

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Automatique et Electromécanique

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Energies Renouvelables*

Spécialité : *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

Cours

Stockage de l'énergie et pile à combustible

Par: Dr. Abdelouahab KHATTARA

Semestre3 Master : Energies renouvelables en Electrotechnique

Semestre: 3

UE Fondamentale Code : UEF2.1.1

Matière : Stockage de l'énergie et pile à combustible

VHS:22h30 (Cours: 1h30)

Crédits: 2

Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement :

Acquérir les principes de fonctionnement de la conversion d'H₂ en électricité par le biais des piles à combustible (PAC) et les différents types de stockage de l'énergie électrique.

Connaissances préalables recommandées :

Introduction aux ER

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Les systèmes de stockage d'énergie

- Les différents modes de stockage d'énergie
- Energie mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage (STEP), stockage par air comprimé (CAES), volants d'inertie
- Le stockage électrochimique
- Batterie d'accumulateurs au Plomb acide, Cadmium Nickel
- Les super condensateurs

Chapitre 2. Stockage électrochimique

- Batterie à usage solaire: Technologie de la batterie, caractéristiques d'un accumulateur au Plomb acide, paramètres indicateurs de l'état de charge d'une batterie, modes de charge d'une batterie, circuit électrique équivalent, modélisation de la batterie, ...etc.).
- Supra condensateurs: Rappel sur les condensateurs, présentation d'un supra condensateur, applications des supra condensateurs, différentes familles, caractérisation et modélisation, vieillissement, utilisation des supra condensateurs, ...etc.

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

- Historique
- Principe de fonctionnement: principe, cinétique et rendement, structure des PAC
- Les différents types de piles : AFC, PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC...
- Production et stockage de l'hydrogène
- Systèmes à ER utilisant les piles à combustibles
- Applications dans le domaine de l'automobile.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40%, Examen : 60%.

Références bibliographiques:

- [1] MézianeBoudellal, La pile à combustible - 2e éd.
- L'hydrogène et ses applications Broché- 11 janvier 2012 , Edition Dunod.
- [2] Achaibou Nadia, Optimisation Du Stockage Des Energies Renouvelables, édition Academiques, 2014.
- [3] Antonio Luque and Steven Hegedus, Hand book of photovoltaic science and Engineering, John Wiley and Sons Ltd, 2003.
- [4] Krishnan Rajeshwar, Robert McConnell and Stuart Licht, Solar Hydrogen generation toward a renewable energy future, Springer Science, 2008.

Avant-propos

Ce module est destiné aux étudiants du deuxième année master énergies renouvelables en électrotechnique pour le premier semestre, selon le contenu programmé dans le canevas du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.

Le but de ce module est d'acquérir les principes de différents types de stockage et de fonctionnement de la conversion d' H_2 en électricité par le biais des piles à combustibles PAC et les différents types de stockage de l'énergie électrique.

Ce module à trois parties essentielles :

- Les systèmes de stockage d'énergie
- Stockage électrochimique
- Piles à combustible PAC

Avant d'accéder à ce module, les étudiants doivent avoir des prérequis sur l'électrotechnique générale, la thermodynamique, la chimie fondamentale, et la physique

Sommaire

Avant-propos	iii
Sommaire.....	iii
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Les systèmes de stockage d'énergie	
I.1 Introduction	3
I.2 Les différents modes de stockage d'énergie	3
I.3 Echelle de stockage d'énergie.....	3
I.4. Stockage gravitaire par pompage (STEP).....	4
I.4.1 La puissance hydraulique	5
I.4.2 Les turbines	5
I.4.3 Pertes dans une centrale hydraulique	10
I.5 Stockage par air comprimé (CAES).....	10
I.5.1 Types des systèmes CAES	11
I.6 Volants d'inertie	11
I.6.1 Principe de fonctionnement.....	11
I.6.2 Calcul de l'énergie stockable	12
Chapitre II. Stockage électrochimique	
II.1 Introduction.....	16
II.2 Batterie à usage solaire	16
II.2.1 Raccordement des batteries solaires avec le système PV	16
II.2.2 Types des batteries solaires.....	17
II.2.3 Batteries plomb-acide (Lead-acid).....	17
II.2.4 Batteries nickel-métal-hydrure (Nickel-Metal Hydride NiMH)	18
II.3 Technologie de la batterie (les accumulateurs).....	19
II.3.1 Principe de fonctionnement	19
II.3.2 Grandeurs électriques des accumulateurs	20

II.3.3 Caractéristiques d'un accumulateur au Plomb acide	21
2.4. Supercondensateur	23
2.4.1 Rappel sur les condensateurs	23
II.4.2 présentation d'un supercondensateur	25
II.4.3 Applications des supercondensateurs	27
II.4.4 Différentes familles des supercondensateurs	28
II.4.5 Modélisation des supercondensateurs	28
Chapitre III. Piles à Combustible (P.A.C.)	
III.1 Historique	31
III.2 Principe de fonctionnement	32
III.3. Cinétique et rendement d'une PAC	33
III.4 Différents types de piles	35
III.5 Production d'hydrogène	37
III.5.1 Réforme du méthane à la vapeur	37
III.5.2 Réaction de décalage eau-gaz	38
III.5.3 Electrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène	38
III.6 Stockage d'hydrogène	38
III.7 Applications dans le domaine de l'automobile	39
III.8 Applications dans le domaine résidentiel	39
Références bibliographiques	40

Introduction générale

Le stockage d'énergie sert l'un de ces deux principaux besoins :

Le besoin d'autonomie : C'est le besoin pour se déplacer avec propre source d'énergie.

Le besoin de compensation : C'est le besoin en énergie dans le cas de décalage temporaire entre la demande de la charge et la production, ou dans le cas des fluctuations d'intensité du courant (dans le cas des éoliennes par exemple).

Les solutions de stocker l'énergie électrique actuellement sont de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la transformation inverse lorsque on a besoin de disposer à nouveau de l'électricité. La forme stockable de l'énergie peut être mécanique, chimique, biologique ou thermique. Ce module va présenter les différents modes de stockages et leurs théories et applications.

Le premier chapitre présente les différents modes de stockage de manière générale puis illustre le stockage mécanique d'énergie sous forme cinétique et potentiel.

Le deuxième chapitre est dédié au stockage électrochimique de l'énergie où il commence par la présentation des batteries à usage solaire, leurs caractéristiques, leurs paramètres et leurs utilisations hors l'usage solaire. Par la suite et après un rappel sur les condensateurs les supercondensateurs seront présentés avec leur différentes familles, leurs caractérisations et modélisation, leur vieillissement et utilisation.

Finalement, les piles à combustible (PAC) seront présentées dans le troisième chapitre, dont illustre l'historique, le principe de fonctionnement, la cinétique et le rendement et la structure des PAC. Ainsi, il donne les différents types de piles : AFC, PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC... Outre, ce chapitre va entamer la production et le stockage de l'hydrogène, ainsi aux systèmes à énergies renouvelables utilisant les piles à combustibles et leurs applications dans le domaine de l'automobile.

Chapitre I.

Les systèmes de stockage d'énergie

I.1 Introduction

Cette partie présente l'organigramme des différents modes de stockage d'énergie, puis le stockage potentiel d'énergie par pompage d'eau et par air comprimé, ainsi le stockage cinétique d'énergie par volant d'inertie.

I.2 Les différents modes de stockage d'énergie

L'énergie peut être stockée sous une des différents modes présentés dans Fig I.1.

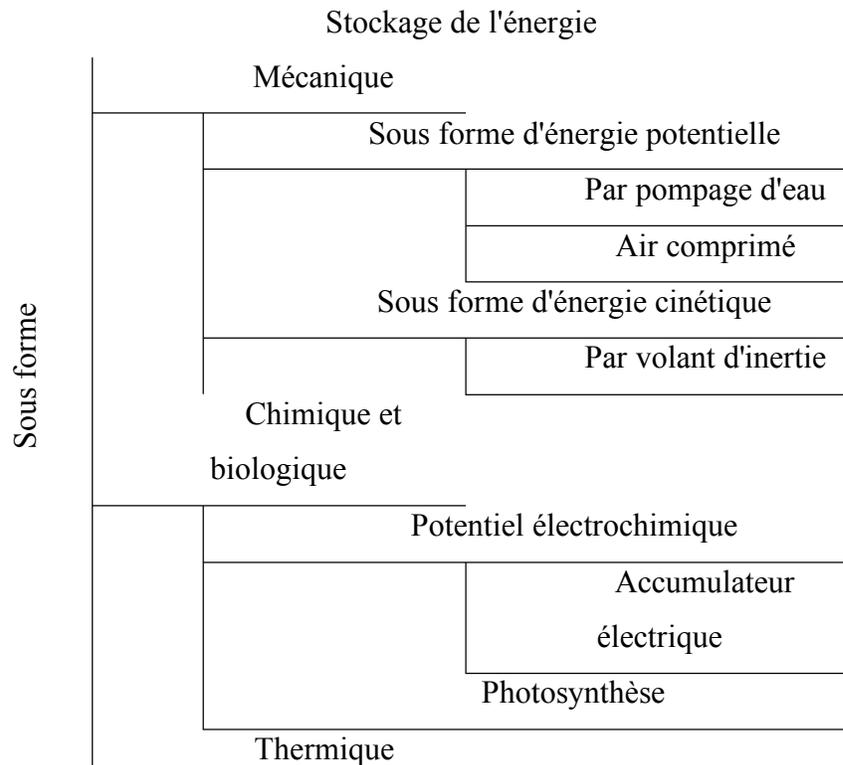


Fig I.1 Formes de stockage d'énergie

La classification des types de stockage de l'énergie peut être aussi selon l'échelle de stockage, voir Fig I.2.

I.3 Echelle de stockage d'énergie

▪ Stockage à grande échelle

C'est les techniques capables de stocker de l'énergie avec des grandes quantités et qui peuvent être utilisées par un gestionnaire de réseau.

- **Stockage à faible et moyenne échelle**

C'est les utilisations peuvent servir le système électrique mais également la production décentralisée pour nombreux utilisations.

Echelle de stockage de l'énergie	
	Stockage à grande échelle
	Par système hydraulique
	Sous forme d'air comprimée
	Couplage avec un stockage de gaz naturel ou liquéfiée
	Sous forme biologique
	Sous forme d'hydrogène
	Sous forme thermique
	Stockage à faible et moyenne énergie
	Accumulateur électrochimique
	Volant d'inertie
	Inductance, super conductance
Super condensateur	
Sous forme air comprimé	

Fig I.2 Echelles de stockage d'énergie

I.4. Stockage gravitaire par pompage (STEP)

En faisant des réservoirs d'eau dans les barrages, on accumule de l'énergie qui ne sera transformée en électricité qu'en fonction des besoins instantanées du réseau. C'est ainsi que certains barrages fonctionnent essentiellement aux heures de pointe, Fig I.3. Il est possible d'aller plus loin en utilisant l'électricité produite durant les heures creuses pour pomper de l'eau depuis la vallée et remplir à nouveau le barrage. On parle alors de station de transfert d'énergie par pompage, ou STEP (Stations de transfert d'énergie par pompage) [1].

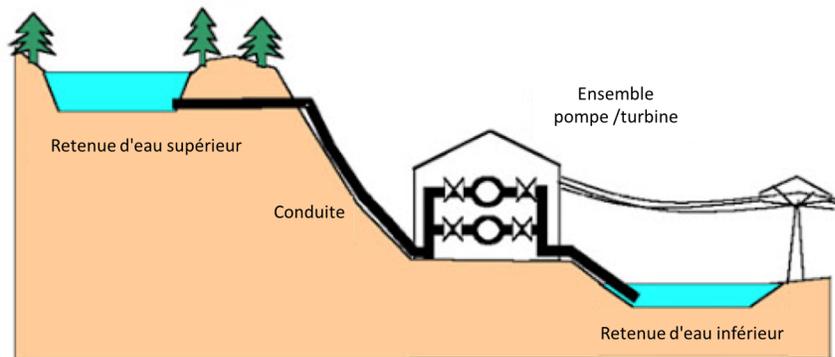


Fig I.3 Principe de fonctionnement pour un STEP

I.4.1 La puissance hydraulique

Le débit et la chute net permettent de calculer la puissance hydraulique [2].

$$P_{hyd} = Q_n H_n \rho g \quad (I.1)$$

P_{hyd} : Puissance hydraulique, en (W)

Q_n : Débit turbiné, en (m^3/s)

H_n : Chute net, en (m)

ρ : Masse volumique de l'eau en (kg/m^3), $1000 kg/m^3$

g : Accélération due à la pesanteur, $9.81 (m/s^2)$

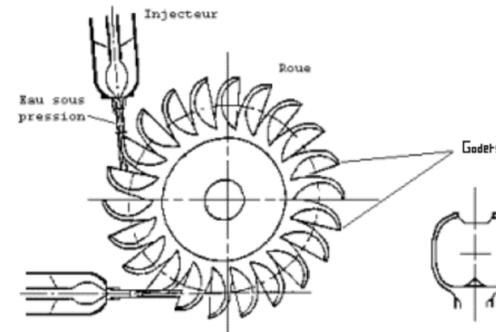
I.4.2 Les turbines

Une turbine hydraulique est une machine tournante entraîne le générateur, le rendement des turbines sont situées généralement entre 80 et 90 %, il existe trois principaux types de turbines Pelton, Francis et Kaplan.

I.4.2.1 Les turbines Pelton

La turbine Pelton est un type de turbine à eau qui a été développée par Lester Ella Pelton dans les années 1870. Elle est généralement utilisée pour les centrales à haut et à faible débit. Les buses sont des jets d'eau directs puissants et à grande vitesse contre une série rotative de godets en forme de cuillère, également connus sous le nom "impulse blades", qui sont montés autour de la jante circulaire d'une roue motrice également appelée "runner". Lorsque le jet d'eau frappe les pales, la direction de la vitesse de l'eau est modifiée pour suivre les contours du godet. L'énergie

impulsionnelle de l'eau exerce un couple sur le godet et le système de roue, faisant tourner la roue; le jet d'eau lui-même fait un « demi-tour » et sort sur les côtés extérieurs du seaux [3].



Vue schématique d'une roue Pelton à deux jets

Fig I.4 La turbine Pelton

La turbine Pelton est préférée pour l'hydroélectricité, lorsque la source d'eau disponible à une hauteur relativement élevée (10-2000 m) à de faibles débits ($0.04-1.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

I.4.2.2 Les turbines Francis

La turbine Francis a été inventée au 19^{ème} siècle par James B. Francis et elle est utilisée pour une chute moyenne et un débit moyen d'eau. La turbine Francis est un type de turbine à réaction, une catégorie de turbine dans laquelle le travail du liquide arrive à la turbine sous une pression immense et l'énergie est extraite par les aubes de turbine à partir du travail du liquide. Le tube de sortie de la turbine est conçu pour aider à ralentir l'écoulement d'eau et à récupérer la pression, Fig I.5. L'écoulement d'eau est radial de l'extérieur vers l'intérieur.

Les turbines Francis couvrent une plage d'hauteur moyenne (40-400 m) et un débit moyen ($0.1-6 \text{ m}^3/\text{s}$). Son efficacité diminue quand le débit diminue. Elles peuvent également être utilisées pour le stockage par pompage, où un réservoir est rempli par la turbine (agissant comme une pompe) entraînée par le générateur agissant comme un gros moteur électrique pendant les périodes de faible demande de puissance [4].

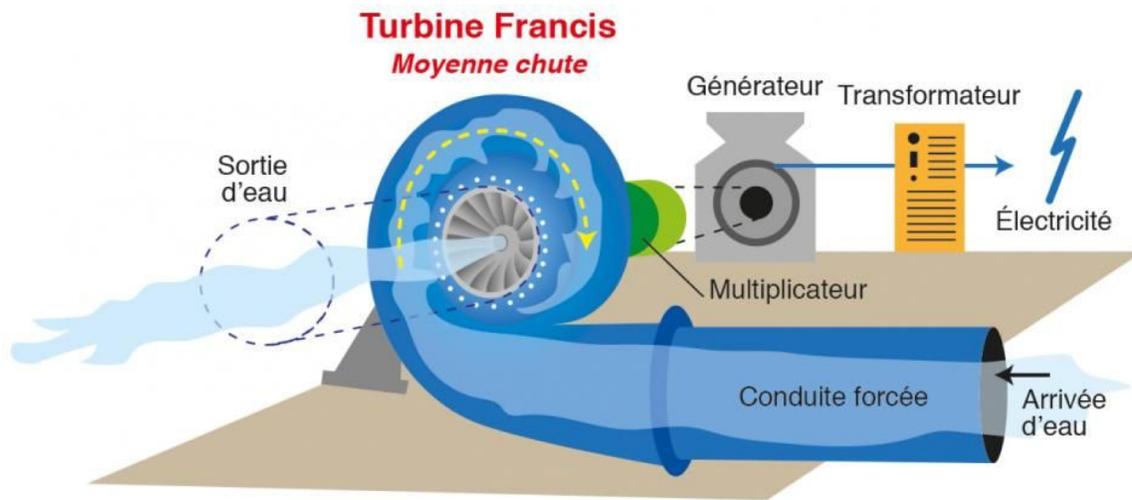


Fig I.5 Turbine Francis

I.4.2.3 Les turbines Kaplan

La turbine Kaplan a été développée en 1913 par le professeur Autrichien Viktor Kaplan. Elle a des pales réglables et elle est utilisée pour les faibles vitesses et les débits élevés. Elle s'agit d'une turbine à réaction à flux entrant, ce qui signifie que le travail de fluide charge la pression lorsqu'il se déplace dans la turbine et abandonne son énergie. L'entrée est un tube en forme de volute qui s'enroule autour du "wicket gate". L'eau est dirigée tangentiellement à travers le portillon et les spirales sur un coureur en forme d'hélice, le faisant tourner, Fig I.6.

Les turbines Kaplan sont largement utilisées pour la production d'énergie électrique. Elles couvrent les sites hydroélectriques les plus bas (10–30 m) et elles sont particulièrement adaptées aux conditions de débit élevé (300-10000 m³/s). Les grandes turbines Kaplan sont conçues individuellement pour chaque site afin de fonctionner avec le rendement le plus élevé possible (>90%). Elles sont très coûteuses à modeler, à fabriquer et à installer, mais elles fonctionnent pendant des décennies [5].

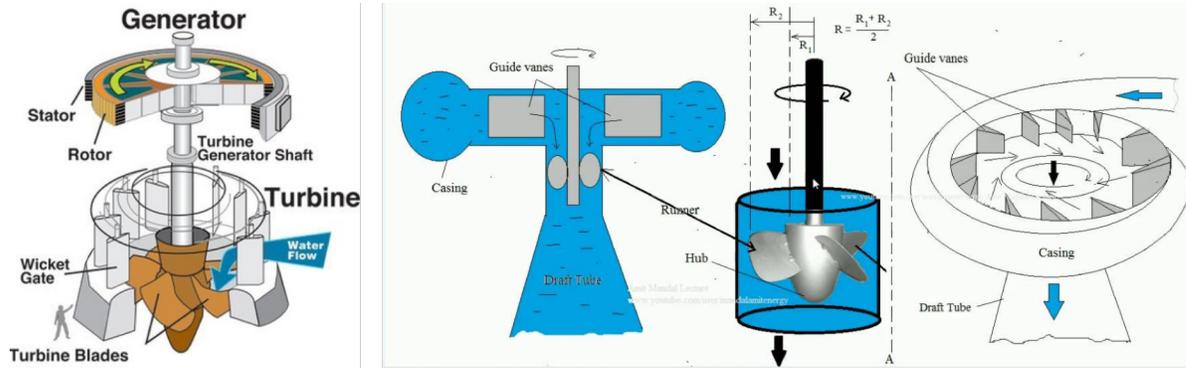


Fig I.6 Turbine Kaplan

I.4.2.4 Les turbines cross-flow

En 1903, Anthony Michel a développé la turbine cross-flow, et elle est utilisée pour les basses hauteurs. (10-70 m) Comme pour une turbine à eau, l'eau est admise au bord de la turbine. Après avoir dépassé le "runner", il repart du côté opposé. Le passage à travers le "runner" deux fois fournit d'efficacité plus élevée, Fig I.7. La turbine cross-flow est une machine à faible vitesse qui convient bien aux emplacements à faible hauteur (2-200 m) mais à débit élevé ($0.03-16 \text{ m}^3/\text{s}$).

L'efficacité maximale d'une turbine cross-flow est légèrement inférieure à celle d'une turbine Kaplan, Francis ou Pelton. Elle a un prix bas et une bonne réglementation. Comme l'eau traverse le "runner" deux fois, offre une efficacité supplémentaire. Les turbines cross-flow sont principalement utilisées dans les mini et micro centrales hydroélectriques. Ainsi son bon point lorsque l'eau quitte le "runner", il aide à le nettoyer des petits débris et de la pollution [6].

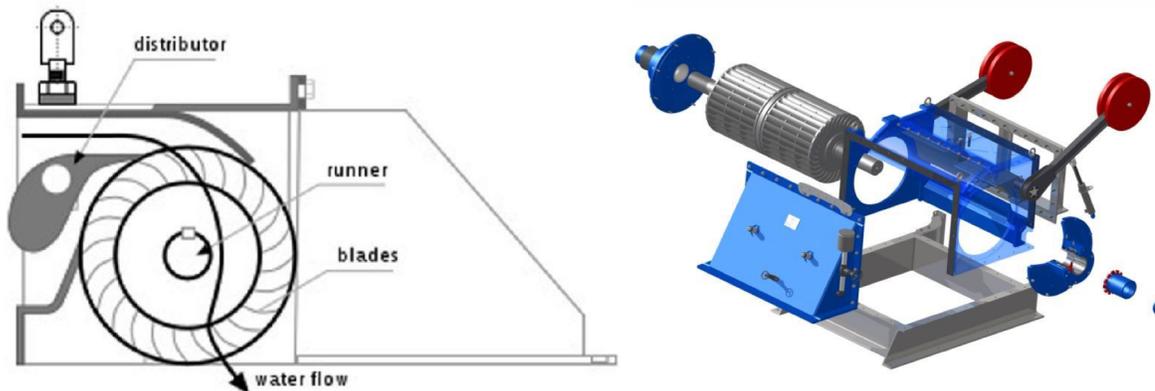


Fig I.7 Turbine cross-flow

Tableau I.1 Plage d'hauteur et débit de chaque type de turbine

Type	Chutes	Débits
Pelton	10 - 2000 m	0.04 – 1.5 m ³ /s
Francis	40 - 400 m	0.1-6 m ³ /s
Kaplan	10 - 20 m	300-10000 m ³ /s
Cross flow	2-200 m	0.03-16 m ³ /s

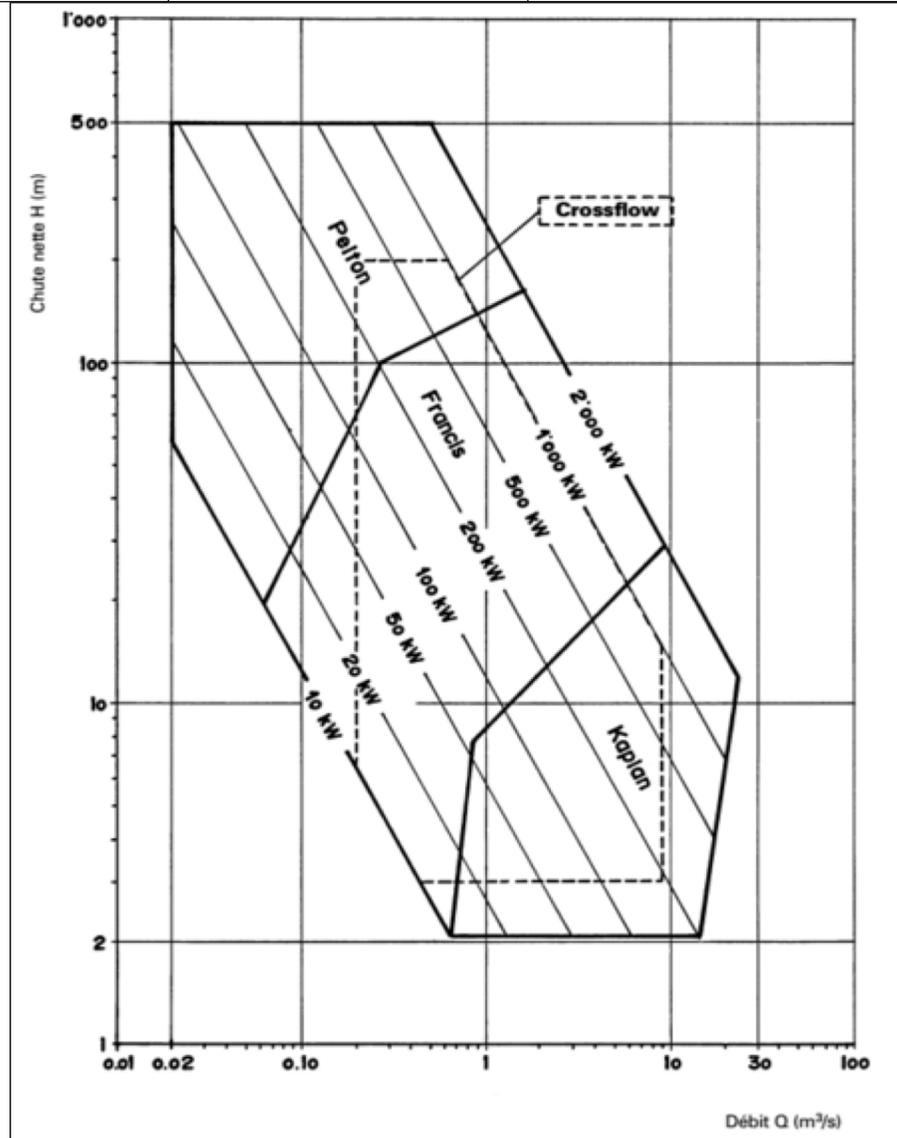


Fig I.8 Plage d'hauteur et débit de chaque type de turbine [24]

I.4.3 Pertes dans une centrale hydraulique

La figure ci-dessous (Fig I.9) résume les pertes existes pour une production hydroélectrique et comment calculer le rendement pour une centrale.

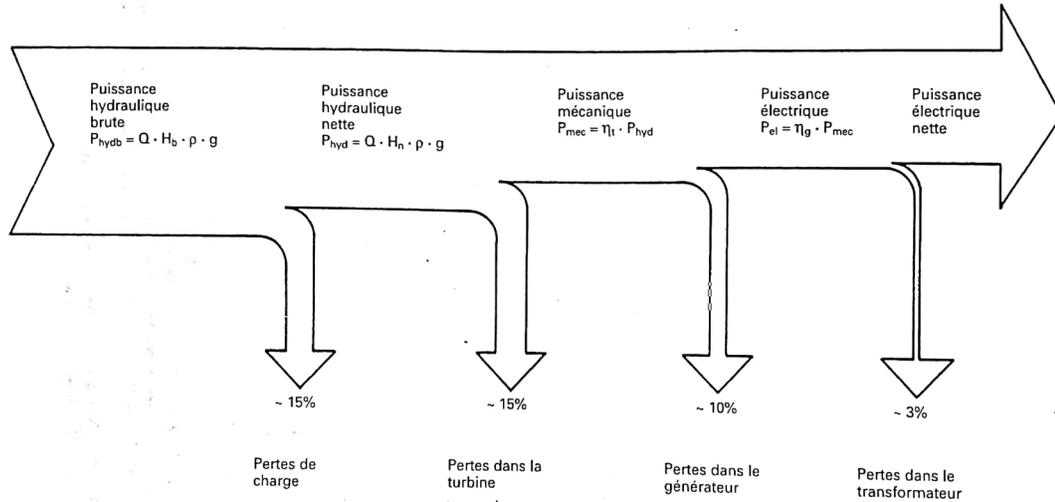


Fig. 1.9 Pertes dans une centrale hydraulique

I.5 Stockage par air comprimé (CAES)

Le principe de CAES (Compressed Air Energy Storage) comme illustré dans Fig I.10 consiste à utiliser l'énergie électrique excédentaire pour comprimer l'air qui est ensuite stocké dans un réservoir souterrain. La compression de l'air génère de la chaleur. L'air peut être libéré vers une chambre de combustion dans une turbine à gaz pour générer de l'électricité [7].

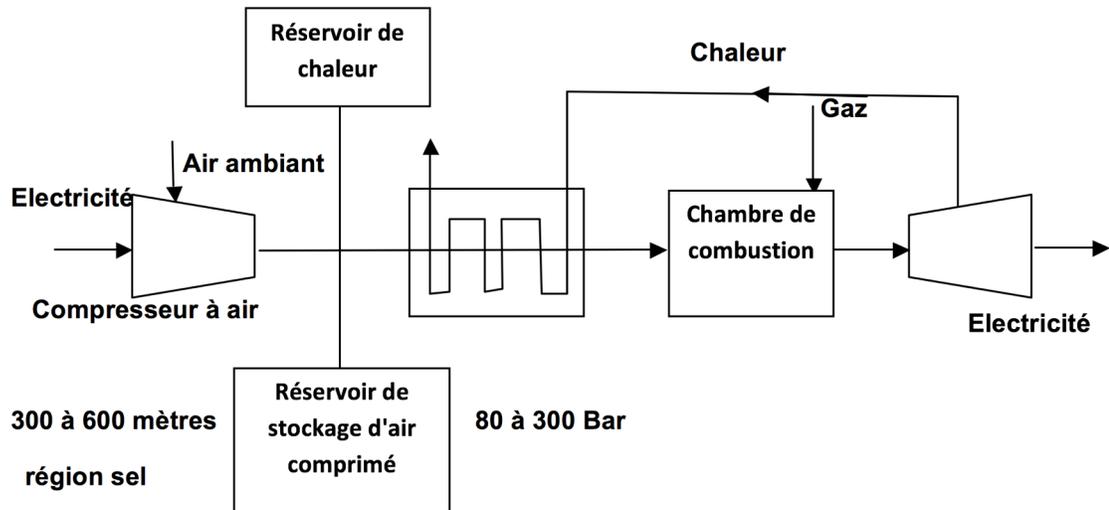


Fig I.10 Principe de fonctionnement des CAES

I.5.1 Types des systèmes CAES

1.5.1.1 Conventionnel

L'air chaud comprimé à la sortie du compresseur est directement envoyé dans une chambre de stockage, l'efficacité des systèmes conventionnel est environ de 50 %.

1.5.1.2 Adiabatique

Les CAES adiabatiques sont semblables aux systèmes conventionnels mais incluent en plus un système permettant de stocker la chaleur, efficacité est environ de 70 %.

1.5.1.3 Isotherme

Un CAES isotherme consiste à extraire la chaleur de l'air au fur et à mesure de sa compression (non pas après sa compression comme les systèmes adiabatiques), efficacité est environ 95 %.

I.6 Volants d'inertie

Il est utilisé pour le stockage inertiel de l'énergie, ou l'énergie est stockée sous forme d'énergie cinétique sur un disque tournant à la vitesse de 130 à 265 tr/s.

I.6.1 Principe de fonctionnement

Pour stocker de l'énergie, le convertisseur pilote la machine électrique de sorte qu'elle fonctionne en moteur, le volant roule et accélère, il emmagasine donc de l'énergie. Puis le

convertisseur pilote la machine électrique de sorte qu'elle fonctionne en générateur, le volant sera freiné et l'énergie sera restituée au réseau. Fig.I.11 montre le principe [8].

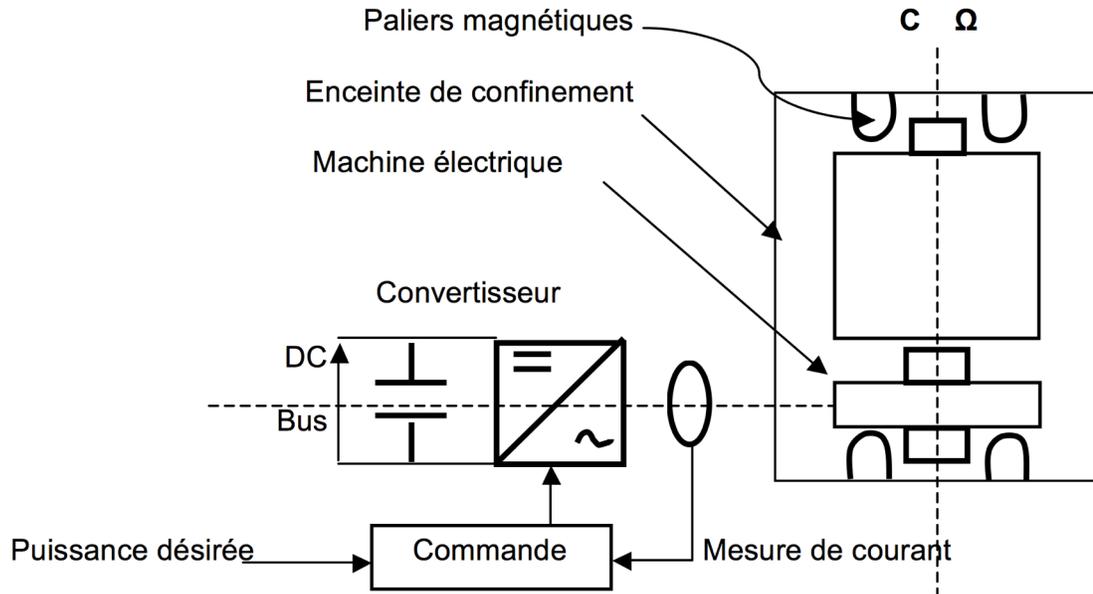


Fig. I.11 Fonctionnement d'un volant d'inertie

I.6.2 Calcul de l'énergie stockable

Rappelons que l'énergie cinétique E_c de la translation d'une masse m à une vitesse v est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (I.2)$$

L'énergie cinétique E_c de la rotation d'un système avec un moment d'inertie J à une vitesse de rotation Ω est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} J \Omega^2 \quad (I.3)$$

Le moment d'inertie des parties tournantes pour quelques cas élémentaires est donné dans le tableau 1.2.

Tableau I.2 Moment d'inertie pour quelques cas

Systèmes	Moment d'inertie
Masse d'une particule	$m \cdot r^2$
Cylindre plein de masse M	$\frac{1}{2} M \cdot r^2$
Cylindre creux de masse M	$\frac{1}{2} M (R_{int}^2 + R_{ext}^2)$
Barre stationnaire de masse M et de longueur L tournant autour de son centre de gravité	$\frac{1}{12} ML^2$

Notons que pour augmenter l'énergie cinétique stockée, il faut à la fois une vitesse de rotation élevée et un moment d'inertie important.

Cependant on se limite au volant et à sa vitesse périphérique V_p où

$$V_p = \Omega R_r \quad (I.4)$$

R_r est le rayon du volant.

Ainsi l'énergie stockée dépend directement de la vitesse maximale périphérique V_{pmax} admise par la partie tournante compte tenu de sa résistance mécanique à la traction en limite élastique R_e , de sa masse volumique ξ et de sa forme.

$$V_{pmax} = k_v \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \quad (I.5)$$

k_v : coefficient de vitesse lié au coefficient de concentration de contrainte dans le volant.

Le k_v pour un cylindre simple de rayon intérieur R_{int} et rayon extérieur R_{ext} est donné par :

$$Kv = \begin{cases} \frac{3+v}{8} & \text{cylindre plein} \\ \frac{3+v}{4} \left(1 + \frac{1-v}{3+v} \alpha^2\right) & \text{cylindre creux} \end{cases} \quad (I.6)$$

$$(I.7)$$

$$\alpha = \frac{R_{int}}{R_{ext}} \quad (I.8)$$

Où v correspond au coefficient de Poisson.

Exercice

Un cylindre plein de masse de 200 kg et de rayon de 50 cm tourne avec une vitesse de 2400 tr/min.

Calculer l'énergie stockée par ce cylindre.

Chapitre II.

Stockage électrochimique

II.1 Introduction

Deux formes de stockage d'énergie seront présentées dans cette partie, le stockage sous forme électrochimique par différentes technologies de batteries et stockage sous forme électrique par les condensateurs et les supercondensateurs.

II.2 Batterie à usage solaire

Les batteries à usage solaire PV fonctionnent comme n'importe quelle batterie rechargeable; elles stockent du courant continu (CC) à partir d'une source externe (par exemple panneaux photovoltaïques) et déchargent du courant continu lorsque de l'énergie est requis.

II.2.1 Raccordement des batteries solaires avec le système PV

Il y a deux façons principales pour raccorder un système de stockage par batterie à un système PV [9]:

1- Installer les batteries avec l'onduleur solaire du côté panneaux PV (Fig II.1) elles se chargent à partir des panneaux et leur courant n'est converti en alternatif que lorsqu'il est utilisé [9].

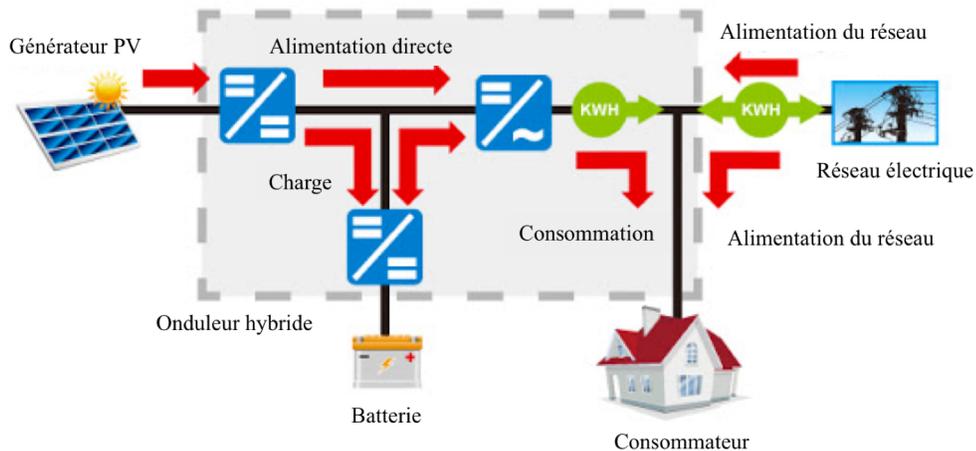


Fig II.1 Batterie à côté de PV

2- Installer les batteries au côté réseau (Fig II.2), là où le courant continu du PV a déjà été converti en alternatif. Un onduleur séparé convertit le courant alternatif en courant continu pour le stocker dans les batteries. Lorsque la batterie se décharge, le même onduleur séparé convertit le courant continu en courant alternatif.

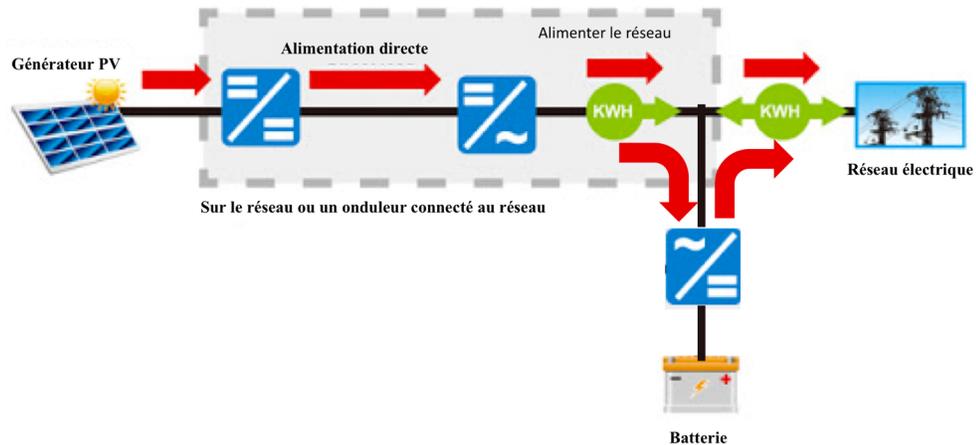


Fig II.2. Batterie à côté réseau

II.2.2 Types des batteries solaires

Les types de batteries couramment utilisés pour les systèmes PV sont :

Batteries plomb-acide (Lead-acid), batteries nickel-métal-hydrure (Nickel-metal hydride NiMH), batteries au nickel-cadmium (Nickel cadmium NiCd), et batteries lithium-ion (Lithium ion batteries LIB) [10].

II.2.3 Batteries plomb-acide (Lead-acid)

Il s'agit de la technologie la plus ancienne et la plus mature disponible. Les batteries scellées sont résistantes aux éclaboussures et ne nécessitent pas d'entretien périodique. Les batteries plomb-

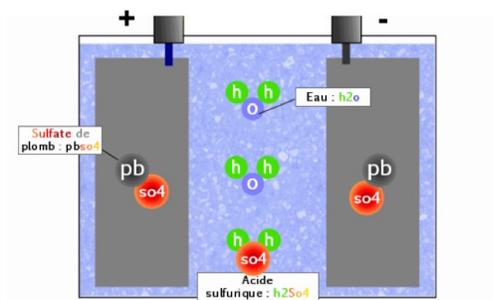


Fig II.3 Batterie plomb acide

acide (Fig II.3) inondées sont généralement les moins chères mais nécessitent l'ajout d'eau distillée au moins une fois par mois pour reconstituer l'eau perdue pendant le processus de charge normale.

II.2.4 Batteries nickel-métal-hydrure (Nickel-Metal Hydride NiMH)

Les batteries NiMH ont une densité d'énergie élevée, comparable à celle des batteries lithium-ion (voir ci-dessous). Cependant, les batteries NiMH souffrent d'un taux élevé d'autodécharge.

II.2.5 Batteries au nickel-cadmium (Nickel Cadmium NiCd)

Les batteries NiCd (Fig II.4) ont une densité d'énergie beaucoup plus faible que les batteries lithium-ion.

Outre, les batteries NiCd souffrent de l'effet mémoire : les batteries perdent leur capacité d'énergie utilisable si elles sont chargées à plusieurs reprises après avoir été partiellement déchargées, l'effet mémoire affecte les performances et la durée de vie des batteries lorsque celles-ci sont rechargées avant d'être totalement déchargées.

Ces inconvénients font les batteries NiMH et NiCd inappropriées pour les systèmes de stockage PV [11].

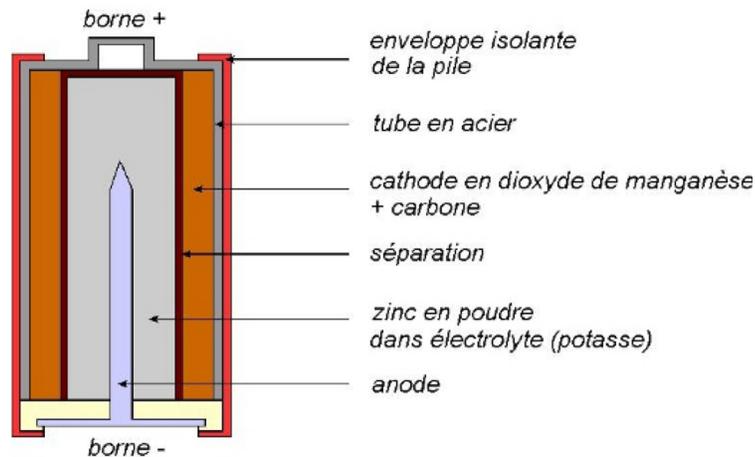


Fig II.4 Batteries au Nickel-Cadmium [23]

II.2.6 Batteries lithium-ion (Lithium Ion Batteries LIB)

Les batteries lithium-ion (LIB) et les batteries lithium-ion polymère (LiPo), ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années.

Leur densité énergétique élevée a fait la technologie préférée pour les applications de stockage légères, comme dans les téléphones mobiles.

Cependant, ces technologies souffrent encore de coûts élevés et d'une faible maturité.

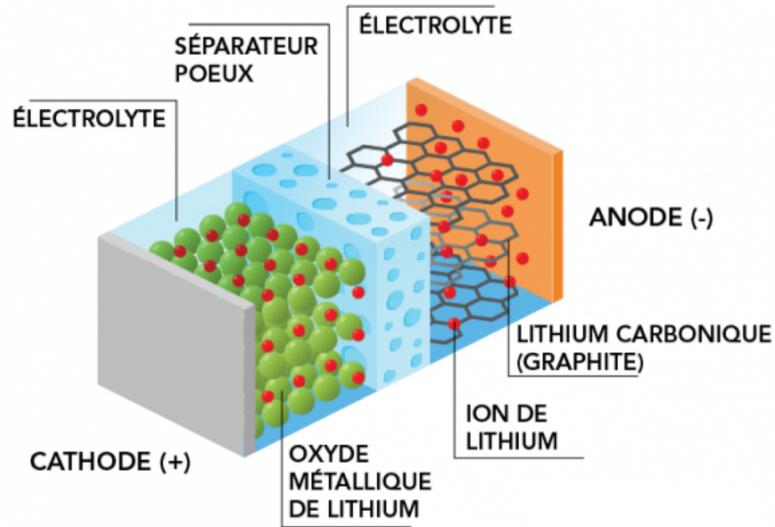


Fig II.5 Batteries Lithium-Ion [25]

II.3 Technologie de la batterie (les accumulateurs)

Les accumulateurs ou batterie d'accumulateurs se composent au moins de deux cellules voltaïques, qui sont connectées en série pour fournir une tension continue constante aux bornes de sortie de la batterie.

La tension est produite par une réaction chimique à l'intérieur de la cellule. Les électrodes sont immergées dans un électrolyte, ce qui force la charge électrique à se séparer sous forme d'ions et d'électrons libres [12].

II.3.1 Principe de fonctionnement

La batterie fonctionne sur la réaction d'oxydation et de réduction d'un électrolyte avec des métaux. Lorsque les électrodes (deux substances métalliques différentes) sont placées dans un électrolyte dilué, une réaction d'oxydation et de réduction a lieu respectivement dans les électrodes. Suite de la réaction d'oxydation, une électrode est chargée négativement appelée cathode et en raison de la réaction de réduction, une autre électrode est chargée positivement appelée anode. Donc la cathode forme la borne négative tandis que l'anode forme la borne positive d'une batterie.

Pour bien comprendre le principe de base de la batterie, il faut avoir le concept de base des électrolytes et de l'affinité des électrons. En fait, lorsque deux métaux différents sont immergés dans un électrolyte, une différence de potentiel se produit entre ces métaux.

II.3.2 Grandeurs électriques des accumulateurs

II.3.2.1 La tension

C'est la différence de potentiel aux bornes de la batterie, elle s'exprime en Volt (V). Ainsi, la tension marquée sur une batterie c'est la tension nominale ; cependant, la tension en circuit ouvert sur une batterie complètement chargée est plus élevée de 5 à 7 % sa valeur nominale. La tension en circuit fermé est la tension de fonctionnement. Il faut vérifier toujours la tension nominale correcte avant de connecter une batterie.

II.3.2.2 La capacité

La capacité de la batterie est une mesure de la charge stockée par la batterie (généralement en ampères-heures), et elle est déterminée par la masse de matière active contenue dans la batterie. La capacité de la batterie représente la quantité maximale d'énergie qui peut être extraite de la batterie dans certaines conditions spécifiées. Cependant, les capacités des batteries peuvent varier considérablement de sa capacité nominale, car la capacité de la batterie dépend fortement de l'âge et de l'historique de la batterie, des régimes de charge ou de décharge de la batterie et de la température.

Par exemple, une batterie avec une capacité de 1 Ah, signifie qu'elle peut fournir 1 A de courant pendant une heure, ou 0,1 A pendant 10 heures, ou 0,01 A (10 mA) pendant 100 heures.

II.3.2.3 Densité énergétique

La densité énergétique ou l'énergie spécifique, ou densité d'énergie gravimétrique, définit la capacité de la batterie par unité de masse (Wh/kg); ou de volume, densité d'énergie volumétrique, reflète le volume en litres (Wh/l).

II.3.2.4 La charge

Il existe trois modes courants pour charger une batterie ; tension constante, courant constant et combinaison de tension constante / courant constant avec ou sans circuit de charge intelligent.

Une tension constante permet au courant complet du chargeur de circuler dans la batterie jusqu'à ce que l'alimentation atteigne sa tension prédéfinie. Le courant diminuera alors jusqu'à une valeur minimale une fois que ce niveau de tension est atteint. La batterie peut être laissée connectée au chargeur jusqu'à ce qu'elle soit prête à être utilisée et restera à cette « tension de flottage », charge lente pour compenser l'autodécharge normale de la batterie.

Le courant constant est une forme simple de charge des batteries, avec une intensité de courant à environ de 10% de la capacité maximale de la batterie. Le temps de charge est relativement long avec l'inconvénient que la batterie peut surchauffer si elle est surchargée, entraînant un remplacement prématuré de la batterie. Ce mode de charge convient aux batteries Ni-MH. La batterie doit être déconnectée une fois la batterie est chargée.

La tension constante / courant constant est une combinaison des deux méthodes ci-dessus. Le chargeur limite l'intensité de courant à un niveau prédéfini jusqu'à ce que la batterie atteigne un niveau de tension prédéfini. Après, le courant diminue jusqu'à que la batterie est complètement chargée. La batterie au plomb utilise la méthode de charge à tension constante / à courant constant.

II.3.2.5 La décharge

Si un accumulateur reste branché trop longtemps en décharge sur un circuit, il va trop se décharger, il va s'éteindre et le système chimique d'échange d'électricité va être désamorcé.

II.3.2.6 L'autodécharge

Le taux de perte de capacité (par mois) peut varier en fonction de la technologie de la batterie ; Plomb 5 %, Lithium 10 %, Ni-Cd 20 %, Ni-MH 30 %, l'autodécharge est plus élevée au cours des premiers 24 heures et diminue par la suite. L'autre décharge augmente avec l'âge de l'accumulateur et avec la température ambiante.

II.3.2.7 Profondeur de décharge

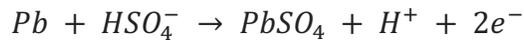
Une batterie ne doit pas être déchargée en dessous d'un certain seuil, sinon elle risque de s'endommager.

II.3.3 Caractéristiques d'un accumulateur au Plomb acide

II.3.3.1 Décharge

A l'état de déchargé, les bornes positives et négatives deviennent du sulfate de plomb (PbSO_4) et l'électrolyte perd une grande partie de son acide sulfurique dissous et devient principalement de l'eau. Le processus de décharge est entraîné par la forte réduction d'énergie lorsque 2H^+ (aq) (protons hydratés) de l'acide réagissent avec les ions O^{2-} de PbO_2 pour former les liaisons fortes O-H dans H_2O [13].

Réaction de la borne négative



La libération de deux électrons conducteurs donne à l'électrode de plomb une charge négative (Fig II.6).

Au fur et à mesure que les électrons s'accumulent, ils créent un champ électrique qui attire les ions d'hydrogène et repousse les ions du sulfate, conduisant à une double couche près de la surface. Les ions d'hydrogène filtrent l'électrode chargée de la solution, ce qui limite la poursuite de la réaction à moins que la charge ne puisse s'écouler hors de l'électrode.

Réaction de la borne positive

Exploitant la conductivité métallique du PbO₂.



II.3.3.2 Charge

À l'état complètement chargé, la plaque négative est constituée de plomb et la plaque positive est constituée de dioxyde de plomb. La solution d'électrolyte a une concentration plus élevée d'acide sulfurique aqueux, qui stocke la plupart de l'énergie chimique.

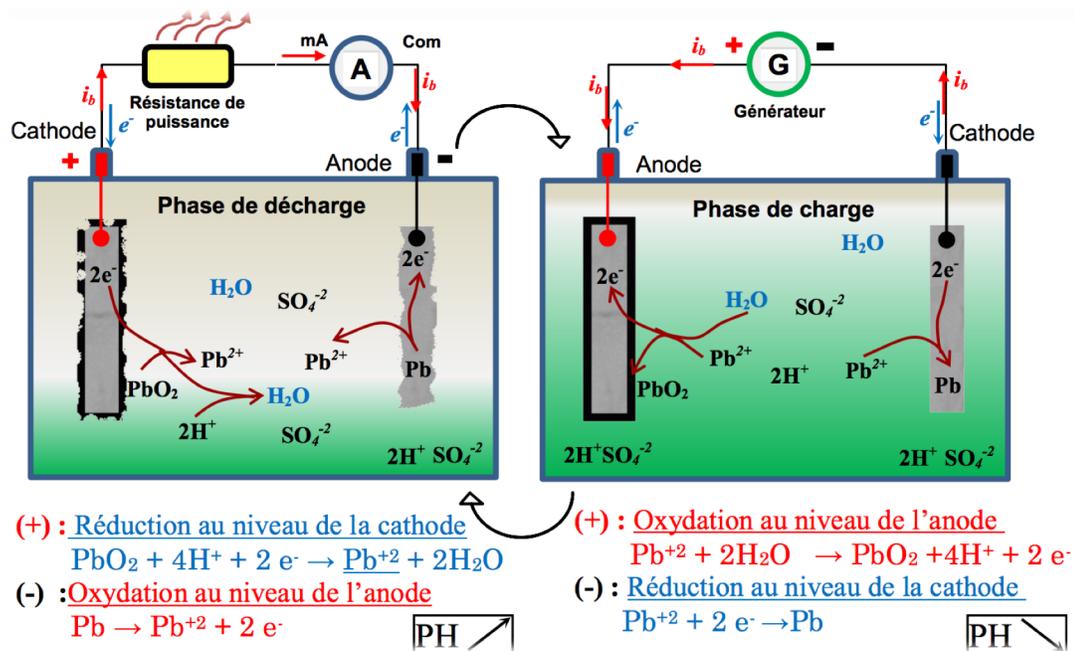


Fig II.6 Fonctionnement d'une batterie

Exercice



L'équipement doit être alimentée durant 7 heures.

Donner le nombre de batteries et donner le schéma de raccordement.

2.4. Supercondensateur

2.4.1 Rappel sur les condensateurs

Un condensateur est constitué de deux conducteurs (plaques métalliques) placés à proximité l'un de l'autre, mais sans qu'il y ait un contact entre eux (FigII.7). Les plaques métalliques sont appelées les armatures de condensateur. Elles sont séparées par un isolant d'épaisseur variable appelée diélectrique [14].



Fig II.7 Condensateur

Si une tension aux armatures d'un condensateur est appliquée, il s'électrise rapidement. L'armature branchée à la borne positive de la batterie porte une charge $+Q$ et celle branchée à la borne négative de la batterie portera une charge égale et opposé $-Q$.

Dans les schémas on représente les condensateurs par le symbole :



II.4.1.1 La capacité d'un condensateur

La capacité d'un condensateur à plaques parallèles est proportionnelle à la surface de la plus petite des deux plaques, A en m^2 et inversement proportionnelle à la distance ou à la séparation, d (c'est-à-dire l'épaisseur du diélectrique) donnée en mètres entre ces deux plaques conductrices.

L'équation généralisée de la capacité d'un condensateur à plaques parallèles est donnée comme suit: $C = \epsilon (A / d)$ où ϵ représente la permittivité absolue du matériau diélectrique utilisé. La permittivité d'un vide a la valeur de la constante $8,84 \times 10^{-12}$ Farads par mètre.

La capacité est la propriété électrique d'un condensateur et elle est la mesure de la capacité d'un condensateur à stocker une charge électrique sur ses deux plaques, l'unité de capacité est le Farad (en abrégé F) du nom du physicien britannique Michael Faraday.

La capacité est définie comme étant qu'un condensateur a la capacité d'un Farad lorsqu'une charge d'un Coulomb est stockée sur les plaques par une tension d'un volt. La capacité C est toujours positive en valeur et n'a pas d'unités négatives. Cependant, le Farad est une très grande unité de mesure à utiliser seule, de sorte que des sous-multiples du Farad sont généralement utilisés tels que les micro-Farads, les nano-Farads et les pico-Farads [15].

II.4.1.2 Rôle du diélectrique dans un condensateur

Les diélectriques empêchent les charges de passer d'une armature à l'autre ce qui respectait pour effet de décharger le condensateur.

La présence d'un diélectrique permet d'approcher les armatures sans risquer qu'elle se touchent ce qui accroît la capacité.

II.4.1.3 Les condensateurs en série et en parallèle

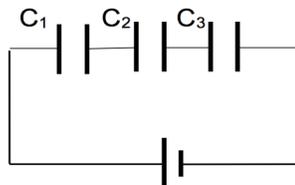


Fig II. 8 Raccordement des condensateurs en série

Comme présenté dans Fig II. 8, la tension totale est la somme des tensions aux bornes de chaque condensateur.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 ; V = \frac{Q}{C} \quad (\text{II.1})$$

Quand remplace les tensions par leurs valeurs dans (II.1) on obtient :

$$\frac{Q}{c} = \frac{Q_1}{c_1} + \frac{Q_2}{c_2} + \frac{Q_3}{c_3} \quad (\text{II.2})$$

La capacité équivalente des condensateurs raccordés en série est donnée par :

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \quad (\text{II.3})$$

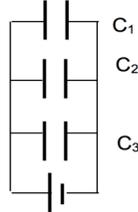


Fig II.9 Raccordement des condensateurs en parallèle

$$V = V_1 = V_2 = V_3 \quad (\text{II.4})$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{II.5})$$

$$C.V = C_1.V + C_2.V + C_3.V \quad (\text{II.6})$$

D'après les équations (II.4), (II.5) et (II.6), la capacité équivalente des condensateurs raccordés en parallèle est donnée par :

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (\text{II.7})$$

L'énergie électrique emmagasinée par un condensateur est :

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}C.V^2 \quad (\text{II.8})$$

II.4.2 Présentation d'un supercondensateur

Comme un condensateur ordinaire, un supercondensateur a deux plaques qui sont séparées par un diélectrique (Fig II.10). Un supercondensateur diffère d'un condensateur ordinaire de deux caractéristiques importantes ; la surface de ses plaques est beaucoup plus grande et la distance entre elles est beaucoup plus petite, parce que le séparateur entre les deux plaques fonctionne d'une manière différente d'un diélectrique conventionnel [16].

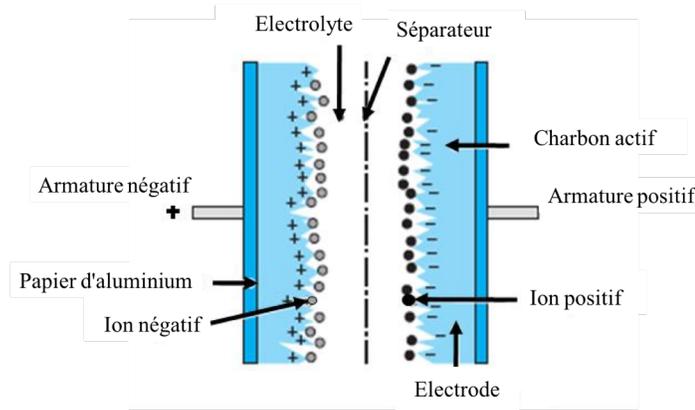


Fig II.10 Présentation d'un supercondensateur

Les plaques sont fabriquées par un métal recouvert d'une substance poreuse telle que du charbon actif en poudre, ce qui le donne une plus grande surface pour stocker beaucoup plus de charge.

Dans un condensateur ordinaire, les plaques sont séparées par un diélectrique relativement épais comme du mica (une céramique), un mince film plastique ou même simplement de l'air (dans certain appareil comme le cadran de réglage à l'intérieur d'une radio). Lorsqu'un condensateur est chargé, les charges positives s'attachent sur une plaque et les charges négatives sur l'autre, créant un champ électrique entre elles. Le champ polarise le diélectrique, de sorte que ses molécules s'alignent dans la direction opposée au champ et réduisent sa force. Cela signifie que les plaques peuvent stocker plus de charges à une tension donnée [16].

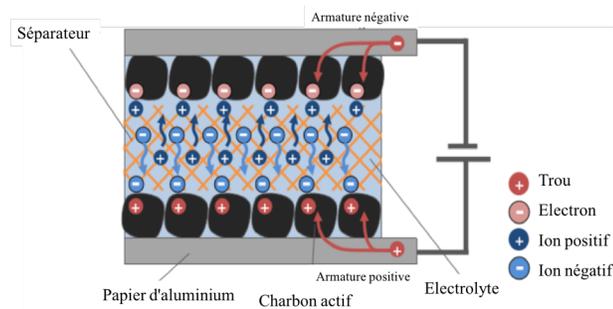


Fig II.11 Fonctionnement d'un supercondensateur

Dans un supercondensateur (Fig II.11), il n'y a pas de diélectrique, au lieu de cela, les deux plaques sont trempées dans un électrolyte et séparées par un isolant très mince (qui peut être en carbone, en papier ou en plastique). Lorsque les plaques sont chargées, une charge opposée se forme de chaque côté du séparateur, créant une double couche électrique, d'épaisseur très faible

(peut-être juste une molécule, par rapport à un diélectrique dont l'épaisseur peut varier de quelques microns à un millimètre ou plus dans un condensateur conventionnel). C'est pourquoi les supercondensateurs sont souvent appelés condensateurs à double couches, également appelés condensateurs électriques à double couches.

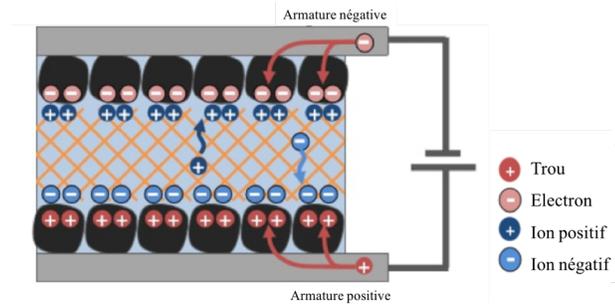


Fig II.12 Un supercondensateur chargé

La capacité d'un condensateur augmente tant que la surface des plaques augmente et que la distance entre les plaques diminue. Donc, les supercondensateurs augmentent leur capacité beaucoup plus grande d'une combinaison de plaques avec une surface efficace plus grande (en raison de leur construction en charbon actif) et moins de distance entre elles (en raison de la double couches très efficace). Fig II.12 présente un supercondensateur chargé à l'état repos.

II.4.3 Applications des supercondensateurs

Aujourd'hui, les supercondensateurs de petite taille, sont largement utilisés comme sources d'alimentation sans entretien comme pour les mémoires intégrées et les micro-ordinateurs. Parmi les nouvelles applications proposées pour les supercondensateurs de grande taille est de figurer le nivellement de charge dans les véhicules électriques et hybrides ainsi que dans le domaine de la traction, le démarrage des moteurs, les applications dans les télécommunications et les exigences de qualité et de fiabilité de l'énergie pour les installations électriques sans coupure. En général, les supercondensateurs peuvent être adaptés aux deux domaines d'application suivants [14].

Le premier correspond aux applications d'haute puissance. Grâce à la capacité élevée des supercondensateurs, ils ouvriront de nouvelles opportunités pour l'électronique de puissance. Toutes les applications nécessitant des pics de puissance pour courte durée peuvent être fournies par ces condensateurs.

La gestion rapide de l'énergie dans les véhicules hybrides ou le démarrage de moteurs diesel lourds sont des exemples typiques où un courant important est requis pendant une courte période.

Le second correspond aux applications basse consommation, les supercondensateurs, même s'ils sont beaucoup plus gros, ils apportent suffisamment d'avantages pour remplacer les batteries. Dans ce domaine, l'onduleur ainsi que les installations de sécurité sont les exemples les plus représentatifs.

II.4.4 Différentes familles des supercondensateurs

Il existe plusieurs normes de classification pour les supercondensateurs. Cette partie présentera principalement deux méthodes de classification. Le premier sera classé en fonction des différents mécanismes de stockage d'énergie des matériaux d'électrode, et le second sera classé en fonction des différents électrolytes.

II.4.4.1 Classification selon les différents mécanismes de stockage d'énergie

Les supercondensateurs peuvent être divisés en supercondensateurs symétriques, supercondensateurs asymétriques et supercondensateurs hybrides.

II.4.4.2 Classification selon les différents électrolytes

Selon le type d'électrolyte, ils sont divisés en électrolytes aqueux et électrolytes organiques. Parmi eux, les électrolytes aqueux comprennent : les électrolytes acides, les électrolytes alcalins, et l'électrolyte neutre.

II.4.5 Modélisation des supercondensateurs

Un supercondensateur peut être modélisé sous une forme simplifiée comme un circuit RC, avec une résistance interne et une capacité linéaire dépendant de la tension (Fig II.12). Ce modèle convient aux applications où l'énergie stockée dans le condensateur est d'une importance primordiale et la réponse transitoire peut être négligée [15].

Le modèle simplifié utilise un modèle de composant de condensateur variable PLECS pour implémenter la capacité dépendante de la tension. Le modèle de condensateur variable est basé sur l'équation :

$$i = \frac{d}{dt}(C \cdot v) = C \frac{dv}{dt} + v \frac{dC}{dt} \quad (\text{II.9})$$

Puisque la tension et sa dérivée sont calculées, la capacité C , et sa dérivée par rapport au temps, $\frac{dC}{dt}$, sont nécessaires comme entrées externes.

Puisque $\frac{dC}{dt}$ ne peut pas être calculée facilement. L'équation ci-dessus doit être réorganisée en utilisant la règle de la chaîne pour permettre au deuxième terme d'être exprimé comme un facteur de $\frac{dv}{dt}$ plutôt que de $\frac{dC}{dt}$:

$$i = C \frac{dv}{dt} + v \frac{dC}{dt} \frac{dv}{dt} \quad (\text{II.10})$$

$$i = \frac{dv}{dt} \left(C + \frac{dC}{dt} v \right) + 0 \quad (\text{II.11})$$

$$i = \frac{dv}{dt} C_1 \quad (\text{II.12})$$

Equation d'effet de la tension :

$$C(v) = C_0 + k_v v \quad (\text{II.13})$$

Ce réarrangement permet de mettre en œuvre la caractéristique de capacité variable en fournissant le terme C_1 à l'entrée de valeur de capacité et en réglant l'entrée dérivée de capacité à zéro. Calcul de $C + v \frac{dC}{dt}$ pour l'équation d'effet de la tension donne :

$$C_1 = C_0 + 2k_v v \quad (\text{II.14})$$

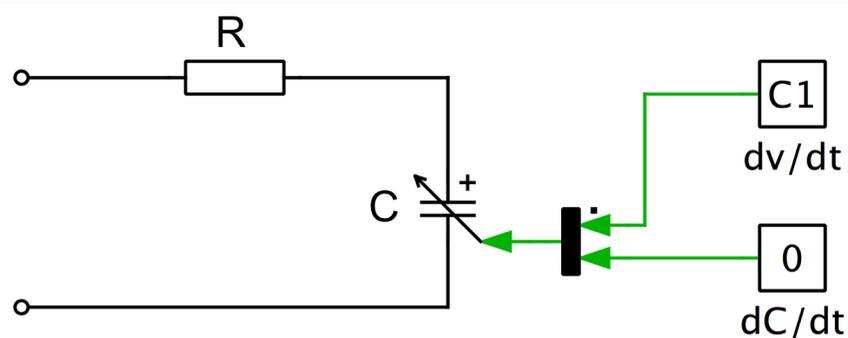


Fig II.12 Modèle d'un supercondensateur

Chapitre III.

Piles à Combustible (P.A.C.)

III.1 Historique

En 1800, William Nicholson et Anthony Carlisle ont décrit le processus d'utilisation de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. William Grove est crédité de la première démonstration connue de la pile à combustible en 1839. Grove a vu des notes de Nicholson et Carlisle et a pensé qu'il pourrait recomposer de l'eau en combinant des électrodes dans un circuit en série, et l'a bientôt accompli avec un dispositif appelé un « gaz batterie ». Il fonctionnait avec des électrodes en platine séparées dans l'oxygène et l'hydrogène immergées dans une solution d'électrolyte d'acide sulfurique dilué. Les récipients scellés contenaient de l'eau et de gaz, et il a observé que le niveau d'eau montait dans les deux tubes à mesurer que le courant circulait. L'appareil était surnommé la « cellule Grove » et se composait d'une électrode de platine immergée dans l'acide nitrique et d'une électrode de zinc immergée dans du sulfate de zinc. Il a généré environ 12 ampères de courant à environ de 1,8 volts [17].

Friedrich Wilhelm Ostwald (1853–1932), a fourni une partie importante de la compréhension théorique des piles à combustible. En 1893, Ostwald a déterminé expérimentalement les rôles de nombreux composants de la pile à combustible.

Ludwig Mond (1839-1909). En 1889, Mond et son assistant Carl Langer ont effectué de nombreuses expériences en utilisant un gaz dérivé du charbon. Ils utilisaient des électrodes en platine mince et perforé et avaient de nombreuses difficultés avec les électrolytes liquides. Ils ont atteint six ampères par pied carré (la surface de l'électrode) à 0,73 volts.

Charles R. Alder Wright (1844–1894) et C. Thompson ont développé une pile à combustible similaire à peu près au même moment. Ils ont eu des difficultés à empêcher les gaz de fuir d'une chambre à une autre. La fuite et quelques autres défauts de conception ont empêché la batterie d'atteindre des tensions aussi élevées qu'un volt. Wright et Thompson ont estimé que s'ils disposaient de plus de financement, ils pourraient créer une cellule plus robuste qui fournirait une électricité adéquate pour de nombreuses applications.

L'équipe de Louis Paul Cailletton (1832–1913) a estimé que le processus électrochimique de la pile à combustible n'était pas pratique en raison du besoin aux métaux précieux. Outre, de nombreux articles publiés au cours de la même période ont déclaré que le charbon était

extrêmement peu coûteux, de sorte qu'un nouveau système plus efficace ne réduirait pas considérablement les prix de l'électricité.

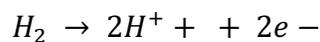
William W. Jacques (1855–1932), n'a pas prêté attention à ces critiques et a surpris le monde scientifique en construisant une batterie au carbone en 1896. De l'air était injecté dans un électrolyte alcalin pour réagir avec un carbone électrode. Il pensait atteindre une efficacité de 82%, mais n'obtenait qu'une efficacité de 8%.

Emil Baur (1873-1944) et plusieurs de ses étudiants ont mené de nombreuses expériences sur différents types de piles à combustible au début des années 1900. Il a travaillé sur des appareils à haute température et une unité utilisant un électrolyte solide d'argile et d'oxydes métalliques.

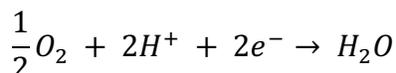
O. K. Davtyan a fait de nombreuses expériences pour augmenter la conductivité et la résistance mécanique de l'électrolyte dans les années 1940. De nombreuses conceptions n'ont pas donné les résultats escomptés, mais les travaux de Davtyan et de Baur ont contribué aux recherches préliminaires nécessaires pour les dispositifs actuels à pile à combustible fondu et à pile à oxyde solide [18].

III.2 Principe de fonctionnement

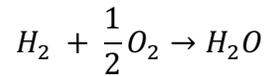
Une pile à combustible (PAC) est un générateur électrochimique d'énergie. Il est constitué de deux électrodes (une anode émettrice d'électrons et une cathode réceptrice d'électrons), séparées par un électrolyte permettant le passage des ions, et une membrane évite la mise en contact des réactifs à l'anode et à la cathode (Fig III.1). Ce générateur convertit l'énergie chimique en énergie électrique par deux réactions électrochimiques. Dans une pile à combustible à membrane électrolyte alimentée à l'hydrogène, l'hydrogène est oxydé en protons et en électrons à l'anode. Les protons migrent à travers l'électrolyte vers la cathode. La membrane étant un isolant électrique, les électrons sont contraints de circuler dans un circuit électrique externe. À la cathode, l'oxygène réagit avec les protons pour produire de l'eau, qui est le seul déchet d'une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène. L'hydrogène est oxydé à l'anode en protons [19].



Tandis que l'oxygène est réduit à la cathode



Réaction totale dans la cellule



A base d'hydrogène et d'oxygène, la PC donne de l'énergie, de la chaleur et de l'eau. Il existe d'autres carburants, électrolytes et ions de transfert de charge pour les autres types de piles à combustible - mais le principe est le même.

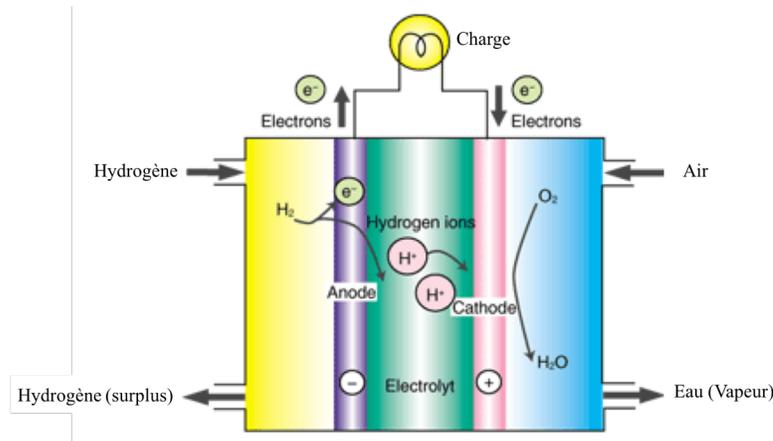


Fig III.1 Principe de fonctionnement d'une PAC

La force motrice d'une pile à combustible est l'affinité naturelle pour moins d'énergie (chimique) libre. L'hydrogène et l'oxygène sont instables en présence l'un de l'autre et forment spontanément de l'eau dans une réaction redox. La tension maximale d'une seule pile à combustible est inférieure à 1 volt. Pour une utilité pratique, de nombreuses piles doivent fonctionner ensemble. Généralement, cela se fait en connectant plusieurs cellules en série pour former une PAC. Par variant le nombre et la taille des cellules, la PAC peut être ajusté pour répondre presque à tous les types d'exigences.

III.3. Cinétique et rendement d'une PAC

Une pile à combustible est un convertisseur d'énergie électrochimique. Son fonctionnement est basé sur les réactions électrochimiques précédentes, se produisant simultanément sur l'anode et la cathode.

Plus précisément, les réactions se produisent sur une interface entre l'électrolyte (conducteur des ions) et l'électrode (conducteur des électrons). Tandis qu'il y a des gaz durant les réactions électrochimiques des piles à combustible, les électrodes doivent être poreuses, permettant aux gaz d'arriver, ainsi que de permettre à l'eau produite de quitter les sites de réaction. Notez que

ce sont les réactions globales et que dans les deux cas, il y a plusieurs étapes intermédiaires séquentielles et parallèles impliquées.

Le rendement d'une pile à combustible est défini par le rapport entre la puissance d'électricité produite et la puissance d'hydrogène consommé. Les deux grandeurs doivent être en mêmes unités watts ou kilowatts [20].

La puissance d'électricité produite est simplement le produit entre la tension et le courant.

$$P = V.I \quad (\text{III.1})$$

Où I est le courant en ampères et V est le potentiel de la cellule en volts. L'hydrogène consommé est directement proportionnel au courant (selon la loi de Faraday).

$$N_{H_2} = \frac{1}{nF} \quad (\text{III.2})$$

Où N_{H_2} est en *mol/s*, et

$$W_{H_2} = \Delta H \frac{1}{nF} \quad (\text{III.3})$$

W_{H_2} : L'énergie de l'hydrogène consommé en Joules par seconde.

ΔH : Échauffement maximum d'hydrogène (286 kJoules/mol)

Il est à noter que $\frac{\Delta H}{nF}$ est en volts, et pour $\Delta H = 286$ kJ/mol, il égale à 1,482 V, et qu'il est le potentiel thermoneutre.

En combinant les équations ci-dessus, le rendement de la pile à combustible est proportionnel au potentiel de la pile.

$$\eta = \frac{V}{1,482} \quad (\text{III.4})$$

Le rendement calorifique inférieur η_{LHV} (lower heating value efficiency) est donné par

$$\eta_{LHV} = \frac{V}{1,254} \quad (\text{III.5})$$

Si de l'hydrogène est perdu, la consommation d'hydrogène sera supérieure à celle correspondant au courant généré. Par conséquent, l'efficacité de la pile à combustible serait un peu inférieure à celle donnée précédemment.

Le rendement de la pile à combustible est alors le produit du rendement en tension et du rendement en courant.

$$\eta = \frac{V}{1,482} \frac{i}{(i+i_{loss})} \quad (\text{III.6})$$

III.4 Différents types de piles

III.4.1 Piles à combustible à membrane électrolyte polymère

Les piles à combustible à membrane électrolytique polymère PEM (Polymer Electrolyte Membrane full cell), utilisent comme électrolyte une membrane polymère conductrice de protons. L'hydrogène est généralement utilisé comme carburant. Ces cellules fonctionnent à des températures relativement basses et peuvent varier rapidement leur rendement pour répondre aux demandes de puissance changeantes. Les piles à combustible PEM sont les meilleurs candidats pour alimenter les automobiles. Ils peuvent également être utilisés pour la production d'énergie stationnaire. Cependant, en raison de leur faible température de fonctionnement, ils ne peuvent pas utiliser directement des carburants hydrocarbonés, tels que le gaz naturel, le gaz naturel liquéfié ou l'éthanol. Ces carburants doivent être convertis en hydrogène dans un reformeur de carburant pour pouvoir être utilisés par une pile à combustible PEM.

III.4.2 Piles à combustible à méthanol direct

La pile à combustible au méthanol direct DMFC (direct-methanol fuel cell) est similaire à la pile PEM en ce qu'elle utilise comme électrolyte une membrane polymère conductrice de protons. Cependant, les DMFC utilisent du méthanol sur l'anode, ce qui élimine le besoin au reformeur de carburant. Les DMFC sont intéressants pour alimenter les appareils électroniques portables, tels que les ordinateurs portables et les chargeurs de batterie. Le méthanol offre une densité d'énergie plus élevée que l'hydrogène, ce qui le fait un carburant avantageux pour les appareils portables.

III.4.3 PAC alcalines

Les piles à combustible alcalines utilisent un électrolyte alcalin tel que l'hydroxyde de potassium ou une membrane alcaline qui conduit les ions hydroxyde au lieu que les protons. Elles sont utilisées à l'origine par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) lors de missions spatiales, les piles à combustible alcalines ont de nouvelles applications, comme l'énergie portable.

III.4.4 PAC à acide phosphorique

Les piles à combustible à acide phosphorique utilisent un électrolyte d'acide phosphorique qui conduit les protons maintenus à l'intérieur d'une matrice poreuse et fonctionnent à environ 200

° C. Ils sont généralement utilisés dans des modules de 400 kW ou plus et elles sont utilisés pour la production d'électricité dans les hôtels, les hôpitaux, les épiceries et les immeubles de bureaux, où la chaleur résiduelle peut également être utilisée. L'acide phosphorique peut également être immobilisé dans des membranes polymères, et les piles à combustible utilisant ces membranes sont intéressantes pour certaines applications d'énergie stationnaire.

III.4.5 PAC au carbonate fondu

Les piles à combustible au carbonate fondu utilisent un sel de carbonate fondu immobilisé dans une matrice poreuse qui conduit comme électrolyte les ions carbonate. Ils sont déjà utilisés dans diverses applications stationnaires de moyenne à grande échelle, où leur rendement élevé produit des économies d'énergie nettes. Leur fonctionnement à haute température (environ 600 ° C) leur permet de reformer des carburants en interne tels que le gaz naturel et le biogaz.

III.4.6 PAC à combustible à oxyde solide

Les piles à combustible à oxyde solide utilisent comme électrolyte une couche de céramique fine solide qui conduit les ions d'oxyde. Elles sont développées pour une utilisation dans certaines applications d'alimentation stationnaire, ainsi que dans des dispositifs d'alimentation auxiliaires pour camions lourds. Fonctionnant à (700 ° C - 1000 ° C) avec des électrolytes à base de zircon, et aussi bas que 500 ° C avec des électrolytes à base de cérium, ces piles à combustible peuvent reformer en interne le gaz naturel et le biogaz, et elles peuvent être combinées avec une turbine à gaz pour produire des rendements électriques aussi haut que 75%.

III.4.7 PAC combinées de chaleur et d'électricité

Les piles à combustible produisent de l'électricité et de la chaleur. Cette chaleur peut être utilisée pour répondre aux besoins de chauffage, y compris l'eau chaude et le chauffage des locaux. Les piles à combustible combinées de chaleur et d'électricité sont intéressantes pour alimenter les maisons et les bâtiments, où le rendement total peut atteindre 90%. Ce fonctionnement à haut rendement permet d'économiser de l'argent et de l'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

III.4.8 PAC régénératives ou réversibles

Ce type de piles à combustible produit de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, mais peut être inversée et alimentée en électricité pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène.

Cette technologie émergente pourrait fournir le stockage de l'énergie excédentaire produite par des sources d'énergie renouvelables intermittentes, telles que les centrales éoliennes et solaires, utilisant cette énergie pendant les périodes de faible production d'énergie.

III.5 Production d'hydrogène

III.5.1 Réforme du méthane à la vapeur

Le reformage à la vapeur du méthane se compose généralement de quatre étapes (Fig III.2): (1) Le sulfure d'hydrogène et d'autres composés soufrés sont éliminés pour empêcher l'empoisonnement du catalyseur; (2) Le pré-reformage est utilisé pour protéger contre la formation de carbone pendant l'étape principale de reformage et également réduire la quantité de vapeur requise; (3) reformage primaire dans lequel de la vapeur et de la chaleur sont fournies pour permettre à la réaction de se dérouler sur un catalyseur au nickel à 700–830 ° C; (4) Un reformeur secondaire utilise l'air pour produire de la chaleur par des réactions de combustion pour amener la température à 1300 ° C et convertir la plupart du méthane restant en gaz de synthèse. [21]

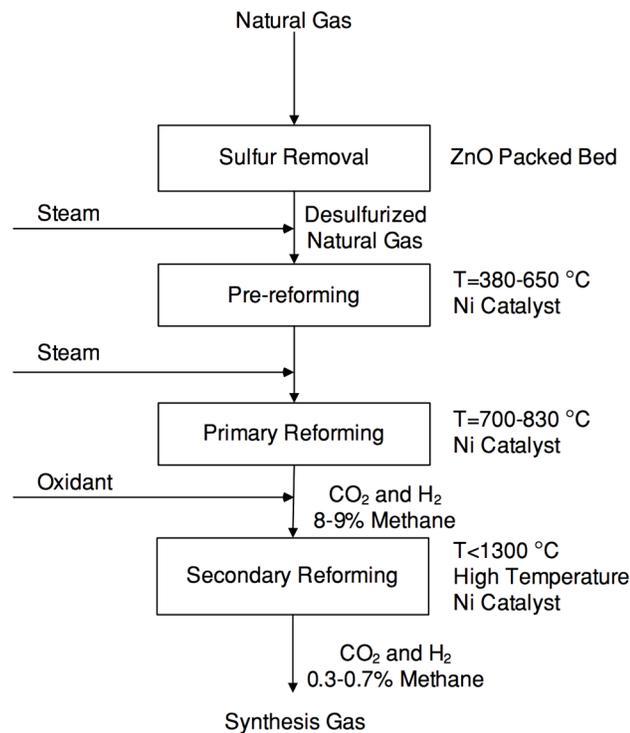
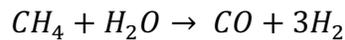
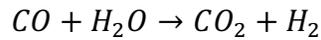


Fig III.2 Réforme du méthane à la vapeur

III.5.2 Réaction de décalage eau-gaz

Une fois que le syngaz est produit, il est refroidi et plus d'hydrogène est produit par la réaction de décalage eau-gaz WGS (water gas shift). La réaction WGS consiste à faire réagir du monoxyde de carbone avec de la vapeur sur un catalyseur pour produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone ($\Delta H_{298}^{\circ} = -41 \text{ kJ/mol}$).



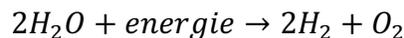
Il existe d'autres méthodes de production d'hydrogène tel que

- Oxydation partielle du méthane
- Reformage auto thermique du méthane
- Production d'hydrogène à partir du pétrole lourd et du charbon
- Séparation des gaz produits
- Électrolyse de l'eau

III.5.3 Electrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène

L'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène est un producteur mineur, où il ne représente qu'environ quatre pour cent de l'inventaire mondial.

La réaction chimique pour l'électrolyse de l'eau, peut s'écrire :



Dans un électrolyseur, l'énergie est de l'électricité provenant d'une source d'alimentation CC (courant continu).

III.6 Stockage d'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène est une partie importante du développement et de la commercialisation des technologies des piles à combustible. Les applications de stockage d'hydrogène pour transport ont jusqu'à présent les plus importantes pour des gouvernements et des entreprises qui tentent de commercialiser la technologie. Les caractéristiques de performance pour les solutions de stockage d'hydrogène sont les densités d'énergie volumétrique (kWh / L) et gravimétrique (kWh / kg), le coût, le temps de ravitaillement, la cinétique de décharge et la durée de vie du cycle [22].

Il existe plusieurs technologies et solutions pour le stockage d'hydrogène :

- Stockage d'hydrogène comprimé

- Liquéfaction et stockage d'hydrogène
- Hydrures métalliques
- Hydrures complexes
- Stockage à base de carbone
- Stockage liquide porteur

III.7 Applications dans le domaine de l'automobile

Les véhicules à PAC (Fig III.3) FCV (full cell vehicul) partagent la plus part des composants avec les voitures ICE (internal combustion engine) et ils sont assez similaires aux véhicules électriques. Les systèmes distinctifs sont la pile à combustible et son système de commande associé ainsi que les systèmes de stockage d'hydrogène ou de conversion de carburant. Les piles à combustible PEM présentent une série de caractéristiques qui les rendent adaptées à une utilisation dans des applications mobiles. Elles donnent un démarrage rapide à partir de la température ambiante, des rapports puissance / volume et puissance / poids adéquats ainsi qu'une capacité élevée à suivre les variations de charge électrique. D'autre part, elles nécessitent à la fois des catalyseurs hautement actifs et du carburant contaminé à l'état de traces (H₂).

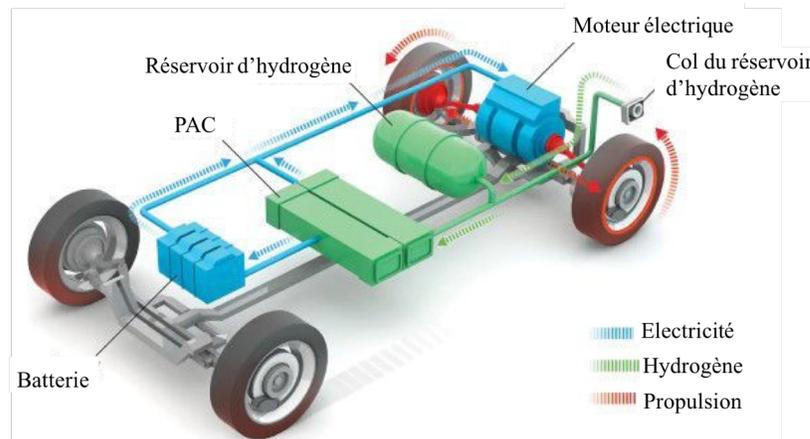


Fig III.3 Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

III.8 Applications dans le domaine résidentiel

L'application des piles à combustible dans le domaine résidentiel est une opération clé. Le chauffage et l'alimentation électrique des maisons sont responsables d'environ un quart de la consommation mondiale d'énergie et des émissions de carbone.

Deux facteurs sont importants pour la cogénération d'énergie thermique et électrique à pile à combustible: la quantité de chaleur et d'électricité demandée.

Souvent, les systèmes de pile à combustible résidentiels ont une capacité électrique de 0,7 à 1,5 kW. Cette capacité est suffisante pour fournir l'ensemble de l'électricité et environ la moitié de la demande thermique d'une maison, le reste provenant d'une chaudière et d'un réservoir de stockage de chaleur intégrés.

La taille et le poids du système posent des problèmes pratiques, c'est pourquoi les installations sont généralement réalisées à l'extérieur. Autres modèles plus petits sont en cours de développement.

Références bibliographiques

- [1] J. R. Bernard Multon, «Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité,» smart grids-cre, 2010.
- [2] Okba Djelailia, Mounia Samira Kelaiaia, Hocine Labar, Salah Necaibia, Faycel Merad, «Energy Hybridization Photovoltaic/Diesel Generator/Pump Storage Hydroelectric Management Based on Online Optimal Fuel Consumption Per kWh,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 44 , pp. 1-15, 2019.
- [3] B. Zoppé, C. Pellone, T. Maitre, P. Leroy, «Flow Analysis Inside a Pelton Turbine Bucket,» *Journal of Turbomachinery*, pp. 500-511, 2006.
- [4] J.-E. P. Thierry Jacob, «Francis Turbine Surge: Discussion and Data Base,» *Hydraulic Machinery and Cavitation*, pp. 855-864, 1996.
- [5] Dragica Jošt, Andrej Lipej, Kazimir Oberdank, Mateja Jamnik, Boris Velenšek, «Numerical Flow Analysis of a Kaplan Turbine,» *Hydraulic Machinery and Cavitation*, pp. 1123-1132, 1996.
- [6] Shahram Khosrowpanah, A. A. Fiuzat, Maurice L. Albertson, «Experimental Study of Cross-Flow Turbine,» *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 114, 1988.
- [7] G. Henrik Lund, «The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems,» *Energy Conversion and Management* , vol. 50, pp. 1172-1179, 2009.
- [8] Mustafa E. Amiryar, Keith R. Pullen, «A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications,» *Applied sciences* , vol. 7, 2017.
- [9] A. Nadia, Optimisation Du Stockage Des Energies Renouvelables, paf, Éd., 2014.
- [10] S. H. Antonio Luque, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, WILEY, 2003.
- [11] F. COUPAN, Stockage pour les énergies renouvelables : évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide, HAL, 2017.

- [12] B. Aïssa, Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2015.
- [13] A. Bhatia, «Introduction to Batteries,» CED engineering.
- [14] Guoping Wang, Hongqing Wang, Benhe Zhong, Lei Zhang, Jiujun Zhang, «Supercapacitors' Applications,» chez *Electrochemical Energy*, 2015, pp. 479-492.
- [15] John Schönberger, «Modeling a Supercapacitor using PLECS,» Application Example, 8005 Zürich.
- [16] Lei Zhang, Xiaosong Hu, Zhenpo Wang, Fengchun Sun, David G. Dorrell, «A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1868-1878, 2018.
- [17] C. Spiegel, «Fuel Cell Store,» 2017. [En ligne]. Available: fuelcellstore.com. [Accès le 2020].
- [18] F. S. panel J. M. Andújar, «Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 19, pp. 2309-2322, 2009.
- [19] M. Boudellal, La pile à combustible. 2e éd. L'hydrogène et ses applications, DUNOD, 2012.
- [20] «Chapter 3 - Fuel Cell Electrochemistry,» chez *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, 2008, pp. 49-76.
- [21] K. K. Said Al-Hallaj, «Chapter 3: Hydrogen Production, Storage and Fuel Cells,» chez *Hybrid Hydrogen Systems Stationary and Transportation Applications*, Springer, 2011.
- [22] Rajeshwar Krishnan, McConnell Robert, Licht Stuart, Solar Hydrogen Generation Toward a Renewable Energy Future, Springer, 2008.
- [23] C. Lahache, «Nickel cadmium battery».

- [24] Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine, Programme d'action PACER, Energies renouvelables. Office fédéral des questions conjoncturelles, 1998.
- [25] alamy, 2017. [En ligne]. Available: alamyimages.fr. [Accès le 2020].