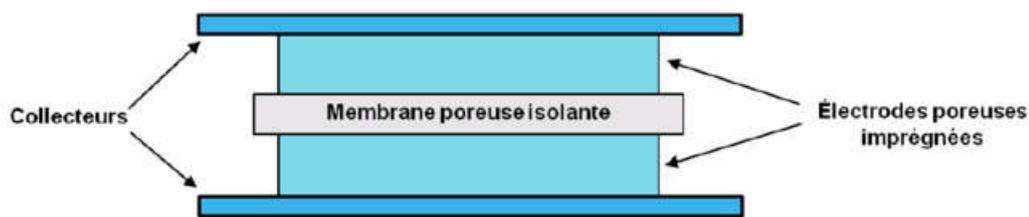


Fig. 2.8a Constitution d'un supercondensateur

5.2.3 Fonctionnement

Leur fonctionnement électrique est le même que celui d'un condensateur :

- ils ne sont pas polarisés ;
- on peut les charger de 0 à 2,7 V ou 5,5 V selon les modèles ;
- la résistance interne est très faible, ce qui autorise de forts courants de charge et de décharge ;

- en conséquence, les temps de charge et de décharge peuvent être très courts, de l'ordre de quelques secondes ;
- par contre ils présentent un peu d'autodécharge (en μA).

Comme les condensateurs, de leur capacité, qui se chiffre en farads, dépend la quantité d'énergie qu'ils peuvent stocker, selon la hausse de tension à leurs bornes.

Quand les électrodes sont chargées, les ions de l'électrolyte se déplacent sous l'influence du champ électrique en direction de l'électrode de signe opposé. Lorsque le condensateur est chargé, une fraction des anions et des cations est localisée tout contre l'électrode de façon à équilibrer la charge en excès dans le carbone actif. Ainsi, on obtient à l'interface entre le carbone et l'électrolyte deux couches de charges en excès de polarité opposée appelées double couche électrochimique (figure 2.8b).

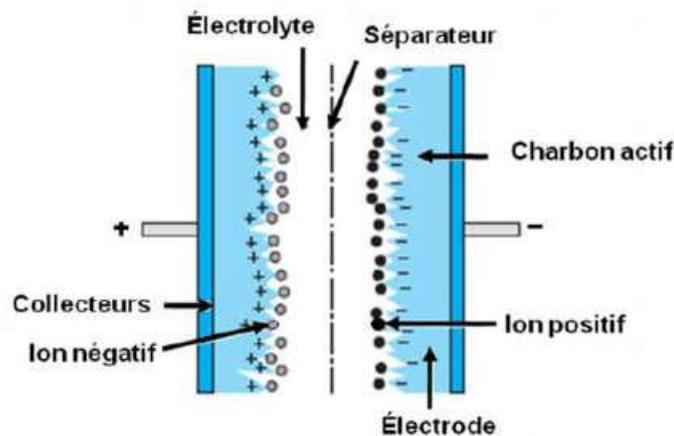


Fig.2.8b Fonctionnement d'un supercondensateur

5.2.4 Classification des supercondensateurs

La nature du matériau utilisé pour les électrodes permet de classer les supercondensateurs en deux familles :

les supercondensateurs électrostatiques et les supercondensateurs électrochimiques.

5.2.4.1 Supercondensateurs électrostatiques

A) Constitution

Le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques.

L'énergie est donc stockée dans la double couche électrique. Les électrodes sont à base de carbone activé et l'électrolyte doit être un conducteur ionique, organique ou aqueux par exemple l'acide sulfurique. Elles sont séparées par une membrane poreuse et inerte.

Ces supercondensateurs stockent les charges électriques grâce à :

- d'une part la double couche électrochimique à l'interface entre le conducteur électronique (électrode) et le conducteur ionique (électrolyte) et ;

- d'autre part, à l'aptitude de certains matériaux à conduction électronique, tel que le carbone activé, à développer des surfaces spécifiques extrêmement élevées (jusqu'à 2000 à 3000 m²/g).B)

B) Fonctionnement

Les mouvements des charges de natures électronique et ionique permettent d'expliquer le cycle de charge/décharge du supercondensateur (figure 2.9a).

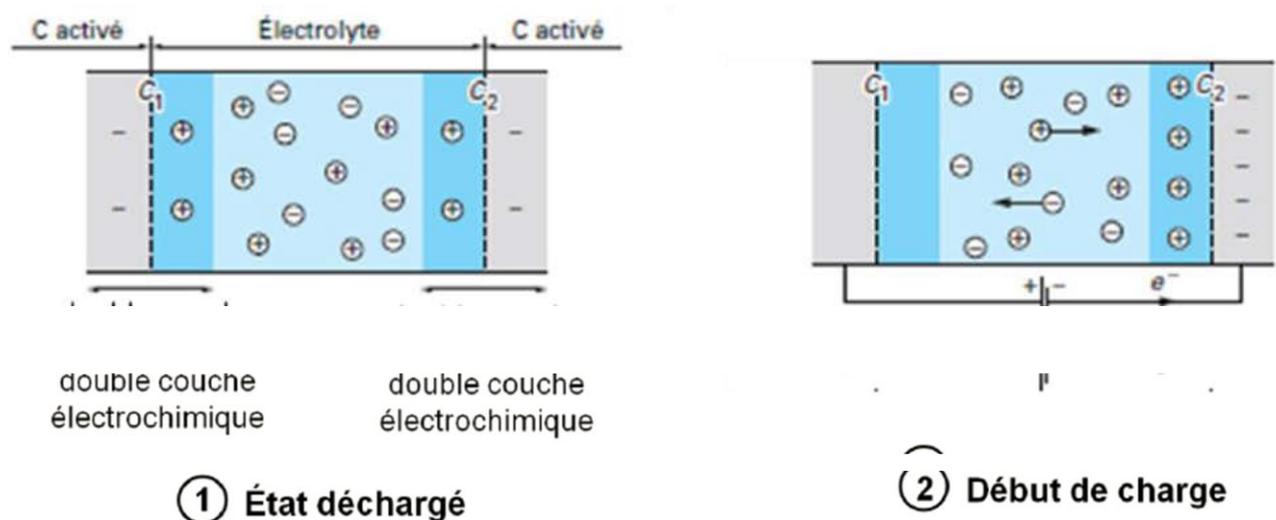
À l'état déchargé, il apparait une accumulation des charges en excès à l'interface carbone-électrolyte aussi bien du côté de l'électrode que de celui de l'électrolyte. La formation de cette double couche électrochimique, dont l'épaisseur n'est que de quelques dixièmes de nanomètre à quelques nanomètres, résulte du fait que les deux matériaux en présence contiennent des porteurs de charge mobiles de nature très différente et que ces porteurs subissent des forces anisotropes à l'interface alors même qu'ils sont condamnés à rester confinés dans leur milieu d'origine, sans possibilité de passage dans le milieu adjacent, l'électrode étant bloquante.

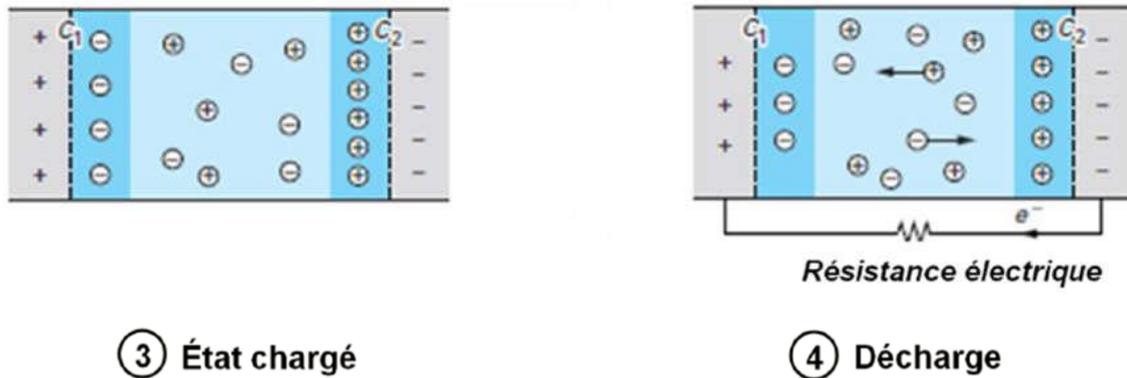
En appliquant une différence de potentiel aux bornes du dispositif, les charges électroniques vont s'accumuler au niveau de l'électrode 2 à droite. Les cations et anions de l'électrolyte vont migrer dans des directions opposées comme indiqué par les flèches. La distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée, celle à gauche étant dépourvue de charge a un potentiel nul tandis que l'autre à droite où les charges s'accumulent voit son potentiel s'élever.

3) La charge du dispositif est poursuivie jusqu'à la valeur maximale, la tension de charge ;

4) Lors de la décharge, les ions et les électrons suivent le chemin inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur.

L'évolution de la tension est donnée sur la figure 2.9b.





③ État chargé

④ Décharge

Fig. 2.9a Principe de la charge/décharge d'un supercondensateur électrostatique

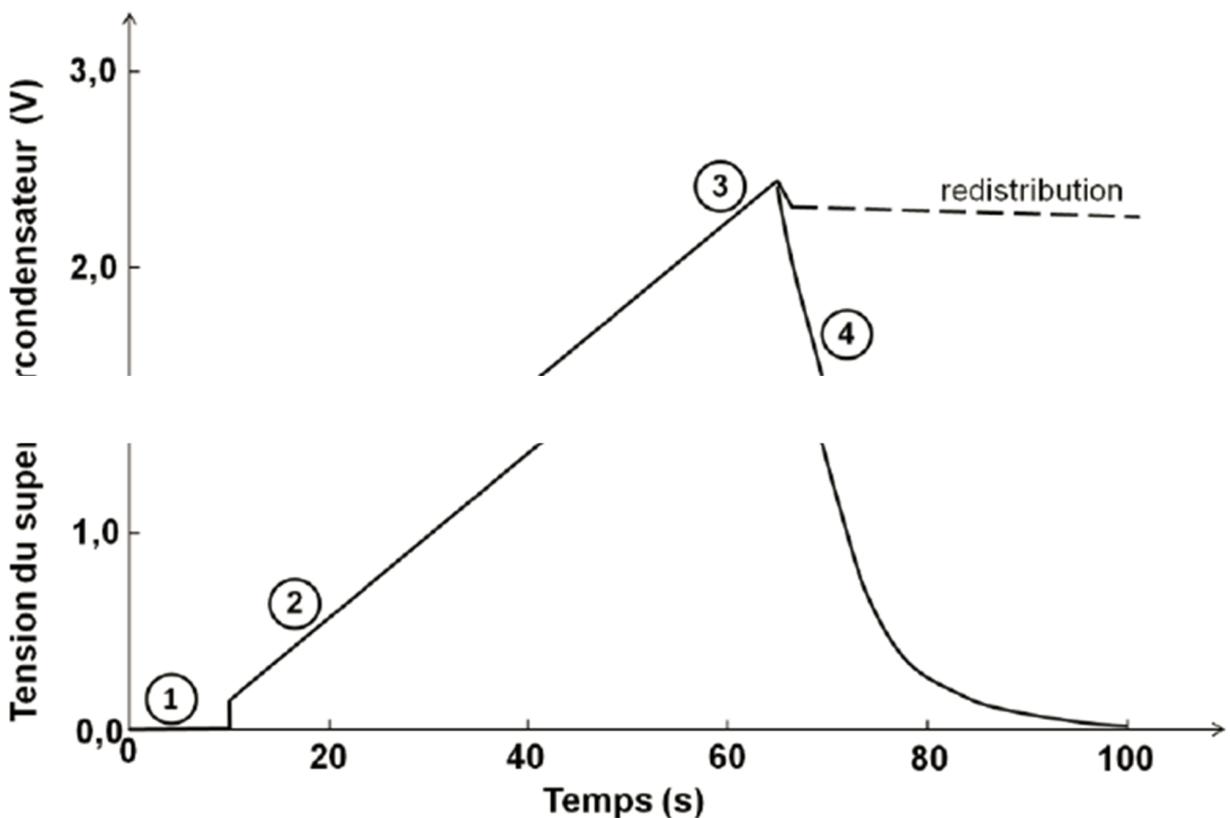


Fig. 2.9b Evolution de la tension

5.2.4.2 Supercondensateurs électrochimiques : Principe

Le principe de fonctionnement des supercondensateurs électrochimiques combine celui des supercondensateurs électrostatiques et celui des accumulateurs. Leurs électrodes sont en effet susceptibles de subir des réactions redox réversibles et donc de mettre en oeuvre, en plus des processus électrostatiques, des processus faradiques.

5.2.5 Applications des supra condensateurs

Les supercondensateurs sont particulièrement adaptés pour des applications qui requièrent des « pulses » d'énergie sur des temps très courts. L'application principale est le stockage d'énergie rapide sur les véhicules électriques pendant les phases d'accélération et de freinage, les batteries ne pouvant qu'effectuer des échanges d'énergie longs (dizaine de secondes ou quelques minutes). Les différents types d'applications portent sur les systèmes d'énergie non renouvelables et les systèmes renouvelables.

5.2.6 Hors énergies renouvelables

Les applications se résument dans les points suivants :

- Stockage de l'énergie embarquée et applications dans le véhicule hybride;
- Application dans l'automobile où la technologie des supercondensateurs satisfait aux fonctions de démarrage;
- Application dans les transports collectifs urbains où les supercondensateurs permettent d'améliorer le rendement énergétique des tramways et métros.

B) Application pour le stockage des énergies renouvelables

- En raison de leur haute fiabilité, efficacité et de durée de vie, les supercondensateurs sont particulièrement idéals pour des applications liées aux énergies renouvelables.
- Les supercondensateurs sont fondamentalement considérés comme des dispositifs sans entretien qui ne nécessitent pas de tests coûteux et onéreux comme des batteries.
- La combinaison, des batteries et supercondensateurs, à de fortes applications dans le domaine des énergies renouvelables.

Les supercondensateurs représentent une technologie intéressante pour réguler la puissance auprès des batteries, en absorbant un excédent d'énergie ou en fournissant les pics de puissance électrique nécessaires.

Chapitre 3

Piles à Combustible (P.A.C.)

1.1. Historique

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction directement en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur. Lorsqu'en 1802 Sir Henry David énonce le principe de l'électrolyse inverse, il met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Partant de ce procédé Sir William Grove expérimenta en 1839 la première pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et un produit de réaction, l'eau. Depuis cette découverte, différents types de piles à combustible ont été inventés fonctionnant à des températures pouvant aller de quelques dizaines de degrés Celsius à plus de 1000 °C, selon l'électrolyte utilisé.

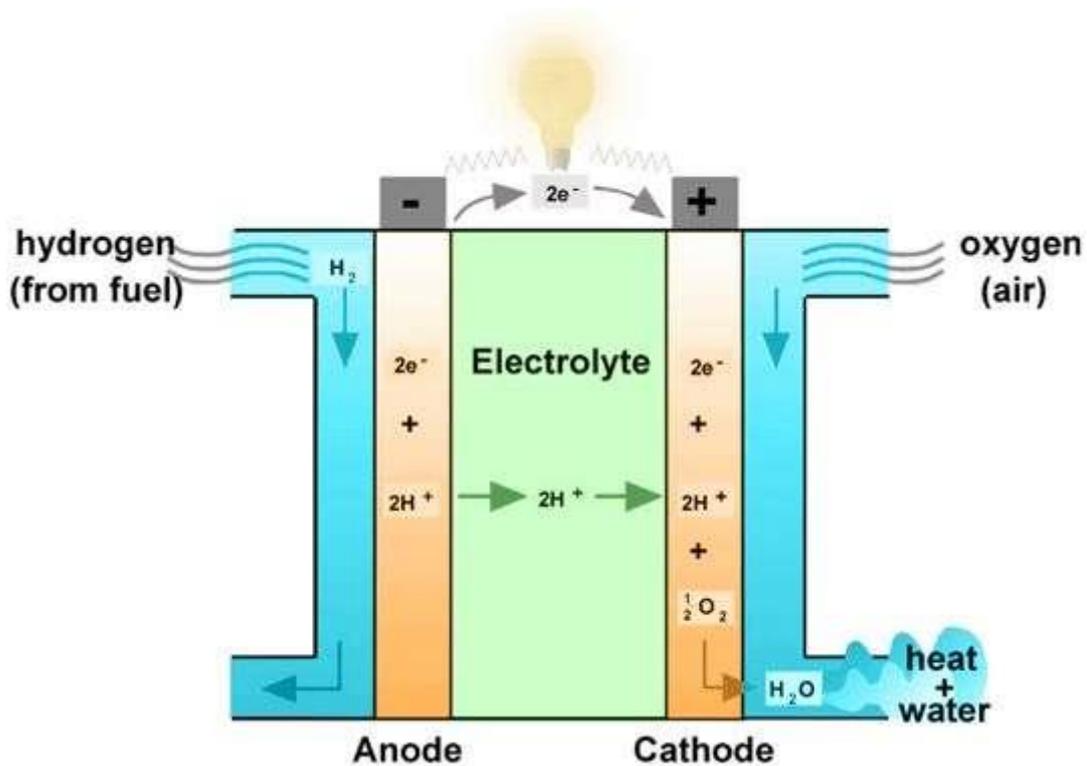


Fig. 3.1 pile à combustible

1.2. Les Avantages des piles à combustible

- Haut rendement énergétique : Le rendement énergétique net électrique dépend du type de pile, et généralement élevé.
- Silencieuses : Lors de leur fonctionnement, les piles sont silencieuses : dans les systèmes PAC, seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes, le système de ventilation, produisent un léger bruit.
- Emissions de pollution limitées : On cite les piles à combustible comme a tout dans la lutte contre la pollution, les émissions produites par un système pile dépendent étroitement du carburant utilisé et de son origine.
- Modularité : Les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible en adaptant le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 kW et plusieurs MW.
- Diverses températures de fonctionnement : dans les deux cas basse ou élevée le fonctionnement de la pile est bien assuré.
- Pas de parties rotatives : Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible

1.3. Les inconvénients des piles à combustible

les piles à combustible présentent beaucoup d'avantages, cependant elles présentent des inconvénients aussi :

- Le coût global
- La fiabilité du système
- La logistique de production du carburant.

1.4. Les différents types de piles : AFC, PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC...

Les piles à combustible sont généralement classifiées par le type d'électrolyte utilisé. Une exception dans cette classification est la pile de type DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) qui est en fait une PEMFC, mais utilisant comme carburant

du méthanol qui est directement envoyé à l'anode.

Une autre caractéristique utilisée pour classer les piles à combustible est leur température de fonctionnement, on distingue ainsi les piles à basse température et les piles à haute température.

Les piles à basse température sont les piles alcalines ou AFC (Alkaline Fuel Cell), les piles à membrane échangeuse de protons ou PEMFC, les piles à méthanol direct ou DMFC et les piles à acide phosphorique ou PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell).

Les piles à haute température fonctionnent entre 600 et 1000 °C. Deux types ont été développés, soit les piles à carbonates fondus ou MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) et les piles à oxyde solide ou SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).

Le tableau 1 récapitule les différents types de piles avec leurs caractéristiques respectives.

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<i>Électrolyte</i>	Solution KOH	Membrane à échange de protons	Membrane à échange de protons	Acide phosphorique	Mélange de Li_2CO_3 et de KCO_3 fondu dans une matrice LiAlO_2	Oxyde de zircon stabilisé ZrO_2 et yttrium Y_2O_3
<i>Type de charge transférée</i>	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
<i>Température de fonctionnement (en °C)</i>	<100	60-120	60-120	160-220	600-800	600-1 000
<i>Combustible</i>	H_2	H_2	Méthanol	H_2	H_2 produit à partir d'hydrocarbures	H_2 et CO produit à partir d'hydrocarbures
<i>Oxydant</i>	O_2	Air	Air	Air	Air	Air

Tableau 1: Comparaison des différents types de piles à combustible.

1.4.1 La pile alcaline (AFC)

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se retrouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 120 à 150°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes:

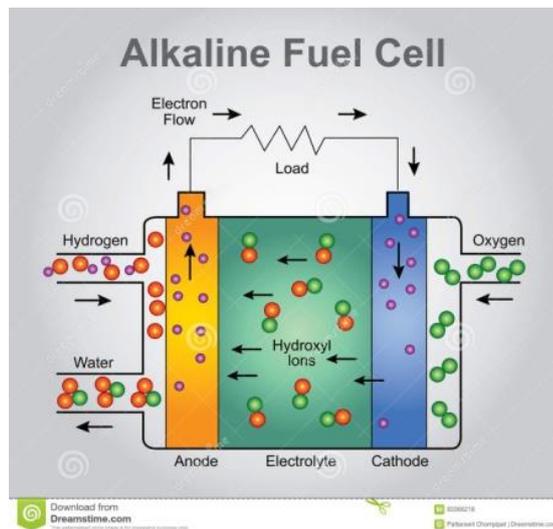
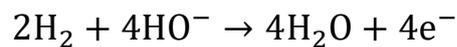
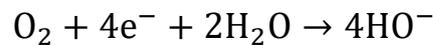


Fig3.2. La pile alcaline (AFC)

À l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction



et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction:



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (HO^-). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques.

1.4.2 Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fût ensuite vite remplacé par des AFCs, faute

de rendement suffisant.

La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

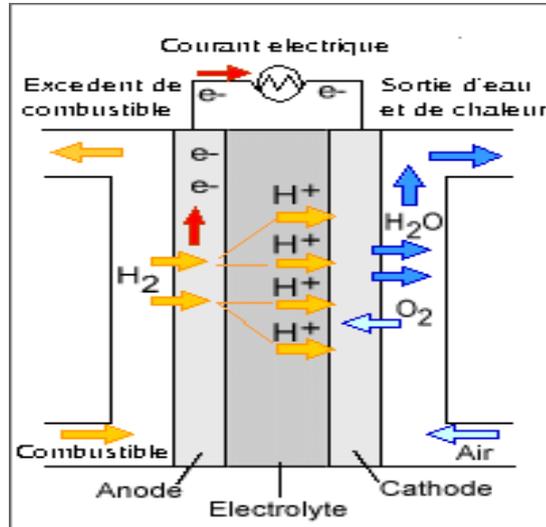
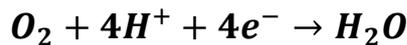


Fig. 3.3. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)

À l'anode, on a:



et à la cathode, on a:



L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H⁺). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes.

1.4.3 La pile à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans différents endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans le cas de la PEMFC, avec des températures de fonctionnement variant de 150 à 220°C, on a donc

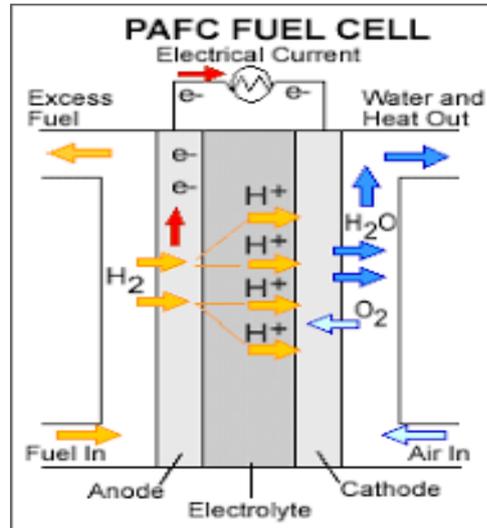
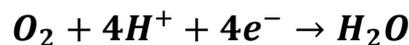


Fig 3.4. La pile à acide phosphorique (PAFC)

à l'anode:



et à la cathode:



Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique (aussi un électrolyte conducteur de protons), un liquide, alors qu'il s'agit d'un polymère solide dans le cas de la PEMFC. Au début du développement des PAFCs, on a utilisé l'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile.

1.4.4 La pile à méthanol direct (DMFC)

Il ne faut pas confondre cette pile avec les piles qui utilisent du méthanol (ou éthanol) comme source d'hydrogène par le reformage externe (la pile à méthanol indirect). La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent (à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C):

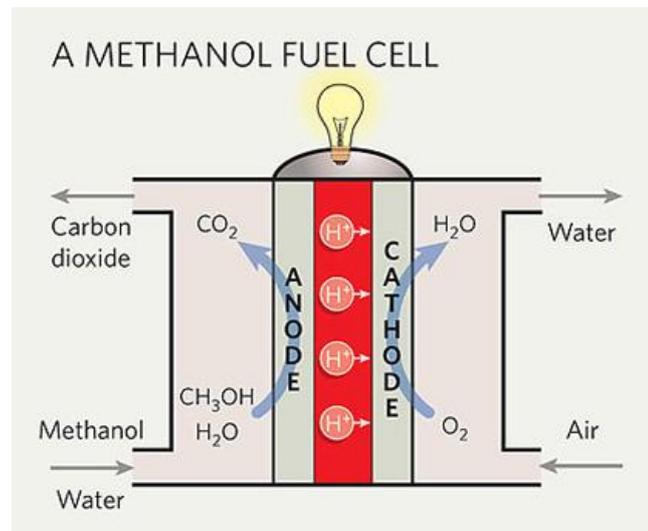
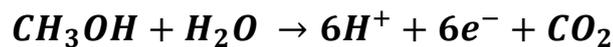
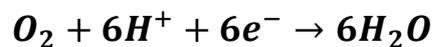


Fig3.5. La pile à méthanol direct (DMFC)

À l'anode on a:



et à la cathode on a:



Il est important de noter que dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol.

1.4.5 La pile à oxyde solide (SOFC)

Le principe de fonctionnement des SOFCs est basé sur le mécanisme suivant: l'oxygène est dissocié à la cathode en O^{2-} , puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode

avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

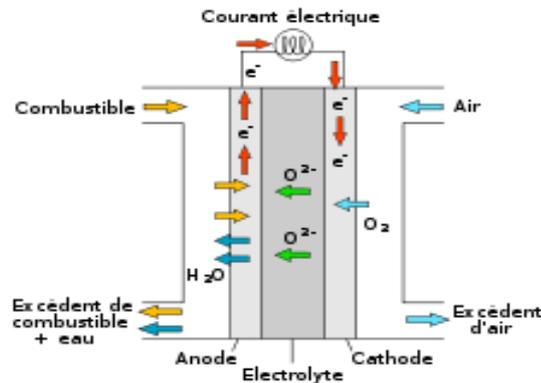
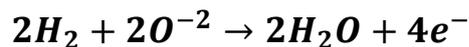
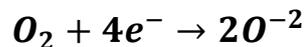


Fig3.6. La pile à oxyde solide (SOFC)

À l'anode on a la réaction:



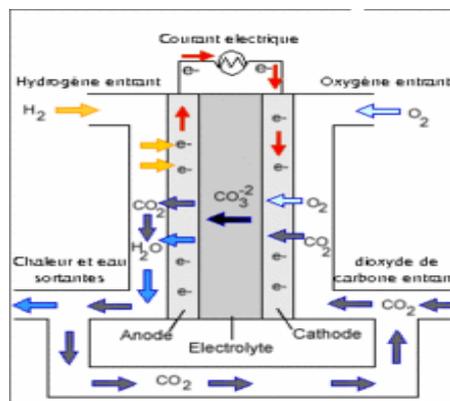
et à la cathode on a:



La caractéristique principale des SOFCs réside donc dans leur haute température de fonctionnement (600 à 1000 °C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique.

1.4.6 La pile à carbonates fondus (MCFC)

Les avantages et les inconvénients de ce type de pile sont sensiblement les mêmes que dans le cas des SOFCs.



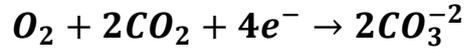
F3.7. La pile à carbonates fondus (MCFC)

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes:

À l'anode



et à la cathode on a :



Ici, du dioxyde de carbone et de l'oxygène sont consommés la cathode et l'ion de carbonate CO_3^{-2} voyage de la cathode à l'anode.

1.5 Modélisation de la pile à combustible

La modélisation des piles correspond à une phase très importante des recherches car elle participe à une meilleure compréhension et représentation des phénomènes mis en jeu au sein des PàC. Il existe ainsi, à ce jour, un certain nombre de modèles de piles PEM qui ont chacun leurs propres spécificités et utilités. Les modèles développés dans la littérature peuvent être classés en trois catégories principales:

Les modèles détaillés basés sur des équations différentielles partielles, les modèles empiriques basés sur des tables et des cartographies expérimentales, les modèles statiques utilisant des équations statiques linéaires ou non linéaires et qui négligent les différentes dynamiques et les modèles dynamiques qui négligent les variations spatiales. D'un autre point de vue, tous les modèles peuvent être classés en deux grandes familles, les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques.

La première catégorie comprend les modèles développés au niveau cellulaire et qui tiennent compte des variations spatiales des paramètres et des performances locales.

Les principes complexes d'électrochimie, de la thermodynamique et de la mécanique des fluides sont utilisés pour développer ce type de modèles. A partir de ces modèles, les performances et le rendement de la pile en fonctionnement statique peuvent être déterminés. Aussi, ces modèles sont utiles pour la conception des composants de la pile à combustible et pour le choix des points de fonctionnement.

1.5.1 Modèle électrique

Dans l'électrolyseur et la pile à combustible, se déroulent les mêmes réactions électrochimiques. Le modèle électrique de ces composants est identique.

Le modèle électrique que nous avons choisi , pour décrire la courbe de polarisation (caractéristique en courant-tension de la pile à combustible), est le modèle de Kim (J. Kim & al, 1995).

Ce modèle est semi-empirique, c'est-à-dire basé sur des équations théoriques mais utilisant des paramètres pour ajuster le modèle aux données expérimentales.

Caractéristique tension-courant

La tension réelle est strictement inférieure à la force électromotrice E à cause des différentes chutes de tension qui apparaissent dans tout générateur électrochimique.

Elle diminue avec le courant débité. On trace habituellement la courbe de la tension V aux bornes d'un élément en fonction de la densité de courant J (figure 3.8).

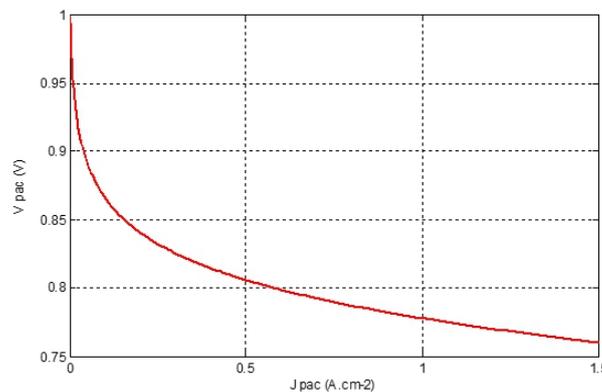


Figure 3.8 : Courbe de la tension aux bornes d'un élément de pile à combustible en fonction de la densité de courant.

Origines de la chute de tension

Comme pour tout générateur électrochimique, la chute de tension résulte essentiellement de trois phénomènes et on distingue :

- ✓ la chute de tension d'activation ΔV_{act} ;
- ✓ la chute de tension résistive ΔV_{ohm} ;
- ✓ la chute de tension de concentration ΔV_{conc} .

La tension aux bornes d'un élément peut s'écrire sous la forme :

$$V_{Pac} = E_{Pac} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc} \quad (22)$$

Avec :

$$E_{Pac} = E_T^\circ + \frac{RT}{2F} \cdot \ln(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2})$$

$$\Delta V_{act} = \mathcal{A} \cdot \ln\left(\frac{J}{b}\right)$$

$$\Delta V_{ohm} = r \cdot J$$

$$\Delta V_{conc} = m \cdot \exp(n \cdot J)$$

Ce qui donne :

$$V_{Pac} = E_{Pac} - \mathcal{A} \cdot \ln\left(\frac{J_{Pac}}{b_{Pac}}\right) - r_{Pac} \cdot J_{Pac} - m \cdot \exp(n \cdot J_{Pac})$$

Avec :

V_{Pac} : Tension d'une cellule élémentaire de la PAC (V) ;

J_{Pac} : Densité de courant d'une cellule élémentaire de la PAC ($A \cdot cm^{-2}$) ;

E_{Pac} : Tension à vide de la cellule élémentaire de la pile (force électromotrice) (V) ;

$\mathcal{A} = \mathcal{A}_a + \mathcal{A}_c$: Coefficients de l'équation de Tafel à l'anode et à la cathode (V) ;

$b_{Pac} = J_{0_a}^{\mathcal{A}_a} \times J_{0_c}^{\mathcal{A}_c}$: Courants d'échange à l'anode et à la cathode ($A \cdot cm^{-2}$) ;

r_{Pac} : Résistance surfacique spécifique de la membrane ($\Omega \cdot cm^{-2}$) ;

m (V) et n (cm^2/A) : Coefficients empiriques (paramètres liés à la diffusion) ;

R : constantes r des gaz parfaits ;

F : nombre de faraday ($96.485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$) ;

T : Température (K).

NB : Pour une pile à combustible PEMFC,

$$\mathcal{A} = \frac{RT}{2\alpha F} \text{ où } \alpha \text{ est le coefficient de transfert de charge } (0 \leq \alpha \leq 1)$$

Les paramètres de l'équation 28 dépendent de la température, de la pression et de la pression partielle en oxygène. Ce modèle permet de représenter toutes les parties d'une courbe de polarisation d'une pile, jusqu'à la zone de diffusion.

Par contre, il n'est pas utilisable pour une densité faible de courant, inférieure à la densité de courant d'échange J_0 de l'électrode, en raison du terme $-\mathcal{A} \cdot \ln\left(\frac{J_{Pac}}{b}\right)$.

3.2.1.3. Effet des conditions de fonctionnement

La pression et la température agissent à la fois sur la force électromotrice et sur la chute de tension.

✓ *Influence de la pression*

Une augmentation de la pression entraîne un accroissement de la force électromotrice. Cet effet est accru sur la tension car la chute de tension diminue à pression élevée.

Cependant, l'utilisation du compresseur permettant d'élever la pression, cela entraîne une consommation notable de la puissance. Pour évaluer l'intérêt de travailler à pression élevée, il faut donc comparer l'augmentation de puissance due à l'accroissement de la tension avec la perte de puissance due à la consommation du compresseur.

✓ *Influence de la température*

L'augmentation de la température conduit à une diminution de la force électromotrice. Cet effet négatif est contrebalancé par une réduction des chutes de tension. L'augmentation de la conductivité ionique de l'électrolyte entraîne une diminution de la chute de tension résistive. Par ailleurs, une température élevée accroît la vitesse de réaction, ce qui réduit la chute de tension d'activation.

Puissance

La puissance électrique $PPac$ fournie par une pile à combustible formée de N éléments en série est :

$$Ppac = NCPac \cdot VPac \cdot IPac = NCPac \cdot V \quad : \cdot JPac \cdot SAPac \quad (28)$$

$Ppac$: Puissance totale fournie par la pile à combustible (W)

$SAPac$: Surface active d'une cellule élémentaire de la pile à combustible (cm²)

$NCPac$: Nombre de cellules élémentaires en série de la pile à combustible (-)

$IPac$: Intensité du courant d'une cellule de la pile à combustible (A).

Pour que la pile à combustible puisse fonctionner, une partie de la puissance électrique libérée par celle-ci doit être envoyée à ses auxiliaires (appareils qui assurent le refroidissement de la pile à combustible et l'alimentation en réactifs de la pile ainsi que différents capteurs et électrovannes). On exprime cette puissance par l'équation suivante

$$P_{auxPac} = C_{C_{auxPac}} + C_{V_{auxPac}} \cdot P_{pac}$$

P_{auxPac} : Puissance consommée par les auxiliaires de la PAC (W) ;

$C_{C_{auxPac}}$: Consommation constante des auxiliaires de la PAC (W) ;

$C_{V_{auxPac}}$: Consommation variable des auxiliaires de la PAC, dépendant de la puissance fournie par celle-ci (%).

Le rendement d'une pile à combustible n'étant pas parfait, les gaz consommés (hydrogène et oxygène) ne sont pas en totalité transformés en puissance électrique mais également en puissance thermique. Celle-ci peut être définie par la relation suivante :

$$P_{thPac} = N_{C_{Pac}} \cdot (V_{th} - V_{Pac}) \cdot J_{Pac} \cdot S_{APac}$$

Avec :

P_{thPac} : Puissance thermique libérée par la pile à combustible (W) ;

V_{th} : Tension thermoneutre d'une cellule élémentaire (= 1,48 V).

La figure 3.9 représente la puissance électrique produite ainsi que la puissance thermique dégagée par la pile à combustible pour une cellule élémentaire. Lorsque la densité de courant augmente, les puissances augmentent également. On remarque que la pile à combustible produit plus de puissance électrique que thermique dans les densités de courant faible mais que cela s'inverse pour les fortes densités.

La pile à combustible possède un seuil de fonctionnement en dessous duquel elle ne peut pas fonctionner. La valeur de ce seuil est néanmoins très faible, et dépend de la puissance nominale de fonctionnement de la pile à combustible

$$S_{FPac} = C_{SPac} \cdot P_{NPac}$$

Avec :

S_{FPac} : Seuil de fonctionnement de la pile à combustible (W)

C_{SPac} : Coefficient pour le calcul du seuil de fonctionnement de la pile à combustible (%)

P_{NPac} : Puissance nominale de fonctionnement de la pile à combustible (W)

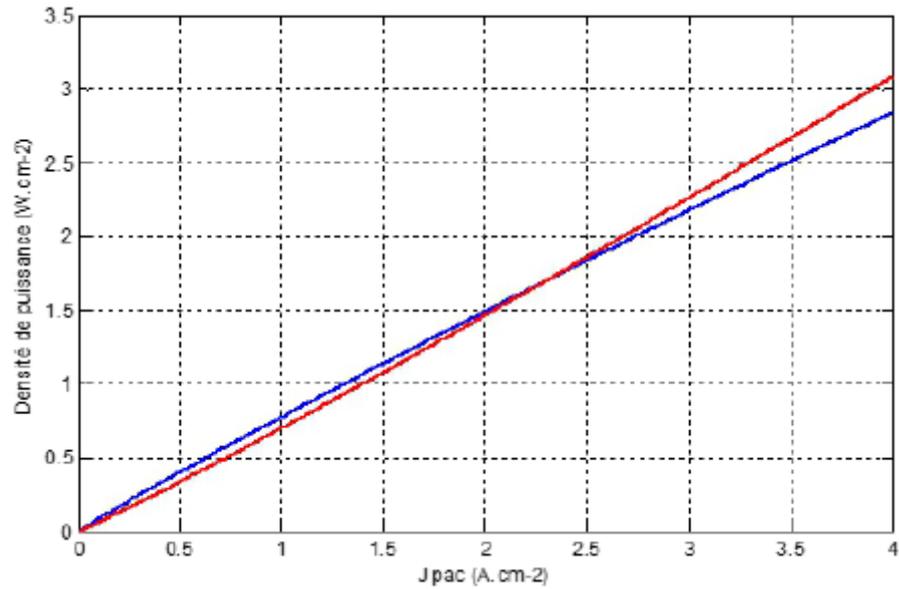


Figure 3.9 : Puissances libérées par la pile à combustible (T= 70 °C, P= 3 bars)

‘—’ : Puissance électrique; ‘—’: Puissance thermique

Débit des réactifs

Les consommations d’hydrogène et d’oxygène de la pile à combustible, sont calculées selon la loi de Faraday

$$Q_{H_2}^C = 2 \frac{S_{H_2}}{S_{O_2}} Q_{O_2}^C = \frac{3600 \cdot N_{CPac} \cdot J_{Pac} \cdot S_{APac} \cdot S_{H_2}}{2 \cdot F} \times \frac{1}{\eta_F}$$

Avec :

$Q_{H_2}^C$: Quantité d’hydrogène consommée (mol.h⁻¹)

$Q_{O_2}^C$: Quantité d’oxygène consommée (mol.h⁻¹)

S_{H_2} : Stœchiométrie de l'hydrogène (-)

S_{O_2} : Stœchiométrie de l'oxygène (-)

η_F : Rendement faradique de la pile à combustible (= 99 %)

Le rendement faradique résulte du fait qu'une partie de l'hydrogène et de l'oxygène migre à travers la membrane et se recombine, ce qui engendre des pertes puisque l'on ne peut récupérer cette énergie. Ce rendement est généralement très proche de 0,99 (J. Labbé, 2006 ; C. Darras & al, 2010).

Les consommations d'hydrogène et d'oxygène, et la production d'eau, croissent linéairement avec l'augmentation de la densité de courant ce qui est conforme au comportement de la loi de Faraday (C. Darras, 2010).

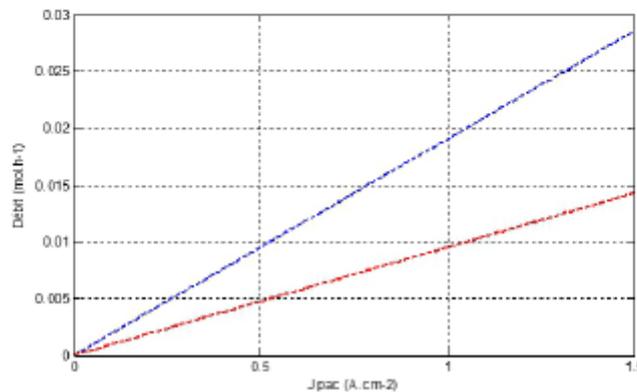


Figure 3.10 : Quantités de gaz consommés par la PAC (T= 70 °C, P= 3 bars)
 '—' : H₂ consommé ; '—' : O₂ consommé

1.6 Présentation du système PEMFC

Le fonctionnement d'un cœur de pile à combustible nécessite un grand nombre d'auxiliaires indispensables à son bon fonctionnement. Le système global (cœur de pile et auxiliaires) est appelé système pile à combustible. Il est généralement constitué d'un cœur de pile, de l'alimentation en hydrogène, de l'alimentation en air (oxygène), d'un circuit de refroidissement, d'un circuit d'humidification, d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et d'un système de contrôle. Les auxiliaires d'une pile à combustible consomment une partie non négligeable de l'énergie produite par celle-ci, entraînant ainsi la dégradation du rendement du système. Leur conception est donc souvent un élément clé dans le développement d'un système pile à combustible.

1.7 Circuit d'alimentation en hydrogène

Suivant l'application visée, le mode d'alimentation retenu peut différer. L'hydrogène peut être stocké tout simplement dans un réservoir, ou fabriqué à partir d'un hydrocarbure par un processus de reformage.

Le gaz stocké dans un réservoir à des pressions de l'ordre de 300 bar à 700 bar. Afin de satisfaire les conditions de pression en entrée de la pile (jusqu'à 3 bar), il est nécessaire d'ajouter entre le stockage et la pile, un détendeur permettant de réguler la pression d'hydrogène en entrée de la pile. L'inconvénient d'un tel mode de stockage est que l'énergie utilisée pour comprimer l'hydrogène représente 7% de l'énergie stockée si l'hydrogène est comprimé à 200 bars (et donc plus si la pression est plus élevée).

Dans le cas d'un processus de reformage, la complexité du système croît et la production d'hydrogène dégage du dioxyde de carbone. Ce type d'alimentation sera certainement utilisé comme solution transitoire avant le tout hydrogène car le réseau de distribution des hydrocarbures est déjà présent

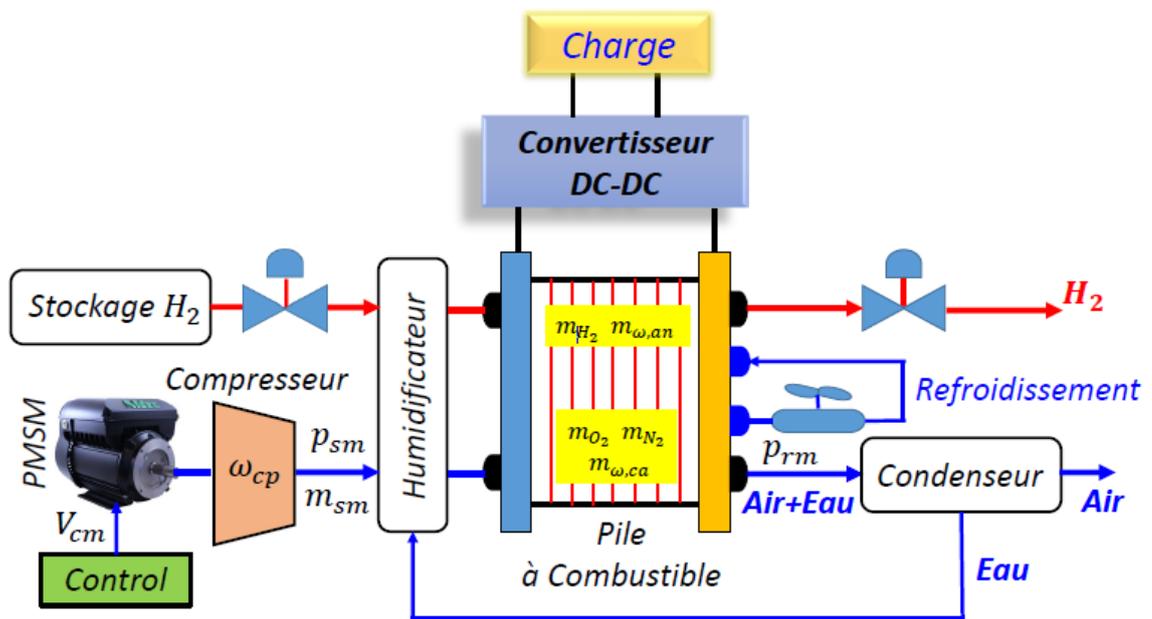


Figure 3.8 : La Représentation des Etats dans le Système de la Pile à combustible

1.8 Système de refroidissement

La conversion électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène en électricité produit également de la chaleur. Celle-ci doit être évacuée afin de maintenir la température de la pile constante. L'évacuation de cette chaleur, pour des petites puissances, peut être réalisée avec un ventilateur (convection forcée d'air) qui peut être le même que celui alimentant la pile en air. Dans le cas des piles de plus fortes puissances, la convection forcée à air ne suffit plus à évacuer la chaleur donc la température est régulée à partir d'un circuit de circulation en eau dans la pile. Des plaques de refroidissement sont donc insérées entre les cellules élémentaires du stack et sa température est ainsi régulée grâce au débit du fluide

circulant dans un circuit indépendant.

1.9 Système d'humidification

Généralement les piles de type (PEMFC) requièrent un circuit d'humidification des gaz afin que la membrane ne soit pas déshydratée (augmentation de la résistance ionique de la membrane) ou que les électrodes ne soient pas noyées en raison d'un excédent d'eau. Ce circuit a donc pour rôle d'humidifier les gaz en entrée de la pile, généralement à partir de l'eau produite par la pile, Récupérée au moyen d'un condenseur. L'assèchement ou la sur-humidification de la membrane diminue la production d'énergie électrique et limite la durée de vie de la pile.

1.10 Convertisseurs statiques

Les auxiliaires de la pile disposent de nombreux convertisseurs statiques. Ils sont nécessaires pour la gestion d'énergie dans le système contenant la pile. La tension de la pile, relativement faible, varie en fonction du courant débité. Un convertisseur statique est donc nécessaire pour faire l'interface entre la pile et le bus continu.

Pour cet objectif, le convertisseur choisi dépend du cahier des charges, et est généralement de type continu-continu, élévateur de tension et unidirectionnel en courant. Selon l'application, des composants de stockage, comme les batteries et les supercondensateurs, peuvent être connectés au bus continu par des convertisseurs. Sur le même bus, des convertisseurs sont aussi connectés pour assurer le lien avec une charge électrique quelconque alimentée par la pile, comme un moteur électrique.

1.11 Système de contrôle

Le système pile à combustible et ses auxiliaires sont fortement interdépendants et de façon non linéaire. Pour assurer un bon fonctionnement (rendement, sécurité de la pile, temps de réponse, contraintes mécaniques, etc...), il est nécessaire d'avoir un système de contrôle global qui agit sur les différents sous-systèmes en interaction :

- contrôle des convertisseurs statiques pour la gestion d'énergie.
- contrôle du débit des gaz et du groupe moto-compresseur.
- contrôle de la pompe à eau et du ventilateur nécessaires au refroidissement.
- contrôle de la température de l'humidificateur.

1.12 Conclusion

Les piles à combustible sont en passe d'évoluer du cap de la recherche et des projets pilotes vers des premières applications industrielles et ces performances doivent encore être améliorées. Dans ce chapitre, nous avons réalisé une description globale d'une pile à combustible de type PEMFC, de son fonctionnement et de son intégration dans un système pile à combustible. La complexité de ce dernier due aux auxiliaires. Parmi ces auxiliaires, le circuit d'amenée d'air composé d'un compresseur, d'où un rappel théorique, comparaison entre les différents types et ses meilleurs choix avec la PàC ont été fait.

*Références
Bibliographiques*

[1]“ *Fuel Cell Systems* ” L. BLOMEN et M. MUGERWA - PLENUM PRESS New York et Londres - 614 pages -1993

[2]“ *Fuel Cell Technology : status and future prospects* ” A. J. APPEBY - *Energy : the international journal* - volume 21 - N° 7/8 - pages 521-653 - 1996

[3]“ *New materials for fuel cell systems 1* ” O. SAVADOGO, P.R. ROBERGE et T.N. VEZIROGLU - *Proceedings of the “ First International Symposium on new materials for fuel cell systems ”* - Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal - 738 pages - 1995

[4]“ *Les piles à combustible* ” M. PRIGENT - Editions de l'Institut Français du Pétrole - 64 pages - 1997

[5]“ *Contribution à l'étude des possibilités de réalisation et caractérisation partielle d'un générateur d'électricité constitué d'une pile à combustible alcaline alimentée avec un mélange hydrogène azote issu du réformage de l'ammoniac* ” R. METKMEIJER - Thèse de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris - 242 pages - 1994

[6]“ *Modélisation d'une pile à combustible de type hydrogène/air et validation expérimentale* ” L. GERBAUX - Thèse de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble - 236 pages - 1996

[7]“ *Etude numérique et expérimentale des écoulements dans une pile à combustible PEM adaptable aux applications embarquées* ” D. PICOT - Thèse de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris - 194 pages - 1998

[8]“ *Les piles à combustible : application au véhicule électrique* ” C. LAMY et J.M. LEGER - *Journal de Physique* - volume 4 - N° 1 - pages 253-281 - 1994

[9]“ *Performance and modelling of a direct methanol solid polymer electrolyte fuel cell* ” K. SCOTT, W TAAMA et J. CRUICKSHANK - *Journal of Power Sources* - N° 65 - pages 159-171 - 1997

- [10] "Stockage électrochimique Notes de cours", B. Azoui Université Batna 2
- [11] G. Guihéneuf, *Les installations domestiques à énergies renouvelables*, Documentations pédagogiques en ligne sur www.elektor.fr/NRJ, consulté en 2015
- [12] Joel Davidson, Fran Orner, *The new solar electric home, The complete guide to photovoltaics for your home*, aatec publications. Ann Arbor, Michigan, 2008
- [13] M. Darío MORALE S, *Optimalité des éléments d'un système décentralisé de production d'énergie électrique*, Thèse de Doctorat en Genie Electrique, Université Paris XI Orsay, France, 2006.
- [14] Alain Ricaud, *Systèmes photovoltaïques*, Polytech' Savoie 5eme année, p.155, Oct. 2011.
- [15] Mohamed Ansoumane Camara, *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs*, Université Paris-Est, 2011. Français. < NNT : 2011PEST1071 >.
- [16] François Badin, *les véhicules hybrides*, Edition technip, 2013, France.
- [17] Akassewa Tchapo SINGO, *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010
- [18] Anne Labouret et al., *Cellules solaires. Les bases de l'énergie photovoltaïque*, 5ème édition, Techniques et Scientifiques françaises, Dunod, Paris, 2010.