



Manuel d'enseignement des énergies renouvelables



CREDITS

Contributors/Reviewers
Colleen Spiegel Ph.D.

Horizon Design and Production Staff
Stone Shen, Miro Zhang, Dane Urry

Version française contribué par notre partenaire H2Power
www.h2power.ch

Copyright © 2009 by Horizon Fuel Cell Technologies.
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Horizon Fuel Cell Technologies
Block 19, No.2 Suide Rd.
Shanghai 200331, P.R. China
<http://www.horizonfuelcell.com>

Manuel d'enseignement des énergies renouvelables

Table des matières

Chapitre 1 : Environnement et changement climatique 01-20

- 1.1 Introduction
- 1.2 Demande mondiale en énergie
- 1.3 Réchauffement global
 - 1.3.1 L'effet de serre
 - 1.3.2 Niveau des mers
 - 1.3.3 Les effets du réchauffement global
 - 1.3.4 Pouvons nous stopper le réchauffement global ?
- 1.4 Inconvénients des technologies actuelles de l'énergie
- 1.5 Technologies écologiques innovantes
 - 1.5.1 Cellules solaires photovoltaïques
 - 1.5.2 Énergie éolienne
 - 1.5.3 L'électrolyse
 - 1.5.4 Les piles à combustible
- 1.6 Perspectives d'une économie basée sur l'hydrogène; énergie propre d'origine renouvelables
- 1.7 Conclusion

Chapitre 2 : Énergie solaire

21-37

- 2.1 Introduction
- 2.2 Histoire
- 2.3 Types de panneaux photovoltaïques
- 2.4 Principes et caractéristiques
- 2.5 Technologie solaire
 - 2.5.1. Déplacement des électrons dans le silicium
 - 2.5.2. Effet photovoltaïque
 - 2.5.3. Spectre électromagnétique et pertes d'énergie
 - 2.5.4. Le silicium et la jonction PN
 - 2.5.5. Étude des matériaux
 - 2.5.5.1. Pertes de tension due au transfert de charges
- 2.6 Autres matériaux pour les cellules photovoltaïques
 - 2.6.1. Silicium cristallin
 - 2.6.2. Cellule solaire au tellure de cadmium
 - 2.6.3. Cellule solaire au sélénure de cuivre-indium
 - 2.6.4. Cellule solaire multijonction à l'arséniure de gallium (GaAs)
 - 2.6.5. Colorants absorbeurs de lumière DSSC Light Absorbing Dyes)
 - 2.6.6. Cellules solaires en polymère organique
 - 2.6.7. Films minces de silicium
- 2.7 Utilisations de l'énergie solaire
 - 2.7.1 Powering a House Using Solar Power
 - 2.7.2 Solving Solar-Power Issues
 - 2.7.3 Solar Powered Cars
- 2.8 Conclusion

Chapitre 3: Énergie éolienne

38-52

- 3.1 Introduction
- 3.2 Histoire de l'énergie éolienne
- 3.3 Principes et caractéristiques
 - 3.3.1 le régime global des vents
 - 3.3.2 l'aérodynamique des éoliennes
- 3.4 Types d'éoliennes

- 3.4.1 Éolienne à axe horizontal
- 3.4.2 Éoliennes à axe vertical
- 3.5 Éléments constitutifs d'une éolienne
- 3.6 Énergie et puissance du vent
- 3.7 Effet de la hauteur du mât
- 3.8 Potentiel théorique de l'énergie éolienne
 - 3.8.1. Distribution de la vitesse du vent
- 3.9 Estimation de l'énergie produite par une éolienne
- 3.10 Facteur de capacité
- 3.11 Parcs éoliens
- 3.12 Conclusion

Chapitre 4: Les électrolyseurs

53-66

- 4.1 Introduction
- 4.2 Histoire des électrolyseurs
- 4.3 Conception des électrolyseurs
 - 4.3.1. Concept unipolaire
 - 4.3.2. Concept bipolaire
- 4.4 Types d'électrolyseurs
 - 4.4.1. Electrolyseurs alcalins
 - 4.4.2. Electrolyseur PEM
 - 4.4.2.1. L'électrolyte
 - 4.4.2.2 Le catalyseur
- 4.5 Rendement des électrolyseurs
- 4.6 Les bases de la thermodynamique dans la conception des électrolyseurs
- 4.7 Production actuelle de l'hydrogène
- 4.8 Opportunités pour l'électrolyse
- 4.9 Conclusion

Chapitre 5: Les piles à combustible

67-83

- 5.1 Introduction
- 5.2 Histoire des piles à combustible
- 5.3 Utilisations des piles à combustible
 - 5.3.1. Secteur du stationnaire
 - 5.3.2. Marché des transports
 - 5.3.3. Secteur portable
- 5.4 Types de piles à combustible
 - 5.4.1 Pile à combustible à membrane polymère électrolytique (PEM)
 - 5.4.2 Pile à combustible alcaline (AFC)
 - 5.4.3 Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)
 - 5.4.3 Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)
 - 5.4.4 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)
 - 5.4.5 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)
 - 5.4.6 Pile à combustible directe à méthanol (DMFC)
- 5.5 Principe de fonctionnement
 - 5.5.1. La couche d'électrolyte
 - 5.5.2. La couche de diffusion des gaz
 - 5.5.3. La couche catalytique
 - 5.5.4. Les plaques bipolaires
- 5.6 Conception et configuration des piles
- 5.7 Conditions d'utilisation
 - 5.7.1 Courbe de polarisation
- 5.8 Conclusion

Chapitre 6: Stockage et transport de l'hydrogène 84-97

- 6.1 Introduction
- 6.2 Aspect de la sécurité avec l'hydrogène en temps que combustible
- 6.3 Production, distribution et stockage de l'hydrogène
 - 6.3.1. Techniques pour la production de l'hydrogène
 - 6.3.1.1. Reformage de vapeurs
 - 6.3.1.2. Oxydation partielle
 - 6.3.1.3. Gazéification du charbon
 - 6.3.1.4. La biomasse
 - 6.3.1.5. Electrolyse de l'eau
- 6.4 Technologies pour le stockage de l'hydrogène
 - 6.4.1. Grand réservoir souterrain
 - 6.4.2. Réservoirs d'hydrogène pressurisés pour véhicules
 - 6.4.3. Stockage de l'hydrogène liquide
 - 6.4.4. Réservoir à hydrures métalliques
 - 6.4.5. Les nanofibres de carbone
 - 6.4.5.1. Résistance des nanotubes de carbone
 - 6.4.5.2. Stockage de l'hydrogène et autres applications
- 6.5 Technologies pour le stockage de l'hydrogène
- 6.6 Conclusion

Chapitre 7: Eléments d'électronique de puissance 98-114

- 7.1 Introduction
- 7.2 Notions d'électronique
 - 7.2.1. Les circuits
 - 7.2.2. Termes courants utilisés en tests et mesures électroniques
 - 7.2.3. Tests de base
 - 7.2.3.1. Mesure de tension (Volts)
 - 7.2.3.2. Mesure d'un courant (Ampères)
 - 7.2.3.3. Mesure d'une résistance
- 7.3 Electronique analogique et électronique numérique (digitale)
- 7.4 La loi d'Ohm
- 7.5 Histoire de l'électronique
- 7.6 Electronique de puissance et énergies renouvelables
- 7.7 Types de semiconducteurs de puissance
 - 7.7.1. les diodes de puissance
 - 7.7.2. Dispositifs de commutation
 - 7.7.2.1 MOSFET de puissance
 - 7.7.2.2 Transistor bipolaire à porte isolée (IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor)
 - 7.7.2.3 Thyristors ou redresseurs contrôlables à base de silicium (SCRs)
 - 7.7.2.4 Thyristor commutable à porte intégrée (IGCT Integrated Gate Commuted Thyristor)
- 7.8 Convertisseurs et systèmes de puissances
 - 7.8.1. Convertisseurs DC – DC
 - 7.8.2 Onduleurs
- 7.9 Conclusion

Résumé

115-117

Sources

118-122



Chapitre 1

Environnement et changement climatique

1.1 Introduction

1.2 Demande mondiale en énergie

1.3 Réchauffement global

1.4 Inconvénients des technologies actuelles de l'énergie

1.5 Technologies écologiques innovantes

1.6 Perspectives d'une économie basée sur l'hydrogène, énergie propre d'origine renouvelable

1.7 Conclusion

1.1 Introduction

L'énergie fait partie intégrante de notre société moderne, elle permet la vie après le coucher du soleil, le transports des gens et des marchandises ainsi que le développement continu des sciences et des technologies. Les sources d'énergie actuelles, telles que le pétrole, et le gaz naturel ont permis de satisfaire les besoins en énergie croissants d'une population en augmentation aussi bien pour la consommation résidentielle ou industrielle que pour les transports. Cependant l'utilisation des combustibles fossiles pour générer l'énergie nécessaire a eu de nombreuses conséquences négatives, soit : une pollution considérable, l'exploitation intensive des ressources naturelles, d'importantes tensions geo-politiques envers les pays disposant d'importantes ressources de combustible. De plus, la demande globale en énergie va croître avec l'augmentation de la population du globe.

Les réserves en combustibles fossiles existent en quantité limitée; elles se situent dans quelques régions du globe. Cette situation conduit à des tensions ou conflits régionaux qui représentent une menace pour la paix mondiale. Les réserves limitées et l'énorme demande en combustibles fossiles va inévitablement conduire à des hausses de coût. Pour cette raison, la fin des combustibles fossiles bon marché s'approche. Les combustibles fossiles sont actuellement indispensables pour maintenir notre niveau de vie et notre confort. Cependant leur consommation provoque des effets secondaires négatifs pour les humains, les animaux et les plantes. Les résidus de combustion de produits provoquent le réchauffement de l'atmosphère terrestre, ils polluent l'air, l'eau et le sol. Le résultat en est une détérioration des conditions de vie pour toutes les espèces vivant sur terre. Il existe à la fois des raisons économiques et environnementales pour justifier le développement d'énergies alternatives.



L'intérêt dans les sources d'énergie alternatives est apparu dans les années 1970, lorsque le pétrole s'est soudainement raréfié sur le marché. Alors que les réserves semblaient encore immenses, le monde a tout à coup pris conscience que les réserves de pétrole sont limitées et qu'un jour elles seraient épuisées. Durant la dernière décennie, l'intérêt pour les énergies douces et pour une meilleure productivité a vu le jour. La recherche s'est alors orientée vers des sources d'énergie alternatives. Notre dépendance envers les combustibles fossiles a conduit à une sévère pollution de l'air et à l'épuisement rapide des réserves de pétrole mondiales. En plus du danger qu'elle représente pour l'écosystème et pour les espèces vivantes, la pollution altère aussi l'atmosphère terrestre. Cette tendance est appelée le réchauffement global et celui-ci continuera de s'aggraver avec la consommation croissante de combustibles fossiles. Le monde a besoin d'une source d'énergie peu polluante, hautement efficace et qui existe en quantité illimitée afin de satisfaire les besoins d'une population croissante.

De nombreuses énergies alternatives ont été testées et développées. Celles-ci comprennent le soleil, le vent, l'hydro-électrique, la bio-énergie, la géothermie et bien d'autres encore. Les cellules solaires photovoltaïques utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité, l'énergie cinétique du vent est utilisée pour faire tourner les éoliennes, la bio-énergie est extraite des plantes. D'autres sources d'énergies renouvelables proviennent des déchets végétaux ou de l'énergie des vagues. Chacune de ces sources alternatives d'énergie présentent des avantages et des inconvénients; elles se trouvent actuellement dans différents stades de développement. Les Figures 1-1 à 1-3 représentent l'énergie éolienne, solaire et hydro-électrique.

Il est bénéfique pour notre terre et pour toutes les espèces qui l'habitent que nous prenions conscience de l'énergie que nous consommons. Le set éducatif relatif aux énergies renouvelables (FCJJ-27), permet de découvrir toutes les formes d'énergies renouvelables de base : l'éolienne, solaire photovoltaïque, et l'hydrogène (production et consommation grâce à un électrolyseur et une pile à combustible). Ce set d'expérimentation démontre comment les énergies renouvelables sont produites, transformées, stockées puis consommées. Ces énergies se régénèrent naturellement dans notre environnement. Les expériences possibles à l'aide de ce set permettent aux étudiants de comprendre le fonctionnement des technologies sous-jacentes aux énergies renouvelables. Nous espérons que ces expériences vous inciteront également à pousser plus loin l'étude de ces technologies, de partager ces expériences avec vos amis, de rechercher d'autres découvertes en regardant des émissions de vulgarisation scientifique sur des chaînes de télévision spécialisées. Il est possible que les objets contenus dans ce set éducatif vous incitent à construire de plus grands prototypes, voire de travailler un jour comme ingénieur ou comme physicien à l'amélioration de ces technologies.

1.2 Demande mondiale en énergie

La consommation de combustibles fossiles a augmenté rapidement au cours du 20^{ème} siècle et elle a quadruplé depuis les années 1970. La population mondiale consomme les produits pétroliers à un rythme 100'000 fois supérieur que leur rythme de renouvellement naturel. (1,2). La Chine est actuellement le troisième plus grand consommateur de pétrole; cependant, si le consommateur Chinois utilisait la même quantité de pétrole que le citoyen Américain, la Chine aurait besoin de 90 millions de barils de pétrole par jour pour subvenir à ses besoins. (1,2). Selon (1) la quantité moyenne de pétrole produite chaque jour est de 80 millions de barils. Il est évident que ce processus ne peut continuer.

Figure 1-4 montre la consommation d'énergie actuelle et celle projetée entre 1980 et 2030 (1) On prévoit que la consommation globale d'énergie augmentera de 2 % par an entre 2003 et 2030.. La consommation totale d'énergie passera de 421 quadrillions de British Thermal Units (BTU) en 2003 à 563 quadrillions de BTU en 2015 et 722 quadrillon de BTU en 2030 (1).

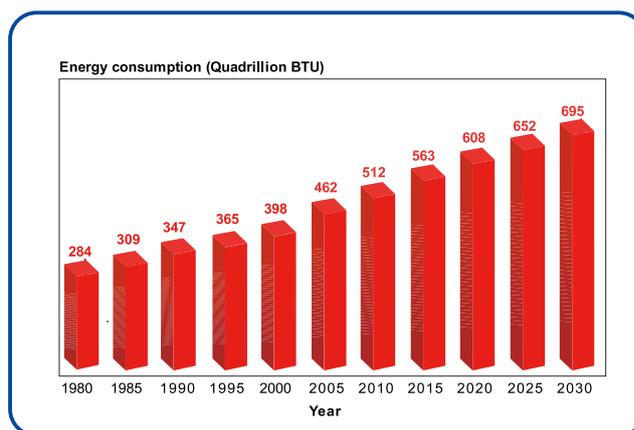


Figure 1-4.
Consommation mondiale d'énergie, 1980–2030

Consommation d'énergie (Quadrillion BTU):

Une unité d'énergie utilisée pour la puissance en production de vapeur, en chauffage et en réfrigération. Le BTU est maintenant remplacé par le Standard Industrial Unit (SI), le Joule (J). Le BTU est encore utilisé dans les pays tels que le Royaume Uni, la Nouvelle Zelande, le Canada et les Etats Unis.

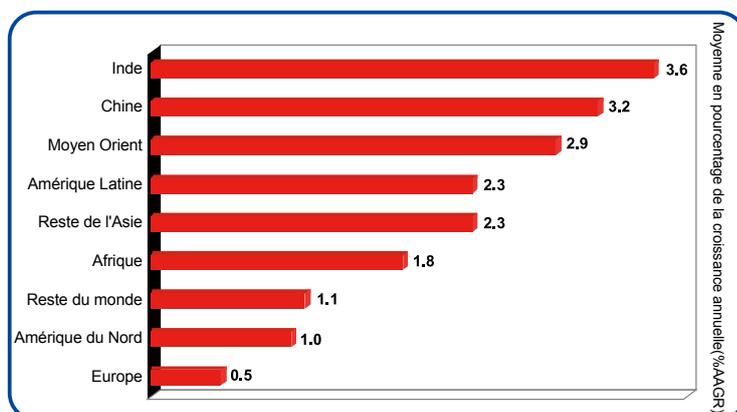


Figure 1-5.
Demande primaire d'énergie par région
(% AAGR 1980-2030)

La croissance la plus rapide de la demande en énergie entre 2003 et 2030 est prévue en Asie (comprenant la Chine et l'Inde), ainsi qu'en Amérique Centrale et en Amérique du Sud, en Afrique, au Moyen Orient et en Eurasie (1,2). La consommation d'énergie croîtra en moyenne de 5 % par an dans ces pays. La demande en énergie par région est montrée par la Figure 1-5.

Croissance moyenne annuelle (%AAGR):

La croissance moyenne annuelle est calculée en prenant la moyenne arithmétique des chiffres de croissance annuelle. Par exemple, si la demande en énergie dans une région donnée est prévue à 10% une année, puis 20% l'année suivante, la croissance moyenne annuelle (%AAGR) pour la période considérée sera de 15%.

Dans chaque pays, des groupes politiques demandent des augmentations de taxes sur les combustibles fossiles pour induire une diminution de la consommation. D'autres groupes demandent plus de recours aux énergies renouvelables. De nombreux experts encouragent les pays industrialisés à réduire leur consommation de combustibles fossiles et leur demandent de recourir à des énergies renouvelables, à adopter une stratégie de développement durable.

Environ 43% de la population mondiale utilisent le pétrole comme principale source d'énergie. Le gaz naturel arrive en deuxième position avec 15%, les déchets et les combustibles renouvelables (bois) comptent pour 13% , le charbon pour 8%, et les sources alternatives (géothermie, électricité hydraulique et solaire) pour 3%.a

Durant les 18 èmes et 19 èmes siècles, durant la révolution industrielle, le charbon a été la principale source de combustible . Ensuite, les automobiles et l'installation de l'électricité dans les ménages, le pétrole est devenu la principale source d'énergie, durant le 20 ème siècle. Cependant durant les années récentes, le charbon est redevenu la consommation en plus forte croissance suite à l'augmentation de consommation de combustible fossile en Chine. Bien que l'ensemble des énergies renouvelables représentent un faible pourcentage du total, ce sont elles qui bénéficient actuellement du plus fort taux de croissance moyenne annuelle (%AAGR), comme le montre la Fig. 1-7.

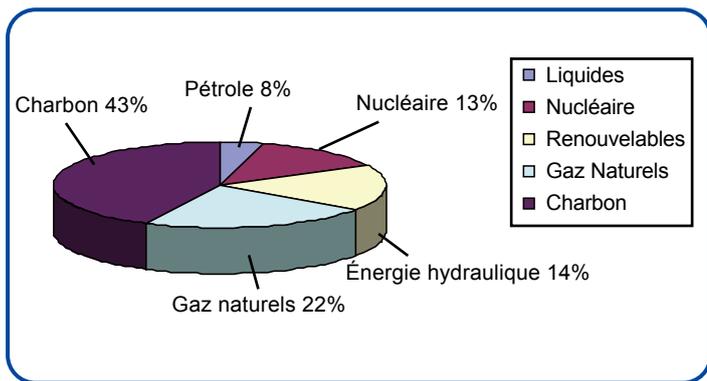


Figure 1-6.Électricité mondiale générée par combustible

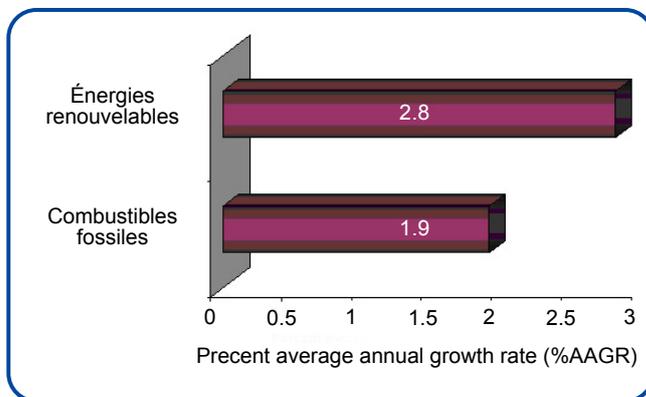


Figure 1-7. Moyenne annuelle de la croissance pour les énergies renouvelables et pour les combustibles fossiles

1.3 Réchauffement global

Chacun d'entre-nous a entendu parler du « réchauffement global » et sait qu'il signifie un réchauffement de notre planète. Cependant, la plupart d'entre-nous ignorent exactement ce que cela signifie ou comment le réchauffement est mesuré.

Réchauffement global:

Une augmentation significative de la température sur la terre survenue dans une courte période, suite aux activités humaines.

Au cours d'un siècle, une augmentation de température de 0.4 degrés Celsius est significative et une augmentation de 1 degré Celsius est considérée comme « réchauffement global » (3.4)

Les changements de climat surviennent en des dizaines de milliers d'années. Bien que 1 ou 2 degrés Celsius ne semblent pas représenter une grande différence, ils peuvent induire des effets significatifs. Lorsque vous entendez parler de période glaciaire, vous vous représentez probablement la terre recouverte de neige et de glace. Des périodes glaciaires surviennent environ chaque 50'000 à 100'000 ans et la température moyenne durant ces périodes n'est que de 5 degrés Celsius inférieure à la température moyenne actuelle (3.4).

Le IPCC est un groupe de plus de 2'500 scientifiques du monde entier. Ils se sont réunis en 2007 pour faire progresser la recherche en climatologie. La Figure 1-8 montre les estimations des changements de température et de niveau de la mer en fonction du temps. L'une des conclusions de cette réunion fut que les 15 dernières années ont été les plus chaudes depuis 1850.

Voici d'autres conclusions déduites lors de cette conférence (3'4'5)

- ~ la masse des glaciers et des névés a diminué dans les hémisphères nord et sud. La température arctique moyenne a augmenté de plus du double de celle de la moyenne globale.
- ~ Les quantités de pluie ont augmenté sur les continents Américains, au nord de l'Europe, dans certaines parties de l'Asie. L' Afrique du Sud et le bassin Méditerranéen ont connu une tendance à la sécheresse.
- ~ Les jours chauds sont devenues plus fréquents, alors que les jours froids sont devenus plus rares et moins sévères.

Les changements de climat d'origine naturelle tels que phénomènes volcaniques, activité solaire ou les modifications chimiques de l'atmosphère nécessitent quelquefois des milliers d'années pour induire un changement de température de 1 degré Celsius. (3.4.5).

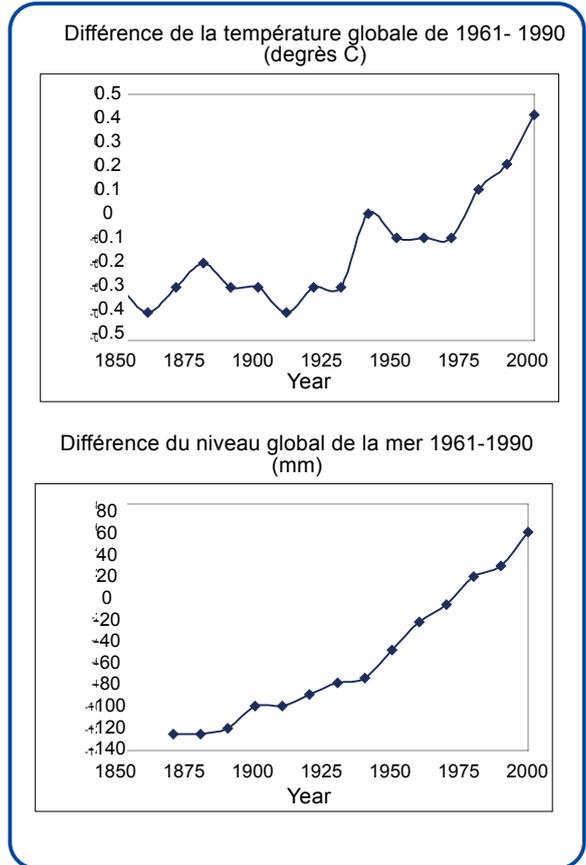


Figure 1-8. Panneau intergouvernemental sur le lien entre les changements climatiques et le changement de température et niveau de la mer.

1.3.1 L'effet de serre

Le réchauffement global est causé par une augmentation de l'effet de serre. L'effet de serre est normalement une bonne chose car il permet de conserver la chaleur de la terre, ce qui permet la vie sur terre. Lorsque le rayonnement solaire frappe l'atmosphère, environ 70 % de l'énergie reste sur la planète alors que 30% sont renvoyés vers l'espace.

Expérience du réchauffement global: L'énergie calorifique qui reste sur la planète est absorbée par le sol, par les océans et par la vie sur terre. Par rayonnement, elle est ensuite évacuée vers l'espace. Une partie de ce rayonnement, notamment les infra-rouges sont absorbés par les gaz tels que le CO₂, le méthane ou la vapeur d'eau. C'est précisément cette absorption de chaleur qui maintient la température de l'atmosphère, donc de la planète. La Figure 1-9 montre le cycle de l'énergie solaire et l'effet de serre. Si la terre ne bénéficiait pas de l'effet de serre, elle ressemblerait probablement à la planète Mars. Certains scientifiques pensent que si l'on pouvait placer suffisamment de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau dans l'atmosphère martienne, ces gaz deviendraient assez consistants pour retenir la chaleur rayonnée et permettre la vie des plantes sur Mars. Ces plantes pourraient alors produire de l'oxygène. La figure 1-10 est une image du climat de Mars.

Figure 1-9. Énergie solaire et les gaz à effet de serre.

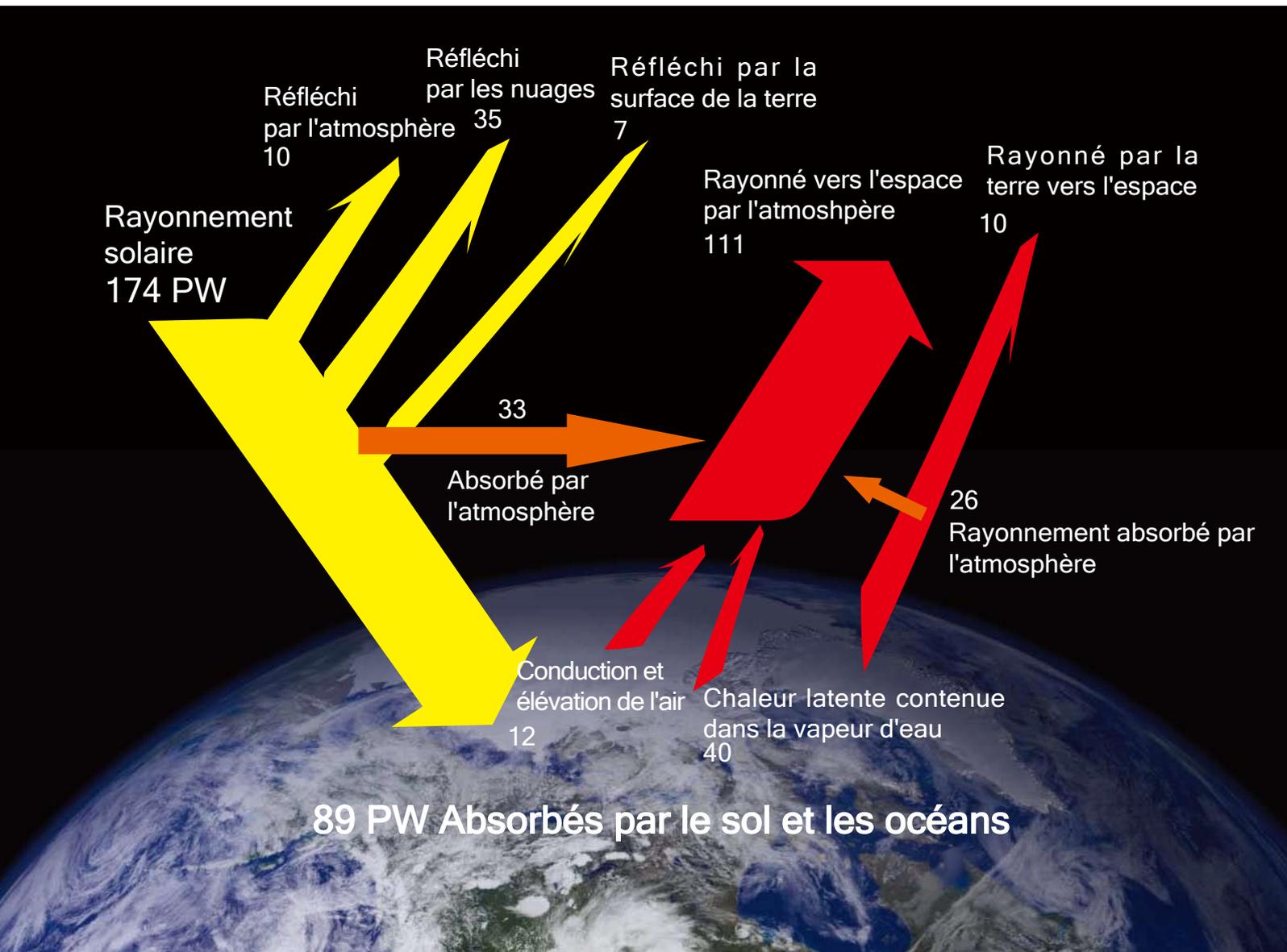
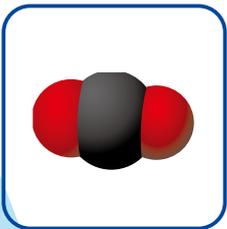




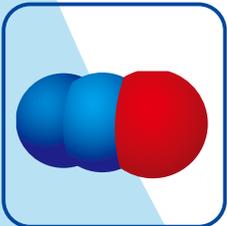
Figure 1-10.
Une image Viking de la surface de Mars.

Depuis la révolution industrielle, une grande quantité de gaz s'est échappée vers l'atmosphère, provoquant l'accélération de l'effet de serre. Parmi ces gaz, nous trouvons (5)

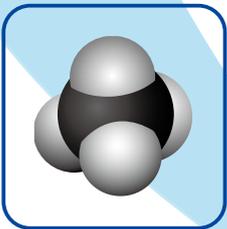


1. Le dioxyde de carbone (CO₂): Il s'agit d'un gaz incolore, résidu de la combustion des carburants fossiles. La plupart du CO₂ actuellement présent dans l'atmosphère a été produit par les éruptions volcaniques il y a des millions d'années. L'homme a contribué à augmenter sa concentration depuis de nombreuses années. Le CO₂ est le principal contributeur du réchauffement climatique car il absorbe le rayonnement infra-rouge. Les émissions globales de CO₂ sont passées de 1 milliard de tonnes en 1900 à 8 milliards de tonnes en 2000 (5).

Le IPCC estime que la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est passée de 280 ppm (part par million) dans les années 1800 à 379 ppm en 2005 (5).



2. L'oxyde d'azote (NO₂): Les volumes d'oxyde d'azote qui ont été lâchés dans l'atmosphère sont bien moindres que ceux du CO₂, mais la quantité d'énergie absorbée par le NO₂ est 270 fois supérieure à celle absorbée par le CO₂. Le NO₂ est également un résidu de la combustion.

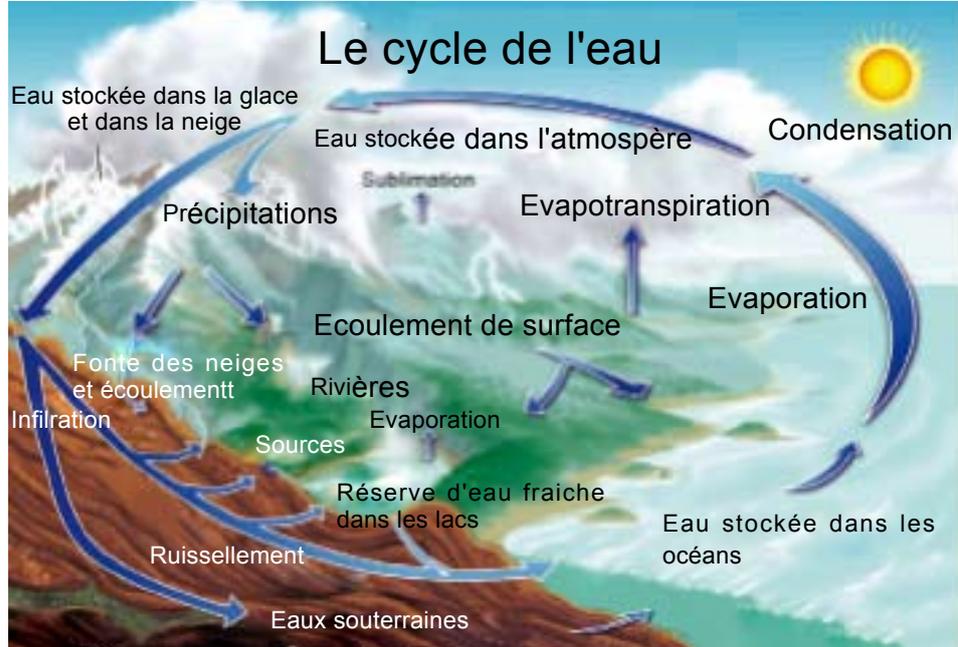


3. Le méthane (CH₄): Le méthane est le principal composant du gaz naturel. Il est produit comme dérivé du charbon, la décomposition des déchets, et par les troupeaux de bétail. Il absorbe proportionnellement 20 fois plus d'énergie que le CO₂, il contribue donc au réchauffement.



4. La vapeur d'eau: L'effet de serre est aussi augmenté par la vapeur d'eau- il s'agit plutôt ici d'un changement naturel du climat que de l'influence humaine. Quand la terre se réchauffe, de la vapeur d'eau se forme et monte, la température des basses couches de l'atmosphère diminue alors. La vapeur d'eau peut donc se refroidir à son tour, se transformer en eau et tomber en pluie. Lorsque la vapeur d'eau s'élève, la plus grande partie va se condenser dans les nuages. Ce qui va contribuer à réfléchir le rayonnement solaire, donc permettre à une plus faible quantité d'énergie de pénétrer l'atmosphère terrestre. La figure 1-11 illustre le cycle de l'eau, l'évaporation, la condensation, et les précipitations. Les scientifiques ne sont pas sûrs de comprendre l'effet que peut produire un supplément de vapeur d'eau dans l'atmosphère, mais ils pensent que la concentration d'eau dans l'atmosphère est corrélée avec la concentration de dioxyde de carbone.

Figure 1-11.
Le cycle d'eau de l'évaporation, de la condensation et de des précipitations.



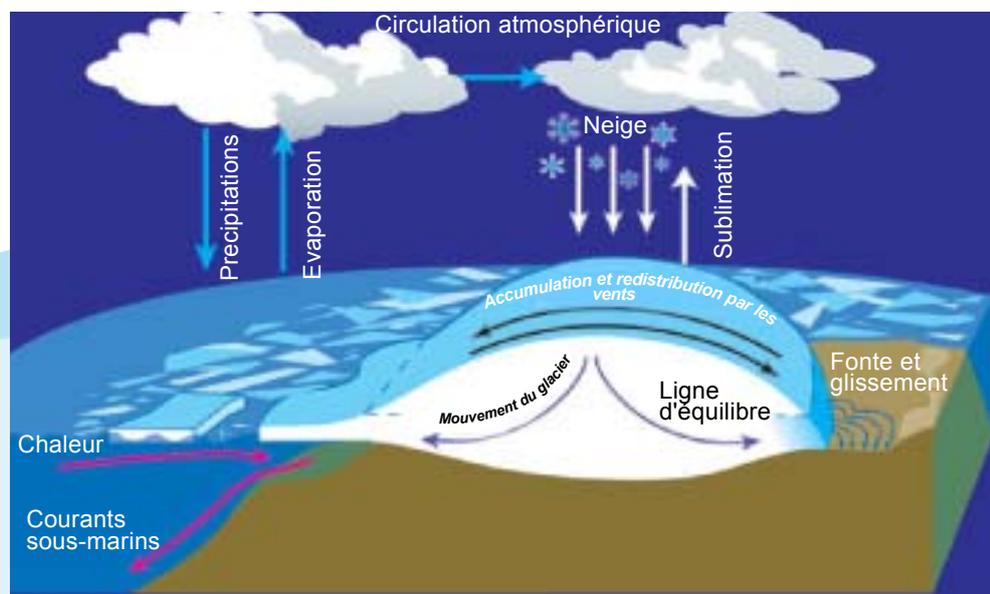
1.3.2 Le niveau de la mer

Par le fait de l'augmentation de la température globale, les glaciers et les névés fondent, comme le montre la figure 1-12. La réduction de la masse de glace pourrait accélérer le réchauffement global par le fait de la réduction de cette surface hautement réfléchissante. Il est évident que la fonte des glaces va provoquer une montée du niveau de la mer. L'augmentation de niveau initiale ne sera que de 2 à 5 centimètres, cependant, quelques centimètres suffisent à provoquer l'inondation de terres sur les cotes. Si la banquise Antarctique fondait ou s'effondrait dans la mer, le niveau de celle-ci pourrait monter de 10 mètres. Ceci inonderait de grandes surfaces de cotes.

La plus importante masse de glace au monde se trouve en Antarctique; elle représente le 90 % de la masse de glace du globe. L'épaisseur de la couche de glace est d'environ 2133 mètres (5). Si cette glace fondait, le niveau de la mer monterait de 60 mètres. La température moyenne en Antarctique est de -37 degrés Celsius, pour cette raison il est peu concevable que ce continent se mette à fondre (3.5).

LA couche de glace au Pôle Nord n'est pas aussi épaisse que celle de l'Antarctique, elle flotte sur la mer. Si cette calotte glaciaire fondait, le niveau de la mer ne serait pas affecté. Le Groenland est aussi recouvert d'une couche de glace et ajouterait environ 20 mètres au niveau de la mer si cette glace fondait. Vu que le Groenland est plus proche de l'équateur, il pourrait atteindre une température de fonte de la glace, c'est pourquoi, c'est cette glace qui serait probablement la première à fondre.

Figure 1-12 Cycles d'eau entre océans, atmosphère et glaciers.



1.3.3 Les effets du réchauffement planétaire

Il est difficile de prévoir les effets du réchauffement global sur l'écosystème.

Beaucoup d'écosystèmes sont très délicats et de petits changements peuvent gravement les altérer. Les écosystèmes sont également interdépendants, c'est pourquoi un changement dans l'un des écosystèmes aura certainement des effets sur d'autres écosystèmes. Une augmentation de la température ou de la quantité de pluie peut affecter les récoltes de céréales. Les pertes actuelles sur les récoltes de céréales mondiales dues au réchauffement climatique sont estimées à 5 milliards de dollars (7). Pour chaque degré Celsius d'élévation de la température, on peut estimer la perte additionnelle entre 3 et 5% sur les récoltes.(5.6).

Ecosystème:

L'ensemble formé par une association ou une communauté d'êtres vivants et son environnement-

1.3.4 Pouvons nous stopper le réchauffement planétaire?

Les émissions des gaz à effet de serre provoquent directement des problèmes de santé, par les pluies acides et la formation d'ozone. Dans certaines régions de Chine et d'Inde la pollution représente un problème de santé publique. Les pluies acides surviennent lorsque le dioxyde de soufre (SO₂) ou le tri-oxyde de soufre (SO₃) ainsi que le dioxyde d'azote (NO₂) réagissent ensemble pour former des composants acides. Ceux-ci sont absorbés par les gouttelettes d'eau en formation dans les nuages puis tombent avec les précipitations, augmentant ainsi l'acidité de l'écosystème. Ce phénomène affecte la vie végétale, les sols et les bâtiments. La plupart de ces retombées acides se produisent près de la source de pollution; ces composés acides peuvent également être transportés dans l'atmosphère sur des distances de centaines ou quelquefois de milliers de kilomètres. Ceci signifie qu'une pollution générée aux USA peut atteindre la Chine et vice-versa.

Parts par million (ppm):

Une mesure qui décrit les très faibles concentrations de substances. Un ppm correspond à 1 milligramme par litre d'eau (mg/L) ou un milligramme par kilogramme (mg/Kg)

La concentration en dioxyde de carbone actuelle déterminées par les cônes de glace (180 à 300 ppm), est bien plus importante que la proportion naturelle mesurée sur 650'000 ans. (3.6), Si la concentration de CO₂ devait augmenter jusqu'à 400 ou 440 ppm et devait se stabiliser, l'augmentation de température résultante pourrait être d'environ 2.4 – 2.8 degrés Celsius. (3,4,5).

La stabilisation de la concentration de CO₂ se produit sous la forme d'un sommet puis d'un déclin qui conduit à la stabilisation. Plus le phénomène se produira rapidement, moins haute sera la concentration résultante. Selon le IPCC, afin que la concentration de CO₂ se stabilise vers une valeur de 445 ou 490 ppm, les émissions de CO₂ devraient atteindre leur sommet en 2015 au plus tard et diminuer ensuite de 50 ou 85 % en dessous des valeurs atteintes en l'an 2000 vers 2050. (3,4). Un sommet d'émissions survenant plus tard, des concentrations maximales plus importantes, conduiraient à des augmentations de température globale plus importantes. La figure 1.13 montre l'augmentation de la température globale moyenne et la concentration de CO₂ atteinte en fonction des années.

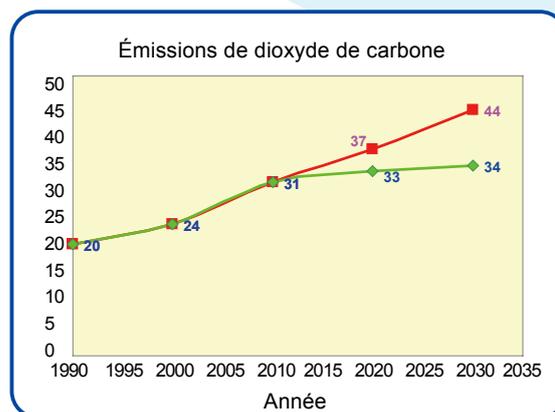
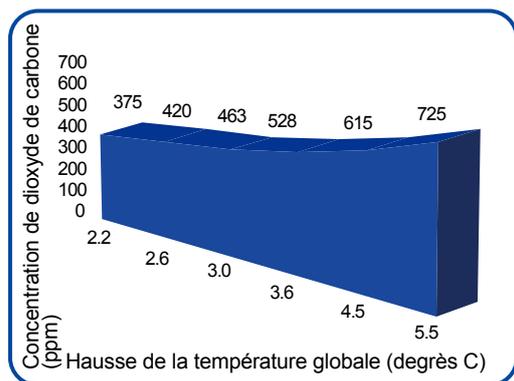


Figure 1-13. Concentrations et émissions de dioxyde carbone.

Le réchauffement global va se poursuivre durant des siècles par les gaz à effet de serre qui ont déjà été émis dans l'atmosphère. Bien que des dégâts considérables ont déjà été provoqués, nous pouvons encore réduire nos émissions de CO₂ en prenant plusieurs mesures.

- **Améliorer le rendement énergétique** le rendement énergétique d'un appareil est le rapport entre la quantité d'énergie présente à la sortie de cet appareil et la quantité d'énergie fournie à l'entrée de celui-ci.

$$\text{Rendement énergétique} = \frac{\text{énergie à la sortie d'un appareil}}{\text{énergie à l'entrée}}$$

Tous les types d'appareils peuvent devenir plus efficaces tout en continuant d'offrir les mêmes services. Le résultat est une économie de combustibles fossiles ce qui diminue les émissions de gaz à effet de serre. Un moyen de réduire ces émissions est également de vérifier que le moteur de votre voiture est bien réglé, ceci diminuera la consommation de carburant et de CO₂.

- **Économiser l'énergie** économiser l'énergie c'est faire moins appel à un service qui consomme de l'énergie, ce qui réduit les émissions. Il y a de nombreuses solutions pour économiser de l'énergie : éteindre les lumières, utiliser un ventilateur plutôt que l'air conditionné, consommer moins d'eau chaude, etc.

- **Consommer des carburants moins générateurs de CO₂** Si le charbon est consommé sans prendre des mesures de captage du CO₂, celui-ci produit 75% plus de CO₂ par unité d'énergie consommée que le gaz naturel, et 30 % de plus que le pétrole (5). C'est pourquoi il vaut mieux consommer du gaz naturel que du charbon si l'on veut réduire les émissions de CO₂ par unité d'énergie utilisée.

- **Utiliser des sources d'énergie propres (sans émission de carbone)** Les sources d'énergie renouvelables, telles que le vent, l'énergie solaire, ou l'énergie nucléaire ne génèrent pas d'émission de CO₂. Si l'on produit de l'hydrogène grâce à des énergies renouvelables (comme on le fait à l'aide du set d'éducation aux énergies renouvelables) on obtient de l'énergie à « émission zéro » car les piles à combustible à hydrogène « PEM » ne produisent pas de CO₂. De telles sources d'énergie peuvent être utilisées pour chauffer les piscines, produire de l'eau chaude, fournir toute l'énergie nécessaire aux habitations ou aux bureaux.

- **Capter et stocker les émissions de CO₂** Il existe de nombreuses techniques pour capturer puis stocker les émissions de CO₂ lors de la combustion de carburants fossiles. Ces techniques peuvent intervenir soit avant, soit après la combustion ou en combinaison. Les endroits où il est possible de stocker le CO₂ sont des puits de pétrole ou de gaz naturel épuisés, d'anciennes mines de sel, des veines de charbon inexploitées.

La meilleure manière de réduire nos émissions de carbone de façon durable est de développer des combustibles non fossiles. L'utilisation d'énergies renouvelables telles que le solaire ou l'éolien, combinées avec les piles à combustible seraient à même de réduire considérablement nos émissions de carbone si elles étaient utilisées à grande échelle.

1.4 Inconvénients des sources d'énergie actuelles

Les sources d'énergie actuelles sont le pétrole, le charbon, le gaz et elles sont transformées par des moteurs à combustion interne, des batteries, etc. Le charbon, le pétrole et le gaz seront moins abondants dans un proche futur, au vu de l'augmentation de la population globale et de ses besoins croissants en énergie.

Les estimations des réserves de combustibles fossiles varient considérablement. Si l'on estime que la consommation se stabilisait au niveau de l'an 2005, le pétrole serait probablement épuisé dans 40 ans environ, et le charbon dans 150 ans.(4,5). Leur épuisement ne sera toutefois pas complet car la production va se réduire rapidement avec la raréfaction. La consommation d'énergie d'origine pétrolière en 2005 a été de 0.18 Zettajoule

Il y a une incertitude concernant ces chiffres. Les futurs 11 ZJ additionnels aux réserves récupérables sont optimistes (8). Figure 1-14 représente une estimation du partage des autres 57ZJ restant sur la planète.

Zettajoule (ZJ):

1 ZJ (Zettajoule) = 10²¹ J (Joules)

Un Joule (J) est l'unité d'énergie du Système International d'Unités (SI).

Il est défini comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter une charge de 1 Coulomb d'une différence de potentiel de 1 Volt. Il est également l'équivalent en énergie de 1 Watt durant 1 seconde.

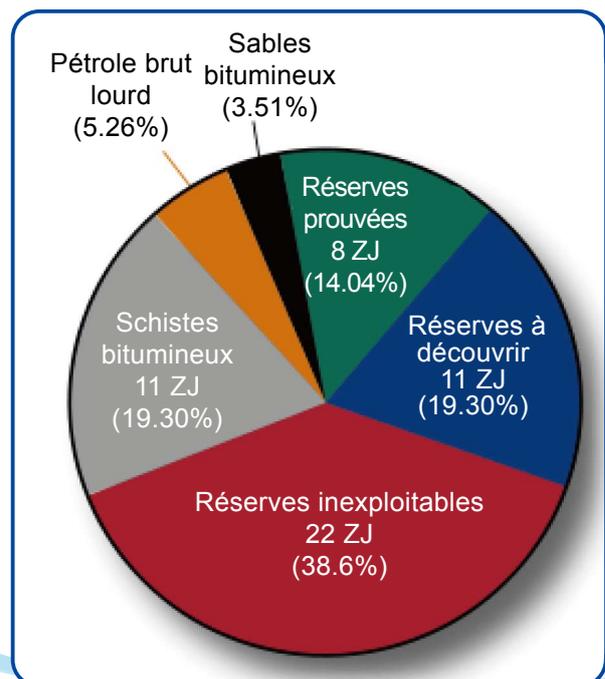


Figure 1-14.

Répartition des réserves de pétrole planétaires, pour les 57 ZJ restants.

Nous avons déjà évoqué les inconvénients des combustibles fossiles, mais nous pouvons encore mentionner ce qui suit :

- **Non renouvelables** : les combustibles fossiles sont non renouvelables, il leur faut des millions d'années pour se former. Ainsi, lorsque les réserves sont épuisées il n'existe pas de moyen d'en obtenir plus.

- **Polluants** : la combustion des carburants fossiles génère de la pollution sous forme de dioxyde de carbone (CO_2), gaz qui est la principale cause de l'effet de serre. Le charbon émet à la fois du CO_2 , du dioxyde de soufre et du tri-oxyde de soufre, qui provoquent des pluies acides. Les pluies acides peuvent produire la disparition des forêts, puis l'érosion des sols. Le pétrole brut contient également des composants toxiques qui sont libérés lors de sa combustion.

- **Destruction du paysage**. Les mines de charbon contribuent à la destruction du paysage.

- **Implantation des usines** : les centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles requièrent d'énormes quantités de matière première. Des trains entiers sont indispensables pour acheminer les quantités nécessaires de combustible. Pour cette raison, il est souhaitable d'implanter ces centrales électriques près des sources de combustibles.

- **Fuites de pétrole** : des fuites de pétrole se produisent de temps en temps, provoquant de graves pollutions et de grands risques pour l'environnement. La vie marine a énormément souffert de ces pollutions successives.

- **Tensions politiques** : bien des pays qui possèdent d'importantes réserves de pétrole sont politiquement instables. Des pays dépourvus de réserves peuvent avoir tendance à influencer les gouvernements des pays possédant les réserves pour en tirer profit.

Par contre, les véhicules électriques alimentés par des piles à combustible ne produisent aucune pollution comparable à



(a)



(b)



(c)

Figure 1-15. (a) La voiture électrique Subaru R1e peut être chargée la nuit avec un courant ordinaire, (b) le concept véhicule FCX de Honda, (c) la voiture urbaine à hydrogène Riversimple avec une pile à combustible de 6kW

celle générée par les véhicules munis de moteurs à combustion interne. Dans les véhicules électriques, des combustibles fossiles peuvent être utilisés pour produire l'électricité nécessaire à la recharge des batteries. Dans les véhicules électriques alimentés par pile à combustible, l'hydrogène nécessaire peut quelquefois être produit à partir de combustibles fossiles. Comment ces véhicules peuvent-ils être bénéfiques ?

Si l'électricité ou l'hydrogène sont produits à partir de combustibles fossiles,

les émissions de CO2 seront déjà diminuées de moitié. Si l'électricité ou l'hydrogène sont produits à l'aide d'énergie renouvelables, telles que solaire photovoltaïque et électrolyse, les émissions de carbone sont alors réduites à 1 % de celles d'un moteur à combustion interne. Ainsi, les véhicules électriques alimentés par des batteries sont déjà plus propres que les véhicules alimentés par du gaz naturel. De plus, le coût de l'électricité ou de l'hydrogène produit peut représenter une fraction du prix actuel de l'essence. La figure 1-15 montre un véhicule électrique ainsi qu'un véhicule alimenté par une pile à combustible.

Le calcul des émissions de carbone provenant de divers types de véhicules peut s'avérer compliqué. Cependant, il existe des approximations simples qui permettent de comparer ces différentes quantités d'émission :

$$PEF = Eg \times \frac{1}{0.15} \times AF \times DPF$$

E est l'équivalent pétrole contenu dans l'énergie électriques $\frac{1}{0.15}$ est le facteur de contenu de carburant AF estimations

cet algorithme a été développé par le département de l'énergie du gouvernement Américain; il permet de comparer la consommation de carburant des véhicules électriques et hybrides avec celle des véhicules à essence traditionnels.

Une méthode simple pour l'évaluation des émissions de carbone est basée sur le type de carburant utilisé. Le taux d'émission est basé sur le pouvoir calorifique du carburant, la proportion de carbone qui est oxydée, et le carbone contenu dans ce carburant. La formule se présente alors comme suit :

Emission de CO2 = quantité de carburant utilisée x valeur calorifique x coefficient d'émission (1,3)

Cette formule est souvent utilisée pour obtenir une estimation rapide des émissions de CO2.

1.5 Technologies « vertes » innovantes

Comme mentionné dans le Chapitre 1.1, de nombreuses technologies « vertes » et renouvelables sont présentes dans le set d'éducation aux énergies renouvelables. Ces technologies permettront des expériences impliquant les piles à combustible, les panneaux solaires photovoltaïques, l'énergie éolienne et l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène. Des notions relatives à ces technologies sont contenues dans les paragraphes qui suivent.

1.5.1 Cellules solaires photovoltaïques

La chaleur et la lumière du soleil procure une quantité d'énergie infinie et elles peuvent être domestiquées par différents moyens. Beaucoup de techniques ont été inventées pour tirer bénéfice de l'énergie solaire. Des dispositifs permettant de concentrer le rayonnement solaire, des systèmes passifs permettant de chauffer de l'eau, des systèmes photovoltaïques, le chauffage ou la réfrigération de locaux. Etc

L'énergie solaire peut être utilisée par de grandes installations ou par de très petits appareils. Cette énergie permet aux industries aux bureaux et aux particuliers de diversifier leurs sources d'énergie, de réaliser des économies en optant pour l'énergie solaire. Les propriétaires d'immeubles peuvent utiliser l'énergie solaire pour le chauffage ou la climatisation de leurs habitations, ils peuvent produire suffisamment d'énergie pour se permettre une indépendance énergétique par rapport au réseau de distribution électrique, voire même produire assez d'énergie pour en revendre à travers le réseau. De nombreuses solutions basées sur l'énergie solaire permettent de satisfaire les besoins des habitations, des locaux commerciaux, leur permettant de faire des économies d'énergie tout en les rendant plus attractifs, modernes et confortables.

En dehors de ces applications « isolées » de l'énergie solaire, des centrales électriques peuvent aussi tirer profit de l'abondance de l'énergie solaire, et en partager les avantages avec leurs clients ou consommateurs. Le fait de concentrer le rayonnement solaire permet à des centrales électriques de produire du courant à grande échelle. Ceci permet ensuite

aux consommateurs de bénéficier d'énergie électrique d'origine renouvelable sans avoir à investir dans une installation propre.

Systèmes concentrateurs d'énergie solaire. (CSP) :

Ces systèmes utilisent des lentilles ou des miroirs paraboliques et des systèmes de suivi automatique du soleil pour concentrer l'énergie solaire d'une grande surface vers un point précis. Ce faisceau d'énergie hautement concentrée peut alors être utilisé comme source de chaleur pour alimenter une centrale électrique thermique.

1.5.2 Energie éolienne

Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité. Elles sont montées au sommets de mâts afin de bénéficier d'un maximum de puissance. A 30 mètres du sol ou plus au dessus du sol, elles bénéficient d'une plus grande vitesse de vent, et évitent ainsi les turbulences aérodynamiques qui se trouvent proches du sol. Les éoliennes captent l'énergie du vent par leurs pales en forme d'hélices. Le plus souvent 2 ou 3 pales sont montées sur un axe pour constituer un rotor.

Une pale d'éolienne se comporte dans l'air comme une aile d'avion. Lorsque le vent souffle, une dépression d'air se forme le long du « dos » de la pale, de son côté « sous le vent ». Cette dépression aspire alors la pale dans sa direction, ce qui provoque la rotation de l'ensemble rotor. Ce phénomène d'aspiration se nomme « la portance ». La force de portance est en fait bien plus importante que la force dynamique du vent sur la face avant des pales, qui se nomme « la traînée ». La combinaison de la portance et de la traînée provoque la giration du

rotor, entraînant à son tour la génératrice d'électricité montée sur le même axe.

Les éoliennes peuvent être utilisées de manière isolées ou elles peuvent être connectées à un réseau de distribution d'énergie électrique. Elles peuvent aussi être combinées avec des systèmes photovoltaïques. Pour constituer des puissances importantes, équivalentes à celles de centrales électriques conventionnelles, de l'ordre du megawatt, les éoliennes sont groupées dans des sites de production bénéficiant de vents soutenus et constituent ce que l'on nomme des « wind farms » ou « parcs éoliens ». De nombreux fournisseurs d'électricité de par le monde utilisent aujourd'hui des parcs éoliens pour alimenter leurs clients en électricité. Les éoliennes isolées sont souvent utilisées pour animer des pompes à eau pour l'irrigation. Cependant, de plus en plus de propriétaires fonciers, de fermiers situés dans des régions venteuses ont maintenant recours à des éoliennes pour réduire leur facture d'électricité.

1.5.3 L'électrolyse

L'électrolyse met en jeu le passage d'un courant électrique à travers un milieu ionique, ce qui provoque une réaction chimique sur les électrodes. Des électrodes métalliques sont normalement utilisées dans les électrolyseurs car elles sont conductrices de courant électrique. Il existe des composants ioniques liquides ou solides, dans les deux cas les ions libres peuvent constituer un flux ou courant.

Ion:

l'ion est une particule chargée électriquement. Cette charge peut être positive ou négative. Un ion peut aussi être un atome ou une molécule qui a perdu ou gagné un électron, constituant ainsi une charge.

L'électrolyse de l'eau est la décomposition de la molécule d'eau en ses deux composants de base, l'hydrogène et l'oxygène. L'électrolyse de l'eau pure n'est pas aisée car la conductivité électrique de l'eau pure est très faible (environ un millionième de celle de l'eau salée). Cette conductivité peut donc être améliorée par l'apport d'un électrolyte tel que un acide, du sel et une base.

Une source d'électricité peut être

branchée sur les deux électrodes qui sont placées dans l'eau. L'hydrogène apparaîtra alors sur l'électrode chargée négativement, la cathode, et l'oxygène se formera sur l'électrode chargée positivement, l'anode. Les quantités d'hydrogène et d'oxygène produites seront proportionnelles à la charge électrique qui aura traversé l'électrolyte. Le phénomène d'électrolyse se produit grâce à l'apport d'énergie qui maintient les ions séparés et leur permet de se déplacer vers les électrodes correspondantes.

1.5.4 Les piles à combustible

Les piles à combustible transforment l'énergie chimique en électricité et en chaleur avec une très grande efficacité. Ces dispositifs peuvent être utilisés partout, n'importe quand, aussi longtemps que nécessaire et tant qu'ils seront alimentés en hydrogène, ils produiront de l'électricité. Les piles à combustible sont l'un des rares dispositifs capables d'utiliser de l'énergie renouvelable pour alimenter des installations de puissance. Elles peuvent fournir l'énergie à des appareils électriques portables, des automobiles, des habitations, des immeubles, des vaisseaux spatiaux. La figure 1-16 montre des piles à combustible utilisées par la NASA. Le principe de base de la pile à combustible est simple. Elle est constituée de nombreuses couches assemblées en sandwichs. Une pile à combustible est composée d'une membrane électrolyte flanquée par une anode poreuse d'un côté et d'une cathode de l'autre.

Anode:

la borne négative d'une pile à combustible ou d'une batterie qui va délivrer du courant.

Cathode:

la borne positive d'une pile à combustible ou d'une batterie qui va délivrer du courant.



Figure 1-16. Piles à combustible de la NASA

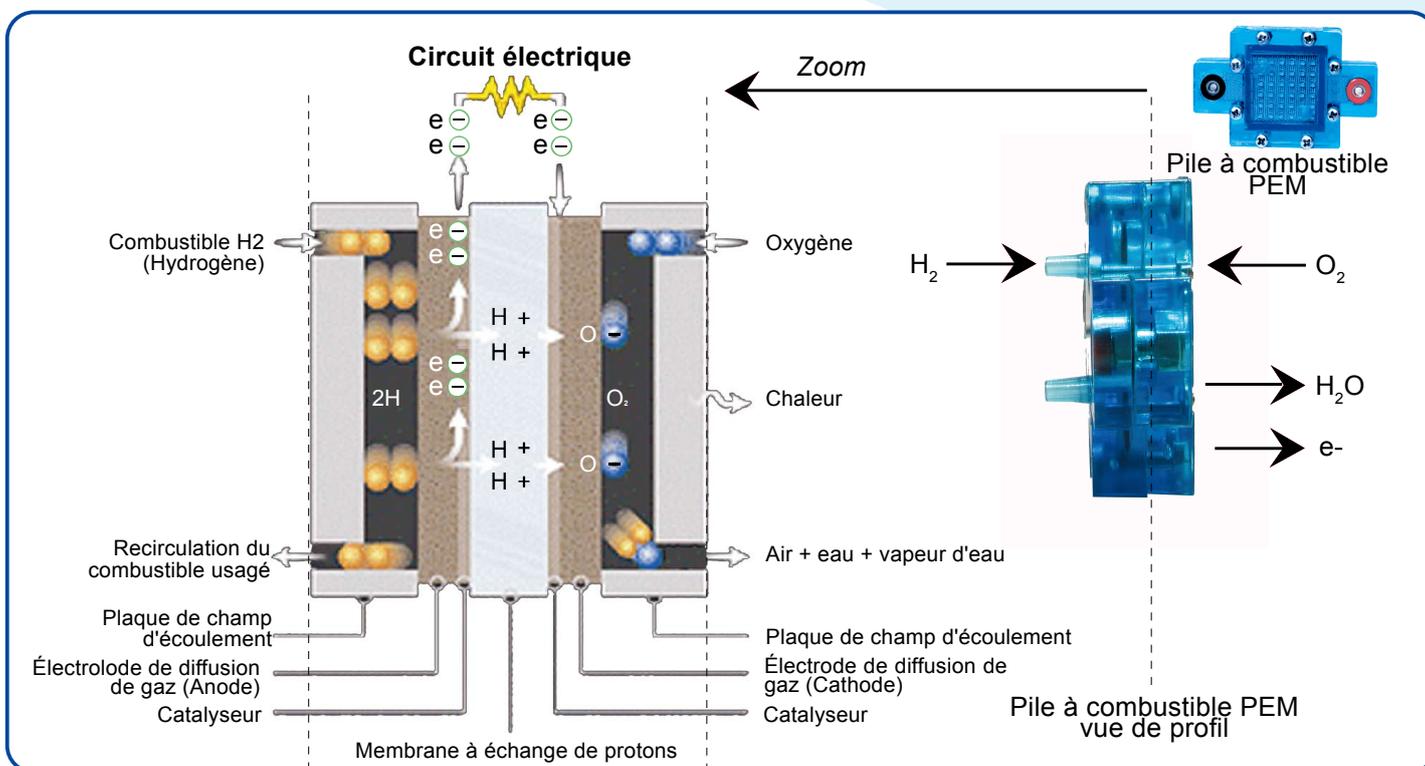
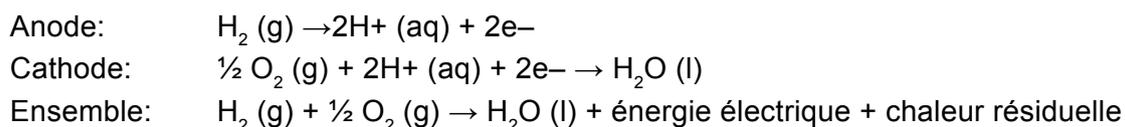


Figure 1-17 une pile à combustible PEM à simple élément

L'hydrogène est séparé en protons et en électrons du côté de l'anode, et se recombine avec l'oxygène pour produire de l'eau du côté cathode. Les protons de l'hydrogène passent de l'anode vers la cathode à travers la membrane électrolytique. Les électrons de l'hydrogène, eux sont reconduits vers la cathode par un circuit extérieur à la pile à combustible. Du côté cathode, les électrons et les protons réagissent avec l'oxygène, forment de l'eau et un peu de chaleur.(10). La cathode ainsi que l'anode contiennent tous deux un catalyseur permettant d'accélérer le processus chimique.

La figure 1-17 montre l'exemple d'une membrane de pile à combustible à échange de protons (PEM) qui fonctionne selon la réaction chimique suivante :



Les réactants (H2) et (O2) sont transportés par diffusion et / ou par convection vers les électrodes catalytiques où la réaction a lieu. Bien que la réaction dans chacune des parties de la pile à combustible sera différente pour d'autres types de piles à combustible, la réaction globale sera équivalente. L'eau et la chaleur résiduelle doivent être évacuées continuellement car leur présence peut nuire au bon fonctionnement de la pile à combustible. (11).

Les piles à combustible de divers types utilisent des carburants ou réactants variés pour générer de l'électricité. Certaines fonctionnent à l'hydrogène, d'autres au méthanol, à l'éthanol, à l'aide de combustibles fossiles, de produits dérivés de la biomasse, etc. L'utilisation de combustibles fossiles pour produire de l'hydrogène afin d'alimenter des piles à combustible est considérée comme une étape intermédiaire en attendant que les infrastructures de production d'hydrogène soient construites. Les combustibles pour les piles peuvent aussi être dérivés de nombreuses sources telles que la biomasse, le méthane produit dans les stations d'épuration de l'eau, des déchets forestiers, des décharges ou déchetteries, des déchets de la ferme ou des excréments du bétail.

1.6 Vision d'une société de l'hydrogène basée sur des énergies renouvelables

La plus grande partie des besoins en énergie de notre société en sont couverts par les combustibles fossiles. Ces combustibles sont extraits, transportés, stockés facilement grâce aux gigantesques investissements qui ont été consentis pour bâtir l'infrastructure correspondante. Cette disponibilité du combustible a permis aux sciences et la technologie d'avancer plus vite durant les deux derniers siècles que pendant toute l'histoire de l'humanité qui a précédé. Bien que les combustibles fossiles ont apporté énormément d'avantages à notre société, ils ont aussi apporté d'importants inconvénients pour l'environnement et certains de ces inconvénients n'ont peut être pas encore été constatés. Certains dégâts provoqués par l'utilisation des combustibles fossiles s'observent dans la pollution de l'atmosphère, du sol et de l'eau, par les pluies acides, par les émissions de CO₂ ou par les fuites d'hydrocarbures. Ces polluants peuvent provoquer le réchauffement global et nuire gravement à certaines espèces vivantes.

Pour la plupart des pays du globe, si l'on arrêtrait l'approvisionnement en pétrole, l'économie ne s'en remettrait pas. Les gens ne pourraient plus se rendre à leur travail ni utiliser l'électricité pour alimenter les usines ou ateliers, ils n'auraient plus de chauffage, plus d'éclairage dans leurs demeures, plus d'énergie disponible. C'est un fait que les voitures consomment de l'essence et provoquent la pollution de l'atmosphère par les émissions de CO₂, de monoxyde de carbone, CO, d'oxyde d'azote, et les résidus d'hydrocarbures non brûlés sont envoyés dans l'atmosphère. Les pots d'échappement catalytiques ont permis de réduire la pollution de manière significative, cependant ils ne sont pas parfaits. De nombreuses villes subissent en certaines périodes des taux d'ozone dangereux dans leur atmosphère.

En plus des effets négatifs de la consommation des combustibles fossiles il faut savoir que ceux-ci existent en quantité limitée et que nous serons forcés de trouver d'autres formes d'énergie. La demande globale en énergie va d'autrepart continuer d'augmenter au vu de la croissance démographique.

L'approvisionnement futur en énergie va dépendre d'une combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables. En ce qui concerne les combustible, l'hydrogène représente l'un des plus riches en énergie. Ceci a conduit la NASA à utiliser largement l'hydrogène comme combustible pour

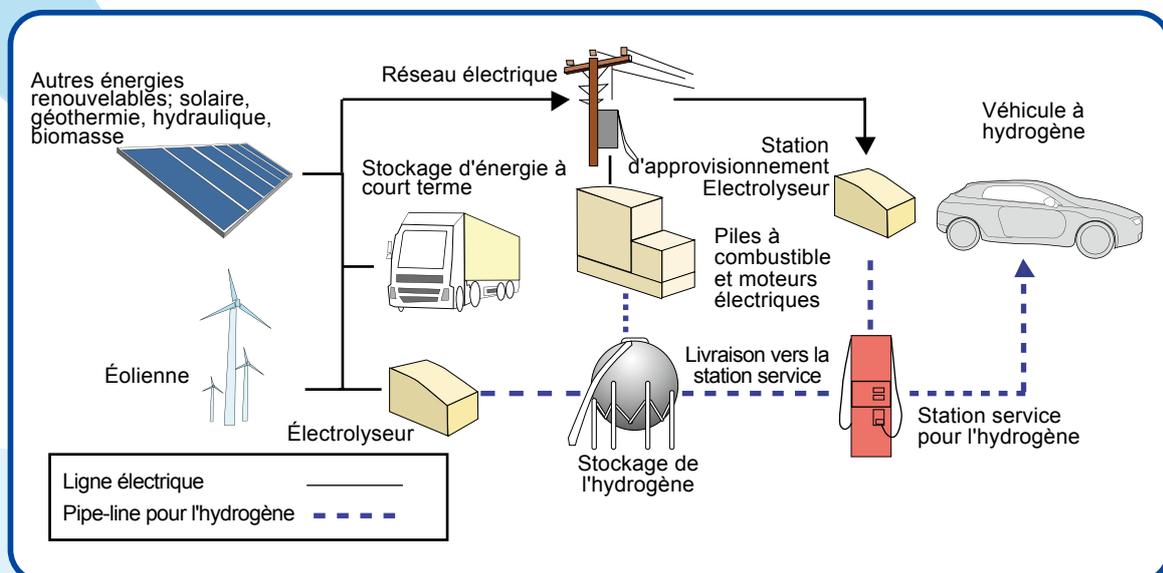


Figure 1-18. Les liens entre hydrogène et le système d'énergie

les missions spatiales dans lesquelles le rapport masse / performance est extrêmement important. L'hydrogène est également l'élément le plus répandu dans l'univers. Cependant on ne le trouve pas de manière isolée sur terre; il est presque toujours associé à d'autres atomes. Il est donc nécessaire de l'extraire des molécules où il se trouve, le plus souvent dans les hydrocarbures ou dans l'eau. Le processus le plus souvent utilisé pour extraire l'hydrogène est le reformage du gaz naturel. Il peut également être extrait du charbon, des bio-carburants, des déchets végétaux, des centrales nucléaires.

L'une des caractéristiques des énergies renouvelables est qu'elles sont disponibles de manière intermittente. Le vent ne souffle pas continuellement, le rayonnement solaire n'est pas disponible la nuit, etc. Lorsque le vent ou le soleil ne sont pas présents, il n'est pas possible de produire de l'électricité. Il est par contre judicieux de produire de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau lorsque l'électricité d'origine solaire ou éolienne est disponible et de stocker cet hydrogène pour le reconverter en électricité en temps voulu.

Les piles à combustible ont été utilisées depuis des décades, principalement dans des applications stationnaires, soit dans des usines soit dans des habitations. Les appareils électroniques portables tels que notebooks, laptops, téléphones portables, les caméras, vont multiplier leur autonomie par un facteur 10x ou 20x en faisant appel aux piles à combustible à hydrogène. La plupart des constructeurs d'automobiles ont déjà investi d'énormes montants dans la conception de véhicules à hydrogène et pile à combustible. Bien que les solutions basées sur les énergies renouvelables soient encore coûteuses les avancées technologiques et l'augmentation du nombre d'unités produites réduisent les coûts chaque année.

De plus, le coût des combustibles fossiles va continuer de progresser dans le futur. Lorsque le prix des énergies renouvelables sera comparable à celui des combustibles fossiles, l'économie dépendante du pétrole va être remplacée par une économie basée sur les énergies renouvelables.

Dans le modèle économique du futur, les maisons individuelles, par exemple, seront capables de produire leur propre énergie. Ce fait permettra de redistribuer le pouvoir, car les grandes compagnies pétrolières ne seront pas à même de contrôler autant de ressources ou de richesse. Ces maisons individuelles produiront également un supplément d'énergie qu'elles pourront injecter sur le réseau de distribution électrique pour que d'autres sites, moins pourvus en énergie renouvelable puissent en bénéficier.

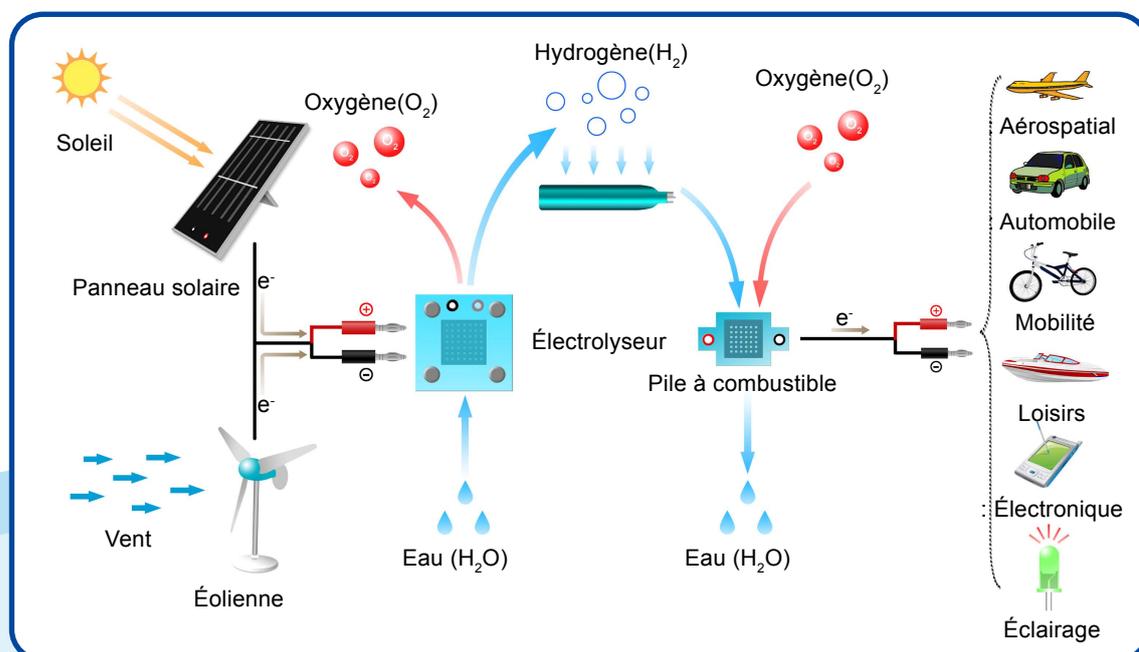


Figure 1-19. Diagramme du cycle hydrogène renouvelable.

Dans le futur, les voitures à hydrogène et pile à combustible pourront être connectées à une prise soit à la maison, soit au bureau et pourront fournir de l'énergie. Une maison individuelle consomme une moyenne de 10 KW de puissance électrique pour alimenter tous les appareils. Une automobile pourra produire environ 40 KW de puissance, une voiture à pile à combustible pourra ainsi se transformer en petite centrale électrique permettant d'alimenter une maison individuelle ou un commerce. Cette transition vers une économie, une société centrée sur l'hydrogène représente un important challenge, mais elle représente surtout une énorme opportunité pour le 21 ème siècle.

La transition vers une économie basée sur l'hydrogène a déjà commencé. Aujourd'hui, nous sommes encore une économie basée sur les combustibles fossiles et principalement sur le pétrole. Nous travaillons actuellement à la diminution des coûts associés à l'économie basée sur l'hydrogène, et nous avons encore bien des progrès à faire; mais nous progressons rapidement !

1.7 Conclusion

L'énergie est nécessaire pour permettre le mode de vie moderne. Les combustibles fossiles ont permis la croissance économique, ils ont révolutionné les transports, la technologie, l'industrie et ont eu un impact sur tous les aspects de notre vie moderne. Ils ont également engendré des conséquences néfastes telles que la pollution, l'épuisement des réserves de matière première, et la domination politique des pays pourvus de ressources minières ou pétrolières. La demande en énergie continue de croître avec l'augmentation de la population mondiale. Les estimations du volume des réserves actuelles de combustibles fossiles varient largement. La plupart des experts estiment que celles-ci vont pouvoir subvenir à nos besoins durant encore 30 à 40 ans. Ainsi, le temps du pétrole bon-marché est bientôt terminé. La pollution provoquée par l'utilisation des combustibles fossiles affecte l'atmosphère, l'air, l'eau et les sols. C'est pourquoi il existe à la fois des raisons économiques et écologiques de développer les technologies des énergies renouvelables. De nombreuses sortes d'énergie renouvelables ont fait l'objet d'études et d'expériences. Parmi celles ci, le solaire photovoltaïque ou thermique, l'énergie éolienne, l'hydroélectrique, la bio-énergie, la géothermie, etc. Les cellules solaires photovoltaïques utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité, l'éolienne utilise l'énergie cinétique du vent, et la bio-énergie est extraite des plantes. Toutes ces énergies alternatives présentent des avantages et des inconvénients et elles se trouvent toutes dans des stades de développement différents. Le set éducatif des énergies renouvelables (FCJJ-27) permet de démontrer un ensemble d'énergies renouvelables comprenant : le solaire photovoltaïque, l'éolienne, les piles à combustible ainsi que l'électrolyse et l'hydrogène. Ce set éducatif permet de démontrer en miniature les principes d'une économie basée sur les énergies renouvelables et sur l'hydrogène.

Nous travaillons actuellement à la réduction des coûts liés à ce futur modèle économique et il nous reste des progrès à faire. Nous nous efforçons d'apprendre rapidement à améliorer ces technologies, parce que cette échéance arrive très vite.



Chapitre 2

Energie solaire

2.1. Introduction

2.2. Histoire

2.3. Types de systèmes Photovoltaïques (PV)

2.4. Principes et Caractéristiques

2.5. Technologie solaire

2.6. Nouveaux matériaux pour les cellules photovoltaïques

2.7. Utilisations de l'énergie solaire

2.8. Conclusion

2.1 Introduction

La plupart d'entre-nous sommes déjà habitués aux cellules solaires photovoltaïques car nous en voyons chaque jour, sur des calculettes, des lampadaires, et sur de nombreux panneaux de signalisations le long des routes. Tant que ces appareils reçoivent assez de lumière, ils semblent fonctionner éternellement. Les panneaux solaires photovoltaïques sont faits de nombreuses cellules assemblées ; le matériau qui les constitue est un semi-conducteur. Il s'agit d'un matériau semi-conducteur spécial qui libère des électrons lorsqu'il est frappé par des rayons lumineux. Nous développerons ce phénomène plus en détails dans la section 2.5 car nous allons commencer par explorer l'histoire des cellules solaires photovoltaïques.



Figure 2-1.
Le prototype Helios développé par AeroVironment et testé par la NASA. Un UAV à de pile à combustible et solaire.

2.2 L'histoire

Les cellules solaires furent inventées en 1839, lorsqu'un physicien Français de 19 ans Edmond Becquerel a pu faire apparaître une tension en éclairant une électrode métallique immergée dans une solution électrolyte de faible concentration.(12, 13). En 1876, Adam et Day, ont été les premiers à étudier l'effet photovoltaïque dans des solides. Ils ont pu réaliser des cellules photovoltaïques à base de sélénium dont le rendement était de 1 à 2 % (12, 13). Charles Fritts a poursuivi le développement de la technologie photovoltaïque en enrobant le sélénium d'une très fine couche d'or, obtenant ainsi une jonction p-n en 1883. Albert Einstein a publié un ouvrage théorique expliquant l'effet photovoltaïque en 1904, ce qui lui valut le prix Nobel en 1923. (12). Dans le même temps, un physicien Polonais du nom de Jan Czochralski développa une méthode permettant de produire des cristaux de silicium parfaits. Entre les années 1940 et 1950, cette technique a été utilisée pour produire les premières cellules photovoltaïque mono cristallines; cette technique est encore utilisée de nos jours dans l'industrie. (13,14). Russel Ohl a breveté la cellule photovoltaïque moderne à jonction en 1946 (US Patent 2,402662-light sensitive device). Il a fait cette découverte alors qu'il travaillait à des développements qui devaient conduire à l'invention du transistor.(14). Un sommaire de l'histoire des cellules solaires photovoltaïques est illustré par la Figure 2.2-

1839	Le physicien français Edmond Becquerel fut le premier à faire apparaître une tension en éclairant une électrode métallique dans une solution électrolytique.
1876	Le physicien français Edmond Becquerel fut le premier à faire apparaître une tension en éclairant une électrode métallique dans une solution électrolytique.
1904	Albert Einstein publia une explication théorique de l'effet photovoltaïque.
1916	Jan Czochralski entreprit le développement d'une méthode permettant de produire de parfaits cristaux de silicium.
1940s	Première génération de cellules photovoltaïques monocristallines.
1950s	Première tentative de commercialisation de panneaux solaires photovoltaïques.
1958	Première utilisation commerciale de panneaux solaires photovoltaïques par la NASA sur le satellite Vanguard 1.
1980s	Apparition des panneaux solaires photovoltaïques sur des produits de consommation.
1990's- Present	Le coût des panneaux solaires PV continue de baisser, ce qui étend leur utilisation.

Figure 2-2. Historique des cellules photovoltaïques

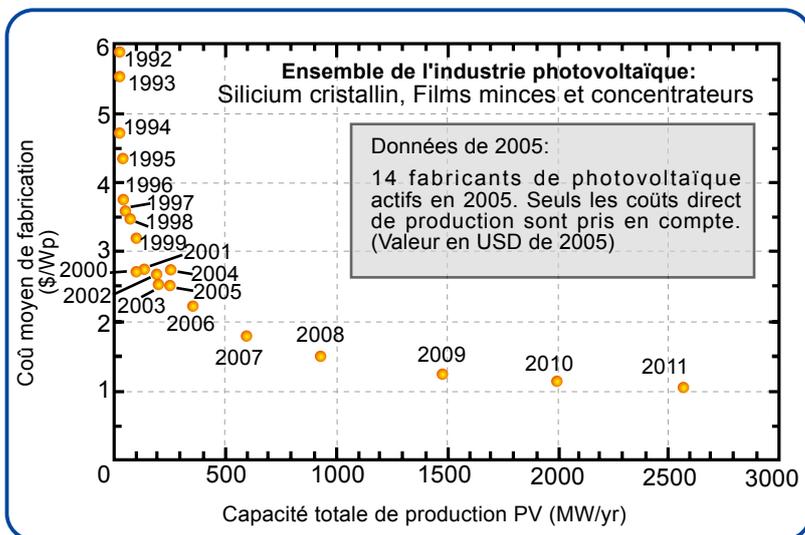


Figure 2-3. Coût et capacité de l'industrie photovoltaïque

le satellite Vanguard 1, en 1958. Ces panneaux provenaient de la firme Hoffmann Electronics (14). Cette application fut facilement justifiée, car pour la technique spatiale, le prix est moins important que la fiabilité et l'encombrement. Les panneaux solaires PV furent depuis lors constamment utilisés pour alimenter les satellites en énergie électrique. Durant le premier choc pétrolier dans les années 1970, les recherches faites pour la NASA commencèrent à être utilisées par des firmes commerciales. Vers la fin des années 1980, la réduction du coût et l'amélioration du rendement autorisa l'utilisation de panneaux solaires PV dans des appareils courants tels que calculatrices, des signaux routiers, des téléphones de secours, etc. Bien que les coûts continuèrent de diminuer durant les années 1990, ils représentent encore le double de ce qui serait nécessaire pour que l'énergie solaire photovoltaïque soit compétitive comparativement aux autres formes d'énergie. (12, 14). La figure 2-3 illustre la réduction des coûts de production des panneaux solaires PV depuis 1992.

2.3 Types de panneaux photovoltaïques

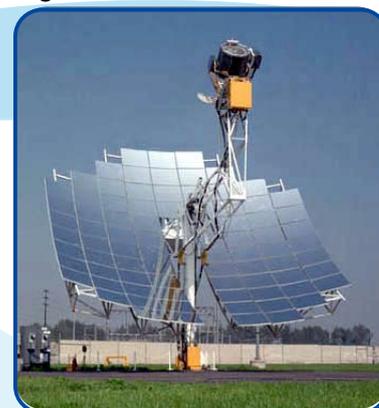
Il existe deux types de panneaux photovoltaïques sur le marché actuellement, ceux qui représentent une surface plane et les concentrateurs. Les panneaux plats sont les plus courants, ils sont constitués par un alignement de cellules individuelles connectées entre-elles et assemblées sur un cadre plat pour capter le rayonnement solaire. Les systèmes photovoltaïques concentrateurs comportent des surfaces de miroirs paraboliques ou des lentilles permettant de focaliser le rayonnement solaire sur de petites surfaces. On économise ainsi une grande quantité de semi conducteurs et on gagne en performance. Lorsque ces dispositifs sont munis de systèmes de suivi du soleil montés sur un axe ou deux axes, on les nomme des heliostats-concentrateurs photovoltaïques (HCPV). Bien que ces systèmes comportent quelques avantages, ils sont peu utilisés car le coût des dispositifs de suivi du soleil, du système de refroidissement, ainsi que le système de focalisation du rayonnement solaire sont très élevés. (1.4).

Lorsque les deux systèmes sont comparés, le système plan est plus simple à réaliser mais il nécessite bien plus de matériel semi conducteur alors que le système concentrateur requiert une plus petite quantité de matériel semi conducteur mais un système sophistiqué du suivi du soleil. Des photos de ces deux types d'installations sont représentées sur la Figure 2.4



(a)

Figure 2.4.
(a) Panneau solaire surface plane
(b) Panneau solaire concentrateur



(b)

2.4 Principes et caractéristiques

De simples systèmes photovoltaïques alimentent des calculettes, des montres bracelet et d'autres petits objets sur le marché aujourd'hui. Des systèmes un peu plus importants alimentent des lampadaires, des panneaux de signalisation routière, des systèmes de pompage, des relais de télécommunication, ils servent également à fournir l'énergie nécessaire pour l'éclairage des maisons et pour assurer le fonctionnement d'appareils ménagers. Les panneaux solaires sont devenus une importante source d'énergie de nos jours car leur rendement s'est amélioré et leur prix les rend plus compétitifs.

Les cellules solaires photovoltaïques sont encapsulées dans du matériau transparent puis connectées en réseau pour former un panneau. Les panneaux PV sont recouverts d'une feuille de verre afin de protéger le matériel semi conducteur tout en laissant passer la lumière. La tension nominale aux bornes d'une seule cellule PV est d'environ $\frac{1}{2}$ Volt, elle est donc incapable d'alimenter la plupart des appareils par elle-même. (14). C'est pourquoi un certain nombre de ces cellules sont connectées en série afin d'augmenter la tension électrique de l'ensemble. Pour obtenir une plus forte intensité de courant, ces ensembles de cellules en série sont connectées en parallèle. La figure 2.5 montre des cellules PV laminées, une puce de silicium monocristalline et une puce de silicium polycristalline.

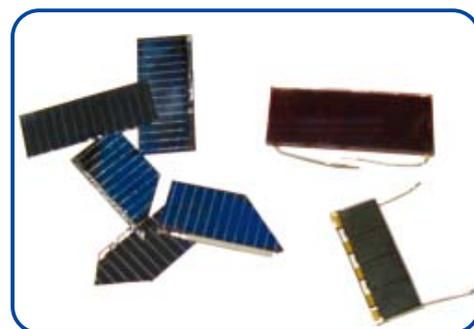
La puissance électrique fournie par un panneau solaire PV est mesurée en Watts ou en Kilowatts. L'énergie électrique produite par les panneaux solaires peut ensuite être injectée dans le réseau de distribution d'électricité à l'aide d'onduleurs. Les onduleurs sont des dispositifs qui convertissent le courant électrique continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif compatible avec le réseau de distribution électrique. Pour des installations photovoltaïques isolées des batteries peuvent être utilisées afin de stocker l'énergie produite pour un usage ultérieur..



(a)



(b)



(c)

Figure 2-5.

(a) Cellule PV laminée

(b) Puce de silicium monocristalline

(c) Puce de silicium polycristalline

2.5 Technologie solaire

Lorsqu'une cellule solaire photovoltaïque est soumise au rayonnement solaire, les photons contenus dans le rayonnement absorbé apportent de l'énergie qui libère des électrons de la couche de semi conducteur de la cellule. Ces électrons se déplacent alors de proche en proche dans la cellule, créant puis bouchant des « trous » dans le matériau semi conducteur. C'est ce mouvement des électrons libérés qui produit le courant électrique. Ce processus de conversion de lumière en électricité est appelé l'effet photovoltaïque.

La lumière est une forme d'énergie et les électrons contenus dans le matériau semi conducteur se mettent en mouvement lorsqu'ils reçoivent ce supplément d'énergie apporté par les photons de la lumière. (Effectuer l'expérience lumière et chaleur). Les électrons se déplacent alors librement à l'intérieur du matériau semi conducteur. La différence de potentiel électrique ainsi créée peut être captée par des fils conducteurs d'électricité vers l'extérieur de la cellule. Si l'on complète alors le circuit électrique par une charge résistive à l'extérieur du panneau solaire, le courant se met à circuler et l'on peut utiliser l'énergie fournie par le panneau solaire.

Pour augmenter la puissance fournie par les cellules PV, on les assemble en série afin d'augmenter la tension (Volts) puis on connecte ces sous ensembles en parallèle afin d'augmenter l'intensité du courant (Ampères) ; on obtient ainsi un panneau solaire photovoltaïque. Ces panneaux solaires peuvent ensuite être connectés entre eux pour former des installations photovoltaïques de plus grande puissance. Une installation photovoltaïque complète ne comporte pas que les panneaux solaires, elle inclut le matériel de montage, le système de stockage de l'énergie ou le dispositif de connexion au réseau de distribution électrique (onduleurs).

Relation entre énergie, travail et puissance.

L' énergie

L'énergie est une quantité qui définit la somme de travail qui peut être fourni. Il existe de nombreuses formes d'énergie : la lumière, le son, la chaleur, l'énergie mécanique, l'énergie chimique, l'énergie électrique. Tous les phénomènes naturels peuvent être expliqués en les analysant par l'énergie mise en jeu. L'énergie peut se transformer d'une forme vers une autre, mais la quantité d'énergie concernée reste toujours la même.

Le travail

Le travail est le produit d'une force par le déplacement. Une force exprimée en Newtons (N), multipliée par la distance de déplacement mesurée en mètres (m). L'unité de mesure du travail est le Joule (J) il représente le travail effectué par une force de 1 Newton sur une distance de 1 mètre.
La puissance.

L'unité de puissance est le Watt

La puissance définit le temps nécessaire pour effectuer un certain travail. La puissance est obtenue par la formule suivante :
Puissance (Watts) = Travail (J) / Temps (sec)

2.5.1 Déplacement des électrons dans le silicium

Un atome de silicium comporte 14 électrons disposés en 3 couches. Les deux premières couches sont complètes et la troisième est partiellement libre puisqu'elle ne compte que 4 électrons, comme illustré par la Figure 2.6. Pour que l'atome se trouve dans son état naturel, il devrait comporter 8 électrons dans sa couche externe. C'est pourquoi, afin de combler les espaces vides, il partage 4 électrons avec l'atome de silicium voisin. C'est ainsi que la structure cristalline est formée. Comme les électrons sont dans l'impossibilité de se déplacer, l'une des propriétés du silicium est qu'il est un mauvais conducteur d'électricité. Les électrons sont prisonniers de la structure cristalline.

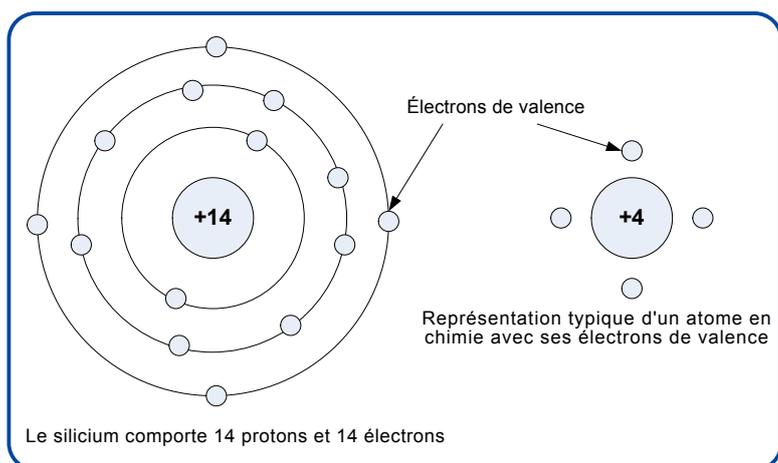


Figure 2-6.
L'atome de silicium comporte 14 protons et 14 électrons. En chimie, les atomes sont représentés uniquement avec leur couche de valence.

Électrons de valence:

Les électrons situés dans la couche extérieure d'un atome sont appelés électrons de valence. Les électrons de valence ont un rôle important puisque ce sont eux qui déterminent la faculté d'un atome de réagir chimiquement avec d'autres atomes. S'il comporte peu d'électrons de valence, un atome sera probablement prompt à réagir. Si l'orbite de valence est complète, l'atome présente moins de probabilités de réagir avec d'autres atomes.

C'est pourquoi, il est nécessaire de modifier les propriétés du silicium afin de permettre à ses électrons de se mouvoir. Il est possible de réaliser cet artifice en injectant des impuretés dans le matériau du silicium. D'autres types d'atomes sont ainsi mélangés avec les atomes de silicium, ce qui libère les électrons de valence. Si l'on injecte des atomes de phosphore, par exemple, ceux-ci s'associent avec les atomes de silicium, mais vu que l'atome de phosphore comporte 5 électrons de valence, l'un d'entre eux demeure libre.

2.5.2 Effet photovoltaïque

Lorsqu'un photon frappe une surface de silicium, il peut soit être absorbé, soit être réfléchi par la surface, ou encore traverser cette couche de silicium.

Photon:

Une particule élémentaire qui représente l'unité élémentaire de lumière ou d'autres formes de rayonnements électromagnétiques.

Bande d'énergie interdite:

Un niveau d'énergie dans un solide qui empêche la présence d'électrons. Ou, le niveau d'énergie requis pour libérer de leur orbite tous les électrons de la couche extérieure d'un atome.

Si le photon est absorbé, son énergie est transmise à un électron dans la couche de cristal. L'électron de valence qui se trouvait lié par la structure cristalline reçoit soudainement un supplément d'énergie de la part du photon le fait sortir de son orbite et lui permet de se déplacer dans le matériau silicium semi-conducteur. Cet électron se déplace vers un autre endroit (trou), et il laisse derrière lui un trou libre, celui où il se trouvait précédemment. Ceci est ce qu'on appelle les paires mobiles « électrons et trous » dans un semi-conducteur.

2.5.3 Spectre électromagnétique et perte d'énergie

Le spectre électromagnétique est constitué de différentes longueurs d'ondes, ce qui correspond à différents niveaux d'énergie.

Le spectre électromagnétique:

Le terme est utilisé pour décrire la gamme complète de longueur d'onde des ondes électromagnétiques, allant des rayons gamma, jusqu'aux ondes radios.

On a tendance à croire que les ondes de lumières sont toutes visibles, mais le spectre des couleurs de l'arc-en-ciel ne représente qu'une très petite partie de l'ensemble des longueurs d'onde capables de transporter de l'énergie. Une grande partie de ces autres longueurs d'onde sont plus ou moins absorbées par l'atmosphère terrestre . Le seul moyen d'observer ces ondes est de se rendre dans l'espace. Les dénominations des différentes gammes de longueurs d'onde du spectre électromagnétique sont montrés par la Figure 2-7.

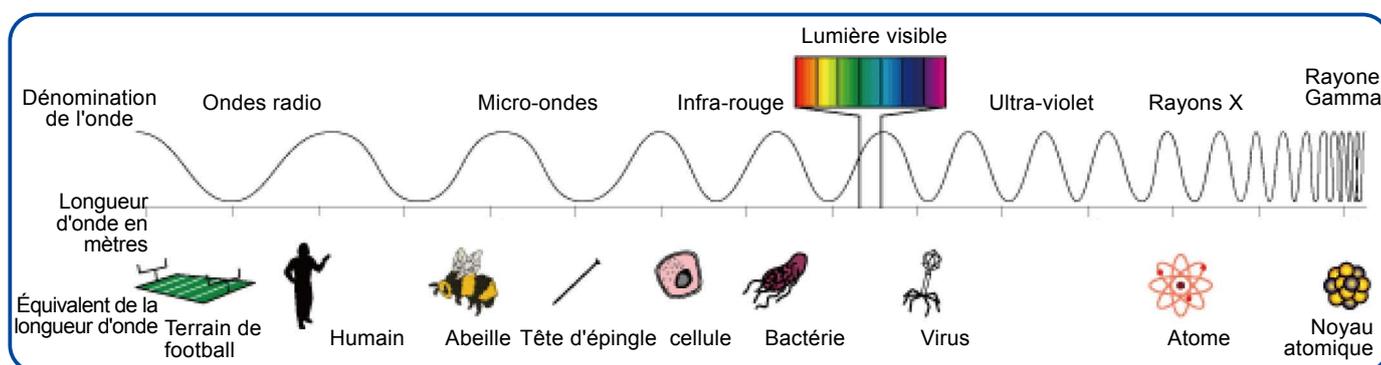


Figure 2-7. Spectre électromagnétique

Lorsque vous observez un arc-en-ciel, vous constatez la séparation de la lumière blanche en ses différentes composantes de fréquence, donc de couleurs. Vu que les matériaux photovoltaïques n'absorbent qu'un certain niveau d'énergie, seule une partie des longueurs d'onde présentes dans la lumière vont permettre de libérer des électrons. Selon le type de cristal de silicium un certain niveau d'énergie (1.1eV pour le silicium cristallin) sera requis pour mettre les électrons en mouvement. Il s'agit du « niveau d'énergie interdit » pour ce matériau.

Electron Volt (eV):

L'électron Volt (eV) est une unité d'énergie utilisée en physique. Il correspond à la quantité d'énergie gagnée par un électron libre alors qu'il accélère à travers à travers une différence de champ électrostatique de 1 Volt (1 Joule / 1 Coulomb), multiplié par la charge de l'électron (1.602×10^{-19} Coulomb) . Le Coulomb (C) est l'unité universelle de charge électrique. Il est équivalent à la charge transportée en une seconde par un courant de 1 Ampère.

Ainsi, si l'on utilisait un matériau caractérisé par une « bande interdite » plus faible, serait-il possible de faire mouvoir un plus grand nombre d'électrons ?

La bande interdite détermine aussi la tension (Voltage) du champ électrique. Ainsi, si cette tension est trop faible, les photons additionnels qui seront absorbés ne généreront pas assez de tension pour fournir la puissance requise.

Pour équilibrer ces deux effets contradictoires, la « bande interdite » optimale est de 1.4 eV pour le matériau qui compose la cellule photovoltaïque. (12,13). D'autres pertes d'énergies surviennent également. Les électrons doivent se déplacer d'un côté de la cellule PV vers l'autre côté. Le dessous et le dessus de la cellule sont en partie couverts de métal, mais une grande partie doit en être dépourvue car les photons doivent pouvoir être absorbés par le silicium afin d'exciter les électrons. Si toute la surface de la cellule était couverte par une plaque de contact, les photons ne pourraient pas entrer. Le silicium est également un semi-conducteur et sa résistance interne est relativement grande, ce qui rend le cheminement des électrons difficile.

Toutes ces caractéristiques se transforment en pertes considérables. Pour réduire ces pertes, la cellule PV est munie d'un grillage métallique qui recouvre partiellement sa surface. Cette grille doit être optimisée : elle doit comporter une assez grande surface de contact pour récupérer les électrons et une surface suffisamment faible pour laisser passer un maximum de photons.

2.5.4 Le silicium et la jonction P-N

Lorsque de l'énergie est apportée à du silicium pur, quelques électrons sont libérés du substrat, laissant un « trou ». Ces électrons cherchent de nouveau un emplacement stable et tentent de trouver un autre trou. Ces électrons sont appelés des « porteurs libres ». Le silicium lorsqu'il est « dopé » par des atomes de phosphore libère une bien plus grande quantité d'électrons, ce qui génère un courant électrique. Le processus qui consiste à ajouter des « impuretés », des atomes de phosphore dans le silicium du substrat, s'appelle « le dopage ». Le silicium contenant des atomes de phosphore devient du silicium de type « n ».

Le silicium peut également être dopé à l'aide d'atomes de bore, qui lui ne contient que 3 électrons de valence, comparativement aux 4 électrons de valence du silicium. Le silicium dopé à l'aide d'atomes de bore deviendra du silicium de type « p ». Ce silicium contiendra alors de « trous libres » plutôt que des électrons libres. Les trous du silicium « p » se déplacent alors selon le même modèle que les électrons du silicium « n ». Les trous qui se déplacent représentent des charges positives.

Si une couche de silicium de type p est accolée à une couche de silicium n, les électrons vont diffuser de la région de forte concentration d'électrons « n » vers la région de faible concentration d'électrons, du côté « p ». Les électrons de la couche de silicium « n » sont repoussés par l'électrode négative et se dirigent vers l'électrode positive de l'autre côté. Les trous de la couche de silicium « p » se déplacent dans l'autre direction. Ce phénomène laisse alors une zone vers le centre, dans laquelle il manque des charges.

Lorsque la différence de potentiel (Volts) entre les électrodes est assez importante, les électrons situés dans la région de manque sont propulsés hors de leurs trous et se déplacent de nouveau librement. La zone de manque se reforme alors et la charge électrique passe à travers la jonction de la diode. La figure 2-8 montre les états de la jonction P-N avant et après le déplacement des électrons.

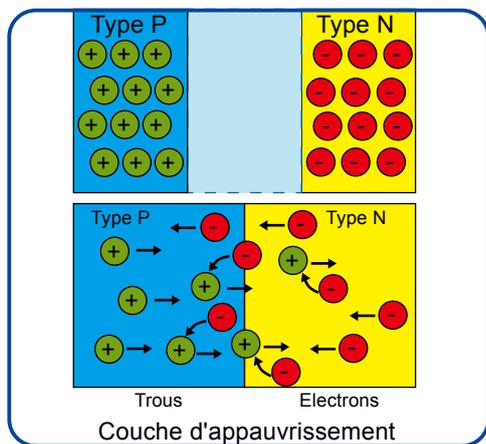


Figure 2-8. Jonctions P-N

Des surfaces de contact métalliques (électrodes) se trouvent du côté « p » et du côté « n » de la cellule photovoltaïque. Ces électrodes sont alors connectées à l'appareil électrique qui doit être alimenté. Les électrons quitteront le côté « n » de la cellule, suivront le conducteur électrique jusqu'à la charge du circuit, la traverseront, puis reviendront vers l'électrode « p » de la cellule. Arrivés dans le substrat de silicium, du côté « p », ils se recombinent avec un « trou » selon le déplacement des paires « trous - électrons » décrit précédemment. Certains proviennent du côté « n » de la jonction d'où ils ont été expulsés. La Figure 2-9 illustre le principe de fonctionnement de la jonction.

2.5.5 Etude des matériaux

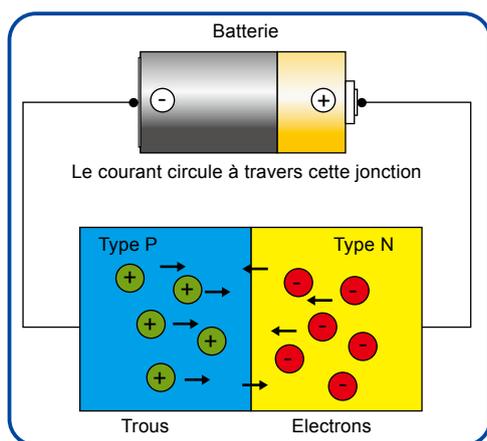


Figure 2-9. Connexion à une batterie extérieure

Les paragraphes en violet sont pour les étudiants de niveau avancé, plus particulièrement pour ceux de 14 ans et plus.

L'un des aspects importants dans la conception des systèmes d'exploitation des énergies renouvelables consiste à étudier les genres de matériaux qui conduisent l'électricité et de comprendre comment ils conduisent le courant. Dans le domaine des énergies renouvelables il existe beaucoup de causes qui génèrent des pertes de rendement. Des électrons se perdent par défaut de contact entre différents éléments ou la faculté de chacun de ces matériaux de conduire l'électricité. La résistance du circuit électrique externe à la cellule, entre la charge et la cellule peut également générer des pertes d'efficacité.

Les principaux types de particules qui entrent en jeu dans les systèmes d'énergies renouvelables sont les électrons et les ions. Des pertes d'électrons surviennent lorsque ceux-ci doivent traverser différentes couches de matériaux, à travers des matériaux dont la structure cristalline n'est pas parfaite, ou suivre de longs câbles conducteurs. Les pertes ioniques sont dues à des raisons plus complexes, mais elles peuvent aussi survenir lors de la traversée de matériaux divers. Pour réduire ces pertes, les matériaux utilisés doivent être hautement conducteurs, présenter une grande faculté d'échange « trou - électron », et les différents éléments doivent être connectés ensemble avec grand soin.

2.5.5.1 Baisse de tension due aux pertes en ligne

Tous les matériaux résistent au passage du courant électrique jusqu'à un certain degré et cette résistance génère des pertes de tension. Ce phénomène se produit dans les cellules photovoltaïques, dans les piles à combustible, dans les électrolyseurs. Les éléments qui contribuent à ces pertes en ligne dans les panneaux PV sont les substrats de silicium et les contacts. Pour les piles à combustible et les électrolyseurs, les pertes sont dues à l'électrolyte, au catalyseur, à la diffusion des gaz, aux plaques bipolaires et aux contacts. Le terme technique pour définir ces pertes est « perte ohmique ». On les calcule en utilisant la loi d'Ohm (voir chapitre 7) . Les résistances impliquées sont la résistance électronique (R_{elec}) et la résistance ionique (R_{ionic}). (11). On peut l'écrire ainsi: $V_{ohmic} = IR_{ohmic} = I(R_{elec} + R_{ionic})$

R_{ionic} produit la majorité des pertes dans l'équation 2-1 car le transport des ions est plus difficile que le transport des électrons. R_{ionic} représente la résistance de l'électrolyte, alors que R_{elec} comprend l'ensemble des résistances de tous les conducteurs composants l'ensemble, y compris les plaques bipolaires, les interconnexions et les contacts.

Conductivité :

La conductivité est la faculté qu'a un matériau de se laisser traverser par des charges électriques.

L'inverse de la résistance électrique s'appelle la conductance. (Φ)

$$\Phi = \frac{1}{R_{ohmic}}$$

La résistance totale de la pile à combustible (R_{ohmic}) est la somme de la résistance ionique et de la résistance électronique. La résistance est caractérisée par les dimensions, la forme et les propriétés intrinsèques du matériau, comme exprimé par l'équation 2-3

$$R = \frac{L_{cond}}{\Phi A_{cond}}$$

Dans laquelle : L_{cond} est la longueur du conducteur exprimées en cm , A_{cond} est la section du conducteur exprimée en cm carrés, et Φ représente la conductivité en $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

La densité du courant :

La densité du courant ou du flux de charges par unité de surface. L'unité standard dans le système d'unités SI est l'Ampère par mètre carré. Dans la plupart des équipements relatifs aux énergies renouvelables, la densité de courant se mesure en milliampères par centimètre carré (mA/cm^2)

La densité de courant j , (mA/cm^2) est définie par la formule :

$$j = \frac{I}{A_{cell}}$$

Dans laquelle A_{cell} représente la surface active de la pile à combustible.

Si la résistance au déplacement des charges électriques diminue, alors la performance augmente. La manière de se déplacer des électrons et des ions varie selon les matériaux. Dans un conducteur métallique, les électrons de valence liés aux atomes se libèrent et sont libres de se déplacer dans le métal. Dans un conducteur ionique typique, les ions se déplacent de lieu en lieu, sautant vers des lieux chargés dans le matériau (comme cela se produit dans le silicium décrit plus haut). Le nombre de porteurs de charges dans un conducteur électronique est bien plus élevé que dans un milieu conducteur de ions. Le déplacement des électrons et des ions sont représentés par les Figures 2-10 et 2-11.

La table 2-1 montre en résumé, une comparaison du comportement d'un conducteur électronique et d'un conducteur ionique, ainsi que les composants d'un système d'énergie renouvelables qui les utilisent.

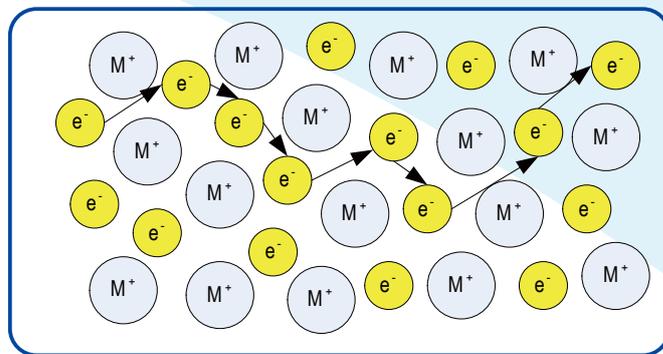


Figure 2-10. Transport d'électron dans un métal

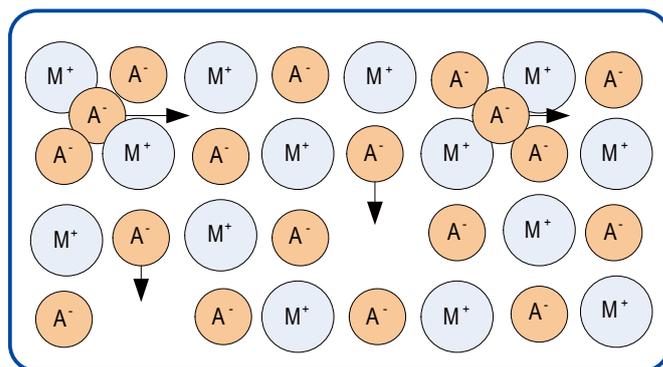


Figure 2-11. Transport ionique dans un conducteur ionique cristallin

Matériau	conductivité	Equipement
conducteur électronique		
Métaux 1	10 puissance 3 à 10 puis 7	Pile à combustible et électrolyseurs
radioconducteurs	10 puissance -3 à 10 puis 4	Cellules solaires (PV)
Conducteurs ioniques		
Conducteurs ioniques	10 puissance-1 à 10 puissance 3	PEMFC Nafion (c), électrolyte utilisé dans de nombreuses piles à combustible et électrolyseurs
Electrolytes liquides	10 puissance -3 à 10 puissance 3	Solution NaOH, acide phosphorique

Table 2-1 : Comparaison des conducteurs électroniques et ioniques utilisés dans les équipements relatifs aux systèmes d'énergies renouvelables.

2.6 Autres matériaux pour les cellules Photovoltaïques

Bien que le silicium soit le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, d'autres matériaux sont employés. Le silicium polycristallin notamment est utilisé afin de réduire les coûts de fabrication, bien que les cellules PV à base de silicium polycristallin soient un peu moins efficaces. Du silicium amorphe est aussi employé dans le but d'abaisser les coûts. D'autres matériaux sont disponibles :

1. l'arséniure de gallium
2. cuivre indium diselenide
3. cadmium telluride

Chaque matériau possède sa bande d'énergie interdite propre. Cela signifie qu'il absorbera un rayonnement d'une longueur d'onde différente. Un moyen d'augmenter le rendement des cellules PV est d'utiliser plusieurs couches de matériau de type différent afin de bénéficier d'un plus grand spectre de longueurs d'onde. On nomme ces cellules photovoltaïques des cellules multi jonctions. On place alors normalement le matériau disposant de la plus haute bande d'énergie interdite au dessus, car il absorbera les photons de plus haute énergie. Le matériau caractérisé par la plus basse bande d'énergie interdite sera placé au dessous. La figure 2-12 montre la partie du tableau périodique des éléments qui concerne les cellules photovoltaïques. (12).

I	II	III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

Figure 2-12 Une partie du tableau périodique des éléments concernant la technique photovoltaïque

2.6.1 Silicium cristallin

Le matériau le plus utilisé pour la construction des panneaux PV est le silicium cristallin; il offre un rendement moyen de 15 %. Il peut être sous la forme de lingots, de rubans ou de puces. Le silicium monocristallin est normalement produit selon le processus inventé par Czochralski. Ces panneaux sont coûteux car ils sont produits à partir de lingots cylindriques.

Lingot :

les lingots de silicium monocristallins sont développés selon le procédé de Czochralski ou de Bridgeman. Ces procédés sont très chers car ils impliquent de nombreuses étapes de fabrication dans des laboratoires sous atmosphère épurée. Après que les cristaux aient été développés, ils sont coupés en tranches et polis, puis ils sont transformés en semi-conducteurs tels que des cellules photovoltaïques ou d'autres composants électroniques.

Il est difficile d'utiliser ces cellules photovoltaïques brutes sans générer un grand nombre de rejets. Le poly-silicium ou silicium multi-cristallin est produit à partir de lingots cubiques forgés qui proviennent d'un grand bloc de silicium fondu qui a été refroidi et solidifié.

2.6.2 Cellules solaires à base de tellure de cadmium

Le tellure de cadmium (CdTe) est un autre matériau absorbeur de lumière permettant de construire des cellules photovoltaïques. Le Tellure de Cadmium est facile à produire et permet une fabrication à grande échelle. Il représente la seule technologie avec le silicium amorphe qui peuvent être produites à grande échelle.

Cependant, les cellules à base de CdTe sont perçues comme étant toxiques car elles comportent du cadmium. De nombreuses études ont cependant montré que la quantité de cadmium qui s'échappe des cellules PV à base de CdTe est plus faible que celle qui s'échappe d'autres cellules contenant du cadmium (14).

2.6.3 Cellules solaires à base de sélénure de cuivre – indium

Les cellules solaires construites à base de sélénure de cuivre – indium (CuInSe₂) possèdent de grandes capacités d'absorption de lumière. Ses caractéristiques optiques et électriques peuvent être manipulées pour développer des dispositifs à la demande du client. Certains de ces films ont démontré des rendements supérieurs à 14 % (14), cependant les coûts de production sont élevés en comparaison de celui des cellules photovoltaïques à base de silicium.

2.6.4 Cellules solaires multi-jonctions à base d'arséniure de gallium

Les cellules PV multi-jonctions construites à base d'arséniure de gallium ont été développées pour des applications spéciales telles que des satellites ou de sondes spatiales. Ces cellules sont constituées de plusieurs couches telles que GaAs, Ge, GaInP₂, et ces couches successives sont déposées par un procédé de vaporisation épitaxiale. (12, 14)

Vaporisation epitaxiale :

Une méthode de dépôt d'une vapeur chimique lors de laquelle une réaction survient dans un mélange gazeux dans des conditions de pression modérée. Cette technique est utilisée pour la fabrication d'alliages de matériaux. Cette technique est utilisée dans la fabrication de cellules solaires PV, de diodes laser, de diodes électroluminescentes LEDs.

Les semi-conducteurs qui sont choisis pour produire les cellules solaires multi-jonctions permettent de capturer pratiquement la totalité du spectre du rayonnement solaire, ce qui leur permet de générer un maximum d'énergie électrique. Les cellules PV multi-jonctions à base de GaAs sont les plus efficaces puisqu'elles atteignent un rendement de 40.7 % (14) Cette technologie est utilisée sur les panneaux solaires du Mars Rover (le petit véhicule des missions sur Mars).

2.6.5 Solutions absorbantes de lumière – Light absorbing dyes (DSSC)

Les solutions absorbantes de lumière (DSSC) sont actuellement testées pour la production de panneaux solaires. Un exemple est le ruthénium organo-métallique qui est déposé en fine couche pour absorber la lumière.

2.6.6 Cellules solaires à base de polymère ou organique

Il existe de nombreuses cellules PV à base de polymère ou organiques qui sont fabriquées selon la technique de film mince (environ 100 nano mètres) et elles sont actuellement testées pour la production de cellules PV. Les exemples comprennent des polymères, des films minces, et des matériaux spéciaux. Le rendement obtenu en conversion d'énergie dans ce cas est plus faible puisque les meilleurs rendements obtenus atteignent 6.5 %. (14). Ces cellules sont toutefois utilisées lorsque le dispositif nécessite de la flexibilité ou pour recouvrir des objets de formes complexes.

2.6.7 Films minces de silicium

Les films minces solaires sont principalement déposés sous forme de vapeurs chimiques à partir d'hydrogène.

Dépôt de vapeur chimique :

Il s'agit d'un procédé qui permet d'atteindre de très grands niveaux de pureté et des matériaux de haute performance. Ce procédé est utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs pour produire des films minces.

En fonction des paramètres de dépôt il va résulter du silicium amorphe, du silicium polycristallin, ou du silicium monocristallin. Les cellules PV fabriquées selon cette méthode de film mince offrent un facteur de conversion d'énergie plus faible que les cellules PV utilisant plus de silicium, mais leur production est moins onéreuse. L'une des récentes inventions concerne des cellules PV à film mince semi-transparentes qui permettront de recouvrir les façades et les vitrages des immeubles. Elles permettront de remplacer les vitrages filtrants actuels tout en produisant simultanément de l'électricité.

2.7 Utilisations de l'énergie solaire

Il existe un nombre illimité d'utilisations de l'énergie solaire. Nous observons déjà de nos jours beaucoup de ces applications sur des calculatrices, sur des lampadaires, sur de nombreux signaux routiers, etc. L'énergie solaire devient également plus courante pour l'alimentation des habitations et des bureaux. Elle a même été utilisée pour alimenter des voitures électriques. Les prochaines sections de ce manuel vont examiner en détail les applications résidentielles, les voitures et quelques problèmes à résoudre pour chacune de ces applications.

2.7.1 Alimenter une maison à l'aide d'énergie solaire.

Il convient de penser à de nombreux détails lors de la mise en place de l'utilisation de l'énergie solaire dans une maison. L'illustration de la figure figure 2-13 représente une installation photovoltaïque typique dans une maison. Le premier élément à considérer, a part le coût, est de s'assurer que le toit offre une pente et une orientation favorable pour bénéficier d'un bon ensoleillement .

Le toit doit être incliné selon un angle permettant de capter une quantité maximum de rayonnement solaire tout au long de l'année. Il peut être avantageux de modifier l'angle de l'installation entre le matin, midi et l'après midi de même que pour l'hiver ou pour l'été. Il convient aussi de s'assurer qu'aucun arbre ou aucun bâtiment ne produira de l'ombre sur les panneaux solaires PV, car si l'un des panneaux est ombragé la production totale de l'installation sera réduite de manière substantielle (bien plus que la proportion de surface ombragée).

Le dimensionnement de l'installation PV est étudiée en fonction de la consommation d'énergie dans la maison, en fonction des conditions d'ensoleillement locales. Il prendra en compte les mois de plus forte consommation. Il sera possible d'optimiser la tension nominale de l'installation en choisissant le nombre de panneaux qui seront montés en série. Souvenons nous que chaque cellule PV produit une tension de 2 volts (section 2.5.2) et que les panneaux solaires PV sont un assemblages de cellules individuelles connectées en réseau ou un certain nombre de cellules sont en parallèle et d'autres en série.

2.7.2 Résoudre les problèmes des installation solaires PV

Lorsque le soleil ne brille pas durant la journée, il est nécessaire d'utiliser une réserve d'énergie stockée. L'électricité peut être stockée en utilisant de l'hydrogène et des piles à combustible ou des batteries d'accumulateurs, ou l'installation photovoltaïque de la maison peut être connectée au réseau de distribution électrique. Il est alors possible de fournir un supplément d'énergie produite par sa propre installation vers le réseau de distribution et à d'autres moments de consommer de l'énergie provenant du réseau de distribution si nécessaire. Des batteries sont souvent utilisées en conjonction avec les installations photovoltaïques, mais selon le type de batterie, la durée de vie de celles- ci varie et elles peuvent nécessiter un remplacement fréquent. Elles peuvent également contenir des électrolytes acides et nécessiter un local bien aéré et dépourvu de métal. Une manière de remplacer les batteries associées aux installations PV, est la production d'hydrogène, puis sa consommation dans des piles à combustible. Les piles à combustible ne nécessitent ps de remplacement fréquent et bénéficient d'une très longue période de stockage. Elles ne requièrent aucun environnement particulier.

Un autre aspect important des installations photovoltaïques est qu'elles produisent du courant continu (DC). L'électricité distribuée par le réseau et consommée par les appareils ménagers dans nos maisons est sous forme de courant alternatif (AC). Il est donc nécessaire d'avoir recours à un appareil capable de transformer le courant continu (DC) en courant alternatif (AC).

ces appareils sont appelés onduleurs. Certaines installations PV comprennent déjà des onduleurs. Pour en savoir plus en ce qui concerne le courant continu, le courant alternatif et les onduleurs, se référer au chapitre 7. Certains constructeurs d'appareils ménagers développent de unités alimentées par du courant continu. Ces appareils peuvent donc être branchés directement sur des installations photovoltaïques.

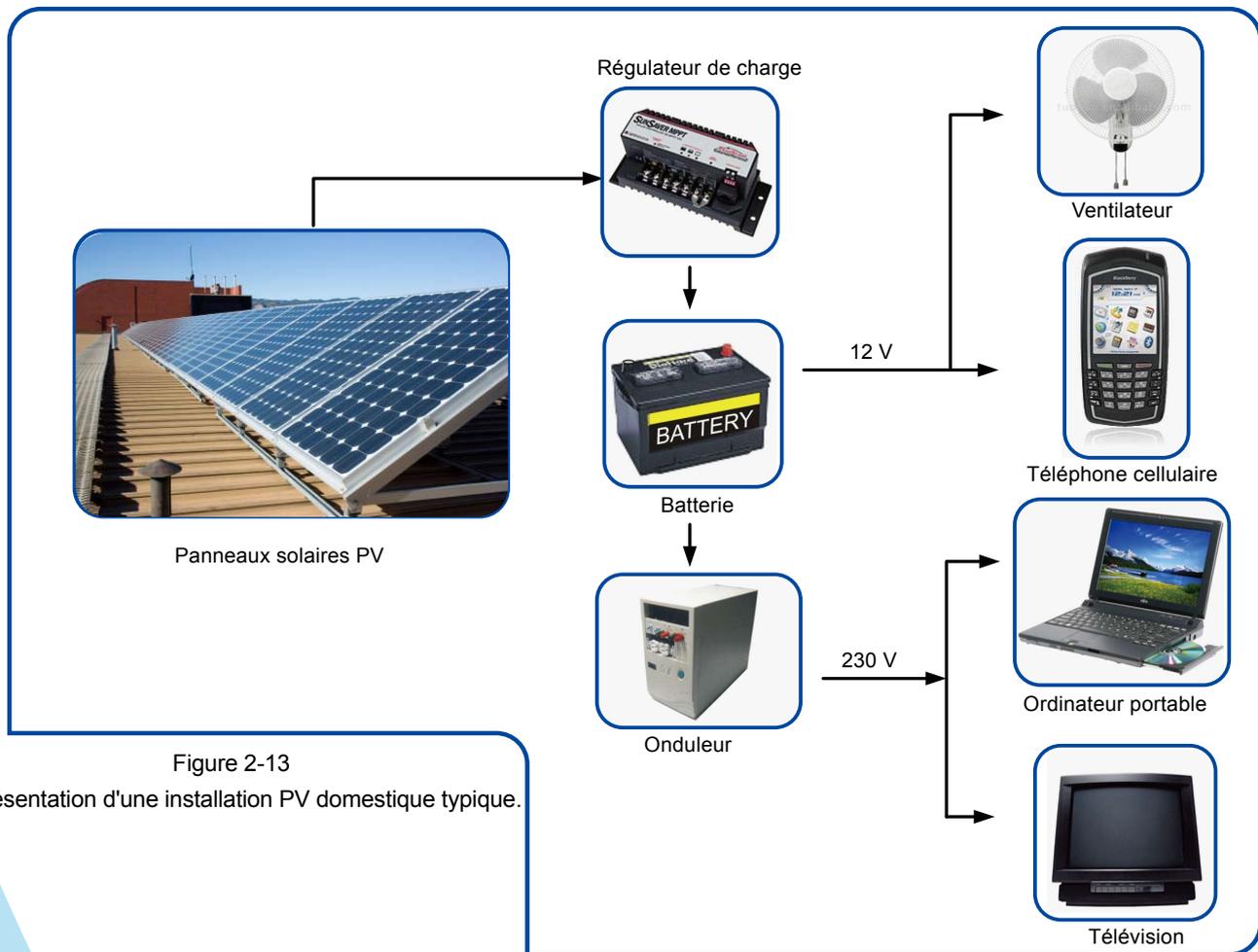


Figure 2-13

Représentation d'une installation PV domestique typique.

2.7.3 Voitures mues par l'énergie solaire

Ne serait-il pas favorable de pouvoir conduire sa voiture sans jamais dépenser de l'argent pour faire le plein d'essence? Il existe des voitures solaires qui ont parcouru de nombreux kilomètres avec succès. L'électricité produite par les panneaux solaires embarqués est stockée dans des accumulateurs puis utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques. Quelques modèles de voitures utilisent directement l'énergie produite par les panneaux PV dans les moteurs, sans stockage intermédiaire. Quelques personnes ont construit leurs propres voitures électriques à énergie solaire PV depuis les années 1970. Quelques grands constructeurs automobiles tels que Ford, et Mazda par exemple ont effectué de nombreuses recherches relatives à des voitures mues par l'énergie solaire. Une voiture de type hybride fut présentée par la firme Française Venturi au salon de l'automobile de Paris en 2006. Le modèle Eclectic combine l'énergie solaire, la force du vent, et l'énergie provenant de batteries pour alimenter son moteur électrique pour la conduite urbaine. Cette voiture n'était destinée qu'à la conduite en ville car sa vitesse était limitée à 50 Km/h (15). Le prix estimé pour cette voiture en 2007 était de 32000 \$. Les figures 2-14 et 2-15 représentent la voiture électrique Venturi Eclectic ainsi qu'une voiture mue par l'énergie solaire exposée au salon de l'automobile de Detroit aux USA.

Les voitures solaires capables de se déplacer à 60 miles par heure (96 KMH) avec une autonomie de quelques centaines de miles utilisent des cellules PV de très haut de gamme. Obtenir de plus grandes vitesses dépend également du poids de la voiture et de son coefficient aérodynamique. Les voitures solaires de compétition ne sont pas pratiques, elles sont très profilées, très basses et elles chauffent rapidement car elles sont couvertes de cellules photovoltaïques. Lorsque le soleil ne luit pas, les voitures solaires nécessitent des accumulateurs ou un moteur à essence comme source d'énergie de secours.



Figure 2-15. Voiture solaire au Detroit Auto Show.



Figure 2-14. La Venturi Eclectic

2.8 Conclusion

Ce chapitre a décrit brièvement comment l'énergie solaire deviendra une part essentielle de l'économie basée sur les énergies renouvelables. Le nombre d'utilisations possibles de l'énergie solaire est infini. Nous observons déjà beaucoup de ces utilisations aujourd'hui, sur des calculettes, des lampadaires, des signaux routiers, etc. Il devient de plus en plus courant d'alimenter les maisons et les bureaux par de l'électricité d'origine solaire photovoltaïque. Les panneaux solaires PV sont composés d'un certain nombre de cellules photovoltaïques assemblées.

Ces cellules sont capables de conduire les électrons car elles sont faites de matériaux semi-conducteurs. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus souvent utilisé pour fabriquer les cellules PV. D'autres matériaux utilisés sont l'arséniure de gallium, le disulfure de cuivre indium, et le tellure cadmium. Les deux types de panneaux photovoltaïques les plus courants sur le marché sont les panneaux plans et les concentrateurs. Les panneaux plans sont constitués par un certain nombre de cellules PV individuelles assemblées sur une surface plate et rigide pour capter l'énergie solaire. Les concentrateurs utilisent des miroirs ou des lentilles construits spécialement pour focaliser le rayonnement solaire en un point précis où se trouvent les cellules PV. Les installations solaires photovoltaïques représenteront une part essentielle de l'alimentation hybride en énergie du futur, car elles ont démontré leur efficacité dans le captage de l'énergie solaire. Comme l'énergie solaire est intermittente, elle sera idéalement utilisée avec un système de stockage. C'est dans ce cadre que la solution constituée par un électrolyseur qui transforme l'électricité en hydrogène, puis le stockage de l'hydrogène et sa consommation ultérieure dans une pile à combustible qui transforme l'hydrogène en électricité apparaît comme une solution judicieuse. L'énergie éolienne est également intermittente et une solution semblable, utilisant l'hydrogène et la pile à combustible peut représenter une source d'énergie complémentaire ou de remplacement. Voir les chapitres 3 -7 pour plus d'information concernant ces sujets.



Chapitre 3

Energie éolienne

3.1 Introduction

3.2 Histoire de l'énergie éolienne

3.3 Principes et caractéristiques

3.4 Types d'éoliennes

3.5 Éléments constitutifs d'une éolienne

3.6 Énergie et puissance du vent

3.7 Effet de la hauteur du mât

3.8 Potentiel théorique de l'énergie éolienne

3.9 Estimation de l'énergie produite par une éolienne

3.10 Facteur de capacité

3.11 Parcs éoliens

3.12 Conclusion



Figure 3-1. L'énergie éolienne

3.1 Introduction

Il est parfois difficile d'imaginer que quelque chose d'invisible peut transporter de l'énergie. L'air est comme tout autre fluide, il peut se mouvoir avec force et son déplacement contient de l'énergie cinétique. Dans une éolienne productrice d'électricité, les pales captent l'énergie cinétique contenue dans le vent. Lorsque les pales reçoivent cette énergie cinétique, elles se mettent en mouvement et font tourner le rotor sur lequel elles sont fixées. Ce rotor comporte un axe dans le prolongement duquel se trouve l'alternateur ou la génératrice. De cette manière, l'énergie cinétique du vent se trouve transformée en énergie mécanique, puis en électricité. L'éolienne produit de l'électricité en transformant une forme d'énergie vers une autre. Une éolienne typique est représentée par la figure 3-1.

Lorsque l'air est réchauffé par le soleil, il s'élève immédiatement car un certain volume d'air chaud est plus léger que le même volume d'air plus froid. Les particules d'air chaud comportent plus de pression que les particules d'air froid, c'est pourquoi l'air chaud nécessite moins de particules par volume pour produire la même pression. Lorsque l'air chaud s'élève, l'air plus froid descend pour occuper le volume libéré. Cet air en mouvement produit le vent. Le vent tente de déplacer tout objet qui se trouve sur son chemin, et lors de ce processus, il transfère une partie de son énergie à cet objet. C'est par ce procédé qu'une éolienne capte l'énergie du vent. La figure 3-2 montre la circulation de l'air provoqué par la différence de température.

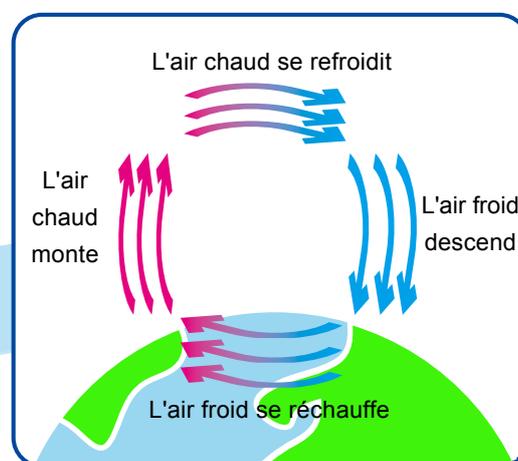


Figure 3-2. La circulation de l'air due à la température

3.2 Histoire de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a été utilisée depuis au moins 5500 ans pour des tâches telles que le pompage de l'eau, les moulins à grains, la navigation à voile, l'animation de divers équipements, la ventilation naturelle des habitations ou autres bâtiments. (17). L'empereur Babylonien Hammurabi avait prévu d'utiliser l'énergie éolienne pour animer son ambitieux projet d'irrigation au 17^{ème} siècle BC (Avant Jésus Christ).

Dans certains pays comme le Danemark, entre 20 et 40 % de l'énergie consommée en 2007 provenait d'énergies renouvelables et principalement d'éoliennes.(16). Ceci démontre que l'énergie éolienne n'est pas seulement capable d'alimenter une ferme isolée en énergie, mais qu'elle est à même d'alimenter des villes entières en électricité.

Hammurabi fut le premier empereur de Babylone. L'empire de Babylone contrôla toute la Mésopotamie après avoir remporté toute une série de guerres face aux royaumes voisins. Hammurabi est reconnu pour avoir créé un ensemble de lois appelé le « code d'Hammurabi ». Celui-ci reste le plus ancien code écrit et reconnu par les historiens. Les lois étaient gravées sur des tables de pierre qui mesuraient environ 180 cm de hauteur.



Des preuves ont été trouvées que les anciens Sinhalese utilisaient les vents de la mousson pour la ventilation de leurs fours dès 300 BC dans des villes telles que Anuradhapura et Sri Lanka. La ventilation permettait d'atteindre des températures de 1100 – 1200 degrés C à l'intérieur des fours. (13, 16). Les premiers moulins à vent connus furent construits au Sistan, Afghanistan vers le 7^{ème} siècle. Il s'agissait de moulins à vent à axe vertical possédant entre 6 et 12 « voiles », constituées de tissu ou canevas. Des moulins à vent à axe vertical furent utilisés dans l'industrie de la canne à sucre et de mouture de grains. Des moulins à vent à axe horizontal firent leur apparition en Europe du nord-ouest vers 1180 et de nombreux moulins de ce style Néerlandais existent encore. (13, 16). La figure 3 – 3, montre l'un de ces anciens moulins alors que la figure 3-4 résume les événements importants de l'histoire de l'énergie éolienne.

Figure 3-3. Anciens moulins à vent

Le développement des moulins à vent utilisés pour actionner des pompes à eau fut un facteur important du développement de l'agriculture en Amérique du Nord. Une vaste proportion du territoire Nord-Américain ne disposait pas d'eau dans les années 1800. Les moulins à vent actionnant des pompes à eau furent aussi importants pour le développement du transport ferroviaire en permettant l'alimentation en eau des locomotives à vapeur.

Un Américain nommé Charles F. Brush est reconnu comme étant la première personne qui a produit de l'électricité à partir d'énergie éolienne. Il mit en fonction sa première éolienne durant l'hiver 1887. (13, 16). En 1891, un professeur d'université Ecossais, James Blyth, effectua les mêmes expériences au Royaume Uni. Son éolienne de 10 mètres de hauteur munie de pales en tissu fut installée dans le jardin de sa résidence secondaire pour produire de la lumière. Il a également construit une autre éolienne pour fournir l'énergie de secours à l'infirmerie d'un asile d'aliénés à Montrose. Cependant, ces installations ne se multiplièrent pas car elles furent considérées comme non viables économiquement. (13, 16)

Dane Poul de la Cour fut le premier à développer une éolienne pour produire de l'électricité, en tenant compte des principes de l'aérodynamique en Europe, vers 1891. Ces éoliennes très pratiques pour la production d'électricité se multiplièrent au Danemark. La Cour utilisait l'électricité de ses éoliennes pour pratiquer l'électrolyse de l'eau et produire de l'hydrogène. Cet hydrogène était utilisé pour alimenter les lampes à gaz dans les écoles locales. De cette manière, on peut dire qu'il était en avance d'une centaine d'années car son invention comprenait un ensemble d'énergie renouvelable pour produire de l'hydrogène par électrolyse et de stocker cet hydrogène comme réserve d'énergie pour une utilisation différée. Cependant, à la fin de la première guerre mondiale, les carburants fossiles, les centrales à vapeur avaient mis les éoliennes de La Cour au rancart. (14)

7e siècle	Les premiers moulins à vent apparaissent au Sistan , Afghanistan
1180	Les premiers moulins à vent à axe horizontal en Europe du Nord-Ouest
1887	Charles F. Brush est le premier Américain à produire de l'électricité à l'aide une éolienne
1891	Le professeur Ecossais, James Blyth fut le premier en Europe à produire de l'électricité au moyen d'une éolienne. Dane La Cour inventa la première éolienne tenant compte de paramètres aérodynamiques.
Début 1900	Des centaines de milliers de moulins à vent, en Europe, aux USA furent utilisés dans les zones rurales dépourvues de réseau électrique.
1980- a nos jours	Des centaines de milliers de moulins à vent, en Europe, aux USA furent utilisés dans les zones rurales dépourvues de réseau électrique.

Figure 3-4. Bref historique des installations éoliennes

Dès le début des années 1900, des centaines de milliers d'éoliennes sont installées dans les zones rurales dépourvues de réseau de distribution électrique.

Le nombre d'éolienne diminua avec l'expansion du réseau de distribution électrique, avec l'amélioration de sa fiabilité et la diminution du prix de vente de l'énergie électrique. Le choc pétrolier des années 1970 fit renaître l'intérêt pour les problèmes énergétiques, pour les énergies renouvelables et pour les éoliennes. Durant la décennie suivante, d'innombrables éoliennes furent installées dans le monde entier, dont un très grand nombre en Californie. L'Etat de Californie avait instauré un système de crédit d'impôt qui fit croître la popularité des éoliennes. Cependant, vers la moitié des années 1980, ces crédits furent stoppés et ceci mit pratiquement fin à l'expansion à l'expansion des éoliennes aux Etats-Unis jusqu'au début des années 1990.

Le développement de la technologie des éoliennes continua en Allemagne, au Danemark, en Espagne, etc. L'Allemagne, le Danemark, les Etats-Unis, l'Espagne, les Indes, sont les pays où la production d'électricité par éoliennes est la plus développée.

3.3 Principes et caractéristiques

3.3.1 Le régime planétaire des vents

Il est bien connu que l'axe de la terre est légèrement incliné et que celle-ci tourne sur elle-même et orbite autour du soleil. Pour cette raison, les différentes parties de la terre reçoivent des quantités différentes d'énergie solaire. La quantité de rayonnement qu'une région terrestre reçoit varie avec le temps, en fonction de sa position relative au soleil. La variation d'inclinaison de l'axe de la terre en au cours de l'année provoque le réchauffement ou le refroidissement de certaines parties du globe (les saisons). Ces différentes surfaces plus chaudes ou plus froides produisent le système de convection de l'atmosphère du globe qui s'étend de la surface du globe jusqu'à la stratosphère. Dans les régions où la surface de la terre est chaude, l'air se réchauffe, et s'élève vers le ciel. La gravité (force d'attraction de la terre) permet d'éviter que la masse d'air de l'atmosphère ne s'éloigne vers l'espace. La plus grande partie de l'énergie cinétique du vent se trouve aux grandes altitudes, là où les vents soufflent presque constamment à 160 km/h. L'énergie cinétique du vent est finalement transformée en chaleur, par le frottement entre les différentes masses d'air en mouvement. Cette chaleur diffuse réchauffe l'atmosphère et la terre. On peut donc en déduire que le vent représente une forme de stockage de l'énergie solaire et que les éoliennes parviennent à capter cette énergie. La figure 3 – 5 représente le régime des vents autour du globe.

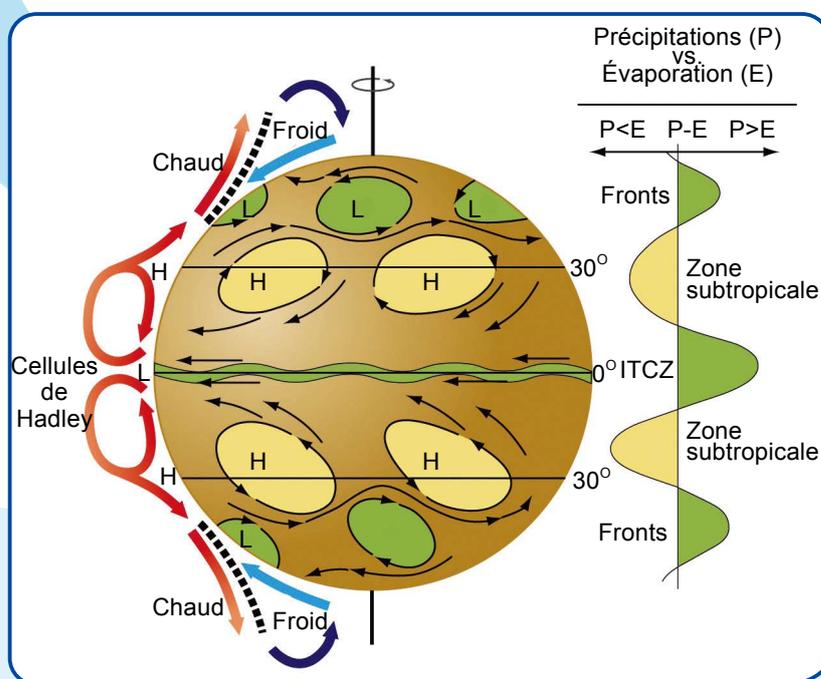


Figure 3-5
régime des vents autour du globe

Les océans, les montagnes et même les immeubles affectent les régimes des vents, mais les principaux courants se développent et persistent car ils sont induits par les gradients de température. Sur les cartes météorologiques, vous observerez qu'il existe des zones de haute et des zones de basse pression, et que ces zones forment des contours de formes variables. Ces contours représentent les « isobares », c'est à dire les lignes le long desquelles la pression est la même. Fig 3-6.

3.3.2 L'aérodynamique des éoliennes

Lorsqu'une force est transmise d'un objet vers un autre, ce deuxième objet se déplacera dans la même direction que le premier. Cependant, lorsque un objet solide transfère une force ou de l'énergie vers un « fluide », la réaction est différente. Deux forces en résultent alors, la traînée et la portance, qui agissent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre. Leur proportion dépend de la forme de l'objet, de la direction de la force initiale, de la densité du solide et du fluide, ainsi que des vitesses réciproques. Dans le cas de l'éolienne, le solide est la pale de l'éolienne et le fluide est l'air. (13, 16).

La traînée :

La traînée : la force qui se produit lorsque un objet se déplace dans le fluide. Elle représente la résistance à l'avancement de cet objet dans le fluide. Pour qu'un objet ait une traînée plus faible, il doit posséder une forme qui présente moins de résistance à la pénétration ou au déplacement dans ce fluide. Les profils d'ailes des avions sont étudiés de manière à bénéficier de la plus faible traînée possible.

La portance :

la force qui fait mouvoir un objet perpendiculairement à sa direction de déplacement dans le fluide.

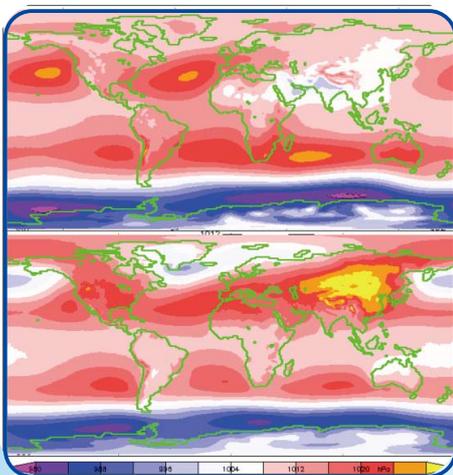


Figure 3-6
Carte météorologique montrant les hautes et les basses pressions.

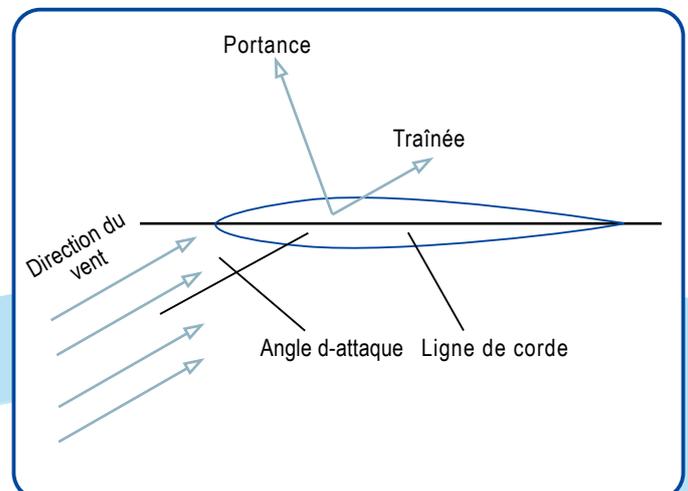


Figure 3-7
Illustration des forces de traînée et de portance.

3.4 Types d'éoliennes

Les éoliennes sont classifiées en fonction de l'orientation de leur axe de giration. La plupart des éoliennes sont du type « à axe horizontal) (HAWT). Mais certaines ont leurs pales qui tournent autour d'un axe vertical (VAWT). La figure 3-8 montre une éolienne à axe horizontal et une éolienne à axe vertical.

3.4.1 Éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal se présentent sous la forme d'un rotor monté sur un axe et d'une génératrice électrique situés au sommet d'un mât. Elles comportent le plus souvent une boîte de vitesse ou engrenage qui transforme la basse vitesse de rotation des pales en une vitesse supérieure pour activer la génératrice et permettre un meilleur rendement. Les pales des éoliennes doivent être très rigides pour éviter toute déformation excessive qui ferait que celles-ci viendraient frotter le mât en tournant sous la pression du vent. (13,16,17)

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT) peuvent comporter n'importe quel nombre de pales. La science permettant la construction des éoliennes modernes est basée sur les lois de l'aérodynamique. Ces lois sont les mêmes que celles utilisées pour le développement des ailes ou des hélices dans l'aviation. Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées.

Figure 3-8 Une éolienne à axe horizontal et une éolienne à axe vertical



Le nombre de pales optimal pour les éoliennes à axe horizontal est variable. Les éoliennes aux pales multiples destinées au pompage de l'eau, souvent vues près des fermes sont développées selon des critères différents de ceux des éoliennes destinées à produire de l'électricité. Ces éoliennes destinées au pompage de l'eau doivent bénéficier d'un grand couple de démarrage pour vaincre le poids, l'inertie et les frottements du piston de la pompe. Elles doivent fonctionner avec des vents faibles afin de permettre une irrigation le plus souvent possible. Cependant, lorsque la vitesse de rotation augmente, ces nombreuses pales créent des turbulences pour les pales voisines, ce qui fait perdre beaucoup de rendement aux plus forts régimes de vent. La plupart des éoliennes destinées à la production de l'électricité utilisent des rotors à trois pales. Elles permettent ainsi un meilleur rendement sous régime de vent soutenu et elles sont montées sur de hauts mâts afin d'éviter les turbulences du vent qui se produisent près du sol. Ces grandes hauteurs de mât représentent toutefois une difficulté pour hisser le rotor à sa place lors de l'installation ou pour la maintenance de l'ensemble.



Figure 3-9 pales d'une éolienne à axe horizontal

Les pales des éoliennes sont le plus souvent teintes en gris pour se confondre avec les nuages et elles peuvent atteindre des longueurs de 20 à 40 mètres. Ces rotors tournent le plus souvent à des vitesses de 10 à 22 tours par minute. (16 , 17). Certaines éoliennes tournent à vitesse constante , mais d'autres évoluent à vitesse variable. Toutes les éoliennes doivent comporter un dispositif automatique d'arrêt en cas de vent trop faible ou de vent trop fort.



3.4.2 Éoliennes à axe vertical

L'ingénieur Français G.M. Darieus fut le premier à développer des éoliennes à axe vertical. La forme des pales de certaines éoliennes à axe vertical les font ressembler à de gigantesques fouets à oeufs. Les laboratoires Sandia National aux Etats Unis développèrent d'une éolienne à axe vertical d'un diamètre de 34 mètres et d'une puissance de 500 KW. (13, 16).

Les éoliennes à axe vertical peuvent utiliser du vent provenant de toute direction sans avoir à être ré-orientées. Le principal avantage des éoliennes à axe vertical est qu'elles ne nécessitent aucun contrôle de lacet, aucun gouvernail pour les maintenir face au vent. Un autre avantage réside dans le fait que la plupart des éléments mécaniques ou électriques se trouvent près du sol, donc facilement accessibles pour la maintenance. Leur axe central disposé verticalement n'est pas soumis à de très grands efforts et ne nécessite pas une construction très robuste donc pas très onéreuse. Leur mât n'est pas soumis au moment de flexion dû à la force du vent sur les pales du rotor situé en son sommet, comme sur les éoliennes à axe horizontal; elles peuvent bénéficier d'une construction plus légère d'autant plus que des câbles de haubanage permettent de consolider l'ensemble.

Les éoliennes à axe vertical présentent également quelques inconvénients. L'un de ces inconvénients est que les pales se trouvent près du sol, où le vent est plus faible et plus turbulent. Ceci augmente les contraintes sur la structure. Lors de vents faibles, les éoliennes de type Darieus offrent un très faible couple de démarrage; leur puissance de sortie doit aussi être contrôlée afin d'éviter des dommages à la génératrice de courant.

3.5 Éléments d'une éolienne

Le principe de fonctionnement des éoliennes est très simple. La force du vent fait tourner deux ou trois pales montées sur un rotor. Ce rotor est solidaire d'un axe qui fait tourner une génératrice et produit du courant.

La plupart des éoliennes sont montées sur un mât afin de capter une plus grande quantité d'énergie provenant du vent. Plus les pales sont placées en hauteur, mieux elles sont à même d'utiliser l'énergie contenue dans un fort vent, et plus ce vent sera laminaire (non turbulent). Une éolienne comprend essentiellement trois éléments, les pales, l'axe et la génératrice, comme montré par la figure 3-10 et 3-11.

- 1) **les pales:** les pales constituent des obstacles pour le vent. Lorsque le vent force les pales à tourner, une partie de l'énergie du vent est transférée au rotor.
- 2) **L'axe:** Lorsque le rotor tourne, l'axe qui en est solidaire tourne également. Le mouvement rectiligne du vent est alors transformé en mouvement de rotation.
- 3) **La génératrice:** Une génératrice utilise une différence de charge électrique (induction électromagnétique) pour produire une différence de potentiel (une tension électrique). La tension électrique correspond à une pression dans un système hydraulique, elle est la force qui permet de faire circuler un flux, un courant. Cette tension électrique produite fera circuler le courant alternatif (AC) dans le réseau de distribution d'électricité.

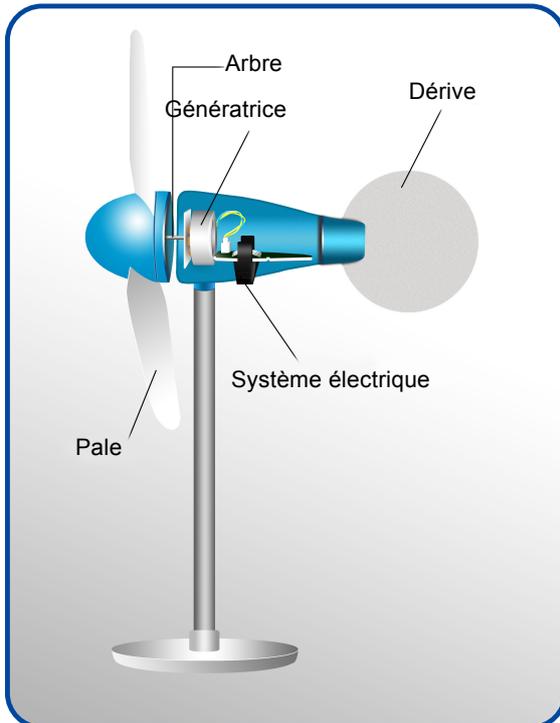


Figure 3-1 Eléments de base d'une éolienne



Figure 3-11

Éléments typiques d'une éolienne; ensemble comprenant le boîtier d'engrenages, l'axe, le rotor et le système de freinage.

L'énergie électrique produite par une éolienne est le plus souvent injectée dans le réseau de distribution électrique. Des éoliennes sont reliées entre-elles par un réseau de moyenne tension vers une sous-station électrique, puis un transformateur permet d'élever la tension produite pour injecter le courant dans des lignes de distribution à haute tension pour le transport sur de longues distances.

Une éolienne peut également alimenter une maison individuelle en électricité et en cas de surplus d'énergie produite, celle-ci peut être injectée sur le réseau public, en fait vendue au fournisseur d'électricité, permettant au propriétaire de l'éolienne d'obtenir un crédit et de réduire ainsi sa facture d'énergie. (13; 16)

3.6 Sujet avancé - Énergie et puissance du vent

Si l'on considère une certaine masse d'air « m » se déplaçant à la vitesse « v », son énergie cinétique « KE » s'exprime par l'équation de la figure 3-12.

Energie Cinétique = une demi masse « m » x la vitesse au carré

$$\text{ou } KE = \frac{1}{2} mV^2$$

où m est exprimée en kilogrammes Kg et V en mètres/secondes (m/s)

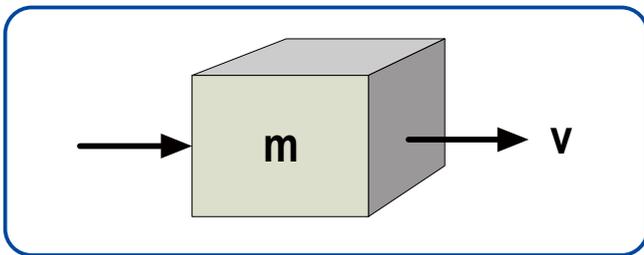


Figure 3.12 : Une masse de vent se déplaçant à la vitesse V

En multipliant un volume d'air par sa densité p, (qui est de 1.2256 KG/m³). La masse d'air passant à travers une section donnée en une seconde s'exprime comme suit :

Masse d'air par seconde « m » = densité de l'air « p » x le volume d'air pas seconde.

La figure 3-13 illustre le fait que la puissance représente une quantité d'énergie par unité de temps. Ceci peut être représenté par une masse d'air « m » se déplaçant à une vitesse « V » à travers une section de surface « A » :

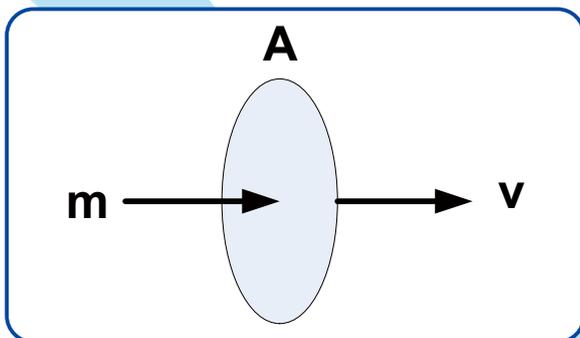


Figure 3-13.

Mass of air passing at a certain velocity through an enclosed area.

La masse d'air « m » circulant à travers la section de surface « A », dépend de la densité « p », de la vitesse « V », et de la surface « A ». Elle s'exprime ainsi :

$$\frac{\text{Masse circulant à travers A}}{\text{Temps}} = m = \rho AV$$

Si l'on substitue m dans cette équation, on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

Dans laquelle :

P = la puissance du vent (Watts)

p = la densité de l'air (Kg / m³) (1.225 Kg/m³ à 15 degrés C et 1 atm de pression)

A = la surface de la section à travers laquelle circule la masse d'air.

V = la vitesse du vent en m/s ; 1 m/s = 3.600 Km/H

Ainsi on observe que la puissance du vent augmente proportionnellement au cube de sa vitesse. Ceci signifie que lorsque l'on double la vitesse du vent, on augmente sa puissance par un facteur Huit. (13;16). De nombreuses éoliennes sont arrêtées automatiquement dès que le vent est trop faible. L'équation 3-4 démontre également que la puissance du vent frappant les pales d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales. Cette surface augmente au carré du rayon du rotor. Si l'on double le diamètre du rotor, on multipliera par quatre la puissance utile du vent. La puissance d'une éolienne est également proportionnelle à la densité de l'air. En altitude, dans des régions de montagnes la densité de l'air est plus faible. La densité de l'air froid est 10% plus élevée que la densité de l'air tropical. Ces éléments permettent de comprendre les critères de décision relatifs à l'installation d'éoliennes.

3.7 Éffet de la hauteur du mât

Vu que la puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse, de petites augmentations de vitesse produisent des effets considérables sur la puissance. Une manière d'obtenir de plus grandes vitesses de vent est d'installer les rotors sur de plus hauts mâts. Dans les premières centaines de mètres près du sol, la vitesse du vent est réduite par les frottements que l'air en mouvement subit par contact avec la surface de la terre. La surface de la mer par exemple offre bien moins de résistance au vent que des forêts ou des bâtiments.

3.8 Puissance théorique du vent

Le potentiel d'énergie éolienne dans l'atmosphère est bien plus élevé que la consommation actuelle d'énergie dans le monde. La puissance potentielle du vent sur les terres et proche des côtes est évaluée à 72 Terawatts (TW), ce qui correspond à 54'000 millions de tonnes équivalent pétrole par an, soit cinq fois la consommation globale d'énergie. (17). Ceci, si l'on ne prend en compte que les endroits où la vitesse moyenne de vents dans l'année est de 6.9 mètres par seconde, à une hauteur de 80 mètres. (17). Ceci nécessiterait l'implantation de six éoliennes de 1.5 MW par kilomètre carré sur approximativement 13 % de la surface terrestre, sachant que cette surface resterait toujours disponible pour l'agriculture. (16;17).

3.8.1 Distribution de la vitesse du vent

La force du vent varie et une valeur moyenne pour un endroit donné ne suffit pas à évaluer la quantité de vent qui peut être exploitée. Afin de déterminer la force du vent pour un endroit donné, il est utile de considérer une distribution statistique de la vitesse du vent au cours d'une période, une année par exemple. La figure 3-14 représente une courbe statistique de vitesse des vents.

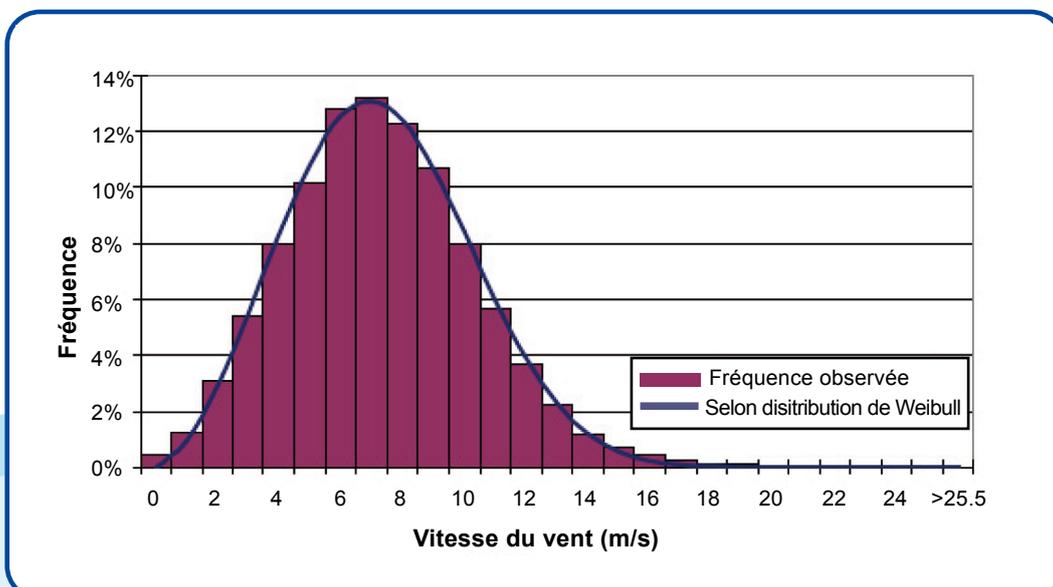


Figure 3-14 Courbe statistique de distribution de vitesse des vents

Vu que la puissance est produite par les plus grandes vitesses de vent, l'énergie sera produite durant de courtes périodes. Il est donc évident qu'une éolienne ne produira pas de l'énergie électrique de manière aussi constante qu'une centrale électrique fonctionnant au pétrole. Pour rendre l'énergie éolienne plus constante, il est utile de connecter en réseau des éoliennes ou des parcs éoliens situés dans des endroits distants. Ceci permet de réduire les différences de vitesses de vents exploitables et de réduire la variation de production d'énergie électrique. Des systèmes d'alimentation en énergie hybrides constitués par de l'éolien, du solaire photovoltaïque, des électrolyseurs et des piles à combustible) permettent de stocker un surplus d'énergie sous forme d'hydrogène, puis de consommer cet hydrogène dans des piles à combustible pour produire un supplément d'électricité lorsque la demande dépasse la production.

Si la vitesse de vent annuelle moyenne pour un site est connue ou évaluée, une valeur approximative de l'énergie produite peut être obtenue par l'équation suivante :

$$\text{Production annuelle d'électricité} = KV^3 \times AT$$

Dans laquelle :

K = 3.2 , un facteur correspondant au rendement typique d'une éolienne

V = vitesse annuelle moyenne du vent (m/s)

A = surface balayée par le rotor de l'éolienne (m²)

T = nombre d'éoliennes

Cette formule demande à être utilisée avec précaution car elle est basée sur le rendement caractéristique moyen des éoliennes disponibles actuellement, et qu' elle suppose une certaine distribution statistique de la vitesse des vents.

3.9 Estimation simplifiée de l'énergie produite par une éolienne

La quantité d'énergie contenue dans le vent et qui peut être utilisée par une éolienne et transformée en électricité dépend de nombreux facteurs tels que : la construction de l'éolienne (rotor, génératrice, mât, systèmes de contrôle); le terrain (topographie, rugosité du sol, obstacles); et le régime des vents (vitesse, distribution temporelle, stabilité).

Prévoir la production potentielle d'énergie dépend de la démarche que l'on entreprend; soit comparer la production d'énergie de différentes éoliennes, ou si l'on veut planifier un parc éolien performant. Un calcul simple peut donner une indication du potentiel d'énergie produite; cependant, des calculs beaucoup plus complexes doivent être entrepris pour obtenir une évaluation précise.

La puissance produite par une éolienne varie avec la vitesse du vent et chaque éolienne possède sa propre courbe de rendement en fonction de cette vitesse. Figure 3-15

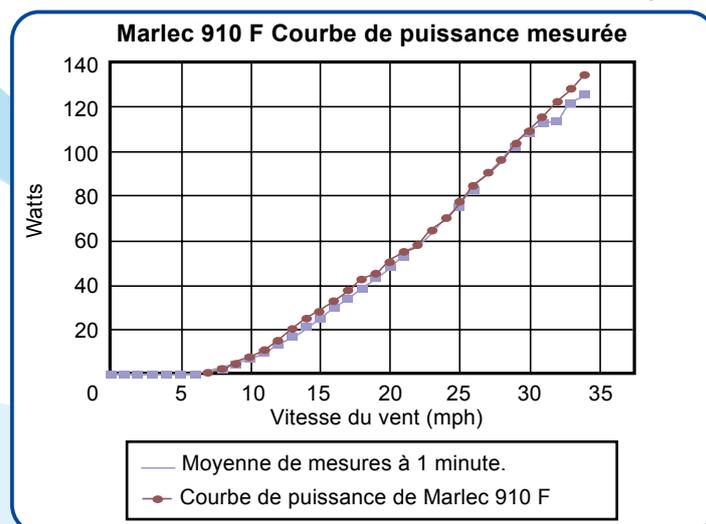


Figure 3-15 : Courbe de puissance typique d'un éolienne en fonction de la vitesse du vent.

3.10 Facteur de capacité

Il est beaucoup plus facile d'estimer la production d'énergie annuelle d'un parc éolien, qui représente la somme des puissances individuelles des éoliennes qui le constituent, en multipliant la puissance nominale de chaque éolienne par le nombre d'heures de vent annuelles. Le facteur de capacité est le rapport entre la production annuelle réelle sur le maximum théorique. Il se situe typiquement entre 20 et 40 % (13;16;17)

Le nombre de Megawatts / Heures se calcule ainsi :

Nombre de Megawatts = CF x Nombre d'heures x Nombre de jours

Par exemple : une éolienne de 1 Megawatt avec Facteur de Capacité de 35% ne produira pas 8'760 Megawatts-heures (1 x 24 x 365), en une année mais $0.35 \times 24 \times 365 = 3'066$ Mwh donc une puissance moyenne de 0.35 MW.

Des données sont disponibles pour des régions spécifiques du globe, et ces données permettent de calculer la production annuelle d'électricité.

3.11 Parcs éoliens

Dans les régions bénéficiant de vents favorables, de multiples éoliennes peuvent être regroupées en parcs éoliens. Les parcs éoliens représentent de nombreux avantages, tels que : coût de développement du site réduit, accès centralisé, connexion facile au réseau de distribution électrique.) La figure 3-16 montre une centrale d'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène, alimentée par un parc éolien.

Les éoliennes ne peuvent pas être installées trop proches les unes des autres car elles créent des turbulences de flux d'air et les éoliennes situées « sous le vent » par rapport aux autres perdraient en rendement.

Sous le vent:

Le vent est ralenti par une éolienne car il perd une partie de sa force qu'il communique au rotor. Les éoliennes disposées « en aval » de la première par rapport au flux du vent recevraient alors d'un vent plus faible.

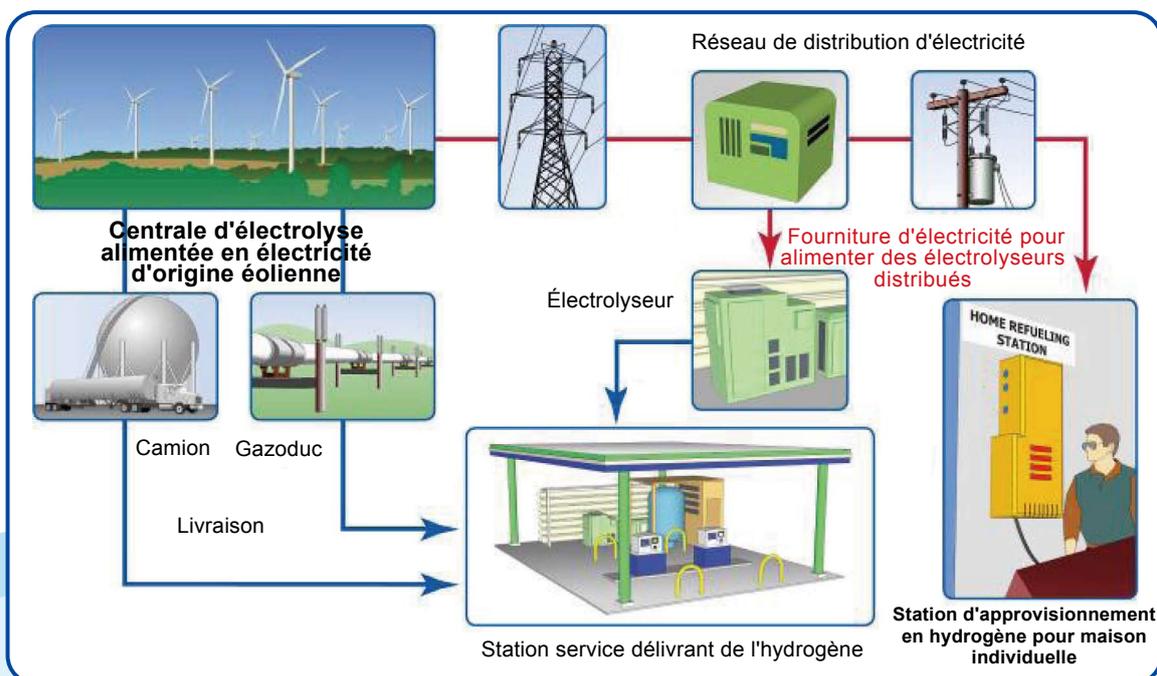


Figure 3-16

Exemple de centrale d'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène alimentée en électricité par un parc éolien.

Il est évident que l'énergie éolienne est une énergie renouvelable très avantageuse; elle est prévue pour devenir l'un des principaux contributeurs pour fournir l'énergie du futur. De nombreux gouvernements de par le monde ont développé des programmes d'encouragement pour le développement de l'énergie éolienne.

3.12 Conclusion

Ce chapitre a traité brièvement la question concernant le potentiel pour l'énergie éolienne de devenir l'une des principales sources d'énergie renouvelable dans l'économie du futur. Les éoliennes captent l'énergie cinétique contenue dans le vent pour la transformer en électricité. Les éléments essentiels d'une éolienne sont : les pales, l'axe et la génératrice d'électricité. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales du rotor qui se mettent en mouvement. La giration du rotor fait tourner un axe relié à la génératrice. L'énergie mécanique de rotation est alors convertie en électricité. Les éoliennes sont classifiées en fonction de l'orientation de l'axe autour duquel leur rotor tourne. Deux catégories principales d'éoliennes existent : les éoliennes à axe horizontal (HAWT), et les éoliennes à axe vertical (VAWT). La puissance électrique nécessaire à un réseau de distribution (ordre du Megawatt) peut être obtenue par plusieurs éoliennes regroupées en un parc éolien. Pour obtenir de l'énergie électrique lorsque le vent ne souffle pas, il est possible de construire des centrales hybrides. Ces installations permettent de stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène, puis de produire de l'électricité lorsque la demande en est faite. Dans ces centrales, l'énergie électrique d'origine éolienne est tout d'abord transformée en hydrogène par électrolyse de l'eau, puis cet hydrogène est transformé en électricité par des piles à combustible.

L'énergie éolienne représente une source d'énergie renouvelable très avantageuse, elle est destinée à devenir l'une des principales sources d'énergie dans le futur.



Chapitre 4

Les électrolyseurs

4.1 Introduction

4.2 Histoire des électrolyseurs

4.3 Conception des électrolyseurs

4.4 Types d'électrolyseurs

4.5 Rendement des électrolyseurs

4.6 Les bases de la thermodynamique dans la conception des électrolyseurs

4.7 Production actuelle de l'hydrogène

4.8 Opportunités pour l'électrolyse

4.9 Conclusion

4.1 Introduction

Les électrolyseurs utilisent l'énergie électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. L'électrolyse de l'eau est une réaction chimique, il s'agit d'un processus simple qui ne requiert aucune pièce en mouvement. Il est très fiable et peut produire de l'hydrogène pur à plus de 99,999%, d'une manière non polluante lorsque l'électricité utilisée provient de source renouvelable. L'hydrogène produit par un électrolyseur est idéal pour la consommation par une pile à combustible (voir le chapitre 5 pour plus d'information concernant les piles à combustible). Les réactions qui ont lieu dans un électrolyseur sont très similaires à celles qui prennent place dans une pile à combustible, sauf que celles-ci sont inversées, de même que l'anode et la cathode. Dans une pile à combustible, l'anode est l'endroit où l'hydrogène est introduit et dans un électrolyseur, l'hydrogène est produit à la cathode. L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, cependant on trouve très peu d'hydrogène à l'état pur; il est presque toujours associé à d'autres éléments. L'hydrogène est l'élément le plus léger et il est très utile car il représente une énergie sous forme chimique qui peut être transformée en énergie électrique. Il est possible d'obtenir de l'hydrogène à partir de différents matériaux tels que : les combustibles fossiles, la biomasse, ou l'eau.

Différents processus sont actuellement utilisés pour produire de l'hydrogène, parmi lesquels, le reformage du gaz naturel, oxydation partielle, gazéification du charbon, électrolyse de l'eau. La plupart de ces procédés impliquent l'utilisation de combustibles fossiles, mais de nombreux procédés peuvent utiliser des dérivés de plantes ou de biomasse. Les technologies actuelles pour la production d'hydrogène par électrolyse atteignent des rendements de 75 % et ils devraient atteindre 90% dans l'avenir. (11). Approximativement 39 Kwh d'électricité et 8.9 litres d'eau sont nécessaires pour produire 1 Kg d'hydrogène à 25 degrés C et une pression de 1 atm (atmosphère) (18).

Atmosphère :

Une unité internationale de pression qui correspond à 101,325 Pa (Pascals). Cette unité de pression a largement été remplacée par le bar, qui représente 100,000 Pa.

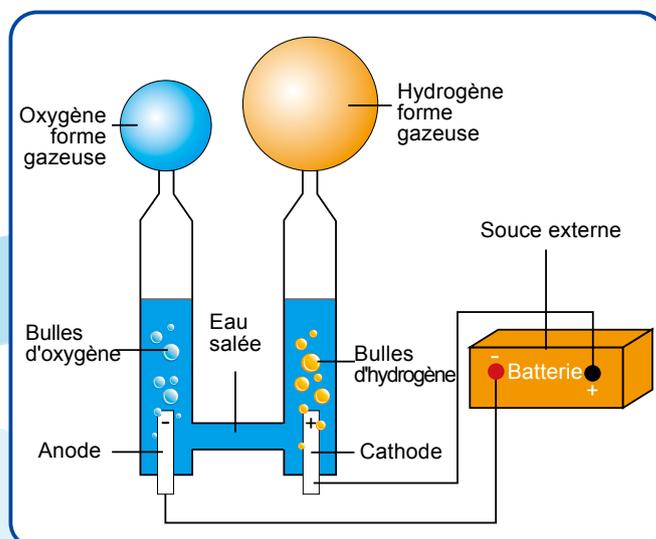
Le plus grand inconvénient de l'électrolyse comme moyen de production de l'hydrogène est la nécessité de l'énergie électrique pour produire la réaction. L'énergie électrique du réseau de distribution doit être transportée par des infrastructures coûteuses. Idéalement, l'énergie électrique utilisée pour la production d'hydrogène devrait provenir de sources renouvelables, comme l'éolien, le solaire photovoltaïque, l'hydro-électrique, afin que le processus complet soit propice pour l'environnement. Afin de développer une « économie de l'hydrogène », l'une des exigences est de produire l'hydrogène d'une manière qui ne génère pas d'émission de carbone et qui soit économiquement compétitive avec les autres sources d'énergie. De nombreux appareils peuvent être conçus sur la base d'énergie solaire ou d'énergie éolienne impliquant de l'électronique de puissance. Ces appareils sont des convertisseurs AC/DC (alimentations stabilisées) ou DC/DC (convertisseurs) ou DC/AC (onduleurs). Voir le chapitre 7 pour plus d'informations concernant les dispositifs électroniques de puissance. Certains de ces équipements ou prototypes de systèmes hybrides ont permis de manière à ce que les coûts d'investissement de ces systèmes ainsi que le prix de revient de l'hydrogène soient faibles.

Les électrolyseurs sont extrêmement utiles lorsqu'ils sont incorporés dans des dispositifs d'alimentation électrique stationnaires, mobiles, ou pour des véhicules. Quelques exemples d'utilisation dans lesquels les électrolyseurs peuvent s'avérer utiles sont les voitures, les bateaux électriques mus par des piles à combustible, les équipement électroniques portables qui bénéficieraient ainsi d'une bien plus grande autonomie. Un électrolyseur peut représenter un complément extrêmement utile à un dispositif générateur d'électricité tel qu'une éolienne ou des panneaux photovoltaïques. Lorsque l'énergie produite dépasse la demande, le supplément d'énergie peut être utilisé pour alimenter l'électrolyseur et produire de l'hydrogène. Cet hydrogène peut

ensuite être transformé en électricité par des piles à combustible et fournir un supplément d'électricité lorsque la demande excède la production instantanée. L'énergie électrique de source éolienne ou solaire PV est par nature intermittente, l'hydrogène permet de la rendre constante.

L'énergie produite en excès durant la journée peut être utilisée pour produire de l'hydrogène qui sera utilisé durant la nuit. Les éoliennes produisent souvent le plus d'énergie durant la nuit lorsque les vents sont forts mais que la demande en électricité est faible. L'excès d'électricité produite durant la nuit peut être utilisé pour produire de l'hydrogène qui sera utilisé durant la journée, aux heures où la demande est la plus forte. Il existe de nombreux dispositifs qui permettent de produire de l'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité photovoltaïque. Cependant, la recherche et le développement doivent continuer pour en améliorer le rendement, en diminuer le coût et en améliorer la portabilité. Actuellement, la majorité des électrolyseurs servent à produire de l'hydrogène destiné à d'autres usages que les piles à combustible. Les avantages des électrolyseurs sont les suivants : (11)

1. l'hydrogène produit est très pur
2. il peut être produit directement sur le site et au moment où il sera utilisé, il n'est donc pas nécessaire de le stocker.
3. Le coût de cet hydrogène est bien inférieur à celui de l'hydrogène livré en cylindres haute pression.



La figure 4-1 Représente le schéma d'un électrolyseur

Il existe suffisamment d'énergie solaire ou éolienne globalement pour produire tout l'hydrogène nécessaire aux besoins des utilisations stationnaires, mobiles ou pour le transport. L'électrolyse possède le potentiel pour répondre aux exigences économiques spécifiées par les gouvernements dans le monde. Il existe des opportunités de marché aujourd'hui pour les fournisseurs d'énergie afin d'acquérir une expérience dans le domaine de la production d'hydrogène et de se positionner comme fournisseurs de carburant du futur. Plusieurs fournisseurs d'électricité conduisent actuellement des recherches pour l'intégration et l'optimisation de ces technologies dans la distribution d'électricité. Le set d'enseignement des énergies renouvelables (Horizon FCJJ-27) présente un modèle de système hydrogène solaire et hydrogène photovoltaïque.

4.2 Histoire des électrolyseurs

L'histoire des électrolyseurs et celle des piles à combustible sont très similaires car leurs principes de base et leurs caractéristiques sont les mêmes. L'électrolyse débuta son histoire dans les années 1800 et continua son développement dans les années 1900 et dans le 21^{ème} siècle. Les recherches s'intensifièrent durant les 20 dernières années. Le chapitre 5 donne plus de détails relatifs à l'histoire de la science concernant les électrolyseurs et les piles à combustible. Les scientifiques qui ont le plus contribué au développement des électrolyseurs sont William Nicholson et Anthony Carlisle. Ils furent les premiers à décrire le procédé permettant de décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'électricité en 1800. (11). Nicholson et Carlisle utilisèrent des électrode de platine et des tubes de verre pour collecter le gaz sur chaque électrode. L'hydrogène se formait par bulles sur une électrode et l'oxygène sur l'autre électrode dans une proportion de deux volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène. (18). Une illustration de ce processus découvert par Nicholson et Carlisle est représentée par la figure 4 -2.

Nicholson et Carlisle furent les premiers à décrire la production d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse de l'eau en 1800.

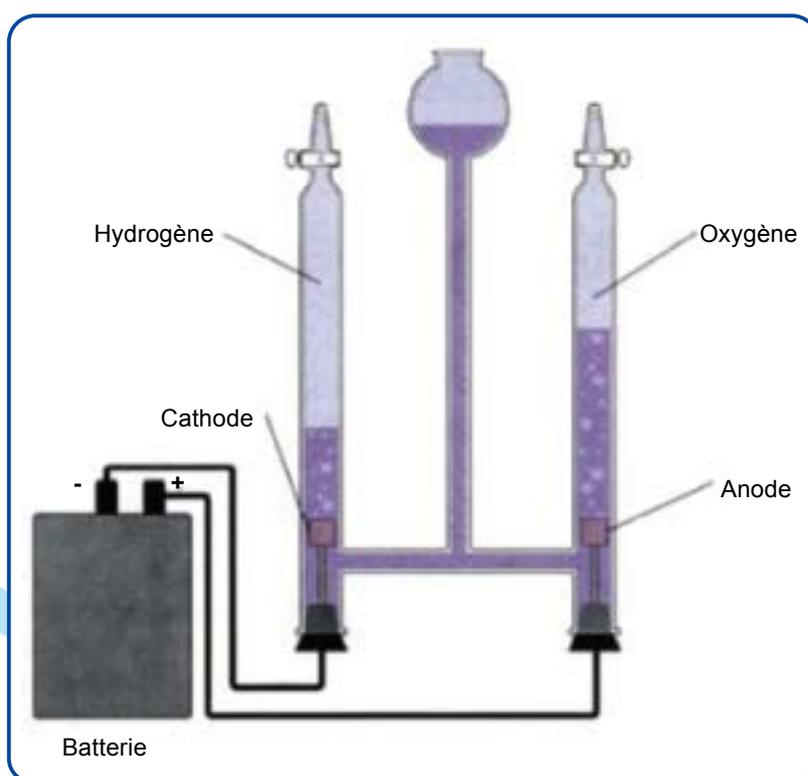
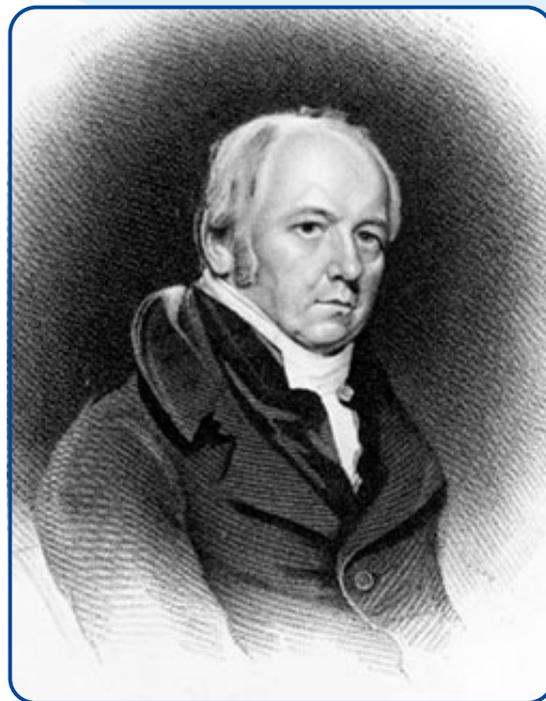


Figure 4 -2 : Le processus d'électrolyse

William Nicholson

William Nicholson était un chimiste Anglais et fut la première personne à produire une réaction chimique grâce à l'électricité. Nicholson avait plusieurs métiers, inventeur, ingénieur, traducteur, et editeur d'articles scientifiques. Après avoir entendu parler de l'invention de la pile électrique par un physicien Italien, Alessandro Volta, il tenta de reproduire le phénomène en plaçant deux électrodes d'une batterie dans de l'eau. Des bulles commencèrent à se former auprès de chacune des extrémités des câbles, ce qui lui constitua la découverte de l'électrolyse.



4.3 Conception des électrolyseurs

Les électrolyseurs peuvent être classés en deux principaux concepts : les unipolaires et les bipolaires. Les unipolaires utilisent typiquement des électrolytes liquides alors que les bipolaires utilisent un polymère solide comme électrolyte. Plus de détails relatifs à ces concepts figurent dans les paragraphes 4.3.1 et 4.3.2.

4.3.1 Concept unipolaire

Le premier électrolyseur utilisait un concept unipolaire. L'exemple d'un électrolyseur unipolaire élémentaire est représenté par la figure 4-3. Les électrodes, anode et cathode sont suspendus dans un réservoir contenant une solution à 20 – 30 % d'électrolyte. Chaque élément est connecté en parallèle et soumis à une tension de 1.9 à 2.5 Volts. (18). Le concept est facile à réaliser et à réparer, mais il n'est pas aussi efficace qu'un électrolyseur moderne.

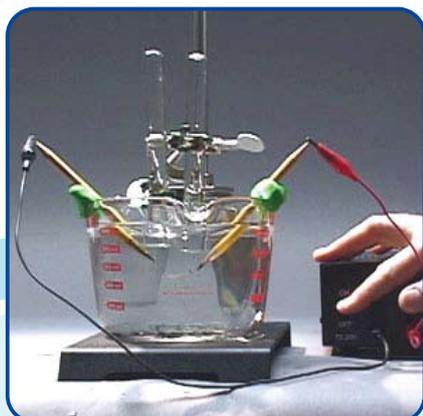


Figure 4-3 :
Exemple d'un
électrolyseur unipolaire.

4.3.2 Concept bipolaire

L'électrolyseur bipolaire est constitué de plusieurs couches pressées ensemble, comme le montre le figure 4-4. Les éléments (ou cellules) sont connectés en série ce qui résulte en des tensions de piles plus élevées. Ces piles peuvent être petites car chaque couche est très mince. Les avantages des électrolyseurs bipolaires sont qu'ils permettent des densités de courant bien plus importantes et une pression de gaz hydrogène plus élevée. Originellement, une couche d'amiante était utilisée pour séparer les éléments mais aujourd'hui, des matériaux polymères tels que le Ryton TM l'ont remplacée.

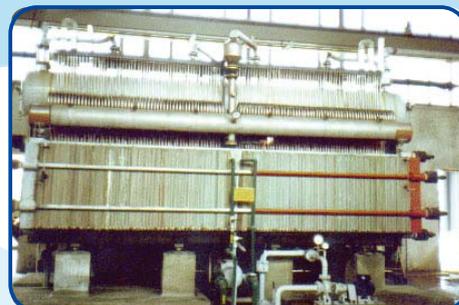


Figure 4-4
Electrolyseur
bipolaire.

4.4 Types d'électrolyseurs

Les électrolyseurs peuvent être répartis en deux types, les alcalins et les électrolyseurs à membrane polymère à échange de protons (PEM). Les modèles alcalins utilisent un électrolyte liquide et les électrolyseurs PEM, un électrolyte polymère solide. La construction d'un électrolyseur ressemble à celle d'une batterie ou à celle d'une pile à combustible. Ils comportent une anode, une cathode et un électrolyte. Sur l'électrode négative, les protons sont retirés de l'électrolyte et les électrons sont apportés par une connexion électrique externe. Les paragraphes 4.1.2 et 4.1.3 donnent plus de détails concernant les électrolyseurs alcalins et PEM.

4.4.1 Électrolyseurs alcalins

Les électrolyseurs alcalins utilisent une solution aqueuse d'hydroxide de potassium (KOH) comme électrolyte. D'autres électrolytes fréquemment utilisés sont l'acide sulfurique (H₂SO₄), le chlorure de sodium (NaCl) ou l'hydroxide de sodium, (NaOH). (11;18). La concentration typique des solutions électrolytes est de 20 – 30% masse, car à ces niveaux, on obtient un bon compromis entre une conductivité optimale et une bonne résistance à la corrosion.

Pourcentage poids :

La masse de n'importe quelles particules solides dans une solution (ces particules peuvent ne pas être visibles à l'oeil nu) divisée par la masse totale de la solution (les particules solides plus le liquide). Ce rapport doit ensuite être multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage.

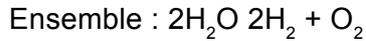
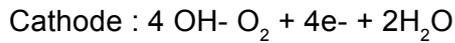
Conductivité

La conductivité est la mesure de l'aptitude d'un matériau à conduire le courant électrique. S'il existe une différence de charge à l'intérieur d'un matériau, les charges se déplaceront à l'intérieur de ce matériau afin de se répartir et d'obtenir un état neutre. Ceci produit un courant électrique.

Résistance à la corrosion :

La capacité d'un matériau de résister à l'altération de ses propriétés par réaction chimique avec son environnement.

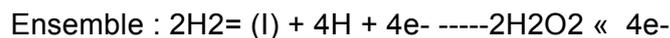
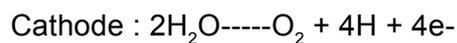
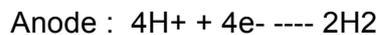
Les électrolyseurs alcalins fonctionnent bien dans une gamme de température entre 25 et 100 degrés C. Wr sous des pressions de 1 à 30 bars. (18). Les électrolyseurs alcalins industriels s'utilisent avec des densités de courant entre 100 et 400 mA/Cm² (18 ;19). Les réactions chimiques au sein d'un électrolyseur alcalin sont :



L'ensemble de la structure d'un électrolyseur alcalin est très simple. Il consiste en un concept unipolaire, ce qui signifie qu'il comporte deux électrodes immergées dans une solution électrolyte aqueuse. Lorsqu'il est alimenté en électricité, les gaz hydrogène et oxygène apparaissent auprès des électrodes respectives. L'électrolyseur doit être conçu de manière à ce que les gaz puissent être recueillis puis évacués de l'électrolyseur de manière efficace. Le concepteur doit s'assurer que les gaz ne puissent pas se mélanger car en présence d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène, une étincelle pourrait mettre le feu. Les figures 4.2 et 4.3 représentent des exemples d'électrolyseurs alcalin et PEM.

4.4.2 Électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM (Polymer Electrolyte Membrane) es le plus populaire et la plupart des électrolyseurs modernes sont construits selon ce concept. L'électrolyseur PEM utilise le même polymère que la pile à combustible PEM. L'électrolyte est une fine membrane solide permettant la conduction des ions. Ces électrolyseurs utilisent le concept bipolaire. Ils peuvent être conçus pour résister à de fortes différences de pression de chaque côté de la membrane. Les réactions au sein de ces électrolyseurs sont :



L'équation 4-7 montre pourquoi la proportion d'hydrogène est double de celle d'oxygène durant l'électrolyse de l'eau.

La structure de base d'un électrolyseur de type PEM est représentée par la figure 4-5.

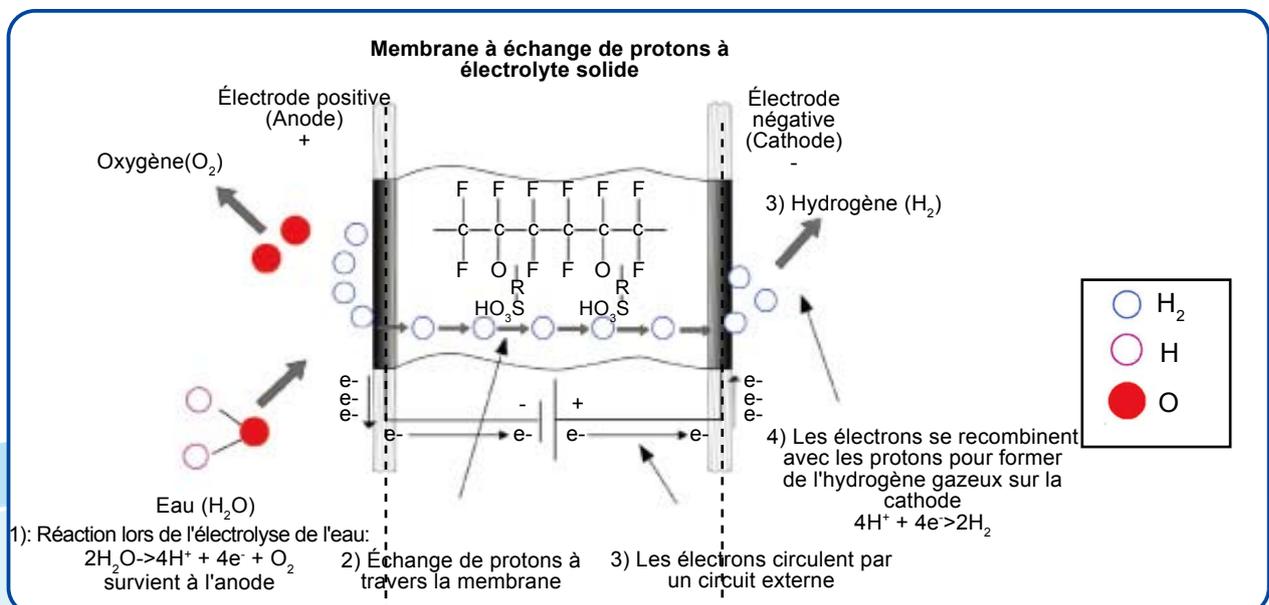


Figure 4-5 : Diagramme simplifié d'un électrolyseur de type PEM

4.4.2.1 L'électrolyte

Dans l'électrolyseur de type PEM la membrane polymère permet aux ions H^+ de passer du côté anode de la membrane au côté cathode; elle sépare également les gaz hydrogène et oxygène. L'hydrogène est produit à l'anode et l'oxygène est produit à la cathode. Le polymère le plus souvent utilisé comme matériau constitutif de la membrane est le Naflon TM de DuPont. Un catalyseur de platine est appliqué de chaque côté de la membrane afin de faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène.

4.4.2.2 Le catalyseur

Afin de convertir l'énergie électrique en énergie chimique, un catalyseur est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène. Le platine (Pt) est le catalyseur le plus commun pour cette réaction. Un catalyseur meilleur marché qui fonctionnerait aussi bien que le platine serait le bienvenu; cependant celui-ci reste à inventer. Si des catalyseurs moins efficaces sont utilisés sur la cathode, il se produira une plus grande perte de tension. L'efficacité énergétique de l'électrolyse de l'eau se situe entre 50 et 80 %, mais ces valeurs ne prennent en compte que le rendement lors de la conversion d'énergie électrique en énergie chimique.

4.5 Rendement d'un électrolyseur

Plusieurs facteurs influencent le rendement d'un électrolyseur. Les principaux sont la conception de l'ensemble, le matériau utilisé, la température et la pression de fonctionnement. Le fait de fonctionner à une plus haute température augmentera le rendement, mais augmentera aussi la corrosion des matériaux. Une plus haute température de fonctionnement implique aussi un choix de matériaux plus onéreux. Une plus grande pression de fonctionnement augmentera également la performance de l'électrolyseur, mais elle implique aussi des équipements additionnels tels que des compresseurs de gaz.

Compresseur de gaz :

Un dispositif mécanique qui augmente la pression d'un gaz en réduisant son volume.

Le rendement de la pile (stack) est calculé en utilisant les pertes de puissance dues à l'électricité nécessaire à alimenter les pompes, les valves, les capteurs et le contrôleur électronique de l'ensemble ainsi que l'énergie introduite dans la pile (stack). Le rendement du système est basé sur la plus haute valeur calorifique de l'hydrogène (HHV = 39 Kwh/Kg), l'énergie consommée par la pile, (Kwh)

Pertes accessoires :

perte de puissance due à l'électricité nécessaire à l'alimentation des pompes, des valves, des capteurs, et des autres dispositifs électriques ou mécaniques qui assurent la circulation des gaz, des liquides, et contrôlent l'ensemble.

La plus haute valeur calorifique (HHV)

L'une des propriétés d'un combustible qui spécifie la quantité de chaleur émise par la combustion d'une quantité spécifique de ce combustible (initialement à la température de 25 degrés C), une fois qu'il est consommé puis est revenu à la température de 25 degrés C.

Le rendement de la pile (stack) (Equation 4-9) est déterminé en calculant le potentiel théorique à une température et une pression de fonctionnement, multiplié par le nombre d'éléments (cellules) dans la pile puis divisé par la tension de la pile.

Rendement du système :

$$\text{Rendement du système} = \frac{HHV}{\left(\frac{\text{rendement de l'alimentation}}{\text{rendement de l'alimentation}} \right) + \text{pertes accessoires}}{\text{hydrogène produit}}$$

$$\text{Rendement de la pile (stack)} = \frac{\text{potentiel théorique de la pile (stack)}}{\text{potentiel réel de la pile}}$$

4.6 La thermodynamique dans la conception d'un électrolyseur

La thermodynamique est l'étude de la transformation d'une forme d'énergie vers une autre forme d'énergie.

Les équations de thermodynamique permettent de prédire les caractéristiques d'un électrolyseur ou d'une pile à combustible. L'étude de ces concepts permettent à un ingénieur de prévoir les paramètres d'une pile à combustible tels que la tension, la température, la pression, la quantité d'hydrogène, d'oxygène, d'eau qu'une pile à combustible ou un électrolyseur va produire ou consommer.

Certains concepts qui doivent être considérés pour entreprendre l'analyse thermodynamique de ces systèmes sont : l'enthalpie absolue, la chaleur spécifique, l'entropie, et l'énergie libre de Gibbs. La définition de ces différents concepts suit _ (19)

Enthalpie absolue :

L'enthalpie absolue comprend à la fois l'énergie chimique et l'énergie thermique. La part de l'énergie chimique de l'enthalpie de formation (h_f) est associée à l'énergie des liaisons chimiques, et des énergies thermiques (A_h) est la différence d'enthalpie entre un état donné et l'état de référence.

Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la mesure de la quantité d'énergie requise pour augmenter de 1 degré C la température d'une certaine quantité d'une substance. (Ou pour un autre intervalle de température)

Entropie :

L'entropie est un autre concept important, qui est la mesure de la quantité de chaleur qui permet la conversion en travail.

Energie libre de Gibbs :

L'énergie libre de Gibbs est la quantité de travail utilisable qui peut être obtenue selon un système isobare, isotherme, lorsque ce système passe d'un état stable vers un autre état stable.

Le rendement maximum d'une pile à combustible est alors examiné par la tension théorique (reversible) du système, calculé selon les lois de la thermodynamique.

Tension de sortie nette :

La tension de sortie nette est le potentiel réversible de la pile, moins le potentiel irréversible sous une certaine densité de courant. Le potentiel irréversible correspond à la tension réelle.

Où $V_{Rev} = E_r$ es le voltage réversible maximum de la pile à combustible et V_{Irev} est la perte de voltage irréversible (surpotentiel) qui survient sur la pile. Ces pertes de tension seront expliquées avec plus de détails dans les paragraphes suivants.

Le voltage réel d'une pile à combustible est plus faible que le voltage théorique à la suite de la réaction, des pertes dues au transfert de charge et de masse. Comme le montre la figure 4-6, la performance d'un électrolyseur ou d'une pile à combustible peut être illustré par une courbe de polarisation qui se compose de trois segments : 1) les pertes d'activation, 2) les pertes ohmiques, 3) les pertes de transfert de charges. Ainsi, la tension nominale d'une cellule peut se représenter comme l'écart entre la tension théorique et les pertes ci-dessus (10).

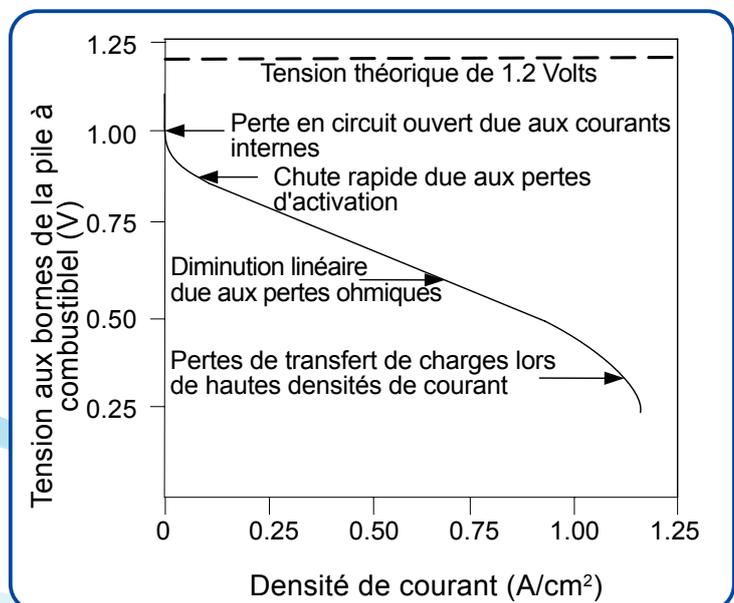
$$V = E_r + V_{act} + V_{ohmic} + V_{conc}$$

Où V représente le potentiel de la cellule, E représente le potentiel thermodynamique ou tension de Nernst, V_{act} représente la perte de tension due à la polarisation d'activation, V_{ohmic} est la perte de tension due à la polarisation ohmique, et V_{conc} est la perte de tension due à la polarisation de concentration. L'explication des termes de l'équation 4-11 et de la figure 4-6 proviennent de l'étude détaillée de différentes disciplines scientifiques. Le voltage de Nernst (voltage thermodynamique théorique) provient de l'étude de la thermodynamique, les pertes d'activation sont décrites par l'électrochimie, le transport des charges définit les pertes ohmiques, et les pertes de concentration sont expliquées par le transfert de masses (qui sont généralement étudiées dans les programmes des collèges en chimie, en physique, ou en génie chimique). Les pertes d'activation et de concentration se produisent aussi bien sur l'anode que sur la cathode, alors que les pertes ohmiques représentent les pertes résistives qui surviennent dans l'ensemble de la pile à combustible. Des études plus complètes de ces concepts se trouvent dans des livres dédiés aux piles à combustible.

Pertes résistives :

Pertes dues aux électrons qui ne circulent pas entre les matériaux et les bornes de la pile à combustible.

Figure 4-6
Courbe de polarisation hydrogène –
oxygène à l'équilibre.



Les pertes d'activation surviennent principalement quand les réactions électrochimiques sont lentes à produire du courant. Lorsque la pile à combustible PEM produit davantage de courant, les pertes d'activation augmentent à un rythme plus lent que les pertes ohmiques.

Les pertes ohmiques sont liées au mouvement des charges de l'électrode où elles sont produites vers la charge électrique où elles sont consommées. Les deux types principaux de particules chargées sont les électrons et les ions et toutes les deux sont sujettes aux pertes ohmiques dans une pile à combustible. Les pertes subies par les électrons surviennent entre les plaques bipolaires de refroidissement et de contact selon la qualité de contact qui existe entre les deux sortes de plaques. Les pertes subies par les ions surviennent dans la membrane alors que les ions H⁺ traversent l'électrolyte.

Les pertes de concentration sont dues aux réactants incapables d'atteindre les points électro-catalytiques, ce qui peut affecter le rendement de manière significative. Ces pertes de transfert de charges peuvent être minimisées en s'assurant que la quantité d'hydrogène exacte, que l'air et l'eau circulent à travers les plaques, les couches de diffusion des gaz et les couches catalytiques

4.7 Production actuelle d'hydrogène et marché

Selon le Département Américain de l'Energie, environ 48% de l'hydrogène est actuellement produit à partir du gaz naturel, 30 % à partir du pétrole, et 18 % à partir du charbon dans le monde. Les 4 % restants sont produits à partir de l'eau. Aux Etats – Unis, environ 95 % de l'hydrogène est produit à partir du gaz naturel (1).

La figure 4-7 montre la quantité d'hydrogène produit mondialement en fonction du procédé utilisé

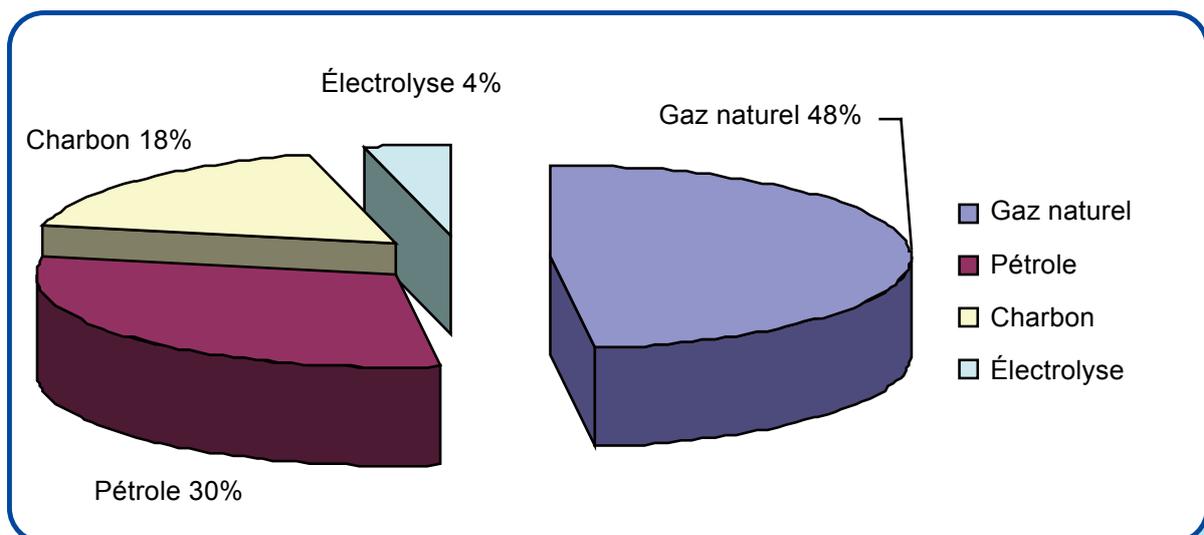


Figure 4-7 Production mondiale d'hydrogène en fonction du procédé utilisé.

La plus grande partie de l'hydrogène est produit aujourd'hui par reformage de vapeurs de méthane (ou SMR, Steam Methane Reforming). La production d'hydrogène par électrolyse n'est pas économiquement compétitive comparée avec le processus de reformage, mais elle va le devenir car le prix du gaz naturel va inévitablement augmenter; de plus des facteurs politiques, et écologiques interviendront en faveur de l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène.

Le SMR, de même que la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles sont limités en quantité et ils produisent des gaz à effet de serre. Le processus de reformage génère à la fois des émissions de CO₂ et de monoxyde de carbone (CO). Si des millions de moteurs à combustion interne consommaient de l'hydrogène produit par SMR, une énorme quantité de gaz carbonique serait toujours produit dans les centrales de production d'hydrogène.

Environ 4% de l'hydrogène produit dans le monde provient de l'électrolyse. La plus grande partie est produit comme résidu durant l'électrolyse d'eau salée durant la fabrication de chlore.



Lors de cette réaction, l'hydrogène est produit sur l'une des électrodes, et les ions de chlore sont produits sur l'autre électrode. L'hydrogène produit lors de ce processus est soit brûlé, soit utilisé dans des produits chimiques spécifiques, ou pour d'autres usages limités.

Le marché actuel de l'hydrogène se divise en deux segments : une utilisation locale, à l'endroit où il est produit, une utilisation éloignée, vers laquelle l'hydrogène doit être transporté. Le marché de l'hydrogène implique des fabriques de produits chimiques, des raffineries, l'hydrogénation de graisses ou d'huiles, et la production de métaux. Une plus petite part de marché revient à l'industrie de l'électronique, l'utilisation comme carburant de fusées, et aux services publics. Le tableau 4-1 indique les utilisations actuelles de l'hydrogène.

Type d'industrie	Utilisation
Chimique	Production d'ammoniaque et d'engrais Synthèse du méthanol
Carburants	Raffineries de pétrole, carburant de fusées, piles à combustible
Electronique	Production de polysilicium, fibres optiques
Sidérurgie	La recuite, le trempage, les traitements thermiques

Table 4-1 : Utilisation actuelle de l'hydrogène

Le futur marché de l'hydrogène est bien plus important. L'électrolyse deviendra une option viable pour la production d'hydrogène avec l'augmentation du pris du gaz naturel. Si l'hydrogène devient le carburant privilégié pour le transport l'avantage environnemental du transfert du pétrole vers une économie de l'hydrogène ne sera réel que si l'on utilise des sources d'énergie renouvelable pour produire cette quantité croissante d'hydrogène. La production d'hydrogène par électrolyse offre une source d'énergie bien plus stable et plus sûre que le pétrole pour le futur.

4.8 Opportunités pour l'électrolyse

L'association des électrolyseurs avec de l'électricité d'origine renouvelable présente une opportunité unique pour fournir l'énergie du futur. L'électricité d'origine renouvelable peut être injectée dans les réseaux de distribution électriques par l'intermédiaire d'électronique de puissance. L'électronique de puissance convertit le courant alternatif (AC) du réseau en courant continu (DC) requis pour le processus d'électrolyse. Les installations photovoltaïques (PV) ainsi que les éoliennes peuvent être utilisés comme source d'énergie pour l'électrolyse. Dans de nombreuses installations éoliennes / électrolyse, les éoliennes alimentent directement l'électrolyseur avec le courant alternatif produit.

De nombreux projets de recherche et de développement sont en cours et analysent ou comparent la production d'hydrogène à partir d'énergie solaire, éolienne ou par le réseau de distribution électrique. Dans ces études, l'hydrogène est produit par électrolyse puis il est comprimé et ensuite stocké pour une consommation ultérieure dans une pile à combustible ou un moteur lorsque la demande en énergie se présente. Ces projets étudient également la co-production d'hydrogène et d'électricité afin de résoudre le problème posé par la nature intermittente de l'énergie solaire ou de l'énergie éolienne et de répondre aux besoins en énergie lors des pointes de la demande. D'autres projets s'intéressent à l'utilisation de l'hydrogène pour la propulsion des véhicules. Ces projets concernent notamment des électrolyseurs multiples qui puissent être mis en service puis arrêtés rapidement; ils concernent également le développement de convertisseurs de puissance AC-DC, et DC-DC permettant de connecter les installations solaires ou éoliennes aux électrolyseurs. La figure 4-8 montre le schéma d'un tel projet qui est actuellement en cours au National Renewable Energy Laboratory (NREL) et auprès de Xcel Energy.

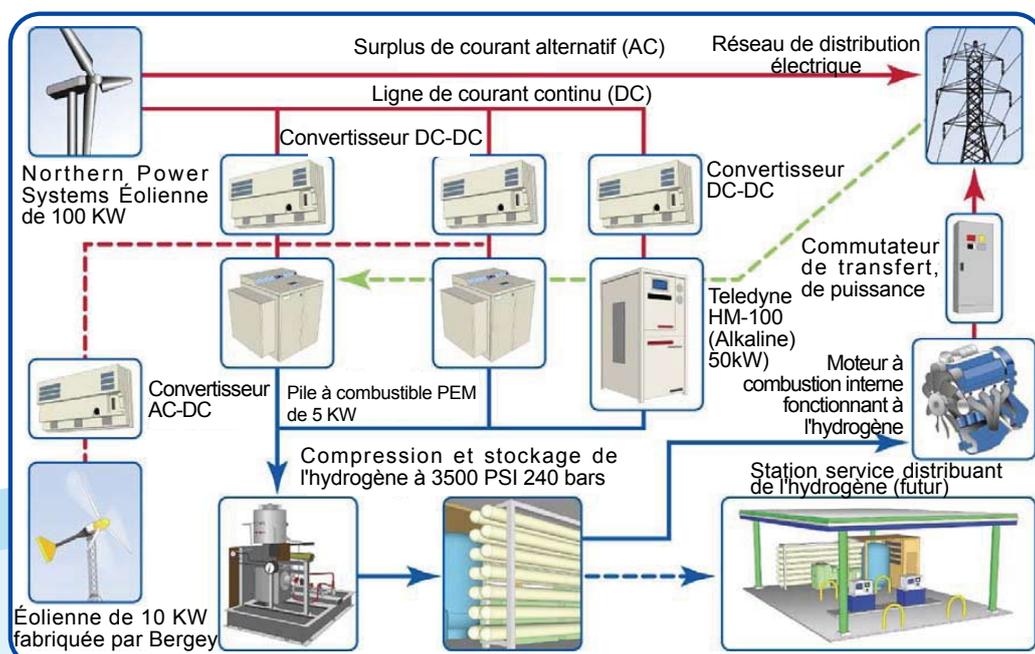


Figure 4-8 : le projet Wind2H de Xcel et du NREL

L'électrolyse et le stockage de l'hydrogène permettent de résoudre le problème posé par la nature intermittente des sources d'énergies renouvelables. Les installations à hydrogène peuvent produire de l'hydrogène puis le stocker pour une consommation ultérieure, ceci améliore le facteur de capacité des installations basées sur l'énergie renouvelable. L'hydrogène permet de rendre continue une alimentation en énergie électrique d'origine renouvelable et de répondre à des pointes de demande. Par la gestion de la co-production d'électricité et d'hydrogène une centrale électrique peut optimiser son système de production et de stockage. Les installations solaires PV aussi bien que les parcs éoliens peuvent bénéficier de la production combinée d'électricité et d'hydrogène. Des études ont montré que les installations qui ont optimisé la combinaison hydrogène – électricité obtiennent de l'hydrogène de manière plus favorable, même lorsque l'électricité est vendue à bas prix.

Les installations produisant de l'hydrogène avec de l'électricité d'origine renouvelable sont plus économiques lorsqu'ils font recours à de l'électronique de puissance, ou lorsqu'ils utilisent les mâts des éoliennes comme réservoir de stockage. Les centrales électriques peuvent également utiliser l'hydrogène produit comme moyen de refroidissement pour leurs génératrices. L'une des utilisations principales de l'hydrogène sera le carburant pour les moyens de transport. Tout le carburant hydrogène nécessaire aux moyens de transports peut être produit par des sources d'électricité renouvelable. Ceci permettra à de nombreux pays à travers le monde de réduire leur dépendance énergétique et de réduire également les émissions de carbone et autres polluants. La consommation d'énergie pour les transports est aujourd'hui bien plus importante que la consommation d'électricité. Il existe pléthore d'opportunités aujourd'hui de produire tout l'hydrogène nécessaire au secteur des transports par de l'électricité d'origine éolienne ou solaire.

4.9 Conclusion

L'électrolyse utilise de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Ce procédé produit de l'hydrogène extrêmement pur (>99.999%) de manière non polluante si l'électricité utilisée est d'origine renouvelable. L'hydrogène peut aussi être produit à l'endroit où il est demandé et au moment où il est demandé, il n'est alors pas nécessaire de le stocker. Il s'agit là de la manière la plus efficace de produire de l'hydrogène pour alimenter des piles à combustible. Lorsqu'une telle installation est bien conçue, elle est plus économique que l'approvisionnement en hydrogène sous forme de cylindres sous haute pression. Les électrolyseurs sont très utiles lorsqu'ils sont intégrés dans des installations stationnaires, portables ou pour produire l'hydrogène servant à alimenter les moyens de transport. Leur emploi est également très judicieux en complément des installations productrices d'électricité éoliennes ou solaires car l'hydrogène produit et stocké peut être utilisé pour alimenter des piles à combustible et fournir de l'électricité lorsque le vent ou le soleil sont absents. Dans la future économie de l'hydrogène, l'électrolyse jouera un rôle essentiel.



Chapitre 5

Les piles à combustible

5.1 Introduction

5.2 Histoire des piles à combustible

5.3 Utilisations des piles à combustible

5.4 Types de piles à combustible

5.5 Principe de fonctionnement

5.6 Conception et configuration des piles

5.7 Conditions d'utilisation

5.8 Conclusion

5.1 Introduction

Les piles à combustible constitueront l'un des éléments essentiels de la future économie de l'hydrogène. Les piles à combustible ont la capacité de subvenir à tous nos besoins en énergie tout en offrant un haut rendement et une technologie à très faible degré de pollution. Il existe six catégories principales de piles à combustible. Le modèle le plus utilisé pour les véhicules, les applications portables est la pile à membrane polymère électrolytique. (PEM – Polymer Electrolyte Membrane). La pile à combustible PEM utilise essentiellement de l'hydrogène comme réactant mais d'autres produits peuvent être utilisés, comme l'éthanol, ou des produits dérivés de la biomasse. La température de fonctionnement des piles PEM varie entre 20 et 80 degrés C. Dans ces conditions elles présentent des facultés de démarrage comparables à celles des moteurs à combustion interne. Les piles à combustible PEM présentent des densités de puissance nettes de plus de 1 KW/litre, ce qui les rend tout à fait compétitives avec les moteurs à combustion interne pour une utilisation dans les véhicules. Les piles à combustible PEM présentent de nombreux avantages et quelques challenges. Les avantages sont :

- Les piles à combustible offrent des possibilités de rendement très élevés
- Il existe de nombreuses sources de combustibles et de moyens d'alimenter une pile à combustible
- Il est facile de construire des piles à combustible offrant une gamme variée de puissances
- Les piles à combustible PEM ne produisent aucun polluant
- Les piles à combustible demandent très peu de maintenance car elles ne comportent aucune pièce mobile.
- Les piles à combustible ne nécessitent pas d'être rechargées et elles fournissent la puissance instantanément lorsqu'elles sont alimentées en combustible. A l'arrêt, aucune perte, aucune consommation n'a lieu.

Certaines limitations caractéristiques de toutes les piles à combustible sont les suivantes :

- Les piles à combustible sont relativement coûteuses car leur fabrication nécessite des matériaux offrant des propriétés spécifiques. Il est difficile de trouver des matériaux de remplacement économiques.
- Le reformage du combustible peut être onéreux, difficile et exige de l'énergie pour fonctionner.
- Si un autre combustible que l'hydrogène est fourni à la pile à combustible, le rendement diminue avec le temps car le catalyseur se dégrade et l'électrolyte s'intoxique.

Ce chapitre traite de l'histoire des piles à combustible, de leur principe de fonctionnement, de leurs caractéristiques, des différents types existants, et des éléments qui les constituent.

5.2 Histoire des piles à combustible

William Grove est reconnu pour avoir inventé la première pile à combustible en 1839. Très peu de recherches furent entreprises durant les années 1800 et le début des années 1900. La recherche s'intensifia en 1960 à la NASA. Durant la dernière décennie les recherches s'accélérent et les piles à combustible approchent maintenant le stade de la commercialisation. La figure 5-1 résume l'histoire des piles à co combustible.

1800	W. Nicholson & Carlisle décrivent le processus d'utilisation de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène.
1836	Démonstration de la pile à combustible par William Grove
1889	Des équipes différentes : L Mond & C. Wright & C. Thompson / L Cailleton & L. Colardeau effectuent diverses expériences avec des piles à combustible.
1893	F. Ostwald décrit le rôle des différents éléments d'une pile à combustible.
1896	W. Jacques construit une batterie en carbone
Early 1900's	E. Baur et ses étudiants conduisent des expériences sur des piles à combustible à haute température.
1960s	T. Grubb & L. Niedrach inventent la pile PEMFC chez General Electric
1990s- Present	Des recherches intensives ont lieu à travers le monde sur différents types de piles à combustible.

Figure 5-1 L'histoire de la pile à combustible.

Le procédé utilisant l'électricité pour décomposer les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène (électrolyse) fut initialement décrit en 1800 par William Nicholson et Anthony Carlisle. William Grove inventa la première pile à combustible en 1839, en utilisant l'idée de Nicholson et Carlisle pour « recomposer l'eau ». Il accomplit ce processus en combinant des électrodes dans un circuit en série avec des électrodes de platine immergées dans de l'oxygène et dans de l'hydrogène contenus dans une solution électrolytique à base d'acide sulfurique. La batterie à gaz ou « Cellule de Grove » produisit un courant de 12 Ampères sous une tension de 1.8 Volts (10). La Figure 1.8 montre une illustration de la pile à combustible de Grove.

William Grove

Reconnu comme le père de la pile à combustible, Grove développa la première pile en inversant le processus d'électrolyse à Oxford en Angleterre en 1839.

William Nicholson et Anthony Carlisle furent les premiers à décrire le processus d'électrolyse en 1800.

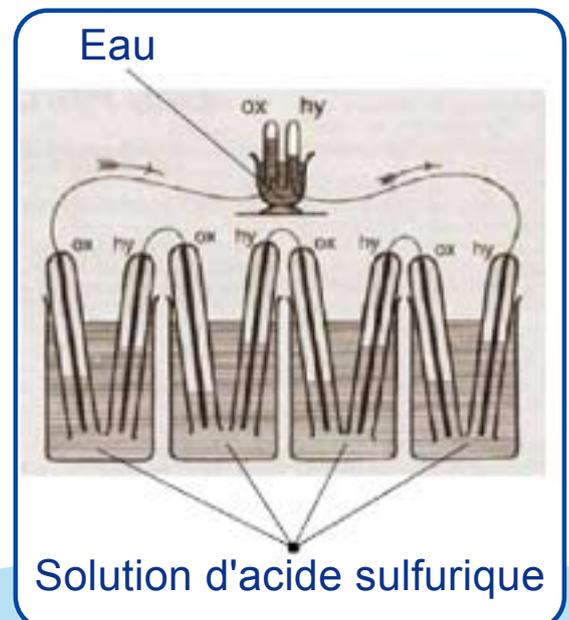


Figure 5-2 La pile à combustible de Grove.

L'un des fondateurs de la chimie-physique, Friedrich-Wilhelm Ostwald (1853-1932) établit une vaste portion de la théorie de fonctionnement des piles à combustible en 1893. Ostwald procéda par expérimentation pour expliquer le rôle des différents composants d'une pile à combustible. Ludwig Mond (1839-1909) fut un chimiste qui consacra une grande part de sa carrière au développement des procédés de fabrication des sodas et au raffinage du nickel . En 1839, Mond et son assistant Carl Langer firent des expériences en utilisant un gaz extrait du charbon. Ils utilisèrent des électrodes de platine perforées et ils rencontrèrent de nombreuses difficultés avec les électrolytes liquides. La puissance maximum qu'ils obtinrent fut 6 Ampères par pied carré (la surface de leur électrode), sous une tension de 0.73 Volts.

Charles R Alder Wright (1844-1894) et C Thompson développèrent une pile à combustible au même moment que Mond et Lager. Ils rencontrèrent des difficultés à prévenir les fuites de gaz d'une chambre vers l'autre. Ces problèmes ainsi que d'autres empêchèrent les piles à combustible d'atteindre des tensions du niveau de 1 Volt. Ils estimèrent que s'ils avaient reçu des fonds suffisants pour la recherche, ils seraient parvenus à construire une pile à combustible fiable, robuste et capable de produire de l'électricité pour servir à de nombreuses utilisations.

Louis Paul Cailletet (1832-1913) et Louis Joseph Colardeau (France) parvinrent à la même conclusion que Wright et Thompson, mais ils conclurent que le procédé n'était pas réalisable car il nécessitait des métaux précieux. De plus de nombreux rapports furent publiés durant cette période, expliquant que le charbon était si bon marché qu'un système innovant bénéficiant d'un meilleur rendement ne permettrait pas de réduire le prix de l'électricité.

William W Jacques, (1855-1932) construisit une batterie à base de carbone en 1896. De l'air était injecté dans un électrolyte alcalin pour réagir avec une électrode de charbon. Il pensait obtenir un rendement de 82 % mais en fait il atteint seulement 8 % de rendement.

Emil Baur et ses étudiants (1873-1944) (Suisse) conduisirent de nombreuses expériences sur différents types de piles à combustible durant le début des années 1900. Leurs travaux incluent des dispositifs à haute température et une unité en particulier qui utilisât un électrolyte solide constitué par de la craie et des oxydes métalliques.

Thomas Grubb et Léonard Niedrach inventèrent la pile à combustible PEM chez General Electric au début des années 1960. GE développa une petite pile à combustible destinée à L'US Navy Bureau of Ships (Division électronique) et pour l'US Army Signal Corps. La pile à combustible PEM était alimentée en hydrogène produit en mélangeant de l'eau et hydride de lithium. Cette pile était très compacte mais le platine utilisé comme catalyseur était très onéreux.

Sur la base de la recherche, du développement et des progrès réalisés durant le siècle dernier, les obstacles techniques sont en cours de résolution par un réseau mondial de scientifiques. Les piles à combustible ont été utilisées durant 20 ans dans les programmes spatiaux et leur commercialisation vers le grand public approche rapidement.

5.3 Utilisations des piles à combustible

Les piles à combustible représenteraient un complément très utile au choix des énergies à disposition car elles fournissent de l'énergie électrique pour des utilisations actuellement limitées en capacité énergétique. Par exemple, l'une des choses les plus ennuyeuses concerne les ordinateurs portables; il s'agit de leur limitation en réserve d'énergie puisqu'ils sont capables de seulement 2 heures d'autonomie. Des piles à combustible existantes aujourd'hui donneraient aux laptops une autonomie de 8 heures, après quoi, une rapide recharge de combustible chimique permettrait à l'utilisateur de poursuivre son travail. Chaque marché nécessite des piles à combustible pour différentes raisons comme le décrivent les paragraphes suivants.

5.3.1 Secteur du stationnaire

Les grandes piles à combustible pour utilisation stationnaire fournissent suffisamment de puissance pour alimenter un immeuble ou des bureaux. Ces piles à combustible peuvent aussi produire un supplément d'énergie électrique qui peut être injectée sur le réseau et vendues par le producteur. Les piles à combustible à usage stationnaire sont surtout avantageuses pour les maisons isolées où le réseau électrique n'est pas disponible. De plus, les piles à combustible peuvent être associées à une éolienne ou une installation photovoltaïque pour constituer une solution hybride efficace d'approvisionnement en énergie électrique.

5.3.2 Marché des transports

Le domaine des transports va bénéficier des piles à combustible car les combustibles fossiles vont se raréfier, ce qui produira inévitablement une hausse de leur prix.

Les législations à travers le monde deviennent également de plus en plus exigeantes quant aux émissions de carbone et de polluants. Bien des pays édictent des lois exigeant la réduction des émissions et imposent une certaine proportion de véhicules propres « zéro émission ». Les véhicules mus par des piles à combustible offrent des rendements plus élevés que les véhicules conventionnels alimentés par d'autres carburants.

5.3.3 Secteur portable

L'un des principaux marchés pour les piles à combustible dans le futur sera le secteur des équipements portables. Le domaine militaire également a besoin d'alimentations électriques puissantes et de longue durée pour les troupes. Il existe de nombreux appareils portables dans le commerce, qui feront appel aux piles à combustible pour gagner en autonomie. Ces appareils comprennent notamment les ordinateurs portables, les téléphones portables, les DVD portables, les caméras vidéo, les stations de jeux, les iPods, etc. Une pile à combustible fera fonctionner un appareil aussi longtemps qu'elle sera alimentée en combustible. La tendance dans les appareils électroniques est la convergence des fonctions et la limitation est la demande en énergie. C'est pourquoi une source d'énergie comme une pile à combustible qui est capable de fournir plus d'énergie durant plus longtemps permettre le développement d'appareils munis de plus de fonctions.



Figure 5-2 Le mini Pack de Horizon est une unité permettant la recharge des appareils portables.

Sujet spécial : Les piles à combustible dans les automobiles

La plupart des fabricants d'automobiles ont développé des modèles fonctionnant à l'aide d'une pile à combustible dans la dernière décennie et ils ont produit au minimum un prototype. La meilleure raison de développer des véhicules à pile à combustible est leur rendement, ainsi que leur émissions de polluants très réduite ou totalement absentes « zéro émission ». Les véhicules mus par des piles à combustible présentent un ou plusieurs de ces avantages :

- la pile à combustible produit toute l'énergie nécessaire au fonctionnement du véhicule.
- Une batterie peut être utilisée pour le démarrage.
- Une pile à combustible possède le meilleur rendement à puissance constante, c'est pourquoi pour les accélérations ou pour des pointes de puissance, des dispositifs tels que batteries ou des ultra capacités sont utilisés en complément.
- Sur certains modèles de véhicules, la source primaire d'énergie peut être les batteries; dans ce cas la pile à combustible devient la source secondaire dont la tâche est de recharger les batteries.
- La pile à combustible peut alimenter en énergie l'ensemble ou une partie du véhicule

La température de fonctionnement d'une pile à combustible pour voiture varie de 50 à 80 degrés C. Une température supérieure à 100 degrés C améliorerait le transfert de chaleur et simplifierait le refroidissement de la pile mais la plupart des véhicules utilisent des piles à combustible du type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ou DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) dont la température de fonctionnement ne peut atteindre 100 degrés C, afin de faciliter la circulation de l'eau à l'intérieur de la pile (10). Les principaux éléments constitutifs d'un système moteur - pile à combustible sont montés par la figure 5-3

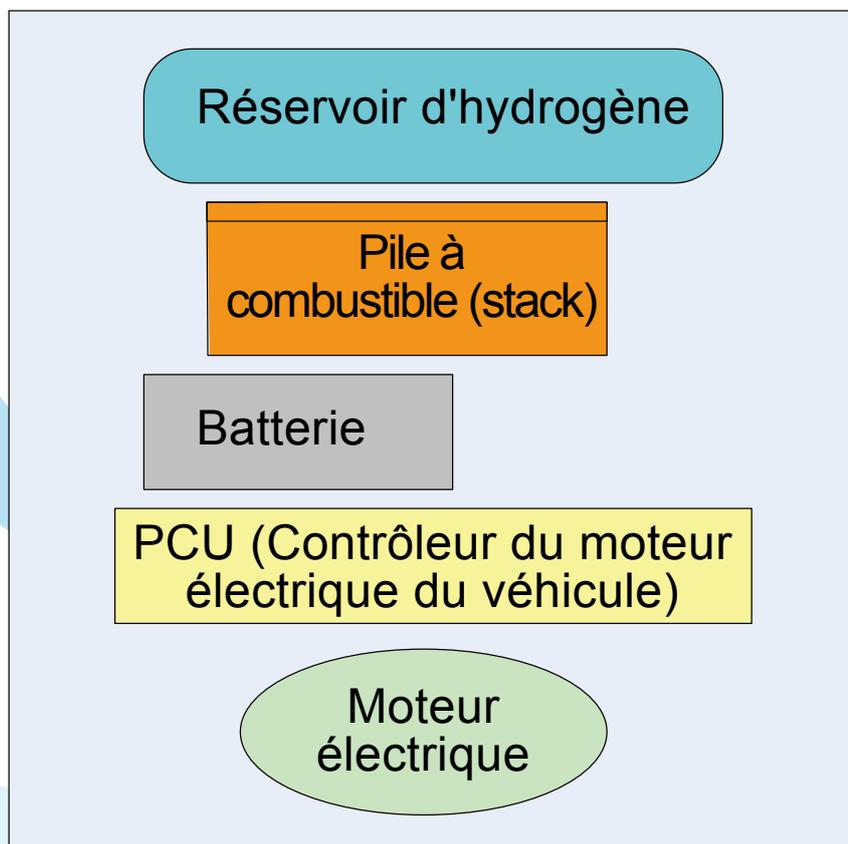


Figure 5-3. Schéma fonctionnel d'une voiture à pile à combustible [10]

La conception d'une pile à combustible destinée à un véhicule implique un nombre de paramètres. Ceux-ci comprennent la même exigence de puissance que pour un moteur conventionnel, le poids et l'encombrement de la pile à combustible, le ou les moteurs électriques, l'électronique de puissance, le dispositif d'alimentation en hydrogène, l'autonomie entre deux pleins et le temps requis pour refaire le plein. La pile à combustible permet aux ingénieurs automobiles d'utiliser des concepts tout à fait novateurs dans la création d'un véhicule. L'un de ces concept-cars est le modèle de voiture à hydrogène développé par General Motors, appelé le « skateboard design ». Les différentes options disponibles pour l'approvisionnement en combustible comprennent la production d'hydrogène embarquée, à partir de carburants conventionnels, ou la réserve d'hydrogène stockée dans un réservoir embarqué et des stations de remplissage sur les routes ou à domicile. Le Département Américain des Transports a décidé de ne promouvoir que le stockage de l'hydrogène dans un réservoir embarqué. Les stations de remplissage à domicile peuvent fonctionner par reformage d'hydrocarbures ou par électrolyse de l'eau.



Picture riversimple – Horizon car

Lors de la conception d'un véhicule à pile à combustible (ou d'un véhicule conventionnel) plusieurs forces doivent être prises en compte, car elles influencent le comportement du véhicule et le dispositif d'alimentation en carburant. Le moteur du véhicule doit fournir assez de puissance pour vaincre ces forces et mouvoir le véhicule. Un diagramme est créé pour comprendre comment ces forces s'appliquent sur un objet. Ces forces doivent être compensées si l'objet demeure à l'arrêt. Si ces forces ne sont pas en équilibre, l'objet se mettra en mouvement.

L'effet des forces sur un objet dépend des caractéristiques de ces forces et de son environnement. Les forces communément appliquées sont le poids, la résistance au déplacement, les frottements, la résistance à la pénétration dans l'air (ou traînée), la force de poussée. Le poids d'un objet est la force produite par la gravité agissant sur la masse de l'objet. La force résistive est la force qui égale le poids d'un objet mais qui agit dans la direction opposée. La friction apparaît lorsque deux objets entrent en contact et glissent l'un sur l'autre. La résistance de pénétration dans l'air ou traînée est le résultat du frottement du flux d'air sur la surface de l'objet. Ce flux d'air sera différent selon la vitesse de déplacement, la forme de l'objet, et la rugosité de sa surface. La force de poussée est la force qui génère le déplacement de l'objet. Cette force doit vaincre toutes les autres forces qui résistent au déplacement. Les forces sont expliquées mathématiquement par les lois du mouvement de Newton, qui comprennent les concepts de masse, de force et d'accélération. La première loi stipule que un objet en mouvement reste en mouvement et qu'un objet au repos reste au repos tant qu'une force ne change cet état.

La seconde loi met en relation la masse à la force :

$$F = ma$$

Dans laquelle F représente la force agissant sur l'objet, m est sa masse et a représente l'accélération que subit l'objet soumis à cette force F. Si l'accélération subie par un objet est due à la gravitation, la lettre g est substituée à la lettre a dans l'équation et l'on obtient :

$$F = mg = W$$

Dans laquelle g représente l'accélération gravitationnelle. Lorsque l'accélération est due à la gravité, la force F est appelée le poids de cet objet.

La troisième loi de Newton stipule que toute action provoque une réaction égale, mais de sens opposé.

Un diagramme des forces qui s'appliquent sur un "corps" est représenté par la figure 5-4.

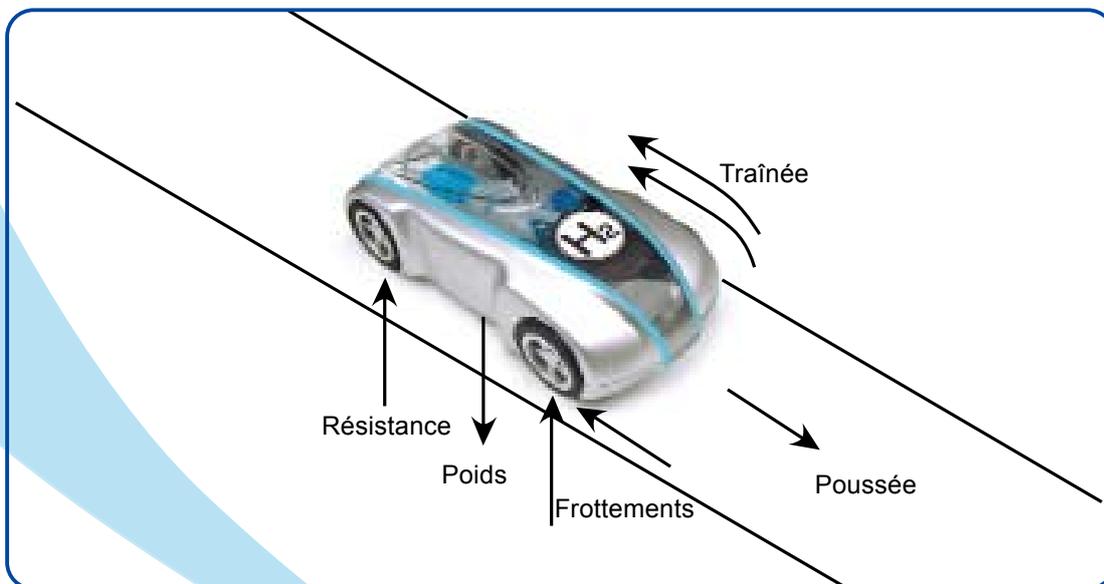


Figure 5-4 : Diagramme des forces agissant sur une automobile

Ces forces doivent avoir une résultante égale à zéro pour que le véhicule maintienne une vitesse constante. Si le véhicule doit accélérer, l'accélération vers l'avant multipliée par la masse indique la force qui doit être appliquée. Les différentes puissances correspondant à ces forces peuvent être combinées pour obtenir la puissance mécanique totale nécessaire au mouvement du véhicule.

5.4 Types de piles à combustible

Plusieurs types de piles à combustible sont actuellement en cours de recherche. Les six principaux types de piles à combustible se différencient par leur électrolyte ainsi que par le combustible utilisé. La température de fonctionnement et le volume ou encombrement de la pile à combustible sont souvent les facteurs déterminants pour choisir un type de pile à combustible à utiliser pour une certaine utilisation. Les types de piles à combustible existantes sont :

- les piles à combustible à membrane électrolytique (PEMFC)
- Les piles à combustible alcalines (AFC)
- Les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC)
- Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC)
- Les piles à combustible à carbonate fondu (MCFC)
- Les piles à combustible à méthanol (DMFC)

Les détails concernant le fonctionnement de ces différentes piles à combustible figurent dans les paragraphes suivants.

5.4.1 Pile à combustible à membrane polymère électrolytique (PEM)

La pile à combustible à membrane polymère électrolytique (appelée aussi proton exchange membrane PEM) fournit une haute densité de puissance et un poids moindre, un coût raisonnable et un faible volume. Une pile à combustible PEM comprend une électrode chargée négativement (anode) une électrode chargée positivement (cathode), et un électrolyte, la membrane, comme le montre la figure 5-5. Il s'agit d'une configuration similaire à celle d'un électrolyseur bipolaire vu au chapitre 4. L'hydrogène est introduit du côté de l'anode et l'oxygène est introduit du côté de la cathode. Les protons sont transportés de l'anode vers la cathode, à travers la membrane électrolytique et les électrons circulent par un circuit externe représenté par la charge. Une pile à combustible PEM typique comporte les réactions suivantes :

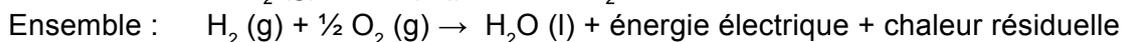
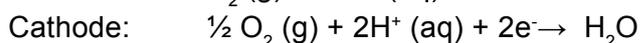
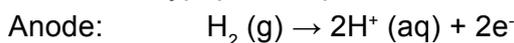
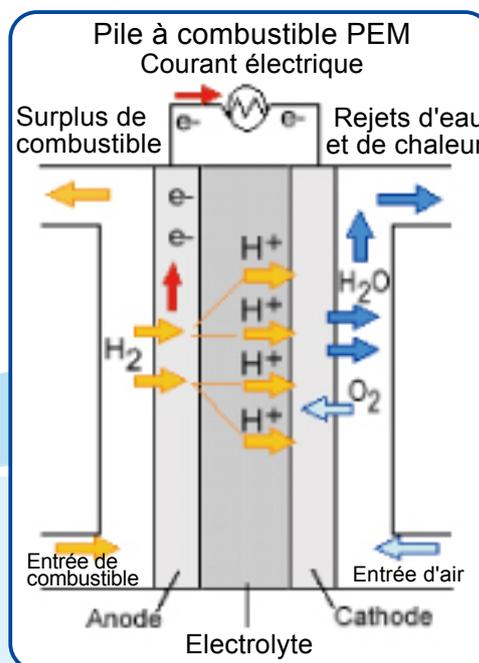


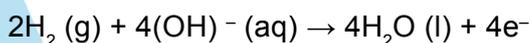
Figure 5-5 Pile à combustible PEM



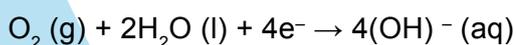
5.4.2 Pile à combustible alcaline (AFC)

Les piles à combustible alcalines (AFC) ont été utilisées par la NASA durant les missions spatiales; elles peuvent atteindre des rendements en génération de puissance jusqu'à 70 %. La température de fonctionnement de ces piles varie entre 150 et 200 degrés C. (10). Une solution aqueuse, de potassium alcalin hydroxide noyé dans une matrice sert d'électrolyte. Il s'agit d'une configuration avantageuse car la réaction à la cathode est rapide dans un électrolyte alcalin, ce qui permet une meilleure performance. Plusieurs fabricants examinent actuellement de moyens de réduire le coût et d'améliorer la flexibilité opérationnelle de ces piles à combustible. Les piles à combustible alcalines offrent typiquement des puissances de 300 Watts à 5 Kwatts. (10). Un illustration de la pile à combustible alcaline est représentée par la figure 5-6. Les réactions chimiques qui prennent place dans une pile à combustible alcaline sont :

Anode:



Cathode:



Ensemble:

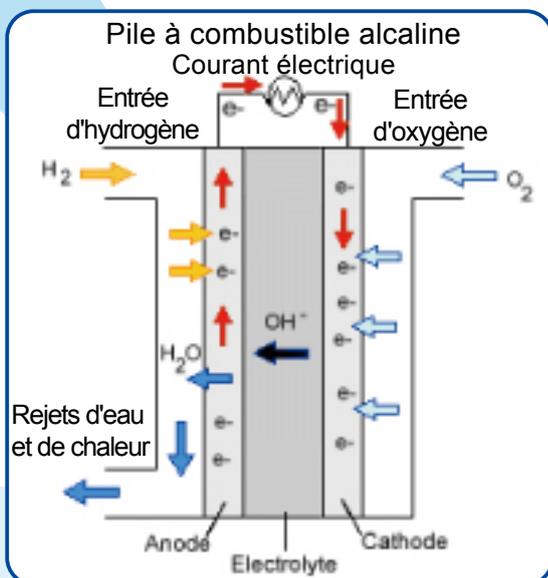
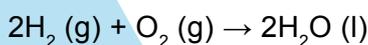


Figure 5-6. Pile à combustible alcaline

5.4.3 Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible à acide phosphorique (PAFC) est l'une des rares piles disponibles dans le commerce. Des centaines de ces piles ont été installées de par le monde. La plupart de ces installations fournissent des puissances allant de 50 à 200 Kwatts, mais des centrales de 1 MW et 5 MW ont été construites. (10). La plus grande centrale installée à ce jour fournit 11 MW de courant alternatif (AC) correspondant à la qualité d'un réseau de distribution. Une PAFC est représentée par la figure 5-7. Les piles à combustible PAFC possèdent des rendements de production d'électricité de 40 % . Leur température de fonctionnement se situe entre 150 et 300 degrés C (10). Les PAFC sont de mauvais conducteurs ioniques sous basse température et le monoxyde de carbone (CO) a tendance à empoisonner sévèrement le platine du catalyseur. Les réactions chimiques qui surviennent dans les PAFCs sont :

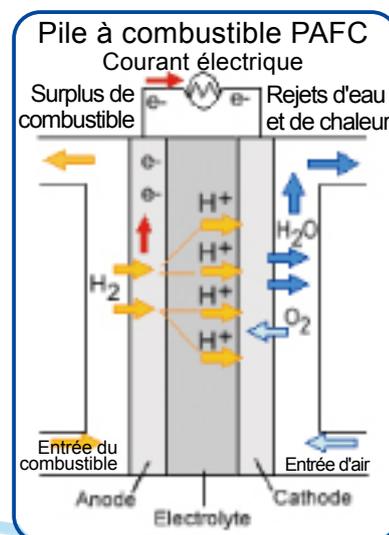
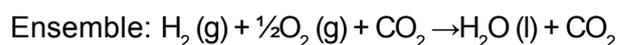
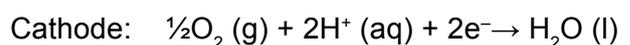
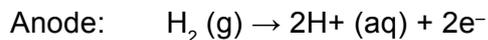


Figure 5-7 Une pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)

5.4.4 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)

Les piles à combustible à oxyde solide (SOFCs) semblent destinées aux grandes installations de haute puissance telles que des centrales de production d'électricité pour l'industrie. Un système à oxyde solide est généralement constitué d'un matériau céramique dur comportant de l'oxyde solide de zirconium et d'une petite quantité d'yttrium pour remplacer l'électrolyte liquide.

Voir la figure 5-8 qui représente une illustration d'une SOFC.

La température de fonctionnement de ces piles à oxyde solide peut atteindre 1000 degrés C. (10). Leur rendement peut atteindre 60 à 85 % avec co-génération et lorsque la puissance de sortie dépasse les 100 KW.

Les réactions internes sont les suivantes :

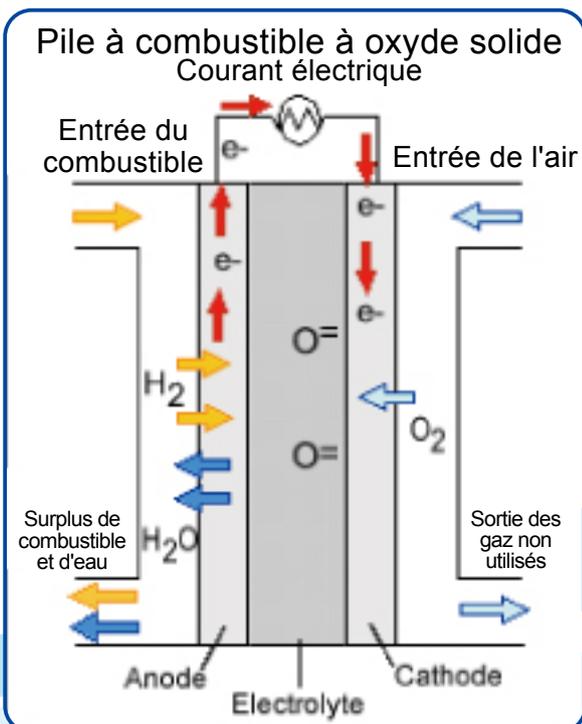
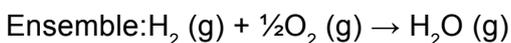
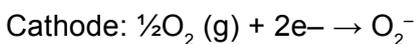
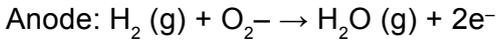


Figure 5-8 Une pile à combustible à oxyde solide (SOFC)

5.4.5 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)

Les piles à combustible à carbonate fondu représentent une forme différente de technologie qui a prouvé son succès à différents endroits du monde. Leur température de fonctionnement élevée présente des avantages car elle permet de meilleurs rendements ainsi que l'utilisation de combustibles différents et de catalyseur bon marché. Un inconvénient des piles à combustible MCFC est que les hautes températures provoquent de la corrosion et quelquefois la rupture de certains éléments de la pile. L'électrolyte de la pile à combustible à carbonate fondu est une solution liquide de lithium, de sodium, et / ou de carbonate de potassium noyé dans une matrice. Les MCFC possèdent un rendement combustible / électricité variant de 60 à 85 % avec co-génération et leur température de fonctionnement est de 650 degrés C environ.

Co-génération

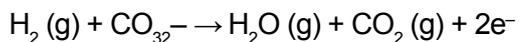
Un procédé qui utilise de l'énergie résiduelle pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

Cette haute température de fonctionnement est nécessaire afin d'obtenir une conductivité suffisante dans l'électrolyte. Ces températures élevées permettent également l'utilisation de catalyseurs meilleur marché pour les processus d'oxydation et de réduction. La figure 5-9 montre la représentation d'une MCFC.

Les piles à combustible à carbonate fondu peuvent consommer de l'hydrogène, du monoxyde de carbone, du gaz naturel, du propane, du gaz de déchetterie, du carburant diesel, et des gaz issus du charbon. Des MCFC d'une puissance de 10 KW à 2 MW ont été testées avec différents combustibles

principalement dans des centrales de production d'électricité. Les réactions chimiques qui ont lieu dans les MCFC sont :

Anode:



Cathode:



Ensemble:

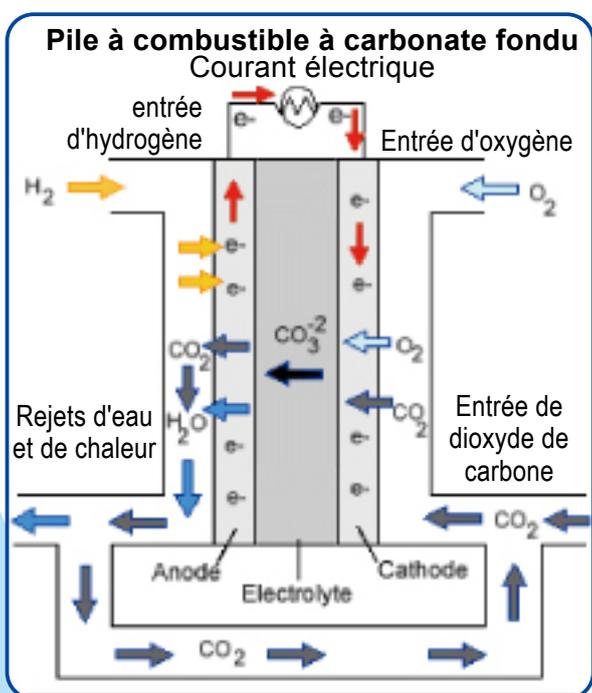
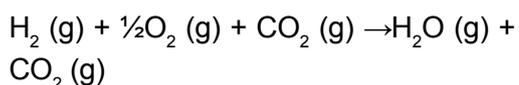
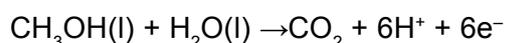


Figure 5-9. Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)

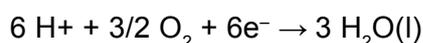
5.4.6 Pile à combustible directe à méthanol (DMFC)

Le grand potentiel pour les utilisations portables des piles à combustible a généré un énorme intérêt pour une pile à combustible qui peut fonctionner directement à base de méthanol. La pile à combustible directe à méthanol (DMFC) utilise la même membrane polymère que la pile à combustible PEM. Le combustible utilisé dans la DMFC est toutefois le méthanol au lieu de l'hydrogène. Le méthanol coule à travers l'anode comme combustible et il se décompose en protons, électrons, en eau, et dioxyde de carbone. Les avantages du méthanol sont qu'il est disponible partout et qu'il peut facilement être reformé à partir d'essence ou de biomasse. Bien que sa densité énergétique ne soit que le cinquième de celle de l'hydrogène par unité de poids, vu qu'il est sous forme liquide, il offre plus de quatre fois la quantité d'énergie par volume comparativement à l'hydrogène sous une pression de 250 atmosphères. Les réactions chimiques qui surviennent dans cette pile à combustible sont :

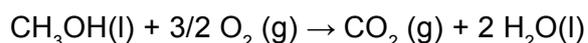
Anode:



Cathode:



Ensemble:



5.5 Comment fonctionnent les piles à combustible ?

Une seule cellule d'une pile à combustible fonctionne sous une tension de 0.6 – 0.8 Volts et produit un courant par surface active (densité de courant) de 0.2 à 1 Ampère par centimètre carré. Une cellule d'une pile à combustible est constituée d'une électrode chargée négativement (anode), d'une électrode chargée positivement (cathode), et d'un électrolyte. L'hydrogène est oxydé sur l'anode et l'oxygène est réduit sur la cathode. Les protons sont transportés de l'anode vers la cathode au travers de l'électrolyte et les électrons sont transportés vers la cathode par un circuit externe. Les électrons circulent à travers un conducteur jusqu'à la charge si nécessaire. L'anode et la cathode comportent un catalyseur pour produire de l'électricité à partir de la réaction chimique comme montré par la figure 5-10.

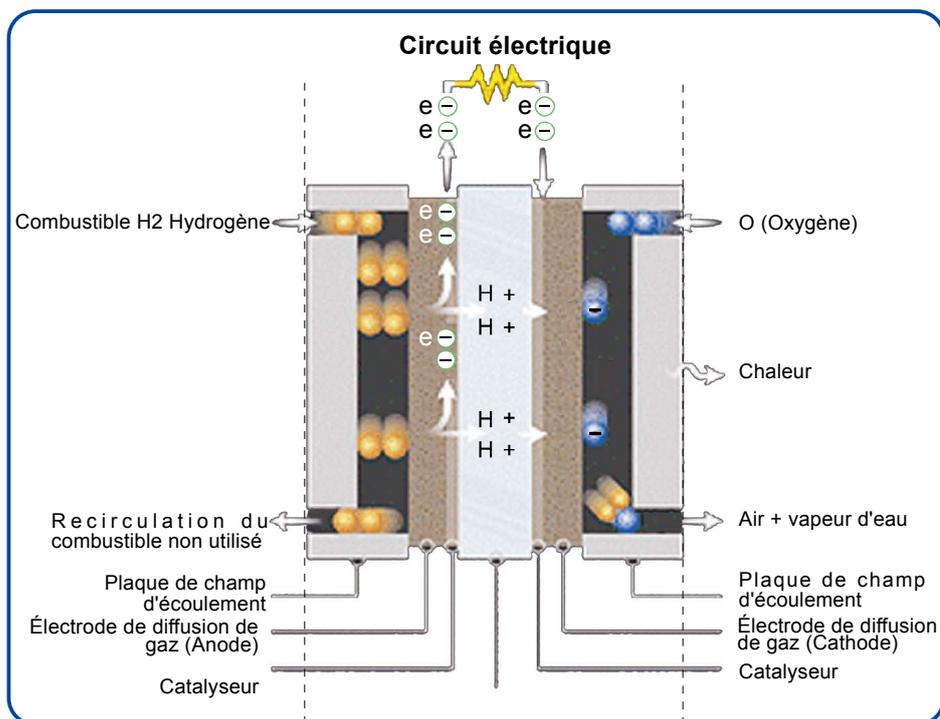


Figure 5-10 Une cellule d'une pile à combustible.

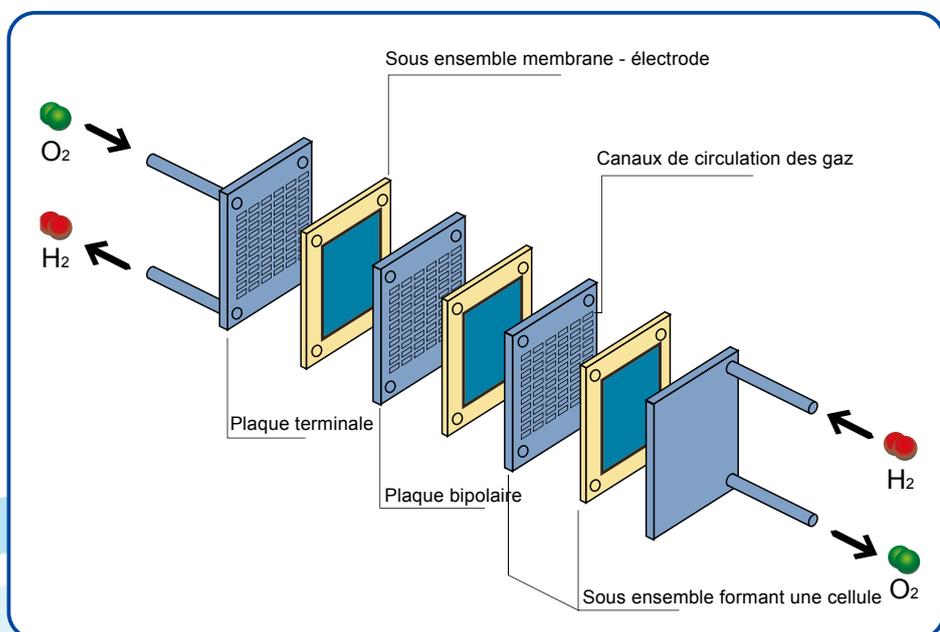


Figure 5-11 : Vue éclatée d'une pile à combustible PEM

La conversion de l'énergie chimique des réactants en énergie électrique, en chaleur et en eau se produit dans les couches du catalyseur. Le carburant et l'oxydant se déplacent vers les couches de catalyseur où la réaction chimique se produit. L'eau et la chaleur résiduelle produits par la pile à combustible doivent être constamment évacués car ces résidus peuvent présenter des risques pour les piles à combustible.

Vu que la plupart des appareils électriques nécessitent des niveaux de tension et des puissances qui ne peuvent être produits par une seule cellule, dans les piles à combustible on connecte en série un certain nombre de cellules qui constituent une « pile ». Ces cellules toutes semblables sont séparées par des plaques permettant la circulation des fluides. L'augmentation du nombre de cellules dans la pile augmente la tension produite alors que l'augmentation de la surface de chaque cellule permet d'augmenter le courant disponible. Une pile à combustible PEM est constituée de plaques bipolaires, d'ensembles membrane – électrodes (MEA) et de plaques terminales comme le montre la figure 5-11.

Les plaques bipolaires sont construites en graphite ou en métal et elles répartissent simultanément les gaz à travers les conduits de flux vers les couches de cellules (MEA) tout en conduisant les électrons vers la charge du circuit. Les conduits de flux de gaz permettent aux réactants de l'anode et de la cathode d'entrer dans la MEA où la réaction chimique se produit. Dans une pile à combustible PEM, la MEA a une épaisseur de 500 à 600 micro m et comporte 5 couches : la membrane à échange de protons, deux couches de catalyseur, anode et cathode et deux couches de diffusion de gaz. Ces différentes couches sont décrites plus en détail dans les prochaines sections.

5.5.1 La couche d'électrolyte

La couche d'électrolyte est le coeur de la pile à combustible. Elle permet de conduire les électrons de la manière exigée en attirant les protons et en leur permettant de la traverser tout en conservant leur état de protons. Les électrons circuleront à travers le circuit externe pour alimenter la charge en courant électrique. Les protons de l'hydrogène traversent donc la couche d'électrolyte pour rejoindre la cathode, puis ils se recombieront avec l'oxygène pour former de l'eau. L'électrolyte doit être un bon conducteur d'ions; il doit également représenter une barrière étanche pour tous les autres réactants; il ne doit pas conduire les électrons, et il doit être facile à intégrer dans la pile à combustible.

5.5.2 La couche de diffusion des gaz

Les couches de diffusion des gaz (GDL) possèdent deux fonctions principales : elles doivent permettre aux gaz de passer et doivent également être de bons conducteurs pour les électrons. Ces couches de diffusion des gaz doivent aussi servir de support à l'électrolyte et sa structure doit faciliter l'évacuation de l'eau qui empêcherait la réaction de se produire. Ces couches de diffusion des gaz sont très minces puisqu'elles mesurent entre 0.25 et 0.40 mm, les perforations dont elles sont munies ont une dimension de 4 à 50 microns. (11).

5.5.3 La couche catalytique

La réaction de la pile à combustible se produit dans la couche catalytique. La couche catalytique de l'anode sépare les molécules d'hydrogène en électrons et en protons et du côté de la couche catalytique de la cathode, l'oxygène se recombine avec les protons de l'hydrogène pour former de l'eau. Ces couches catalytiques sont souvent les plus minces de la pile à combustible, avec une épaisseur de 5 à 30 micromètres. Elles sont aussi les plus complexes car elles doivent contenir plusieurs types de gaz, de l'eau et faciliter les réactions chimiques. Ces couches catalytiques sont faites d'un matériau poreux de carbone, de platine ou de platine / ruthenium.

Les réactions qui se produisent dans la couche catalytique sont exothermiques; il est donc nécessaire d'évacuer de la chaleur hors des cellules de la pile à combustible. La chaleur peut être évacuée par convection à travers les canaux, et par conduction dans la partie solide de la couche catalytique, de la couche de diffusion des gaz et des plaques bipolaires. Comme de l'eau est produite dans la pile à combustible PEM, la condensation et l'évaporation de cette eau affecte le transfert de chaleur. C'est pourquoi, le traitement de l'eau et le contrôle de température de la pile à combustible sont intimement liés.

5.5.4 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires distribuent uniformément le combustible et l'oxydant vers les cellules de la pile à combustible. Elles recueillent aussi le courant électrique produit vers les bornes de sortie. Dans une pile à combustible comportant une seule cellule, il'y a pas de plaque bipolaire; (il n'y a qu'une plaque à un seul côté qui assure le flux). Mais dans les piles à combustible qui comportent plus d'une cellule, il y a au moins une plaque bipolaire (le contrôle de flux existe des deux côtés de la plaque). Les plaques bipolaires assurent plusieurs fonctions dans la pile à combustible. Elles assurent la distribution de combustible et de l'oxydant à l'intérieur des cellules, elles séparent les différentes cellules entre-elles, elles recueillent le courant électrique produit, évacuent l'eau de chaque cellule, humidifient les gaz, et servent au refroidissement des cellules. Les plaques bipolaires comportent également des canaux permettant le flux des réactants (combustible et oxydant), de chaque côté formant les compartiments de l'anode et de la cathode, des côtés opposés de la plaque bipolaire. La conception des canaux de flux peut varier, ils peuvent être linéaires, en serpentins, en parallèle, de structure interdigitée (en forme de peigne), à entretoises, figure 5-12.

Les matériaux sont choisis sur la base de la compatibilité chimique, de leur

résistance à la corrosion, du coût, de leur conductivité électrique, de leur aptitude à diffuser les gaz, de leur imperméabilité, de leur facilité d'usinage, de leur résistance mécanique, et de leur conductivité thermique.

5.6 Conception configuration des piles à combustible

Dans la conception traditionnelle des piles bipolaires, les piles à combustible comportent de nombreuses cellules (ou éléments) connectées en série. La cathode d'une cellule est connectée à l'anode de la cellule suivante. Les MEAs, les joints, les plaques bipolaires et les plaques terminales sont les couches typiques d'une pile à combustible. Ces cellules sont assemblées fermement. La configuration la plus courante est montrée par la figure 5-13 . Chaque cellule (MEA) est séparée par une plaque munie de canaux de flux afin de permettre la distribution du combustible et de l'oxydant. La plupart des piles à combustible ressemblent à cette configuration, quelle que soit leur taille, leur type ou le combustible utilisé.

La performance des piles à combustible dépend du débit de flux des réactants. Une distribution irrégulière résultera en un fonctionnement irrégulier entre les cellules. Les gaz réactants doivent être distribués vers toutes les cellules par les mêmes conduits principaux.

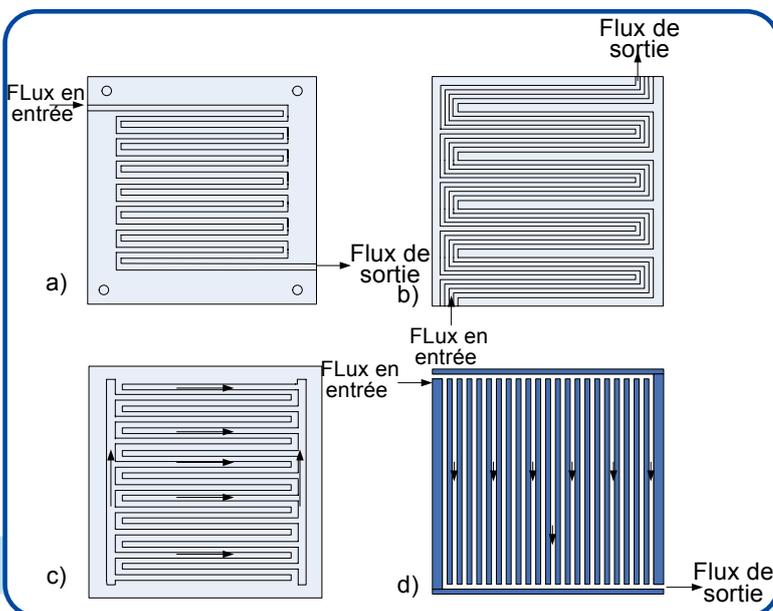


Figure 5-12. (a) Canaux de flux en serpentins
(b) Canaux de flux en serpentins multiples
(c) Canaux de flux en parallèle
(d) Canaux de flux de structure interdigitée

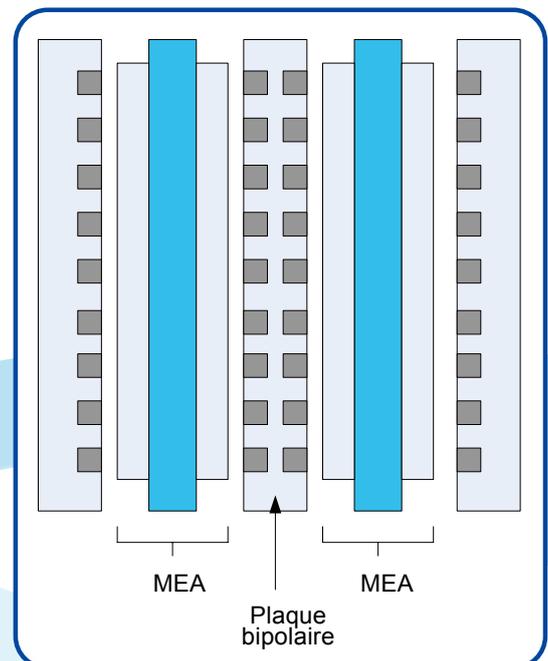


Figure 5-13.
Configuration d'une pile à combustible

5.7 Conditions d'utilisation

L'un des avantages des piles à combustible et qu'elles bénéficient d'une grande plage de conditions d'utilisation. Ceci signifie que certaines piles à combustible peuvent être utilisées à température ambiante, tandis que d'autres peuvent fonctionner sous haute température lorsque ceci présente un avantage. Le rendement des piles à combustible est déterminé par la pression, la température, et l'humidité durant le fonctionnement. Le rendement peut souvent être amélioré (selon le type de pile à combustible) par une élévation de la température, de la pression ou l'humidité ou en optimisant certains paramètres variables de la pile. La possibilité d'améliorer ces variables dépend de l'utilisation de la pile car des considérations de poids, d'encombrement ou de coût peuvent représenter un facteur de décision important.

5.7.1 Courbes de polarisation

La mesure traditionnelle d'une pile à combustible se fait par la courbe de polarisation. Cette courbe est un graphique représentant la tension aux bornes de la pile en fonction de l'intensité du courant. Cette courbe a été présentée au chapitre 4. Une courbe I -V est la méthode la plus courante de caractériser ou de comparer une pile à combustible à une autre. La courbe de polarisation montre la relation tension – courant en fonction des conditions d'utilisation, telles que l'humidité la température, la charge électrique, la densité de flux du combustible et de l'oxydant. La figure 5-14 montre une courbe de polarisation typique d'une pile à combustible PEM, ainsi que tous les points caractéristiques.

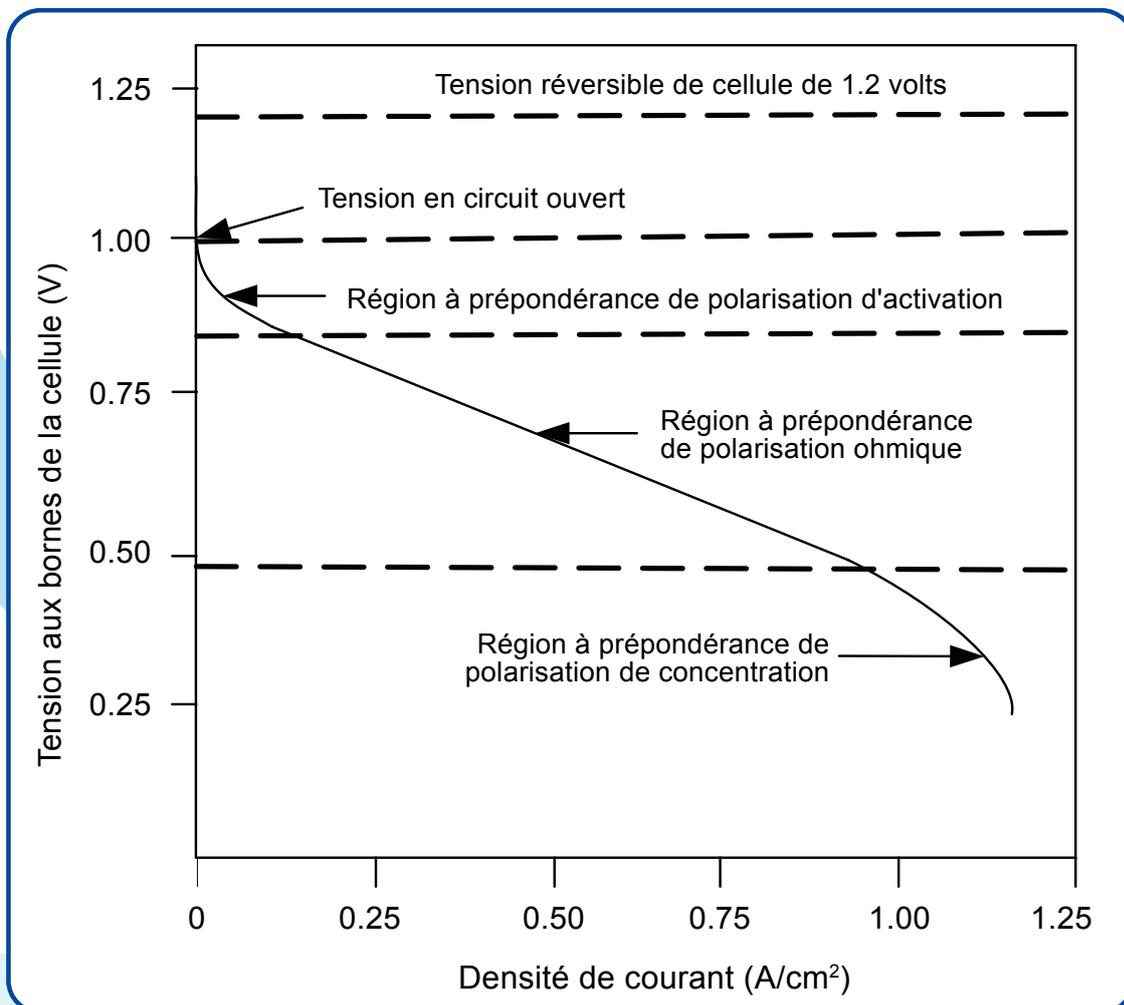


Figure 5-14 Exemple d'une courbe de polarisation d'une pile à combustible PEM

Comme le montre la figure 5-14, le graphique de polarisation peut être divisé en 4 parties : 1) le secteur d'activation; 2) le secteur ohmique; 3) le secteur de concentration. Des pertes décrites dans le chapitre 4 se produisent dans chacun de ces secteurs . Dans le secteur d'activation, les pertes sont dues au temps mis par la réaction pour produire du courant. La réaction électrochimique de l'oxygène sur la cathode est responsable de la plus grande partie des pertes d'activation. Lorsque la pile à combustible produit plus de courant, les pertes ohmiques prennent de l'importance. Les pertes ohmiques sont dues à la résistance au passage des charges dans le catalyseur de la membrane polymère électrolytique, ainsi que de la diffusion des gaz dans les plaques bipolaires.

Les pertes par concentration sont dues à la limitation des transferts de charges. La propagation des réactions électrochimiques à l'intérieur du catalyseur est retardée par le manque de réactants. La limitation des transferts de charges est due aux limites de la diffusion dans l'électrode ainsi qu'à la présence de l'eau dans la couche catalytique de la cathode. Lorsque la densité de courant est élevée, la quantité d'eau produite est plus importante que la quantité d'eau qui peut être éliminée par les canaux d'évacuation. Pour plus de détails concernant ces pertes, se référer au chapitre 4.

5.8 Conclusion

Ce chapitre a décrit comment les piles à combustible deviendront un élément essentiel de l'économie basée sur les énergies renouvelables. Les piles à combustible permettent de satisfaire aux besoins en énergie pour les applications stationnaires, pour les véhicules et pour les appareils portables. Il existe six catégories principales de piles à combustible : les PEMFCs, Les AFCs, les PAFCs, les SOFCy, les MCFCs, et les DMFCs. Le type le plus couramment utilisé pour les véhicules et pour les appareils portables est la pile à combustible à membrane polymère électrolytique (PEM). La pile à combustible PEM utilise le plus souvent l'hydrogène comme combustible, mais elle peut également utiliser d'autres combustibles, comme l'éthanol, ou des dérivés de la biomasse. Les piles à combustible sont constituées de cinq couches principales : deux couches de diffusion des gaz, deux couches de catalyseur, et une couche électrolytique. Les deux couches de diffusion des gaz sont faites de fibre carbone conductrices qui sont poreuses. La couche catalyseur est un mélange de platine poreux et de carbone. L'électrolyte de la pile à combustible détermine plusieurs autres facteurs tels que : la chimie de la réaction, la température de fonctionnement, les matériaux de construction, et la conception de la pile. Les différences induisent d'importants changements dans les caractéristiques de la pile à combustible qui représentent des avantages ou des inconvénients. Toute pile à combustible peut être intégrée dans un système hybride d'alimentation en énergie. L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, l'électrolyse et l'électronique de puissance peuvent faire partie d'un système d'alimentation hybride , tel que décrit dans les paragraphes 2-4 et 6-7.



Chapitre 6

Stockage et transport de l'hydrogène

6.1 Introduction

6.2 Aspect de la sécurité avec l'hydrogène en temps que combustible

6.3 Production, distribution et stockage de l'hydrogène

6.4 Technologies pour le stockage de l'hydrogène

6.5 Conclusion

6.1 Introduction

L'hydrogène possède beaucoup de caractéristiques avantageuses comparé à d'autres éléments. C'est l'élément le plus léger et le plus abondant dans l'univers, et il peut brûler mélangé à l'oxygène tout en libérant une très grande quantité d'énergie. L'hydrogène possède une grande quantité d'énergie par unité de poids, mais il contient une petite quantité d'énergie par volume à température ambiante et à la pression atmosphérique. Le tableau 6-1 compare les propriétés essentielles de l'hydrogène avec celles du méthane, du méthanol, de l'éthanol, du propane et de l'essence. L'hydrogène n'existe pratiquement pas à l'état naturel sur terre; il est presque toujours combiné à d'autres éléments. C'est pourquoi il doit être produit par électrolyse, par reformage de vapeurs ou de gaz naturel, par gazéification de charbon, ou par oxydation et reformage d'hydrocarbures ou de biomasse.

Propriété	Hydrogène	Méthane	Méthano	Ethanol	Propane	Essence
Poids moléculaire (g/mol)	2.016	16.043	32.04	46.0634	44.10	~107.0
Densité à 20 degC et 1 atm (Kg/m3)	0.08375	0.6682	791	789	1.865	751
Point d'ébullition	-252.8	-161.5	64.5	78.5	-42.1	27-225
Température d'éclair deg C	<-253	-188	11	13	-104	-43
Température d'éclair deg C	4.0-75.0	5.0-153.0	6.7-36.0	3.3-19	2.1-10.1	1.0-7.6
Emission de CO2 par unité d'énergie	0	1.00	1.50	1.60	1.70	1.80
Température d'auto allumage dans l'air (degC)	585	540	385	423	490	230-480
Pouvoir calorifique haut MJ/Kg	142.0	55.5	22.9	29.8	50.2	47.3
Pouvoir calorifique haut MJ/Kg	120.0	50.0	20.1	27.0	46.3	44.0

Table 6-1 : L'hydrogène comparé à d'autres combustibles

L'hydrogène représente le bon choix comme future source d'énergie pour de nombreuses raisons. Voici quelques unes de ces raisons :

- L'hydrogène peut être produit à l'aide de plusieurs sources. Il est tout à fait renouvelable. L'élément de départ le plus abondant et le plus propre pour produire de l'hydrogène est l'eau.
- L'hydrogène peut être stocké à l'état gazeux, à l'état liquide, ou à l'état solide. Il peut aussi être stocké dans différentes substances chimiques telles que le méthanol, l'éthanol, ou les hydrures métalliques.
- Il peut être produit à partir d'électricité ou converti en électricité avec de hauts rendements
- Il peut être transporté et stocké avec autant de sécurité que les combustibles utilisés de nos jours.

L'hydrogène peut fournir de l'énergie pour tous les secteurs de l'économie : l'industrie, les habitations, les transports, les appareils portables. Il peut remplacer les carburants à base de pétrole pour les véhicules et représente une source d'électricité intéressante pour les communautés. L'un des principaux avantages de l'hydrogène comparé aux combustibles fossiles est son avantage par rapport à l'environnement. Sa consommation ne produit aucun polluant, aucune émission de carbone. Il peut également être produit sans générer de pollution selon l'une des méthodes suivantes :

- Par électrolyse, en utilisant de l'électricité provenant de centrales nucléaires ou d'électricité d'origine renouvelable. (Comme démontré par le set d'enseignement des énergies renouvelables Horizon FCJJ-27)
- Par reformage de vapeurs de combustibles fossiles ou de gaz naturel si le processus est combiné avec un procédé de capture et de stockage du carbone.
- Par des techniques thermochimiques ou biologiques en utilisant de la biomasse renouvelable.

Comme décrit dans le texte ci-dessus, l'inconvénient du traitement des hydrocarbures est la pollution et le dioxyde de carbone produit. La meilleure façon de produire de l'hydrogène pour éviter toute pollution, toute émission de carbone est l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine renouvelable. Cette méthode ne produit pas de gaz carbonique, aucun produit nitré, aucun oxyde de soufre.

6.2 Aspects de sécurité avec l'hydrogène en temps que combustible

Un obstacle critique vers l'adoption de l'hydrogène en temps que combustible pour le grand public, est la perception du danger qui lui est lié. Contrairement à ce qu'on pense le public, l'hydrogène s'enflamme plus difficilement que l'essence de leur voiture ou que d'autres combustibles fossiles. Comme tous les combustibles l'hydrogène comporte des risques s'il n'est pas stocké ou transporté correctement. Ces risques peuvent être maîtrisés par des procédures adéquates ainsi que des contrôles.

L'accident du Hindenburg est survenu le 6 mai 1937. Le dirigeable allemand Hindenburg fut détruit en une minute alors qu'il tentait de s'amarrer à l'aéroport de Manchester Township, dans le New Jersey. Trente-cinq des quatre-vingt dix-sept personnes à bord décédèrent. Cet accident fut l'objet de nombreux reportages médiatiques. La cause de l'incendie fit l'objet de nombreuses spéculations et une grande variété de théories concernant la cause de l'incendie furent élaborées. La cause finalement la plus largement admise par les scientifiques est que la peinture sur le tissu de l'enveloppe du Hindenburg pris feu suite à une décharge d'électricité statique à l'instant de l'amarrage.

La réputation d'insécurité liée à l'hydrogène a été largement due à l'accident du Hindenburg et accessoirement à la « bombe à hydrogène ». L'hydrogène par lui-même ne peut pas démarrer un feu, il doit être mélangé à de l'oxygène en présence d'une source d'allumage. L'hydrogène par lui-même ne peut donc être la cause de l'incendie du Hindenburg.

Comme l'hydrogène est une petite molécule, il a tendance à s'échapper par de très petits orifices, plus facilement que d'autres gaz ou d'autres liquides. Le gaz naturel possède une densité d'énergie trois fois plus élevée que l'hydrogène, une fuite de gaz naturel représente plus d'énergie libérée qu'une fuite d'hydrogène. Si de l'hydrogène s'échappe, il se disperse beaucoup plus rapidement que tout autre combustible et sans polluer. L'hydrogène est plus léger et se diffuse plus rapidement que l'essence, le propane, ou le gaz naturel. Si une explosion devait se produire, l'hydrogène possède la plus faible puissance détonante par unité de combustible stocké. (11)

Les dangers potentiels de l'hydrogène à bord d'un véhicule sont l'explosion et la toxicité. Un feu d'hydrogène pourrait se déclarer à la suite d'un problème avec le système de stockage, ou avec la pile à combustible elle-même. A l'intérieur de la pile à combustible, une petite quantité d'hydrogène et d'oxygène résident; ces gaz sont séparés par une fine membrane de polymère (voir chapitre 5). Si la membrane devait se rompre, la pile à combustible perdrait immédiatement toute puissance, et un système de sécurité couperait instantanément l'arrivée des gaz. De nombreux systèmes de contrôle existent pour rendre l'utilisation des piles à combustible et de l'hydrogène très sûrs. (11)

- prévention des fuites par des tests et des contrôles scrupuleux des réservoirs et de l'équipement
- installation de valves
- conception de l'équipement pour résister aux chocs aux vibrations et à une gamme de température étendue.
- Adjonction de capteurs d'hydrogène ou de détecteurs de fuite
- prévention d'allumage en éliminant les sources d'étincelles ou d'arcs électriques
- disposition des conduits de gaz afin d'éviter le contact avec le reste de l'équipement.

Pour que l'hydrogène soit largement accepté des règles, des codes et des standards internationaux doivent être élaborés et adoptés en ce qui concerne la construction, la maintenance et l'utilisation des équipements utilisant l'hydrogène. L'harmonisation des règles de sécurité relatives à l'utilisation de l'hydrogène augmentera la confiance des utilisateurs.

6.3 Production, distribution et stockage de l'hydrogène

Afin de pouvoir stocker, transporter, distribuer l'hydrogène, il doit être comprimé et stocké dans des conteneurs pressurisés ou transformé en liquide cryogénique dans un réservoir spécial. L'hydrogène peut être transporté par pipeline mais seulement sur de courtes distances. Il existe aujourd'hui des pipelines transportant de l'hydrogène aux Etats Unis et en Europe, mais il est plus facile de le transporter par rail ou par camion sur de longues distances.

6.3.1 Techniques pour la production de l'hydrogène

Actuellement l'hydrogène est produit à partir de différents combustibles fossiles, tels que le pétrole, le gaz naturel, le charbon. Certains procédés pour produire de l'hydrogène sont le reformage de vapeurs de gaz naturel, l'oxydation partielle d'hydrocarbures, la gazéification du charbon. Cependant ces procédés ne contribueront pas à réduire notre dépendance envers les combustibles fossiles.

L'électrolyse de l'eau est un procédé qui a atteint sa maturité et il fut développé pour la production d'hydrogène. (Voir chapitre 4). Son rendement est bon mais il requiert de grandes quantités d'électricité. Ce problème peut être résolu par l'utilisation d'électricité d'origine renouvelable, de courant photovoltaïque, éolien pour alimenter l'électrolyse. Ce procédé a fait ses preuves et il peut être utilisé à grande échelle. D'autres possibilités existent pour produire de l'hydrogène comme l'hydro électricité les centrales nucléaires, ceci particulièrement durant les périodes creuses de la demande de consommation. La décomposition thermique directe, la thermolyse, les cycles thermo-chimiques, la photolyse sont d'autres procédés possibles. Ces procédés se situent à différents stades de développement, et certains ont été abandonnés. Les méthodes les plus courantes pour produire de l'hydrogène sont le reformage de vapeurs, l'oxydation partielle, la gazéification du charbon, les dérivés de la biomasse ou l'électrolyse de l'eau.



6.3.1.1 Reformage de vapeurs

La méthode la plus économique de produire de l'hydrogène en grande quantité aujourd'hui est par reformage de combustibles fossiles comme le montre la figure 6-1. La méthode actuelle fait recours à un catalyseur de nickel. Le méthane réagit le premier avec la vapeur pour produire du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. Le monoxyde de carbone passe au dessus du catalyseur puis réagit avec la vapeur et produit du dioxyde de carbone et de l'hydrogène. Le gaz naturel est le matériau le meilleur marché pour

Figure 6-1 Usine de reformage de vapeur.

produire de l'hydrogène par reformage de vapeur mais il n'est pas très compétitif sur le plan économique car il est encore trois fois plus élevé que le coût de production de l'essence par raffinage du pétrole.

6.3.1.2 Oxydation partielle

Une autre méthode de production d'hydrogène est l'oxydation partielle. Ce procédé implique de faire réagir du méthane et d'autres hydrocarbures ou d'autres hydrocarbures dans du gaz naturel avec une faible quantité d'oxygène (normalement pris dans l'air), ce qui transforme les hydrocarbures en dioxyde de carbone et en eau. S'il manque de l'oxygène pour compléter la réaction, le résultat de la réaction sera de l'hydrogène et du monoxyde de carbone, un peu de dioxyde de carbone et quelquefois de petites quantités d'autres composés (dans le cas où l'oxygène est pris dans l'air.)

L'oxydation partielle est une réaction exothermique-

Réaction exothermique :

Une réaction chimique qui libère de l'énergie sous forme de chaleur, de lumière ou de son.

L'opposé d'une réaction exothermique est une réaction endothermique.

Réaction endothermique :

Une réaction qui nécessite d'absorber de l'énergie pour se produire.

Ce processus est beaucoup plus rapide que le reformage de vapeur et il requiert un plus petit réacteur d'espace. Cependant, ce procédé produit moins d'hydrogène par unité de carburant utilisé pour alimenter la réaction que dans le cas du procédé de reformage.

6.3.1.3 Gazéification du charbon

La gazéification du charbon est l'un des plus anciens procédés pour produire de l'hydrogène. Elle fut utilisée pour produire du « gaz de ville » avant que le gaz naturel ne soit disponible. Le charbon est chauffé jusqu'à obtenir un mélange gazeux puis ce gaz est mélangé à de la vapeur d'eau en présence d'un catalyseur pour produire un gaz de synthèse. Ce gaz peut ensuite être traité pour en extraire de l'hydrogène et d'autres produits chimiques ou peut être brûlé pour produire de l'électricité. Beaucoup de recherches ont été conduites dans divers pays pour réduire la quantité de polluants produits lors de ce processus, tels que des oxydes d'azote et de soufre, du mercure et du monoxyde de carbone. La figure 6-2 montre une usine de gaz synthétique en Allemagne.



Figure 6.2 Usine de gaz synthétique en Allemagne.

6.3.1.4 La biomasse

L'hydrogène peut être produit à partir d'une variété de biomasse, telles que des résidus agricoles, du fumier, par pyrolyse et par procédé de gazéification.

Pyrolyse :

Un processus qui utilise des hautes températures pour décomposer une substance en solides, liquides, et gaz. Les substances résultantes peuvent être utilisées comme combustibles, ou autres produits chimiques utiles pour l'industrie chimique ou l'industrie des matériaux. Les matières qui sont traitées par procédé de pyrolyse sont le charbon, la biomasse, les déchets, les plastics et le caoutchouc.

Gazéification :

Une procédé chimique ou un traitement thermique qui transforme une substance en un gaz. Un procédé de gazéification est souvent utilisé pour transformer du charbon ou de la biomasse en un combustible liquide.

L'utilisation de la biomasse au lieu de combustible fossile pour produire un combustible gazeux ne produit pas de dioxyde de carbone. Malheureusement la production d'hydrogène à partir de biomasse est plus coûteuse que la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles. Les procédés biologiques qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de la biomasse comprend la fermentation, la digestion anaerobique et des techniques de processus métabolique. Ces procédés sont loin d'être concurrentiels avec les procédés conventionnels de production d'hydrogène. La figure 6-3 montre une utilisation simple de la biomasse.

6.3.1.5 Electrolyse de l'eau

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est utilisée lorsque l'on désire obtenir de l'hydrogène extrêmement pur, (voir chapitre 4 pour plus d'information). L'intérêt de la production d'hydrogène par électrolyse réside dans les grands avantages qu'elle représente pour l'environnement à condition que l'on utilise de l'électricité d'origine renouvelable pour alimenter l'électrolyseur. Si l'on utilise de l'électricité d'origine photovoltaïque, d'origine éolienne, de la biomasse, ou de l'électricité provenant d'une centrale hydraulique nous obtiendrons de l'hydrogène à émission zéro, une énergie totalement propre, zéro émission.

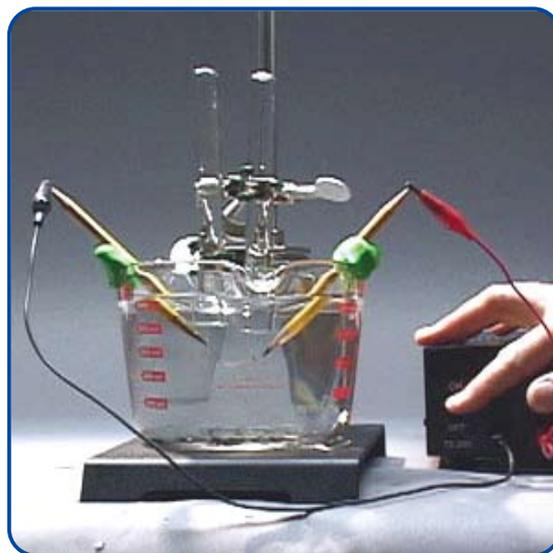


Figure 6-4 L'électrolyse de l'eau



Figure 6-3

Utilisation simple de la biomasse.

6.4 Technologies pour le stockage de l'hydrogène

Il existe beaucoup de systèmes de stockage de l'hydrogène dans le commerce de nos jours. Le moyen le plus souvent utilisé est le cylindre sous pression, qui est disponible en plusieurs capacités et pressions. D'autres moyens de stockage disponibles dans plusieurs domaines d'application sont décrits ci-dessous.

6.4.1 Grand réservoir souterrain

L'hydrogène peut être stocké en sous sol, dans des cavernes des aquifères, des puits de pétrole désaffectés ou des poches de gaz naturel épuisées. Ces grands réservoirs souterrains seront similaires aux réservoirs actuellement utilisés pour le gaz naturel mais probablement trois fois plus coûteux. La figure 6-5 montre une tête de puits au dessus d'une caverne de stockage d'hydrogène ainsi que les systèmes d'exploitation et de sécurité qui en font partie. Le stockage de l'hydrogène en souterrain ne pose pas de problèmes techniques. En fait ils existe de nombreux cas où l'hydrogène ou d'autres gaz sont stockés de cette manière. La ville de Kiel en Allemagne stocke son gaz de ville en souterrain; Gaz de France, la Compagnie française du gaz stocke du gaz naturel en souterrain. Imperial Chemical Industries en Grande Bretagne stocke de l'hydrogène dans des mines de sel à Teeside.



Figure 6-5
Tête de puits au dessus d'une caverne de stockage d'hydrogène et systèmes d'exploitation et de sécurité.

6.4.2 Réservoirs d'hydrogène pressurisés pour véhicules

Un réservoir pressurisé est utilisé pour presque toutes les utilisations de l'hydrogène. Il existe un nombre limité de matériaux permettant le stockage de l'hydrogène car il fragilise la plupart des matériaux utilisés pour le stockage d'autres gaz. Les meilleurs matériaux pour la construction de réservoirs sont les composites ultra-légers qui tolèrent des pressions de plus de 200 bars. Ils sont utilisés dans des prototypes de véhicules. Quelques réservoirs sont utilisés pour le stockage à long terme et d'autres sont conçus pour être échangés lors du remplissage à la station distributrice d'hydrogène. Il existe quatre types principaux de réservoirs à hydrogène :

1. Le type 1 est un réservoir métallique d'aluminium ou d'acier et il peut contenir une pression de 175 bars pour l'aluminium et de 200 bars pour l'acier.
2. Le type II est un réservoir en aluminium renforcé par de la fibre de verre ou de la fibre de carbone. La pression maximum qui peut être contenue par ce type de réservoir est de 263 bars pour la structure aluminium / fibre de verre ou acier/ fibre de carbone et de 299 bars pour fibre de verre / aramide.

3. Le type III de cylindres sont faits de matériau composite, fibre de verre / aramide ou fibre de carbone avec une pellicule métallique. La pression maximum pour ce modèle de cylindre est de 305 bars pour la structure aluminium / fibre de verre et 438 bars pour la structure aluminium / aramide.

4. Le type IV de cylindres sont construits en fibre de carbone avec une pellicule de polymère et ils sont capables de résister à des pressions de 661 bars et plus. Les premiers véhicules mis en circulation qui utilisent ce type de réservoir sont le Mercedes-Benz F-Cell, le Toyota FCHV et le HydroGen4.

La figure 6-6 montre la technologie des réservoirs à hydrogène et des images de réservoirs.

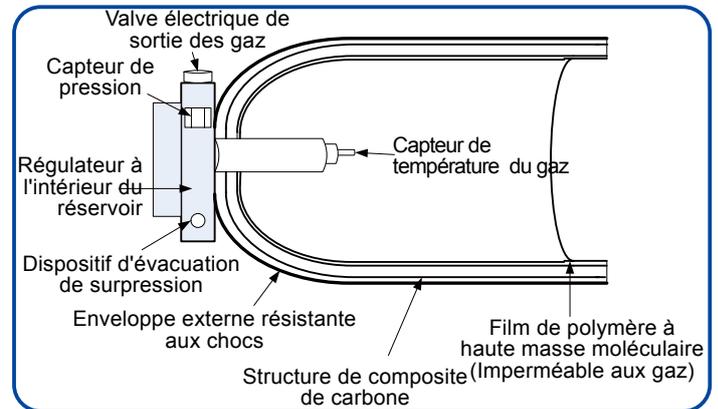


Figure 6-6 Réservoirs à hydrogène comprimé

6.4.3 Stockage de l'hydrogène liquide

Le stockage d'hydrogène liquide peut être avantageux pour le transport ou les applications portables. Le procédé de fabrication de l'hydrogène liquide demande une grande quantité d'énergie. L'hydrogène doit être comprimé et refroidi à une très basse température (20.28 degrés K, soit -252.87 degrés C). Le principal avantage de l'hydrogène liquide comparé à l'hydrogène sous forme de gaz comprimé est que le stockage sous forme liquide nécessite un moindre volume. Une fois que l'hydrogène est stocké sous sa forme liquide, il peut être stocké dans des réservoirs sous pression et isolés thermiquement. La figure 6-7 montre un réservoir d'hydrogène liquide.

L'hydrogène liquide est utilisé comme carburant de fusées pour les applications spatiales. Les fusées utilisent à la fois de l'hydrogène liquide pour la combustion



Figure 6-7 Prototype de réservoir d'hydrogène liquide.

dans les moteurs de fusées prévus pour ce carburant et pour alimenter les piles à combustible. Dans les moteurs, il refroidit les tuyères et d'autres parties du moteur avant d'être mélangé avec l'oxydant (oxygène liquide). Sa combustion dans les moteurs fusées produit de l'énergie, de l'eau, des traces d'ozone et du peroxyde d'hydrogène.

6.4.4 Réservoir à hydrures métalliques

Les réservoirs d'hydrogène à hydrures métalliques ont fait l'objet de nombreuses recherches durant les 25 dernières années. Plusieurs types d'hydrures métalliques ont été développés qui absorbent puis libèrent l'hydrogène à température ambiante et sous pression atmosphérique (20 degrés C et 1 atm). Le groupe des métaux légers dans le tableau périodique des éléments tels que Li, Be, Na, Mg, B et Al peuvent former une grande variété de composés d'hydrures métalliques. Ces composés sont extrêmement intéressants car ils sont légers et comportent un rapport élevé entre les atomes d'hydrogène et les atomes du métal, en général un rapport H/M = 2.



Figure 6-8 :
Cylindres de stockage d'hydrogène sous forme d'hydrure métallique..

Le stockage sous forme d'hydrures métalliques peut s'effectuer à des températures et des pressions modérées, ce qui représente un avantage pour la sécurité comparé au stockage sous forme de gaz comprimé ou sous forme liquide. Les hydrures métalliques offrent une densité de stockage supérieure à la densité obtenue par stockage sous forme de gaz comprimé ou de liquide. (6.5 atomes de H / cm³ contre 0.99 atome de H/cm³ et 4.2 atomes de H/cm³). C'est pourquoi le stockage sous forme d'hydrure métallique est souhaitable pour l'utilisation sur des véhicules. Le stockage sous forme d'hydrure métallique est illustré par la figure 6-8.

La plupart des hydrures métalliques sont soit trop stables soit trop instables à température ambiante et à la pression atmosphérique, mais certains d'entre-eux fonctionnent bien sous ces conditions. L'un des exemples est le palladium qui absorbe environ 900 fois son propre volume en hydrogène à température ambiante. Le composé résultant est l'hydrure de palladium. Le gaz hydrogène est ensuite libéré proportionnellement à la température et à la pression appliquées. Le palladium fut le premier matériau destiné au stockage de l'hydrogène pour les véhicules à pile à combustible. Cependant le coût du palladium découragea la poursuite des recherches et du développement. Les batteries conventionnelles rechargeables sont construites à l'aide d'un hydrure métallique très répandu, l'hydrure de nickel (NiMH) qui a largement remplacé le cadmium- nickel (NiCd). Les hydrures métalliques ont également trouvé une application dans les refroidisseurs cryogéniques à absorption, les batteries NiMH et les pompes à chaleur. Pour leur application dans les véhicules, les réservoirs à hydrures métalliques doivent pouvoir se charger et se décharger à des températures modérées, (25 – 100 degrés C), et doivent supporter de nombreux cycles charge/décharge.

L'hydrogène est capable de réagir avec de nombreux métaux et alliages, ce qui crée un grand choix d'hydrures métalliques pour concevoir des réservoirs. La formation d'un hydrure métallique implique que l'hydrogène gazeux adhère sur la surface du métal et que l'atome d'hydrogène diffuse à l'intérieur du métal. L'hydrogène est alors stocké dans les interstices de la structure des atomes lourds. Cette formation d'hydrure métallique produit de la chaleur (réaction exothermique) , et l'extraction de l'hydrogène du métal se produit sous certaines conditions de

température et de pression dépendantes de la nature du métal utilisé. Les hydrures métalliques satisfont aux besoins de nombreuses applications mais la plupart sont limités car ils ne sont capables de stocker que 2 % de leur poids en hydrogène.

Les hydrures métalliques doivent satisfaire tous les critères suivants afin d'être à même de restituer efficacement l'hydrogène :

- 1) ils doivent être capables de stocker une quantité significative d'hydrogène par unité de masse et de volume. Ceci détermine la réserve d'énergie.
- 2) Ils doivent être capables de libérer facilement l'hydrogène et doivent exiger une faible quantité d'énergie pour restituer l'hydrogène.
- 3) Ils ne doivent pas dégager une trop grande quantité de chaleur lors de la formation de l'hydrure métallique, donc durant le remplissage du réservoir.
- 4) Ils doivent résister à l'oxydation et l'humidité durant de longues périodes.
- 5) Ils doivent être économiques et offrir une grande sécurité durant les opérations de charge ou de décharge de l'hydrogène.

Quelques hydrures métalliques intéressants actuellement cours de recherches sont l'alanate ou l'amide de lithium. L'alanate (AlH_4), peut libérer davantage d'hydrogène que les hydrures métalliques conventionnels. Environ 3.7% de poids en hydrogène est libéré à une température au dessus de 33 degrés C, et un supplément de 1.8 % du poids libéré au dessus de 110 degrés C.

L'amide de lithium complexe est un autre hydrure métallique intéressant actuellement développé, Cette réaction permet le stockage de 6.5% du poids en hydrogène et présente un potentiel de 10 % du poids. Cette réaction a lieu à haute température, mais peut être réduite à 220 degrés C sous une plus haute pression et avec substitution par du magnésium.

6.4.5 Les nanofibres de carbone

De nouvelles méthodes de stockage de l'hydrogènes sont actuellement développées et elles présentent un potentiel pour atteindre de plus hautes densités que les méthodes actuelles. L'une d'elles est le stockage de l'hydrogène dans des nanotubes de carbone. Les nano tubes de carbone sont des structures qui présentent des caractéristiques électroniques et mécaniques surprenantes. Un nanotube de carbone est une structure hexagonale constituée par un réseau d'atomes de carbone qui sont souvent enroulées dans un cylindre. Ces structures sont souvent d'une section du nano mètre et de dizaines de microns de longueur.

Nanotube de carbone :

De grandes molécules de carbone pur longues et minces comme des tubes. Elles sont 100 fois plus résistantes que l'acier et ont 1/6 du poids de l'acier. Elles peuvent être utilisées comme conducteur d'électricité, de chaleur, pour le stockage de l'hydrogène et bien d'autres applications.

Les nanotubes de carbone sont potentiellement utilisables dans beaucoup d'applications grâce à leurs caractéristiques uniques. Les domaines d'applications sont les nano technologies, l'électronique, l'optique et la science des matériaux. Les nanotubes de carbone peuvent conduire le courant électrique, la chaleur et démontrent une extrême résistance mécanique. Leur structure est visible à l'aide d'un microscope électronique.

Microscope électronique :

Un type de microscope qui permet de très grands grossissements en utilisant des électrons pour illuminer un objet et créer une plus grande image. Ces microscopes peuvent atteindre des grossissements de 2 millions de fois. Les microscopes standard (à lumière) peuvent atteindre des grossissements de 2000 fois environ.

Sous un microscope électronique, le nanotube de carbone ressemble à un tapis fait de cordes de carbone. Ces cordes ont une section de 10 à 20 nano mètres et une longueur jusqu'à 100 microns.

Les nanotubes de carbone sont divisés en deux catégories : les nanotubes à paroi simple (SWNTs) et les nanotubes à parois multiples (MWNTs). Les nanotubes à simple paroi sont intéressants pour leurs propriétés électriques. Les nanotubes à paroi simple seront probablement utilisés pour réaliser la prochaine étape de miniaturisation en électronique. Les SWNTs peuvent remplacer les fils électriques métalliques à l'échelle de la micro électro mécanique. Leur principal handicap est que leur coût de production est encore un peu élevé; des méthodes de fabrication plus économiques doivent encore être mises au point.

Les nano tubes de carbone à parois multiples sont constitués de couches multiples de tubes de carbone pour former une structure cylindrique. Ces structures ont l'air de rouleaux de cylindres contenus dans un plus grand cylindre, ou des pages enroulées d'un journal, placées dans un cylindre.

6.4.5.1 Résistance des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont le matériau le plus résistant et le plus rigide découvert à ce jour. Cette haute résistance les rends utilisables pour augmenter la résistance ou la rigidité d'autres matériaux. Une étude récente parue dans la revue Nature montre que des structures de nanotubes sont probablement présentes dans l'acier à haute résistance. Ceci constitue peut-être l'un des facteurs qui ont fait la légende de la résistance des anciennes épées.

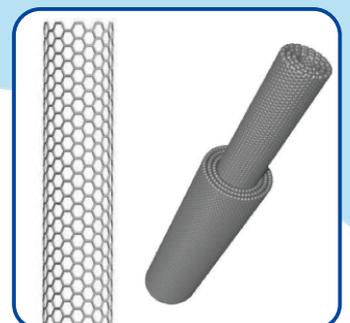
Grâce à leur extraordinaire résistance et leurs propriétés mécaniques supérieures, ces nanotubes peuvent être incorporés dans d'autres matériaux pour obtenir une meilleure

résistance et une incomparable robustesse. Une possibilité qui allierait plusieurs types d'innovations technologiques serait de mettre des molécules de nanotubes de carbone à l'intérieur d'une matrice de polymère pour constituer un matériau de résistance exceptionnelle. Un tel matériau permettrait de construire des réservoirs d'hydrogène pour des pressions extrêmes, pour construire des piles à combustible, pour des gilets ou des combinaisons pare-balles, des fusées, ou d'autres nouvelles technologies.

6.4.5.2 Stockage de l'hydrogène et autres applications

Les nanotubes de carbones ont trouvé de nombreuses applications dans le domaine de l'énergie. Le stockage de l'hydrogène, les panneaux solaires, de nombreuses possibilités à l'intérieur des piles à combustible, sont quelques exemples dans lesquels les nanotubes de carbone peuvent stocker de l'hydrogène, permettre aux électrons de circuler, ou améliorer un catalyseur. Les nanotubes de carbone peuvent stocker une faible quantité d'hydrogène à la température et sous la pression ambiantes. Les nanotubes qui sont envisagés pour le stockage de l'hydrogène sont les nanotubes à paroi simple et les nanotubes à parois multiples. Les scientifiques ne sont pas encore d'accord sur la quantité d'hydrogène qui pourra être stockée par les SWNTs et les MWNTs. La figure 6-9 montre le schéma d'un nanotube de carbone à simple paroi et d'un nanotube à parois multiples.

Figure 6-9 : Schéma représentant des nanotubes de carbone a) à simple paroi (SWNT), b) à parois multiples (MWNT).



De nouvelles cellules photovoltaïques ont été développées en utilisant un mélange de nanotubes de carbone et de fullerènes (Buckyballs) de carbone. Les fullerènes de carbone ont la faculté de piéger les électrons (voir chapitre 2), mais elles ne peuvent pas faire circuler les électrons. Comme les nanotubes de carbone sont des conducteurs électriques, ils permettent la circulation des électrons vers la charge du circuit. Les nanotubes de carbones ont été utilisés dans la recherche pour les piles à combustible. Des nanotubes de carbone ont été ajoutés au platine des électrodes, au catalyseur pour améliorer le rendement et les réactions au sein de la pile à combustible. Un autre domaine où les nanotubes de carbone pourraient améliorer les piles à combustible serait la possibilité de doper des tubes de carbone à l'aide d'azote pour réduire l'oxygène dans la pile à combustible. Si des lignes de tels nanotubes étaient disposées verticalement, ils auraient la faculté de réduire l'oxygène en solution alcaline plus efficacement que le platine.

6.5 Stations d'approvisionnement en hydrogène à travers le monde.

Le nombre de stations d'approvisionnement en hydrogène à travers le monde est montré par la figure 6-10.. Une lente augmentation du nombre de ces stations a eu lieu dans les pays figurant sur la liste depuis 1990. Certains pays tels que l'Allemagne vont largement augmenter le nombre de ces stations dans les cinq prochaines années. Cette augmentation est due à un certain nombre de facteurs :

- la plupart des constructeurs de véhicules ne veulent pas lancer leur production pour un marché de niche
- les constructeurs de véhicules aussi bien que les fournisseurs de carburant ont besoin d'une production de masse pour être rentables
- les utilisateurs ou clients ne veulent pas dépendre d'un carburant qui n'est pas largement disponible.
- Il existe un marché de voitures et de carburant alternatifs dans des pays comme le Brésil et l'Argentine. Le Brésil utilise l'éthanol et l'Argentine utilise le gaz naturel. Les leçons apprises lors de l'introduction de nouveaux carburants montrent que une expansion rapide est le meilleur moyen de gagner l'acceptation de la part des clients pour une nouvelle technologie.

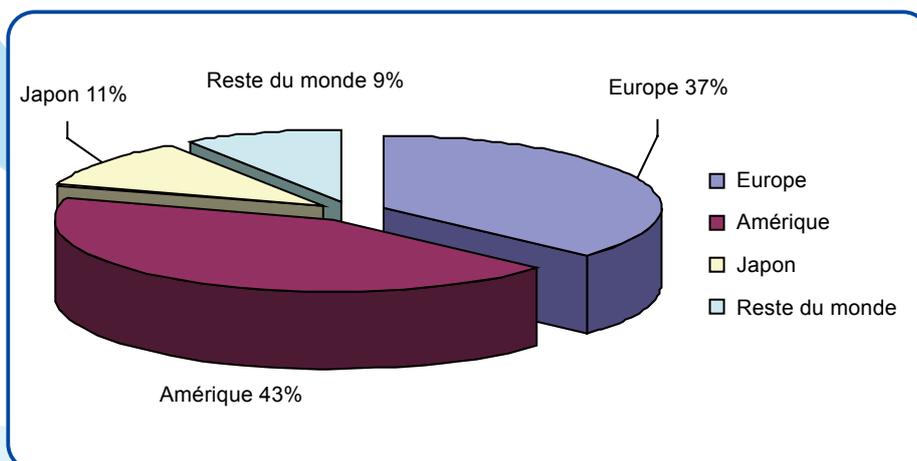


Figure 6-10 : Stations d'approvisionnement en hydrogène dans le monde

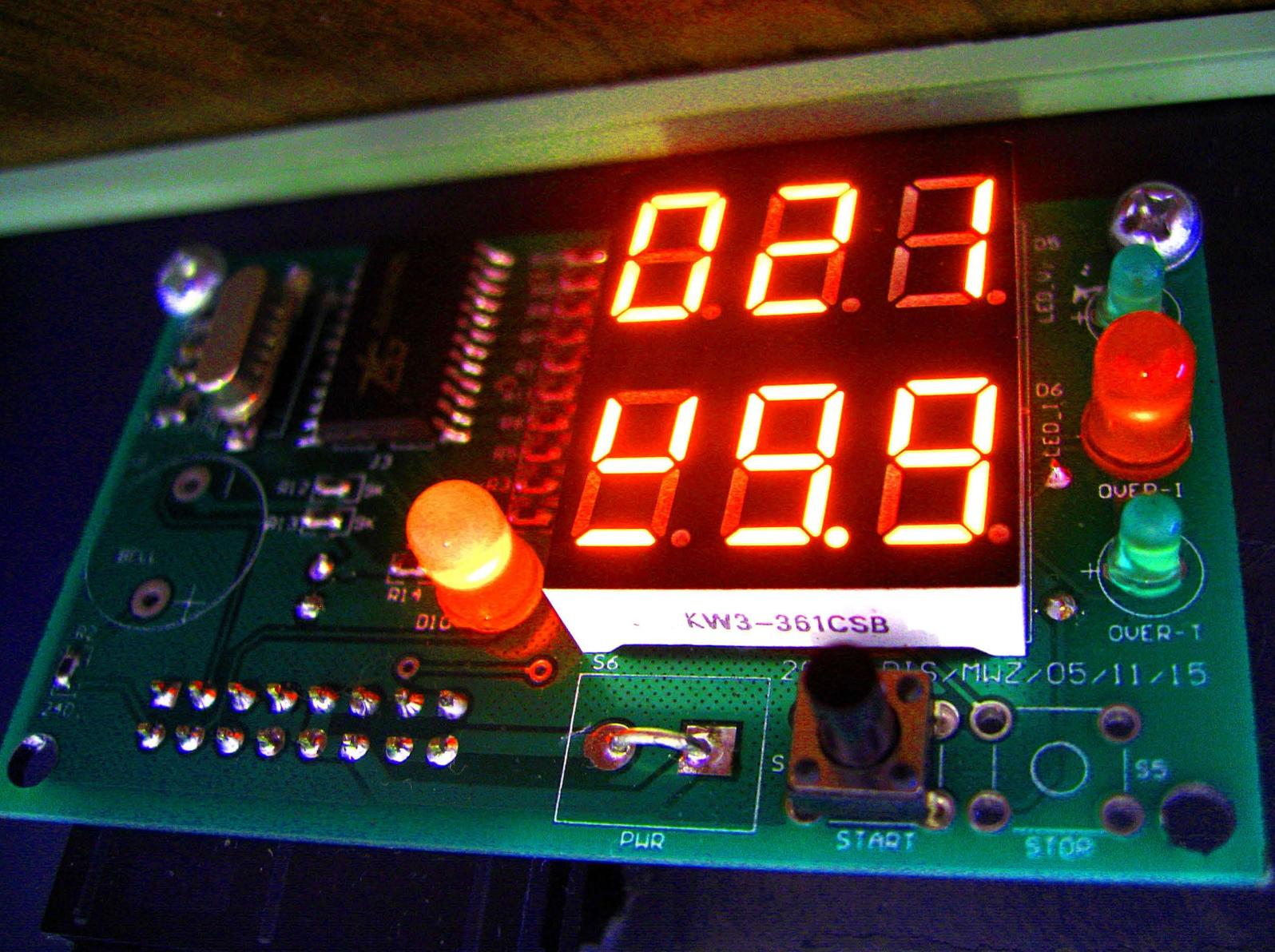
Les Etats-Unis possèdent le plus grand nombre de stations d'approvisionnement en hydrogène. La plupart de ces stations des Etats-Unis se situent en Californie. L'Allemagne arrive en seconde place, suivie par le Japon. Cette distribution correspond avec celle des d'investissement en recherche et développement dans le domaine des piles à combustible et des infrastructures de l'hydrogène. La figure 6-11 montre une station d'approvisionnement en hydrogène en Colombie Britannique, Canada.



Figure 6-11 :
Station de distribution d'hydrogène
en Colombie Britannique, Canada.

6.6 Conclusion

L'hydrogène possède de multiples caractéristiques uniques qui le rendent favorable comme combustible pour les applications stationnaires, les transports ou les appareils portables. Il existe de nombreuses manières d'utiliser, de stocker, notamment sous forme de gaz comprimé, de liquide, ou d'hydrure métallique, de nanotubes de carbone. Plusieurs procédés sont aussi disponibles pour la production de l'hydrogène. Les méthodes les plus répandues sont : le reformage de vapeurs, le reformage interne, l'oxydation partielle, le reformage de méthanol. L'utilisation de l'électricité pour pratiquer l'électrolyse de l'eau ou par des procédés biologiques. Le but ultime de la technologie des piles à combustible est de consommer de l'hydrogène pur produit par électrolyse de l'eau, en utilisant de l'électricité d'origine renouvelable à la place des combustibles fossiles.



Chapitre 7

Éléments d'électronique de puissance

7.1 Introduction

7.2 Notions d'électronique

7.3 Electronique analogique et électronique numérique (digitale)

7.4 La loi d'Ohm

7.5 Histoire de l'électronique

7.6 Electronique de puissance et énergies renouvelables

7.7 Types de semiconducteurs de puissance

7.8 Convertisseurs et systèmes de puissances

7.9 Conclusion

7.1 Introduction

L'électronique de puissance constitue une partie essentielle de la plupart des appareils que la plupart d'entre-nous utilisons quotidiennement. Conduire une voiture, utiliser un ordinateur, converser au téléphone, toutes ces activités impliquent de l'électronique de puissance. Pour commencer à comprendre l'électronique de puissance, une bonne compréhension de l'électronique de base est nécessaire. Les notions essentielles qui doivent être acquises sont :

- les électrons, les protons, les neutrons
- l'électricité
- les circuits ouverts, les court-circuits, la mise à terre
- les tests et mesures de base
- les circuits

A la base de l'électricité se trouvent les électrons et la majorité des études qui ont conduit à notre compréhension de comment les électrons font fonctionner les machines et traitent l'information furent effectuées durant le 20^{ème} siècle. L'électronique de puissance est très importante pour les énergies renouvelables car elle permet de transformer l'énergie électrique obtenue de sources renouvelables en une énergie électrique compatible et utilisable par le réseau de distribution d'électricité. L'électronique de puissance contrôle le flux de courant électrique à par des dispositifs dédiés qui sont décrits en détail dans les sujets avancés de ce chapitre. Quelques-unes des utilisations de l'électronique de puissance dans les appareils sont la régulation de tension, les amplificateurs audio, les contrôleurs de moteurs, les allumages électroniques. L'électronique de puissance permet également de convertir du courant continu (DC) en courant alternatif (AC), permet d'augmenter ou de réduire la tension dans un système, de réguler la puissance qu'un appareil délivre, ou de produire la forme d'onde ou la fréquence d'oscillation souhaitée pour contrôler un moteur ou autre dispositif.

7.2 Notions d'électronique

L'électricité provient de particules d'atomes. Les trois principales particules des atomes sont les protons, les neutrons et les électrons. Toute matière que vous pouvez observer est faite d'atomes. La structure d'un atome ressemble à celle du système solaire où la terre orbite autour du soleil. Les électrons sont comme la terre, et le « soleil » des atomes est le noyau. Le noyau atomique est constitué de protons et de neutrons. Les électrons portent une charge électrique négative, les protons portent une charge positive et les neutrons sont neutres électriquement. La Figure 7-1 montre l'illustration des électrons et du noyau d'un atome.

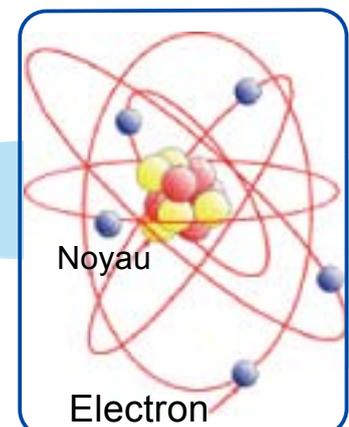


Figure 7-1 Illustration d'un atome.

Il existe 118 types d'atomes dans l'univers comme le montre le tableau périodique des éléments (figure 7-1-1)

La combinaison des atomes constitue chacun des différents éléments de l'univers. La classification des atomes dans le tableau des éléments est effectuée en fonction de la disposition et du nombre d'électrons, de protons et de neutrons. La position de l'élément dans le tableau dépend du « numéro atomique » de l'élément, à savoir du nombre de protons que compte son noyau. Il dépend ensuite de la disposition de ses électrons. Un atome stable comprend toujours un nombre égal de protons et d'électrons.

Lorsqu'un atome perd un électron, il possède plus de protons que d'électrons et cet atome est dit (chargé positivement). Un atome qui gagne un ou des électrons est dit « négativement chargé ». Selon la structure et le type de matériau, les électrons peuvent passer d'un atome à l'autre et ceci provoque un courant électrique. Lorsqu'un nouvel électron s'attache à un atome, un autre électron est libéré et ce phénomène se reproduit de proche en proche, d'un atome au prochain.

Pour produire de l'électricité les scientifiques ont trouvé le moyen de créer de grandes quantités d'atomes chargés positivement ou négativement. Ces différentes catégories d'atomes possèdent de grandes forces d'attraction les uns vers les autres. Le déplacement des électrons produit un courant électrique. Lorsqu'un électron quitte un atome, cet atome devient chargé positivement, Les atomes, par nature ne restent pas chargés positivement ou négativement car ils sont alors instables. Ils doivent retrouver un état stable. Pour retrouver un état stable l'atome chargé positivement attire un « électron libre ».

L'électricité est conduite plus facilement dans certains types de matériaux. Si les atomes à l'intérieur d'un matériau retiennent leurs électrons avec force sur leurs orbites, ce matériau ne sera pas un conducteur d'électricité, il est alors appelé un isolant. Les matériaux isolants les plus connus sont le plastique, certains tissus, le verre, etc. Les matériaux dont les atomes laissent facilement circuler les électrons sont dits : conducteurs d'électricité. Des exemples de bons conducteurs sont le cuivre, l'aluminium, le fer, l'acier. La faculté pour un matériau de conduire l'électricité s'appelle la conductance, mais pour des raisons pratiques c'est la faculté inverse qui est normalement mesurée, à savoir la résistance, soit l'aptitude d'empêcher le courant de circuler. La résistance ne dépend pas seulement de la faculté de ce matériau à laisser circuler le courant, mais également de la distance à parcourir, de la longueur du conducteur.

Tableau périodique des éléments

1A	1											2	8A						
	H												He						
	1.00794												4.002602						
	3	4	Non métaux									5	6	7	8	9	10		
	Li	Be	Métaux de transition									B	C	N	O	F	Ne		
	6.941	9.012182	Métaux alcalins									10.811	12.0107	14.0067	15.9994	18.9984032	20.1797		
	11	12	Métaux alcalins			Actinides			Métaux alcalino-terreux			Métaux pauvres							
	Na	Mg	Métalloïdes			Gaz nobles			Halogènes										
	22.989769	24.3050	Métalloïdes			Gaz nobles			Halogènes										
	19	20	3B	4B	5B	6B	7B	8B		1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	8A		
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	39.0983	40.078	44.955912	47.867	50.9415	51.9961	54.938045	55.845	58.933195	58.6934	63.546	65.38	69.723	72.64	74.92160	78.96	79.904	83.798	
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	85.4678	87.62	88.90585	91.224	92.90638	95.96	[98]	101.07	102.90550	106.42	107.8682	112.411	114.818	118.710	121.760	127.60	126.90447	131.293	
	55	56	57-71		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba	Lanthanides		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	132.9054519	137.327			178.49	180.94788	183.84	186.207	190.23	192.217	195.084	196.966569	200.59	204.3833	207.2	208.98040	[209]	[210]	[222]
	87	88	89-103		104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
	Fr	Ra	Actinides		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
	[223]	[226]			[267]	[268]	[271]	[272]	[270]	[276]	[281]	[280]	[285]	[284]	[289]	[288]	[293]	[294]	[294]
	Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			138.90547	140.116	140.90765	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92535	162.500	164.93032	167.259	168.93421	173.054	174.9668		
	Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
			[227]	232.03806	231.03588	238.02891	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]	[262]		

Figure 7-1-1 : Le tableau périodique des éléments

7.2.1 Les circuits

En électronique, les électrons sont « collectés » à un endroit puis se déplacent le long de matériaux électro-conducteurs. Les électrons ne se libèrent pas des atomes automatiquement, par eux-mêmes ! Ils sont liés à leurs atomes et aux molécules par différents types de forces. Les circuits électriques procurent un environnement permettant de collecter puis de faire circuler les électrons d'un endroit à l'autre, d'un composant électronique à l'autre. Lorsqu'un circuit est mis en fonction, l'interrupteur agit comme un pont qui permet au courant électrique de circuler. La figure 7-2 représente un circuit simplifié.

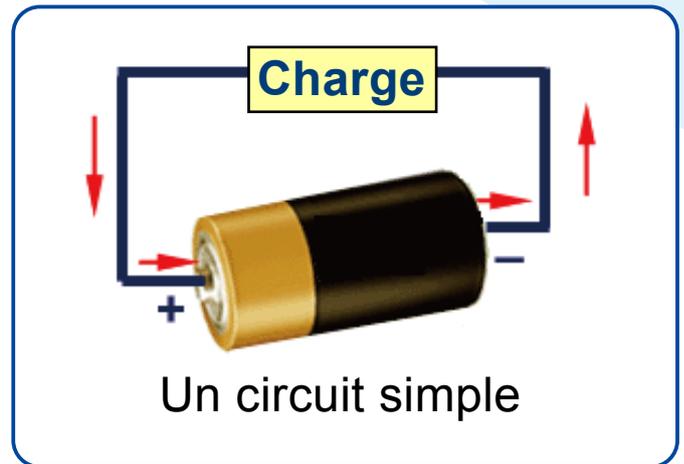


Figure 7-2 Circuit électrique simple

Dans un circuit, le nombre d'électrons qui circulent peut être influencé, il peut être augmenté ou diminué. Ceci peut être obtenu de plusieurs manières, en utilisant différents types de matériaux, de composants électroniques, ou de dispositifs. Lorsque les électrons se déplacent à travers un matériau, ils peuvent entrer en collision avec des atomes le long du chemin, ce qui les ralentit, ou peut même inverser leur sens de marche. Lorsque ces collisions se produisent en nombre, l'énergie électrique perdue se transforme en chaleur.

Les circuits à l'intérieur des appareils électroniques sont constitués de composants qui assument des fonctions différentes et qui sont reliés par des câbles ou autres conducteurs de courant. La fonction accomplie par un circuit est déterminée par la combinaison de composants standards qui le constituent. Ces composants peuvent être assemblés de multiples façons pour obtenir une infinité de fonctions différentes.

Les circuits imprimés sont constitués par un isolant parcouru de matériau conducteur intégré dans la structure isolante. Originellement, avant l'utilisation de circuits imprimés on utilisait des fils conducteurs pour relier les différents composants entre-eux. Mais depuis les années 1960, les circuits imprimés furent utilisés, puis en 1980 les montages en surface « surface mount » sont apparus. Cette technique permet d'augmenter considérablement la densité des circuits et l'automatisation de l'insertion des composants intégrés sur les plaques de circuits imprimés. Les composants sont maintenant reliés par des pistes ou cheminements de cuivre noyées à la surface des plaques de circuit imprimés. Ces cheminements de cuivre sont soit insérés ou alors la carte plaque originale est entièrement recouverte d'une feuille de cuivre qui est ensuite érodée chimiquement pour créer les pistes conductrices selon un procédé photographique puis chimique, comme en imprimerie, d'où le nom de circuit imprimé. Quelques composants d'un circuit type sont représentés par la figure 7-3.

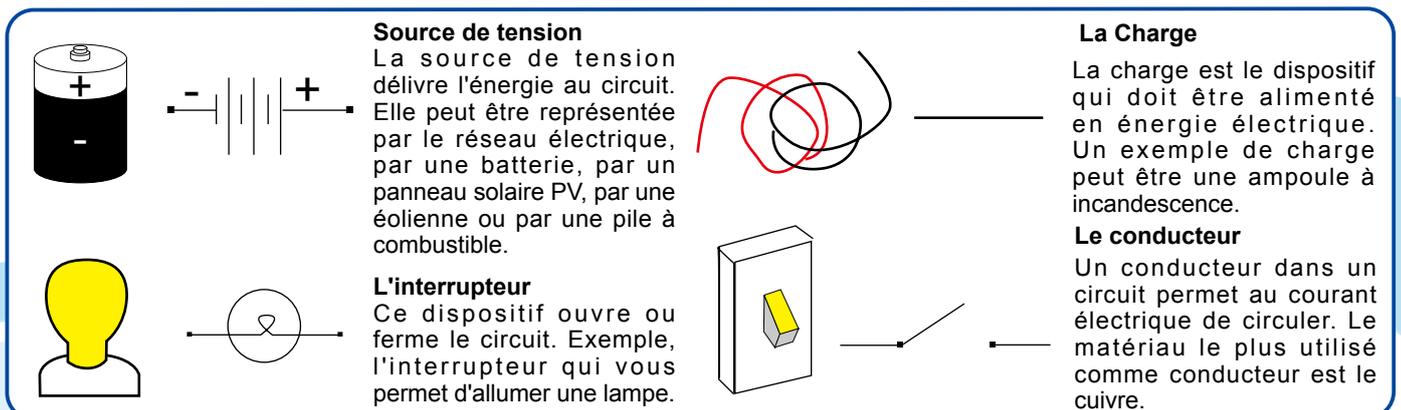


Figure 7-3 : Composants courants d'un circuit.

7.2.2 Termes courants utilisés en tests et mesures électroniques

Les termes courants utilisés en tests et mesures électroniques sont « tension en circuit ouvert » (OCV), mise à terre, court-circuit. Une caractéristique importante d'un composant de puissance est sa tension en circuit ouvert (OCV) ou voltage en circuit ouvert.

Tension en circuit ouvert (OCV)

Il s'agit de la différence de potentiel (voltage ou tension) aux bornes d'un composant lorsqu'aucune charge n'est connectée.

Cet état implique qu'aucun courant électrique ne circule entre les bornes de ce composant, bien que du courant puisse circuler à l'intérieur de ce composant ou de ce sous-ensemble. La tension en circuit ouvert d'une pile à combustible ou d'un panneau photovoltaïque, ou d'une batterie est souvent indiquée en fonction de certaines conditions, température, etc.

Mise à terre :

La mise à terre ou « masse », est une référence connue d'un circuit électrique en fonction de laquelle les autres tensions sont mesurées. Il s'agit aussi d'une voie de retour pour le courant électrique.

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles les circuits électriques sont connectés à la terre (masse). Dans bien des appareils électriques les parties métalliques externes, qui peuvent être au contact des personnes qui les utilisent sont connectées à la terre, ce qui prévient leur mises sous tension électrique en cas de défaut survenant dans l'appareil. Une connexion à la terre limitera la tension entre les circuits de puissance et la terre car un courant intense serait alors produit et activerait le disjoncteur ou le fusible de protection, interrompant le circuit. Les connexions à la terre permettent aussi d'éviter des décharges statiques lors des interventions de réparation ou d'entretien des appareils électroniques.

Le court-circuit :

Un court circuit intervient lorsque le courant suit un autre cheminement ou une autre direction que celle prévue.

Il est courant d'utiliser le terme de court-circuit pour évoquer une mal-fonction dans un circuit électrique. Un court-circuit représente une importante diminution de la charge résistive ou une résistance égale à zéro. Une telle situation provoque une forte augmentation du courant, peut produire des dommages au circuit, une émission importante de chaleur, le feu ou une explosion.

7.2.3 Tests de base

L'un des équipements de tests les plus utilisés en mesures électroniques est le multimètre.

Multimètre :

Un multimètre est un appareil capable de mesurer un courant, une résistance, une tension AC ou DC, soit des Ampères, des Ohms ou des Volts.

Pour utiliser un multimètre, il convient tout d'abord de le mettre en marche, ensuite, avant de placer les sondes aux endroits voulus du circuit il est nécessaire de tourner le commutateur du multimètre sur la position correspondante au type de mesure à effectuer et l'échelle de valeur attendue. En cas de doute concernant les valeurs attendues, placer le commutateur sur les plus grandes valeurs possibles, puis réduire l'échelle si nécessaire pour obtenir une lecture plus précise de la valeur.

7.2.3.1 Mesure de tension (Volts)

Pour mesurer une tension (voltage) placer le commutateur du multimètre sur le type de tension DC ou AC à mesurer et sur l'échelle correspondant à la valeur attendue afin de s'assurer que l'appareil ne sera pas endommagé ou surchargé. Installer les sondes dans les prises correctes du multimètre. Les multimètres possèdent normalement deux sondes, une rouge (positive) et une noire (négative).. La rouge doit être insérée dans la prise rouge + et la noire dans la prise noire - . La sonde positive sera ensuite branchée sur l'élément du circuit à mesurer où l'on attend une tension positive et la sonde négative sur l'élément du circuit où l'on attend une valeur négative ou la masse. Il convient ensuite de mettre le circuit en fonctionnement pour obtenir la valeur de la mesure souhaitée. Si les sondes devaient être inversées, on lirait une valeur négative au lieu d'une valeur positive sur l'écran du multimètre.

7.2.3.2 Mesure d'un courant (Ampères)

Pour mesurer un courant à l'aide d'un multimètre, il convient d'insérer les sondes dans les prises correspondantes du multimètre. Il est ensuite nécessaire de placer le commutateur

du multimètre sur la fonction courant puis de choisir l'échelle de valeur correspondant à la mesure attendue. En cas de doute, choisir la plus grande échelle puis réduire les valeurs afin d'obtenir une lecture plus précise si nécessaire. Choisir une échelle sur laquelle le premier chiffre avant le point décimal est différent de zéro, ce qui permet d'obtenir le plus grand nombre possible de décimales, donc de précision.

7.2.3.3 Mesure d'une résistance

Pour mesurer une résistance à l'aide d'un multimètre, insérer les sondes dans les prises correspondantes du multimètre, puis mettre le multimètre en marche. Pour obtenir un résultat précis dans la mesure de résistance il convient de mesurer les éléments lorsqu'ils sont débranchés du circuit. Si la mesure de la résistance d'un composant est faite alors que ce composant est branché dans le circuit, les éléments voisins influenceront la mesure. Le circuit mesuré ne doit également pas être sous tension lors de la mesure de résistance. Tout courant circulant dans le circuit au moment de la mesure fausserait la mesure, et si le courant est assez intense, le multimètre serait endommagé. Attention également à ne pas toucher le circuit ou ses composants durant les mesures car celles-ci seraient faussées, sans compter le risque d'électrocution !

7.3 Electronique analogique et électronique numérique (digitale)

Il existe deux manières de traiter les signaux, de représenter les valeurs ou de les mémoriser en électronique : la méthode analogique et la méthode numérique ou digitale. Ces méthodes ont beaucoup d'aspect en commun, notamment, toutes deux peuvent traiter des tensions continues (DC) ou des tensions alternatives (AC), qui seront expliquées dans ce chapitre. La méthode analogique de traitement des signaux affiche des courbes, des formes d'ondes, des lectures sur des appareils à cadrans et aiguilles. La méthode numérique convertit les valeurs des paramètres électriques en nombres qui sont affichés sur des écrans numériques et qui sont en mesure de reconstituer les formes d'ondes ou les oscillations des signaux pour afficher des graphiques si nécessaire. Les équipements électroniques fonctionnent selon l'une ou l'autre méthode. L'émetteur radio conservait les signaux sous formes analogique, comme elles lui provenaient de la prise de son, puis les transformait sous forme modulée en ondes électromagnétiques. Les anciens postes de radio recevaient par leur antennes les ondes radio amplifiaient et filtraient les fréquences porteuses pour reconstituer les sons et les diffuser par le haut parleur. Dans tout ce procédé les appareils ne traitaient que des signaux sous forme ondulatoire, évoluant en continu, donc analogiques. Un appareil numérique transforme les sons provenant des microphones en des groupes de chiffres codés puis transmet ces séries de chiffres sous forme d'onde (ou sous formes de paquets de chiffres par internet) puis ces ondes captées par le récepteur sont reconverties en séries de chiffres pour être traitées et finalement converties en oscillations pour produire des sons dans le haut parleur. Un autre exemple de technique analogique est une caméra de cinéma traditionnelle qui capte la lumière à travers l'objectif puis par l'obturateur transfère les images sur une pellicule de plastic traitée chimiquement pour stocker les images. Dans une caméra numérique, l'image impressionne une cellule électronique faite d'une matrice de points multiples dont chacun capte une partie de l'image sous forme de densité lumineuse. Ces multiples valeurs de densité lumineuses sont alors converties en séries de chiffres codés. Ces séries de chiffres sont ensuite traités par un ordinateur pour être retransformés en images et visionnés sur un écran ou imprimés par une imprimante numérique. La plupart des appareils modernes font appel à la technique numérique. La figure 7-4 montre un exemple de caméra photographique numérique moderne et une ancienne caméra analogique.



Figure 7-4

- a) exemple de caméra numérique moderne et
- b) une caméra analogique.

7.4 La loi d'Ohm

Les lois de bases de l'électricité et les circuits élémentaires furent découverts au début des années 1800 par un physicien Allemand, Georg Simon Ohm et elles sont connues sous le nom de lois d'Ohm. La loi d'Ohm est une équation mathématique qui explique la relation entre tension (Volts) courant (Ampères) et résistance (Ohms). Elle s'exprime de la manière suivante :

$$V = I \times R$$

Où, V est la tension mesurée en Volts, I est le courant mesuré en Ampères et R est la résistance mesurée en Ohms. La tension ou voltage est la mesure de l'activité des électrons libres et la force de « pression » à travers la résistance. La tension pousse les électrons le long du circuit. Le courant correspond à la quantité de charges qui circulent le long du circuit à un temps donné. Il est comparable au débit dans un circuit hydraulique. La résistance représente les frottements ou un étranglement dans un circuit hydraulique.

De cette première expression de la loi d'Ohm, on peut déduire que :

$$I = V/R \text{ ou que } R = V/I$$

Une autre mesure de l'activité des électrons dans un circuit est la puissance. La puissance est la mesure de la quantité de travail qui peut être accompli en un temps donné. Par exemple si l'on désire élever un poids, plus haut on voudra le hisser, ou plus il sera lourd, plus il faudra fournir de travail pour l'élever. La puissance mesure la capacité de fournir un certain travail en un temps donné. Elle s'exprime par l'équation suivante :

$$P = I^2 \times R = \frac{V^2}{R} = I \times V$$

Où P est la puissance exprimée en Watts, I est le courant exprimé en Ampères, R est la résistance exprimée en Ohms.

7.5 Histoire de l'électronique

Au début des années 1900, l'invention du tube électronique à deux électrodes en 1904 par John Ambrose Fleming, celle du tube à trois électrodes en 1906 par Lee de Forest signifia le début de l'industrie électronique. Ces inventions permirent le développement des premiers postes de radio vers 1920. Deux sociétés mirent la radio à disposition du grand public : Radio Corporation of America (RCA) et une association entre General Electric (GE), Westinghouse et AT&T et Telefunken (une joint venture entre Siemens et AEG). Dès la fin des années 1920 la vente des postes de radio atteignait la somme de 300 millions \$. Durant la deuxième guerre mondiale, Telefunken se concentra sur d'autres activités , ce qui permit a RCA de devenir seule responsable de la commercialisation les tubes de télévision sur le plan mondial. Lorsque John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley inventèrent le transistor en 1947, l'industrie de l'électronique fit une avancée importante. Les transistors étaient bien plus petits, plus légers et moins gourmands en énergie que les tubes à vide. Une période de miniaturisation des appareils électronique commença. L'invention des circuits intégrés vers les années 1950 permit l'intégration de plusieurs circuits ou composants en un seul. Le développement des techniques de traitement des signaux analogiques s'accéléra et la densité de composants intégrés dans une seule puce électronique augmenta.

Une entreprise unique prit l'initiative, le « leadership » de l'industrie informatique : IBM . IBM domina l'industrie des ordinateurs en terme de chiffre d'affaires et en terme d'offre de produits. Dans les années 1970, des entreprises Japonaises devinrent compétitives en construisant et en mettant sur le marché des ordinateurs compatibles avec les modèles de IBM. IBM domina le domaine du traitement des données bien avant l'arrivée des ordinateurs. Depuis 1914, IBM transforma le travail administratif en introduisant les systèmes à cartes perforées. Dans les années 1920, IBM commercialisait ses systèmes électro-mécaniques de traitement des données. L'un de ses concurrents, Remington Rand fut le premier à introduire des machines à écrire pour le traitement des données; mais dans les années 1930, sa part de marché ne dépassa jamais 15 %. Après la seconde guerre mondiale, Remington Rand acquit deux des quatre projets pour le développement de calculateurs analytiques à grande vitesse pour des besoins militaires. Il introduisit le UNIVAC, le premier ordinateur du marché. IBM le suivit de près avec son propre ordinateur.

Le premier produit semi-conducteur de puissance apparut en 1952, ce fut la diode de puissance développées par R.N. Hall. Cette diode de puissance utilisait le Germanium pour sa construction. Elle traitait des tensions de 200 Volts et un courant de 35 Ampères. Le thyristor fut inventé en 1957 et il permettait de supporter des tensions inverses très élevées ainsi que des grandes intensités de courant. Les premiers transistors bipolaires furent introduits dans les années 1960 et ils permirent de dépasser quelques limitations rencontrées avec les thyristors parce qu'ils étaient commutés à l'aide d'un signal.

Les semi-conducteurs de puissance du type MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor) furent mis sur le marché dans les années 1970 par l'amélioration de la technologie des semi-conducteurs à oxyde métallique originalement développée pour les circuits intégrés. Ces composants permirent d'atteindre de plus hautes fréquences de commutation que les transistors bipolaires mais furent seulement disponibles pour les relativement basses tensions. Les composants électroniques permettent de diriger et de gérer les flux d'électrons à l'intérieur d'un circuit afin de traiter des signaux, de stocker ou de traiter des informations. L'électronique est l'étude du flux des électrons et des composants qui permettent d'influencer ces flux et de les gérer dans les circuits, afin de pouvoir traiter des signaux, stocker ou traiter des données.

7.6 Électronique de puissance et énergies renouvelables

Les systèmes d'alimentation en énergie hybrides sont idéalement placés pour devenir la solution qui alimentera en énergie les équipements portables et les systèmes de production stationnaires. Les systèmes d'alimentation en énergie hybrides comptent de nombreuses variantes et configurations qui leur permettront la tension et le courant nécessaires pour tout appareil ou machine. Un système hybride peut comporter une installation photovoltaïque, une éolienne, un électrolyseur, des piles à combustible, des batteries, des ultra capacités ou d'autres composants de puissance.

Les systèmes hybrides peuvent être adaptés en fonction de leur électronique de puissance pour des hautes ou des basses tensions et pour une large gamme des puissances. Des panneaux solaires photovoltaïques peuvent être utilisés pour transformer l'énergie solaire en électricité lorsque le soleil est bien présent et de l'énergie provenant d'éoliennes lorsque le vent souffle avec une force suffisante. L'énergie électrique produite peut ensuite être stockée dans des batteries ou utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cet hydrogène sera stocké pour être transformé en énergie électrique par une pile à combustible lorsque l'on en aura besoin et à l'endroit où l'on en aura l'utilité. Cet hydrogène pourra notamment être utilisé par des piles à combustible qui alimentent des véhicules ou des appareils portables. L'électronique de puissance joue un rôle déterminant car elle permet la stabilisation des tensions, l'élévation ou la réduction des tensions ou des puissances requises, de gérer les creux et les pointes de demande en énergie.

L'énergie électrique produite par un système ne possède pas toujours les caractéristiques nécessaires pour alimenter une machine ou un appareil. Bien des applications, telles que le réseau de distribution électrique utilisent du courant alternatif (AC), certains appareils tels que les téléphones cellulaires nécessitent du courant continu (DC). L'énergie électrique produite par une pile à combustible est faite de courant continu (DC), sa tension varie en fonction du nombre de cellules assemblées en série que contient la pile. Si l'appareil ou le circuit que l'on veut alimenter à l'aide de cette pile à combustible nécessite du courant alternatif, un onduleur sera nécessaire pour effectuer cette transformation. Bien des systèmes basés sur l'énergie renouvelable exigent un certain temps pour s'adapter à des variations de demande de puissance. Ils possèdent également des délais de mise en route. C'est pourquoi, les systèmes d'approvisionnement en énergie basés sur des sources renouvelables nécessitent des dispositifs permettant de résoudre les problèmes posés par une demande intermittente en énergie ou pour s'adapter en fonction de variations de cette demande dans le temps. Des convertisseurs peuvent être utilisés pour réguler la quantité d'énergie injectée dans un circuit. La figure 7-5 présente un schéma de principe montrant une pile à combustible et des équipements d'électronique de puissance requis pour relier cette pile au réseau de distribution d'électricité.

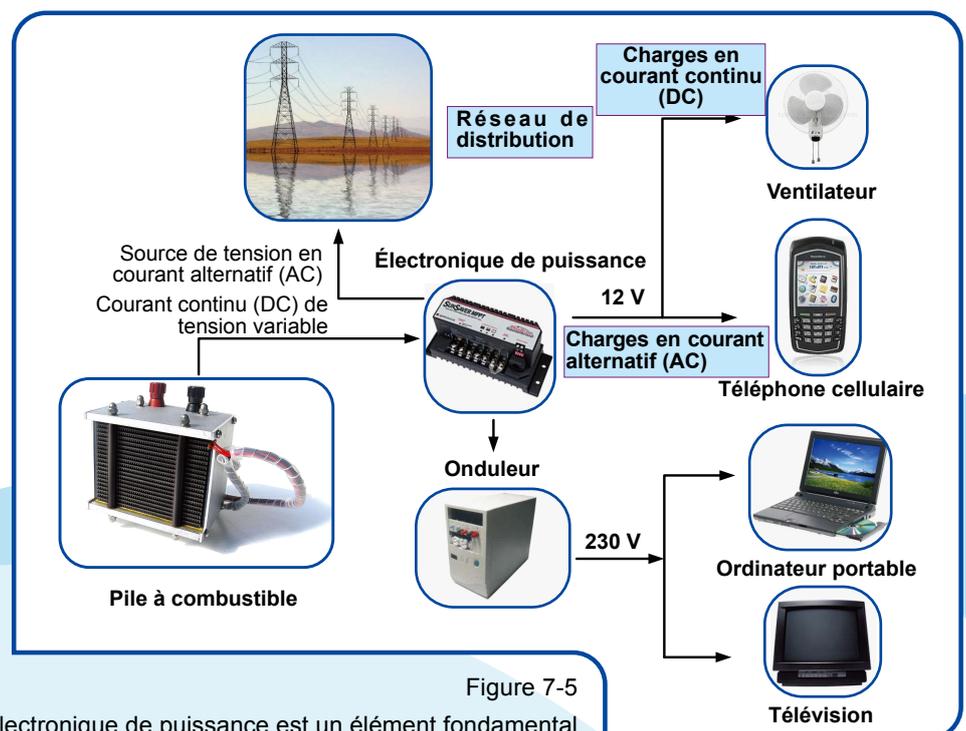


Figure 7-5

L'électronique de puissance est un élément fondamental

La plupart des équipements qui produisent de l'électricité d'origine renouvelable ne peuvent fournir qu'une certaine tension (Volts) et qu'une certaine intensité de courant (Ampères), dépendant de la charge du circuit, vers le convertisseur de puissance. Le convertisseur de puissance devra donc rendre compatibles le courant provenant d'une pile à combustible (par exemple) afin d'alimenter un appareil électrique qui nécessite une autre tension ou une autre forme de courant. La figure 7-6 Un convertisseur DC – DC est utilisé pour élever la tension qui alimente un onduleur. Ce convertisseur DC – DC, en plus d'élever la tension assure également la régulation de la tension d'alimentation de l'onduleur et isole (sépare) les circuits basse et haute tension.

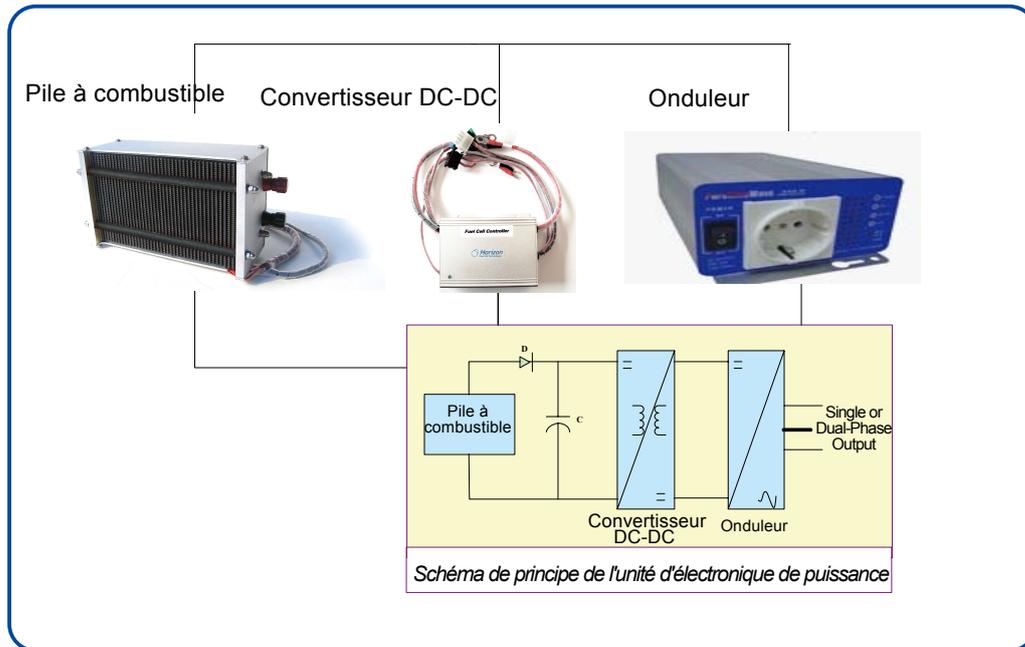


Figure 7-6

Diagramme fonctionnel d'un ensemble pile à combustible et électronique de puissance associée.

L'exemple d'un système hybride d'alimentation en énergie est représenté par la figure 7-7. Cet ensemble, un chargeur de batteries lithium-ions alimenté par une pile à combustible, comprend les éléments suivants : la pile à combustible, la batterie lithium-ions, une alimentation stabilisée en tension, et un chargeur de batteries intelligent.

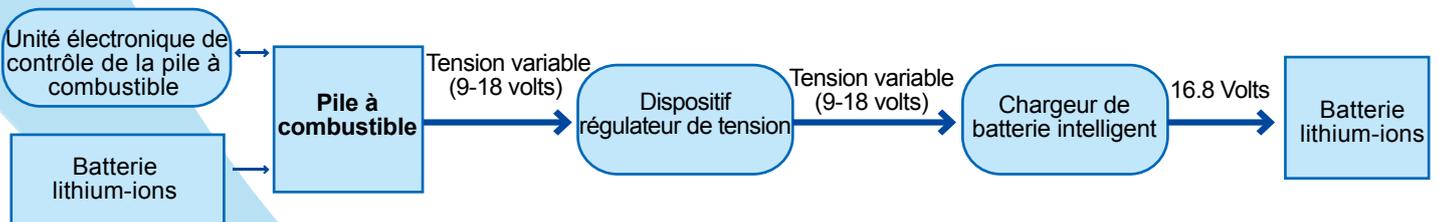


Figure 7-7 : Diagramme fonctionnel d'un ensemble pile à combustible – chargeur de batteries.

Une batterie rechargeable lithium-ions peut éventuellement être installée à l'intérieur du boîtier comprenant une pile à combustible afin de maintenir l'unité de contrôle électronique en tension de veille, ou pour alimenter un système d'horloge permettant de programmer le fonctionnement de la pile à combustible. Cette batterie facilitera également le démarrage immédiat de la pile à combustible et assurera la sauvegarde du programme de contrôle lors de l'arrêt. Cette batterie lithium-ions sera constamment rechargée lorsque la pile à combustible fonctionnera, mais cette recharge se fera sous le contrôle d'un « chargeur intelligent » afin de ne pas surcharger la batterie lithium-ions et de préserver sa durée de vie.

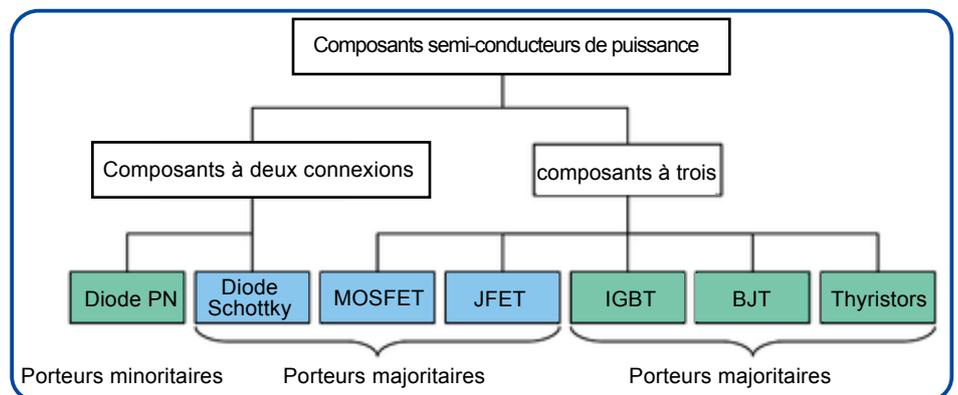
7.7 Types de semi-conducteurs de puissance

Les composants semi-conducteurs les plus utilisés en électronique de puissance sont la diode de puissance, le thyristor, les MOSFET et les IGBT. Des modifications simples sont effectués dans les composants électroniques pour qu'ils supportent des plus fortes intensités de courant, de plus importantes dissipation d'énergie et des tensions inverses plus élevées. Les composants de puissance sont répartis en deux catégories principales :

1. les composants à deux connexions, dont l'état dépend uniquement des paramètres du circuit externe auquel ils sont reliés- La diode en est un exemple.
2. Les composants à trois connexions dont l'état dépend du circuit externe auquel ils sont reliés et d'un signal de commande. Les transistors et les thyristors en sont des exemples.

Les autres familles de composants de puissance sont les porteurs de charges majoritaires et les porteurs de charges minoritaires. Les porteurs de charges majoritaires sont des composants comme les diodes Schottky et les transistors MOSFET (Metal Oxyde Semi-conductor, Field Effect Transistor). Des exemples de porteurs de charges minoritaires sont les thyristors, les transistors bipolaires, les IGBT. Les porteurs de charges majoritaires n'utilisent qu'un type de porteurs de charges (voir chapitre 2) et ils sont plus rapides; les porteurs de charges minoritaires utilisent à la fois des électrons et des « trous » pour obtenir de meilleures performances en l'état « ON ». Les groupes de composants de puissance sont montrés par la figure 7-8.

Figure 7-8 :
Types de composants semi-conducteurs de puissance.



Les panneaux solaires photovoltaïques produits actuellement, certaines éoliennes et les piles à combustible produisent du courant continu (DC), qui est favorable pour les petites installations autonomes. Le courant produit par des installations d'électricité renouvelable plus importantes, qui sont reliées au réseau de distribution électrique doit être converti en courant alternatif (AC), à l'aide d'onduleurs.

Les familles de semi-conducteurs de puissance sont :

- les diodes
- les thyristors ou les redresseurs contrôlés à base de silicium (SCRs)
- les transistors bipolaires à porte isolée (IGBT insulated gate bipolar transistors)
- les transistors à effet de champ en oxyde métallique (MOSFET)
- les thyristors commutables à porte intégrée (IGCT – integrated gate commutated thyristors)

Ces composants sont décrits brièvement dans les paragraphes 7.7.1 à 7.7.8

7.7.1 les diodes de puissance

Les diodes de puissance sont utilisées dans les convertisseurs DC-DC, DC-AC, et AC-DC. La figure 7-6 montre le symbole de représentation et des images de telles diodes.

Diode :

La diode est un composant élémentaire qui permet au courant de circuler dans une seule direction. Elle s'oppose à tout passage de courant en sens inverse. Dans les convertisseurs AC – DC, leur fonction se nomme « le redressement »

Comme les diodes permettent la circulation du courant électrique que dans une direction, elles sont couramment utilisées pour convertir le courant alternatif en courant continu (AC – DC). Des diodes de signaux peuvent également être utilisées comme « redresseurs » dans des unités de faible puissance, mais pour les installations plus importantes le recours aux diodes de puissance est nécessaire afin d'éviter que la jonction P-N ne fonde. (voir le chapitre 2 pour plus de détails concernant la jonction PN).

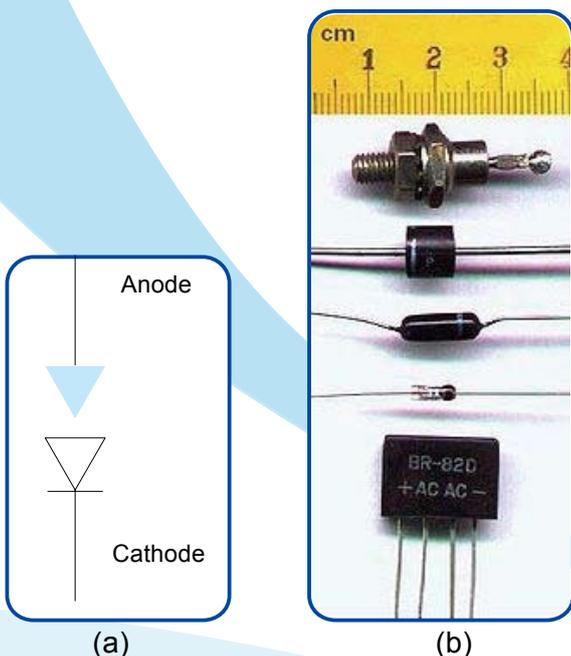


Figure 7-9 a) Symbole de la diode b) différents types de diodes

7.7.2 Dispositifs de commutation

Les piles à combustible, les panneaux solaires PV et les éoliennes produisent une tension très peu régulée mais la plupart des appareils électriques exigent une tension stable. La tension produite par les panneaux solaires ou les éoliennes doit donc être contrôlée et régulée. Une tension peut être régulée en la réduisant vers une valeur fixe, ou en l'élevant vers une valeur fixe. Le plus souvent, la tension est élevée vers une plus haute tension. Les ajustements de tension peuvent être accomplis par des circuits de commutation ou des circuits d'écèlement. Les composants utiles pour les circuits de commutations sont les MOSFET, les IGBT et les thyristors.

7.7.2.1 MOSFET de puissance

Les transistors à effet de champ à base d'oxyde métallique semi-conducteur (MOSFET) est un composant contrôlable par un signal externe appliqué sur sa « porte »

MOSFET:

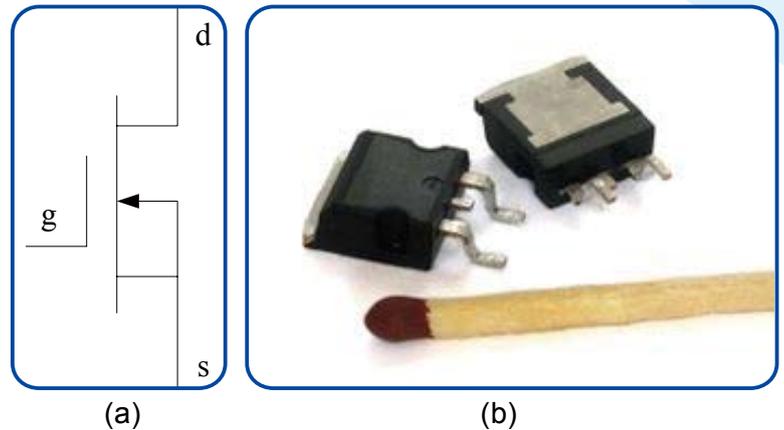
Le MOSFET est un type de transistor qui conduit les électrons à l'intérieur d'un canal. La capacité de ce transistor à conduire les électrons dépend de la largeur de ce canal, qui est contrôlable par la tension appliquée sur la porte du transistor.

L porte (Gate):

La porte du transistor est une électrode séparée du canal par un oxyde servant d'isolant. Cette isolation permet d'éviter la circulation du courant entre le canal et la porte. Le signal électrique appliqué sur la porte permet de contrôler la largeur du canal, donc la quantité de courant qui passe par le transistor.

Lorsque le transistor est « ON » la résistance entre le drain (d) et la source (s) est très faible. La figure 7-10 montre un composant MOSFET. Les MOSFET sont le plus souvent utilisés dans des circuits dont la puissance est inférieure à 1 KiloWatt. Les applications courantes des MOSFET sont dans les alimentations à commutation et dans les chargeurs de batteries.

Figure 7-10
a) symbole du MOSFET,
b) MOSFETs pour montage en surface.



7.7.2.2 Transistor bipolaire à porte isolée (IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor)

Le IGBT est un composant qui combine un MOSFET et un transistor bipolaire conventionnel.

Transistor bipolaire :

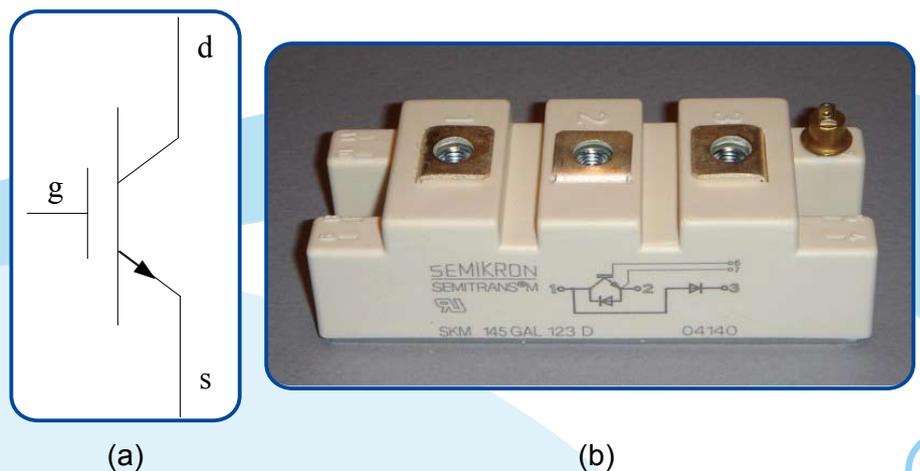
Un composant semi-conducteur utile pour l'amplification des signaux. Il peut amplifier aussi bien des tensions continues que des signaux complexes, ou des impulsions. Il est le plus souvent utilisé pour amplifier un courant, mais peut aussi amplifier une tension donc une puissance.

IGBT:

Un composant qui combine un MOSFET et un transistor bipolaire conventionnel.

Le IGBT exige une faible tension et un courant minimum appliqué sur la porte pour commuter. Le courant principal circule du collecteur vers l'émetteur et la tension ne s'élève guère au dessus de 0.6 Volts, quel que soit l'intensité du courant. La figure 7-11 montre l'image d'un IGBT. Le IGBT est privilégié pour les circuits allant de 1 KW à des centaines de KW. Les IGBT peuvent atteindre des tensions de 1700 Volts et des courants de 600 Ampères avec des temps de commutation entre 1 et 4 microsecondes. Les applications principales des IGBT sont les convertisseurs DC-AC, le contrôle des moteurs électriques, les alimentations de secours.

Figure 7-11
a) symbole de l'IGBT ,
b) photo d'un IGBT.



7.7.2.3 Thyristors ou redresseurs contrôlables à base de silicium (SCRs)

L'un des commutateurs électroniques les plus utilisés sont les thyristors dont c'est la seule utilisation possible.

Thyristor :

Un composant semi-conducteur qui permet la circulation du courant dans une seule direction mais qui peut être commandé comme un transistor, par un signal externe appliqué sur sa gâchette. Une fois qu'il est « ON », le courant passe jusqu'à ce qu'il descende sous un certain seuil.

Ces composants peuvent bloquer la circulation du courant dans les deux directions. Une impulsion appliquée sur la porte commute le thyristor de l'état bloqué à l'état de conduction. Le courant continuera de circuler tant que la tension ne tombera pas à zéro. LA FIGURE 7-12 montre un thyristor.

L'énergie requise pour provoquer l'effet de commutation est plus grande dans le thyristor que dans le MOSFET ou dans l'IGBT. Le principal avantage du thyristor dans le cas de la commutation de courant continu, est qu'il est capable de commuter des courants plus intenses et des tensions plus élevées bien que ses temps de commutations soient plus longs que pour les MOSFET ou IGBT. Des thyristors existent dans le commerce pour des tensions et des courants de très haute valeur. Les utilisations des thyristors sont dans les commutateurs statiques de haute puissance et dans les alimentations de secours.

7.7.2.4 Thyristor commutable à porte intégrée (IGCT Integrated Gate Commuted Thyristor)

Le IGCT est un composant pour haute tension et haute puissance qui fut inventé en 1997.

IGCT:

Un composant semi-conducteur moderne pour fortes puissances et hautes fréquence. Le IGCT ressemble à un thyristor et peut être commuté par un signal appliqué sur la porte.

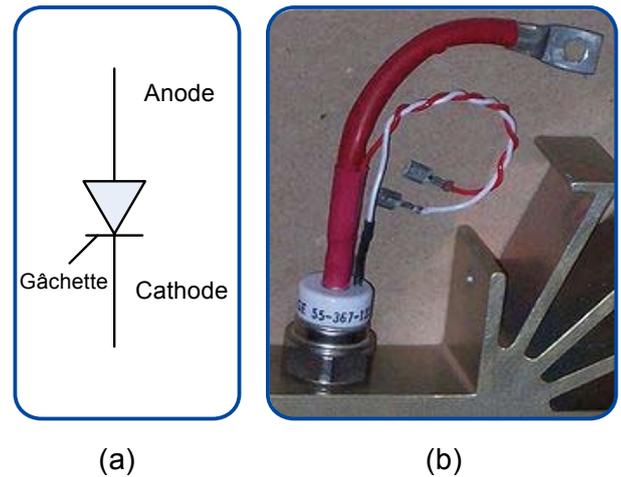


Figure 7-12.
(a) Exemple d'un thyristor et (b) d'un redresseur contrôlable à base de silicium (SCRs)



Figure 7-13. Image de devises IGCT

Ce dispositif est un système de blocage asymétrique (GTO) qui nécessite une tension de grille négative pour le blocage. Ce composant IGCT est communément utilisé dans les réseaux de distribution électrique pour les commutateurs de transfert statiques et pour les dispositifs de contrôle de puissance dans l'industrie. La figure 7-13 montre la photo de différents IGBTs

7.8 Convertisseurs pour les systèmes de puissance

Les deux types d'applications qui doivent être couvertes dans le domaine des énergies renouvelables sont la régulation de puissance et la conversion de tension par les onduleurs. La puissance fournie par les panneaux PV et les éoliennes n'est pas constante. La tension de sortie des piles à combustible est normalement contrôlée par des régulateurs de tension, ou des convertisseurs DC – DC ou d'autres dispositifs afin d'obtenir une valeur de tension constante qui peut être plus élevée ou plus basse que la tension nominale de la pile à combustible.

Les convertisseurs multi-tensions sont intéressants dans le domaine de la distribution d'énergie car plusieurs appareils tels que piles à combustible, panneaux solaires, batteries ou éoliennes peuvent être connectés au même convertisseur. Ce dispositif permet d'alimenter la charge ou le réseau électrique en tension constante. La fonction principale de l'onduleur multi-tensions est de générer une tension alternative (AC) à partir de différentes tensions de courant continu (DC) Pour cette raison, les onduleurs multi-tension sont parfaitement adaptés pour connecter un réseau de distribution en courant alternatif avec des sources diverses d'énergie renouvelable comme les panneaux solaires PV ou les éoliennes ou avec des unités de stockage comme des ultra capacités ou des batteries. Les onduleurs multi tensions utilisent des fréquences de commutations plus lentes, ce qui induit moins de pertes, donc un meilleur rendement.

Les progrès réalisés dans le domaine des piles à combustible exigent des progrès équivalents dans le domaine des onduleurs. Si l'on tient compte des paramètres de l'onduleur lors de la conception de l'installation photovoltaïque ou éolienne, de son dimensionnement, il est possible d'optimiser le rendement de l'ensemble de l'installation.

7.8.1 Convertisseurs DC – DC

Un convertisseur DC – DC est utilisé pour la régulation de tension car la sortie d'un générateur d'électricité d'origine renouvelable varie. La plupart des piles à combustible et des panneaux solaires produisent des tension relativement basses. C'est pourquoi un convertisseur DC -DC élévateur de tension est souvent requis. Un convertisseur est nécessaire car la tension de sortie de ces dispositifs basés sur l'énergie renouvelable varie avec la charge qui leur est appliquée. Cette tension peut tomber de 1.23 Volts DC (hors charge) à une valeur inférieure à 0.5 Volts DC à pleine charge. Il en découle qu'un convertisseur devra s'accommoder de grandes variations de tension.

Les convertisseurs DC – DC sont importants dans le domaine des appareils portables tels que les téléphones cellulaires ou les ordinateurs portables, qui fonctionnent sur batteries. Ces appareils contiennent

de nombreux circuits dont la tension d'alimentation est différente, et différente également de la tension délivrée par les batteries ou par une alimentation externe. Alors que l'on soutire de l'énergie des batteries le convertisseur DC-DC offre la possibilité d'élever cette tension de plus en plus réduite provenant d'une batterie qui s'épuise lentement. La figure 7-14 montre des photos de convertisseurs DC-DC.



Figure 7-14 : Convertisseurs DC -DC

7.8.2 Onduleurs

L'énergie renouvelable peut être utilisée aussi bien dans les ménages que dans l'industrie comme principale source d'alimentation en électricité. L'installation produisant l'électricité d'origine renouvelable devra être connectée au réseau de distribution de courant alternatif (AC). Le courant produit par l'installation photovoltaïque d'une maison indépendante devra être converti en tension alternative afin d'être capable d'alimenter les appareils ménagers qui fonctionnent à l'aide de ce type de courant.

Onduleur:

Un dispositif électronique qui convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC).

Le courant alternatif produit peut posséder les bonnes caractéristiques de tension, de fréquence pour alimenter des appareils du commerce ou pour être branché sur le réseau et permettre au propriétaire de vendre du courant au distributeur d'électricité. Les onduleurs sont utilisés dans de nombreuses applications telles que : les alimentations commutables des ordinateurs, des utilisations dans le domaine des hautes tension en courant continu fournissant des grandes puissances, etc. Les onduleurs servent à produire du courant alternatif à partir de sources de courant continu telles que les piles à combustible ou les panneaux solaires photovoltaïques, ou des batteries. La figure 7-15 montre un onduleur.



Figure 7-15 : Un onduleur

7.9 Conclusion

Ce chapitre a décrit l'importance de l'électronique dans les dispositifs que nous utilisons tous les jours, de même que le rôle fondamental que l'électronique de puissance joue dans les systèmes hybrides d'alimentation en énergie électrique. Vu que l'électronique de puissance est une spécialisation de l'électronique générale, une bonne compréhension de l'électronique générales est nécessaire pour comprendre l'électronique de puissance. Les principes fondamentaux qui doivent être compris sont : les électrons, les protons, les neutrons, les circuits, les circuits ouverts, les court circuits, et le mises à terre. L'électronique de puissance est nécessaire dans tout système d'alimentation en électricité car elle permet de s'assurer que l'électricité produite peut être rendue compatible avec la forme d'électricité exigée par la charge.

Cette adaptation est réalisée à l'aide de composants électroniques de puissance tels que : les diodes, les thyristors, ou redresseurs contrôlables à base de silicium (SCRs), les MOSFETs, les transistors bipolaires à porte isolée (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors), et les thyristores commutables à porte intégrée (IGCT – Integrated Gate Commuted Thyristors) . Ces composants permettent de transformer le courant continu (DC) en courant alternatif (AC), permettent d'élever la tension d'un système d'alimentation en énergie, régulent la puissance qu'un système délivre ou génèrent les impulsions en amplitude et en fréquence, requises pour commander un moteur électrique. Sans ces dispositifs, l'énergie produite par les sources actuelles d'énergie renouvelables ne serait pas utilisable. C'est pourquoi, l'électronique de puissance est une partie essentielle des systèmes hybrides d'alimentation en énergie électrique.

Résumé

L'énergie est vitale pour permettre le développement continu de notre civilisation moderne. Les combustibles fossiles ont été essentiels pour le développement des technologies et pour la modernisation de notre société. Il en est découlé de nombreuses conséquences négatives, telles que une sévère pollution, l'épuisement de certaines réserves naturelles, et la prise de contrôle de pays ou par des pays qui possèdent des réserves de combustible fossiles. La demande en énergie continue de croître avec l'augmentation globale de la population et l'augmentation de la consommation par personne. De plus, les réserves mondiales de combustibles fossiles se réduisent, et les experts estiment qu'il en reste pour environ 30 à 40 ans. La fin du pétrole bon marché est donc proche.

Bien que l'utilisation des combustibles fossiles comme source d'énergie a permis de développer notre civilisation moderne, la pollution produite par la consommation de ces combustibles fossiles a affecté l'atmosphère terrestre. La combustion des combustibles fossiles a accéléré l'effet de serre. L'effet de serre est de manière générale un phénomène bénéfique car il conserve la chaleur sur la terre et permet la vie. Le climat sur la terre évolue naturellement, mais ces changements climatiques prennent normalement des dizaines de milliers d'années. Or il semble que actuellement une augmentation s'opère à un rythme plus élevé. Bien qu'une augmentation de 1 ou 2 degrés C ne semble pas très significative, de faibles changements de température peuvent induire de grands effets. Durant la dernière glaciation, la température globale moyenne n'était que de 5 degrés C plus froide que actuellement.

L'émission des gaz à effet de serre contribue directement aux problèmes qui surviennent sur terre : les pluies acides et la formation d'ozone. Dans certaines parties de Chine ou des Indes, la pollution de l'air demeure un problème de santé publique. Les pluies acides se produisent lorsque de l'acide sulfurique (SO₂), du trioxyde de soufre (SO₃) et du dioxyde d'azote (NO₂) dans l'atmosphère subissent des transformations chimiques et forment des composés acides. Ces derniers sont alors absorbés par les gouttelettes d'eau dans les nuages puis tombent sur terre avec la pluie et augmentent l'acidité de l'éco-système. Ce phénomène peut altérer la vie végétale, les sols, ou les constructions. La plupart des composés acides sont déposés près de leur endroit d'origine, mais ils peuvent aussi être transportés par les courants de l'atmosphère sur des centaines ou des milliers de kilomètres. Afin de se stabiliser le niveau de CO₂ doit d'abord passer par une crête, puis commencer un déclin. Plus tôt les émissions seront réduites, moins la crête de concentration maximum sera élevée et plus le niveau de stabilisation sera raisonnable.

Il existe de nombreuses sources d'énergie qui peuvent être utilisées pour remplacer les combustibles fossiles. Le solaire, l'éolien, l'énergie hydro-électrique, la bio-énergie, l'énergie géothermique, et bien d'autres. Les cellules solaires photovoltaïques utilisent la lumière du soleil pour produire de l'électricité, l'énergie éolienne capte l'énergie cinétique contenue dans le vent, la bio-énergie est extraite des plantes. Chacune de ces formes d'énergie présente des avantages et des inconvénients et elles se trouvent toutes à des stades différents de leur développement. Les plus prometteuses et les plus développées de ces technologies sont le solaire, l'éolien, et les piles à combustible. Un système hybride comprenant ces trois technologies, combiné avec l'électrolyse de l'eau et le stockage de l'hydrogène serait idéal.

L'énergie solaire peut être utilisée par de petites ou par de grandes installations. La chaleur et la lumière du soleil représentent une quantité inépuisable d'énergie et elles peuvent être captées de plusieurs manières. Plusieurs technologies peuvent être mises en oeuvre pour bénéficier de l'énergie solaire : les concentrateurs, les capteurs de chaleurs passifs, production d'eau chaude, chauffage ou réfrigération d'espaces habitables ou de bureaux. Les industries et les services peuvent diversifier leur sources d'énergie, améliorer les rendements de leurs installations, et économiser de l'argent en optant pour l'énergie solaire. Les propriétaires de maisons peuvent utiliser l'énergie solaire pour le chauffage, la réfrigération, l'alimentation des appareils ménagers, la production d'eau chaude.

Les éoliennes captent l'énergie cinétique contenue dans le vent à l'aide de leurs pales fixées au rotor. La rotation du rotor est transmise à la génératrice d'électricité par un axe. L'énergie mécanique de rotation est alors transformée en énergie électrique. Les éoliennes sont installées en hauteur afin de bénéficier de vents plus forts et moins turbulents que près du sol. Les éoliennes peuvent être utilisées de manière autonome ou peuvent être reliées au réseau de distribution électrique. Elles peuvent aussi être combinées avec des installations solaires photovoltaïques pour constituer un système hybride. Pour produire une quantité d'énergie électrique significative pour alimenter un réseau de distribution (ordre du MegaWatt), un certain nombre d'éoliennes sont généralement regroupées dans des parcs éoliens. De nombreux fournisseurs d'électricité dans le monde ont investi pour la création et l'exploitation de parcs éoliens.

L'électrolyse utilise l'énergie électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Ce procédé produit de l'hydrogène très pur et peut être installé à l'endroit et au moment où il est nécessaire, ainsi il n'est pas indispensable de stocker l'hydrogène. Cette méthode est idéale pour produire l'hydrogène nécessaire à l'alimentation de piles à combustible. Si l'installation est bien conçue, ce système est moins coûteux que l'achat d'hydrogène du commerce livré en cylindres pressurisés. Les électrolyseurs sont très utiles lorsqu'ils sont intégrés dans des systèmes d'alimentation en électricité stationnaires, portables ou sur des véhicules pour produire de l'hydrogène. Ils représentent également un complément idéal pour une installation solaire photovoltaïque ou pour une éolienne. Ils permettent dans ce cas de stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène lorsque la demande est inférieure à l'offre puis de consommer cet hydrogène et fournir de l'énergie grâce à une pile à combustible lorsque la demande est supérieure à l'offre. Il est ainsi possible de « lisser » la production d'électricité d'origine solaire ou éolienne par nature évolutives ou intermittentes.

Les piles à combustible transforment directement l'énergie chimique en électricité et en chaleur, avec une grande efficacité. Ces appareils peuvent être utilisés partout et tout le temps, aussi longtemps que de l'hydrogène est disponible. Les piles à combustible sont l'une des sources d'énergie qui peuvent être utilisées avec tout type d'application. Elles peuvent alimenter des appareils portables, des automobiles des habitations, des usines et même des vaisseaux spatiaux. Les piles à combustible peuvent répondre aux besoins en énergie portables, pour les transports, et les besoins stationnaires. Il existe plusieurs types de piles à combustible, mais les plus utilisées pour les transports et les appareils portables sont les piles à combustible du type à membrane polymère électrolytique (PEM – Polymer Electrolyte Membrane). Les piles à combustible PEM consomment généralement de l'hydrogène, mais elles peuvent également consommer d'autres combustibles. L'hydrogène possède de nombreux avantages en temps que combustible car il peut servir sans de nombreux systèmes. Il existe de nombreuses manières d'utiliser et de stocker

l'hydrogène, aussi bien sous forme gazeuse, ou liquide que solide. L'hydrogène peut être produit de selon plusieurs procédés : par reformage de gaz, reformage interne, oxydation partielle, reformage de méthanol, et par électrolyse de l'eau. Le système d'approvisionnement en énergie électrique idéal est la production d'électricité par des piles à combustible alimentées en hydrogène produit par des sources d'énergies renouvelables plutôt que par transformation de combustibles fossiles.

Sans l'électronique aucun appareil que nous considérons comme nécessaires n'existerait. Ordinateurs, téléphones, télévision, Hifi, etc. L'électronique de puissance est une spécialisation de l'électronique générale qui permet la fabrication de dispositifs indispensables au bon fonctionnement des systèmes hybrides d'alimentation aussi bien qu'à celui des machines, des réseaux de distribution, des avions, des locomotives, des automobiles. L'électronique de puissance est indispensable dans tout système d'énergie électrique car elle permet de rendre compatible la forme de courant produit avec la forme de courant nécessaire pour la charge à laquelle il est destiné. L'électronique de puissance permet de convertir du courant continu (DC) en courant alternatif (AC), permet d'élever la tension ou de réduire la tension, permet la stabilisation de la tension à la valeur désirée, ou génère la forme et la fréquence de la tension nécessaire au contrôle d'un moteur.

Sans l'existence de l'électronique de puissance, l'énergie électrique produite par les sources d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque, ou l'éolien ne serait simplement pas utilisable.

Le futur de l'approvisionnement en énergie consistera en une variété de sources d'énergie renouvelables utilisées ensemble. Afin de pouvoir fonder nos besoins en énergie sur des sources renouvelables, nous devons être capables de stocker de l'énergie, vu la nature intermittente et variable des sources. Le soleil et le vent sont d'excellents fournisseurs d'énergies renouvelables, mais le degré d'ensoleillement et l'intensité du vent varient. Lorsque ces sources ne sont pas disponibles, l'électricité ne peut être produite. Lorsque le soleil brille ou que le vent souffle avec force, d'énormes quantités d'énergies peuvent être captées et de l'hydrogène peut être produit par électrolyse à partir d'eau. Cet hydrogène peut alors être stocké pour son utilisation ultérieure par des piles à combustible. Dès que le coût de l'énergie renouvelable sera devenu compétitif, l'économie basée sur les combustibles fossiles sera remplacée par une économie fondée sur les énergies renouvelables et l'hydrogène.

Un système hybride d'approvisionnement idéal en énergie renouvelable comprend le soleil, le vent, et l'énergie provenant de piles à combustible combinées à l'électrolyse de l'eau et l'hydrogène. Toutes ces technologies sont démontrées par l'utilisation du set d'enseignement des énergies renouvelables de Horizon (FCJJ-27). Ce set d'expérimentations démontre les principes et les technologies fondatrices de l'économie basée sur les énergies renouvelables. Aujourd'hui, nous faisons partie d'une économie basée sur les combustibles fossiles; cependant, la migration vers une économie basée sur les énergies renouvelables a déjà commencé. Nous souhaitons que cet ouvrage, ainsi que l'utilisation du set d'enseignement des énergies renouvelables vous incitera à poursuivre vos recherches concernant ces technologies, à construire des prototypes, et peut-être à contribuer au un jour au développement de ces technologies en temps qu'ingénieur ou physicien. Nous nous appliquons actuellement à réduire les coûts liés aux technologies des énergies renouvelables car l'économie du futur, basée sur les énergies renouvelables est proche.

Sources

[1] Energy Information Administration. (2008). International Energy Outlook 2008, Washington DC, November 2008 (No. DOE/EIA-0484(2008)). Retrieved January 25, 2009 from <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>

[2] International Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. (2008). World Energy Outlook 2008. Retrieved from <http://www.sourceoecd.com/>

[3] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved February 4, 2009 from http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_SPM.pdf

[4] Hegerl, G.C., F. W. Zwiers, P. Braconnot, N.P. Gillett, Y. Luo, J.A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J.E. Penner and P.A. Stott, 2007: Understanding and Attributing Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved February 4, 2009 from http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_Ch09.pdf

[5] Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds., 2008: Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp. Retrieved February 8, 2009 from <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf>

[6] Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved February 8, 2009 from http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_Ch01.pdf

[7] Carnegie Institution (2007, March 16). Crops Feel The Heat As The World Warms. ScienceDaily. Retrieved February 25, 2009, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/03/070316072609.htm>

[8] World energy resources and consumption. (2009, February 2). In Wikipedia, The Free

Encyclopedia. Retrieved 05:28, February 2, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=World_energy_resources_and_consumption&oldid=272714347

[9] Gray, D., White, C. & Tomlinson, G., National Energy Technology Laboratory. (2007). Increasing Security and Reducing Carbon Emissions of the U.S. Transportation Sector: A Transformational Role for Coal with Biomass, Washington DC, August 2007 (No. DOE/NETL-2007/1298). Retrieved January 28, 2009 from <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/NETL-AF%20CBTL%20Study%20Final%202007%20Aug%2024.pdf>

[10] Spiegel, C.S. (2008). PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB, 1st Ed. New York: Elsevier Science.

[11] Spiegel, C.S. (2007). Designing and Building Fuel Cells, 1st ed. New York: McGraw-Hill.

[12] Masters, G.M. (2004). Renewable and Efficient Electric Power Systems, 1st ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

[13] Boyle, G. (2004). Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.

[14] Solar cell. (2009, February 4). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:56, February 4, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_cell&oldid=273042670

[15] Kurczewski, N. (June 27, 2008). "How Eclectic!" AutoWeek. June 18, 2007. Retrieved from <http://www.autoweek.com/apps/pbcs.dll/article?AID=/20070612/FREE/70608014>

[16] Gipe, P. (2004). Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm and Business, 1st ed. White River, VT: Chelsea Green Pub.

[17] Wind power. (2009, February 15). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 06:16, February 15, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wind_power&oldid=272831096

[18] Rajeshwar, K, McConnell, R., Licht, S. (2008). Solar Hydrogen Generation: Toward a Renewable Energy Future, 1st ed. New York: Springer.

[19] Li, X. (2005). Principles of Fuel Cells. New York: Taylor & Francis.

[19] Electrolysis of water. (2009, February 20). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 06:30, February 20, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electrolysis_of_water&oldid=273108169

[20] Hydrogen tank. (2009, January 2). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 06:43, February 2, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hydrogen_tank&oldid=261554690

[21] Power semiconductor device. (2009, January 28). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 06:47, February 22, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Power_semiconductor_device&oldid=266985889

Image Sources

- P1/P2/P8/P9/P21/P23/P38/P44/P46/P53/P87 <http://www.istockphoto.com/>
- P7 <http://space.lamost.org/>
- P23 <http://www.altenergystocks.com/archives/solar/>
- P42 <http://www.sonoma.edu/users/f/freidel/global/207lec2images.htm>
- P45 <http://greenterrafirma.com/wind%20turbines.html>
- P104 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:S9000.jpg>
-
- Figure 1-8 <http://www.ipcc.ch/index.html>
- Figure 1-10 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Viking2lander1.jpg>
- Figure 1-11 http://en.wikipedia.org/wiki/File:Water_cycle.png
- Figure 1-12 http://en.wikipedia.org/wiki/Sea_level
- Figure 1-14 http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_demand
- Figure 1-15 http://en.wikipedia.org/wiki/Subaru_R1e
http://en.wikipedia.org/wiki/File:FCX_Clarity.jpg
- Figure 1-16 http://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/fuel_cells.html
- Figure 2-1 <http://www.solarpanelsplus.com/solar-panel-pictures/>
- Figure 2-3 http://www.nrel.gov/pv/pv_manufacturing/cost_capacity.html
- Figure 2-5 http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell
- Figure 2-6 <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/index.html>
- Figure 2-8 <http://electronics.howstuffworks.com/led1.htm>
- Figure 2-9 Solar panels: <http://free-stock-photos.com/science/solar-panel-1.html>
Battery & inverter <http://www.fuellessusa.com/5000WATT.html>
Fan: http://www.isplc2006.org/b2b/paraffin/1/wall_fan_8.html
Cell phone: <http://www.topcellphonereviews.org/>
Laptop: http://blog.loaz.com/timwang/index.php/2007/04/03/mini_laptops
TV: <http://www.fotosearch.com/PDS051/Is016154/>
Charge controller: <http://greenhome.huddler.com/products/morningstar-sunsaver-mppt-controller>
- Figure 2-14 http://www.time.com/time/specials/2007/article/0,28804,1677329_1677971_1677977,00.html
- Figure 2-15 <http://flickr.com/photos/joeross/2224566267/>
- Figure 3-1 <http://www.greenlivingtips.com/articles/65/1/How-wind-turbines-work.html>
- Figure 3-8 <http://www.greentown.ca/Images/vertical%20wind%20turbine.jpg>
- Figure 3-15 <http://www.wind-works.org/articles/marlec910f.html>
- Figure 4-1 <http://www.sparknotes.com/chemistry/electrochemistry/electrolytic/section1.html>
- Figure 4-2 <http://chem.ch.huji.ac.il/history/nicholson.html>
- Figure 4-3 <http://www.sespi.it/sezione.php?language=1&cod=2&s=18>
- Figure 4-4 <http://www.encyclopedia.com/topic/electrolysis.aspx>
- Figure 5-1 http://www.princeton.edu/~chm333/2002/spring/FuelCells/fuel_cells-history.shtml
- Figure 5-2 http://commons.wikimedia.org/wiki/File:1839_William_Grove_Fuel_Cell.jpg
- Figure 6-1 <http://www.nrel.gov/data/pix/Jpegs/05048.jpg>

- Figure 6-2 http://www.linde-le.com/process_plants/hydrogen_syngas_plants/gas_products/syngas.php
- Figure 6-3 <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>
- Figure 6-4 <http://www.encyclopedia.com/topic/electrolysis.aspx>
- Figure 6-5 [http://www.praxair.com/praxair.nsf/0/3A0AB529A089B473852571F0006398A3/\\$file/027847_PRAX_RefinSpec_4_low_res.pdf](http://www.praxair.com/praxair.nsf/0/3A0AB529A089B473852571F0006398A3/$file/027847_PRAX_RefinSpec_4_low_res.pdf)
- Figure 6-6 http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_cylinder
- Figure 6-7 <http://www.networlddirectory.com/blogs/permalinks/6-2008/prototype-hydrogen-storage-tank.html>
- Figure 7-1 <http://www.energyquest.ca.gov/story/chapter02.html>
- Figure 7-2 <http://www.energyquest.ca.gov/story/chapter04.html>
- Figure 7-3 http://scifiles.larc.nasa.gov/text/kids/Problem_Board/problems/electricity/circuits2.html
- Figure 7-8 http://en.wikipedia.org/wiki/Power_semiconductor_device
- Figure 7-9 <http://en.wikipedia.org/wiki/Diode>
- Figure 7-11 http://theelectrostore.com/shopsite_sc/store/html/media/transistors-igbts/skm145gal123d-semikron-igbt-skm-145-gal-123d-123-d-new.jpg
- Figure 7-12 <http://en.wikipedia.org/wiki/Thyristors>
- Figure 7-13 http://fmccgroup.ru/images/semiconductors/igbt/IGCT_img_0.jpg
- Figure 7-15 [http://en.wikipedia.org/wiki/Inverter_\(electrical\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Inverter_(electrical))

About the Author: Dr. Colleen Spiegel



Dr. Colleen Spiegel has been a chemical engineer, R&D manager and consultant for ten years, and also founded Clean Fuel Cell Energy in 2006. She is the author of “Designing and Building Fuel Cells” (McGraw-Hill, 2007), and “PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB” (Elsevier Science, 2008).

Dr. Spiegel has been involved with designing and building PEM fuel cell stacks, ranging from micro to macro designs using standard and alternative materials and configurations. She has also been involved with the development of hybrid power systems, crystal growth, thin films and polymers. In addition, she has extensively used MATLAB for modeling fuel cells and other types of technologies. She has created detailed mathematical models of each fuel cell layers to calculate heat and mass transfer and pressure drop to predict heat and water management in a fuel cell stack.

Dr. Spiegel has a BSChE and MSChE in chemical engineering, and a PhD in electrical engineering from the University of South Florida. Colleen has a passion for designing and promoting fuel cells, and helping to educate young people in science, math and technology. For more information about Colleen, visit www.colleenspiegel.com.