

## **Contribution à la conception d'une source d'énergie électrique stationnaire**

**autonome : Application « piles à combustible associées à des cellules photovoltaïques »**

### **MEMBRES DE L'EQUIPE DE RECHERCHE**

- 1- Pr. BELMADANI Bachir (Président)**
- 2- Mr. MOSTAFAOUI Mohamed**
- 3- Mr. BENYOUCEF Djilali**
- 4- Mr. TAHRI Toufik**
- 5- Mr. KAIROUS Djilali**
- 6- Mr. DEROUASIN Ahmed**

### **INTRODUCTION**

Les physiciens définissent l'énergie comme la quantité de travail qu'un système physique est capable d'effectuer. En outre, selon le premier principe de la thermodynamique, l'énergie ne peut être ni créée, ni détruite. Par contre elle peut être transformée sous différentes formes, par exemple en énergie mécanique, thermique ou électrique.

Les énergies renouvelables sont des énergies de flux. Elles se régénèrent en permanence au rythme du soleil et de ses dérivés, le vent, les cours d'eau, les vagues, les courants marins, la chaleur naturelle et la croissance de la biomasse, ainsi que, des marées et de la chaleur naturelle de la terre.

L'énergie est renouvelable si la valorisation de la source ne limite pas son utilisation future. Il s'agit de ne pas exploiter la source plus vite que ses capacités de renouvellement.

### **SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLES**

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de technologies selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Les principales filières des énergies renouvelables présentes en Belgique sont reprises dans la liste ci-après :

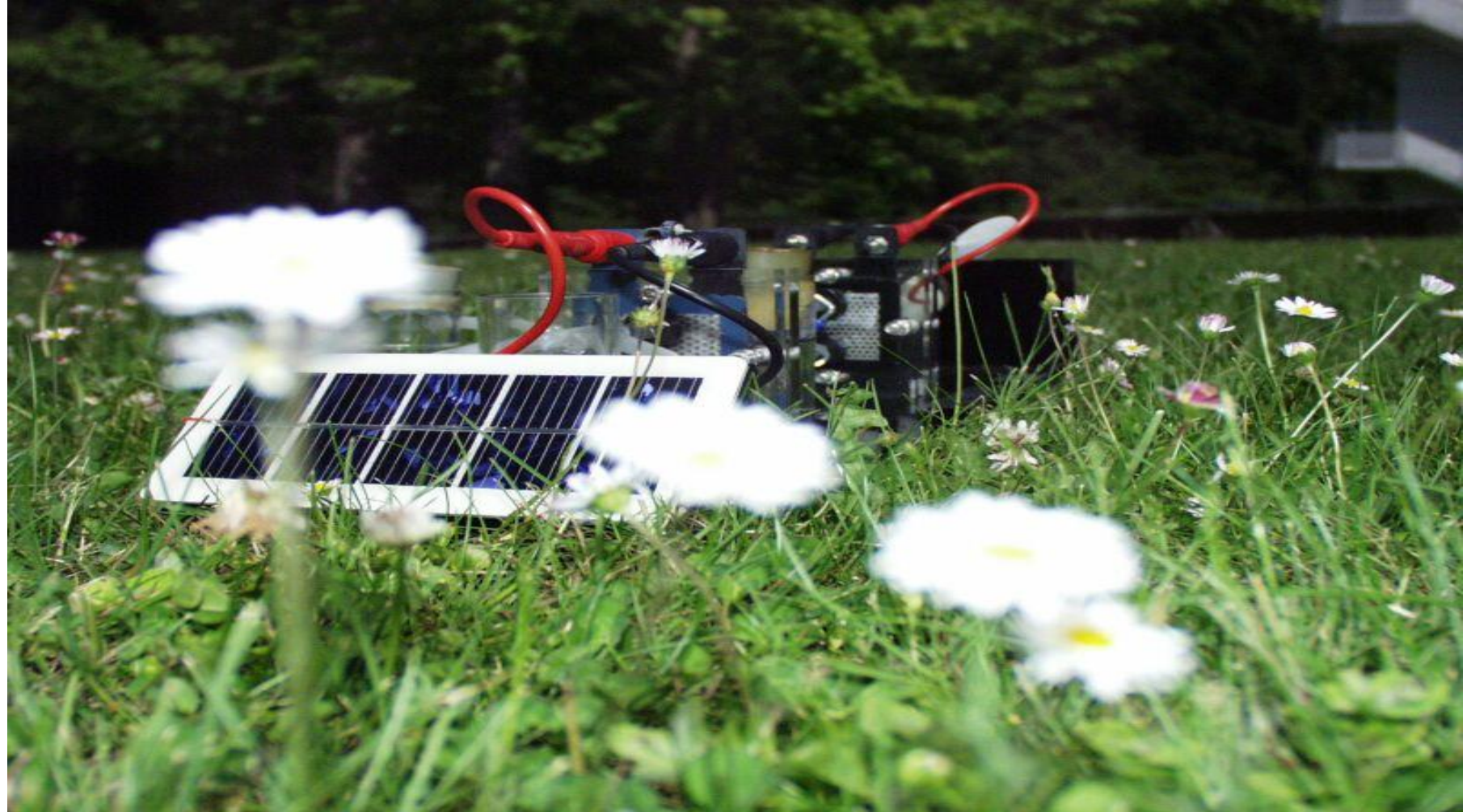
- Biocarburants : Biomasse =====> Carburant
- Bio méthanisation : Biomasse humide ? Biogaz =====> Chaleur utile et/ou électricité
- Chauffage au bois ou à la biomasse : Bois ou biomasse sèche =====> Chaleur utile
- Bioélectricité ou Cogénération au bois ou à la biomasse : Bois ou biomasse sèche ==> Chaleur utile et électricité
- Eolien (Parcs éoliens sur terre et en mer) : Vent=====> Electricité ou énergie mécanique
- Géothermie et chaleur naturelle (Puits géothermiques et pompes à chaleur) : Chaleur naturelle + électricité =====>Chaleur utile
- Hydroénergie (Centrales hydroélectriques) : Cours d'eau ==> Electricité ou énergie mécanique
- Solaire photovoltaïque (Systèmes solaires photovoltaïques) : Soleil =====> Electricité
- Solaire thermique (Chauffe-eau solaires pour l'eau sanitaire et/ou le chauffage et/ou les piscines
- Réfrigération solaire ; Séchage solaire) : Soleil=====> Chaleur utile (ou froid)

### **CELLULES PHOTOVOLTAIQUES**

La cellule photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en courant électrique. L'effet appelé effet photovoltaïque propre aux matériaux semi-conducteurs a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Comme la pile à combustible, la première grande application fut dans le domaine de l'aérospatiale dans les années soixante.

#### Son fonctionnement :

La cellule est composée principalement de silicium dopé qui est un bon semi-conducteur. Lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, les grains de lumière appelés photons apportent une énergie nécessaire aux électrons pour se déplacer à l'intérieur du matériau. Ceux-ci se mettent en mouvement dans une direction particulière. Les électrons passent alors dans un circuit extérieur en connectant deux fils métalliques fins à deux extrémités du matériau : un courant électrique est ainsi créé.



### PILES A COMBUSTIBLE

Une pile à combustible permet de convertir directement de l'énergie chimique en énergie électrique. A la différence des moyens traditionnels de production de l'énergie, son rendement ne dépend pas du cycle de Carnot. Par ailleurs, le combustible est fourni en continu à la différence des piles traditionnelles (pile au Zinc). On peut ainsi obtenir du courant de façon continue.

L'un des intérêts de la pile à combustible est que les températures sont d'un plus faible niveau que dans les turbines ou les moteurs à combustion. Ceci permet entre autres d'éviter la formation de NOx. Cependant à ce niveau de température, la plupart des carburants carbonés traditionnels sont trop peu réactifs et seul l'hydrogène convient. Le méthanol peut aussi être utilisé dans les piles directes à méthanol, mais leurs performances restent pour le moment inférieures à celles des piles à hydrogène. Pour utiliser des combustibles type méthane ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement bien plus élevées: 800 à 1000°C. La réalisation de piles fonctionnant à de telles températures est problématique: on préfère donc utiliser de l'hydrogène.

Une **cellule élémentaire** est constituée de 3 éléments:

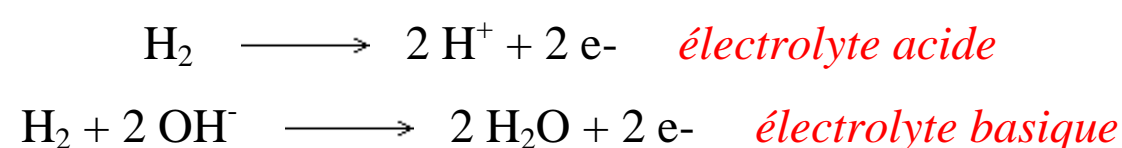
- deux électrodes,
- un électrolyte

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène).

*Principe élémentaire d'une pile*

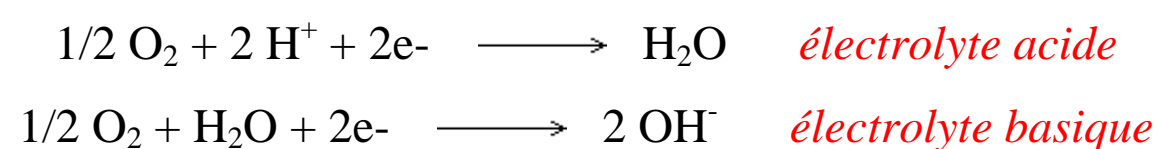
#### Les réactions

Dans le cas d'une pile hydrogène-oxygène, on a oxydation de l'hydrogène à l'anode selon:

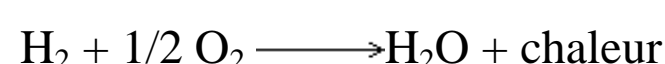


Il s'agit d'une réaction catalysée. L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode.

A la cathode, on assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène selon:



Le bilan donne donc:



Cette réaction est exothermique: à 25°C, l'enthalpie libre de la réaction est de -237 ou -229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse. Ceci correspond à des tensions théoriques de 1,23 et 1,18 V. Cette tension dépend aussi de la température.

### Tension de la pile

Si l'ensemble de l'enthalpie libérée par la réaction pouvait être retrouvée sous forme d'une différence de potentiel, la tension  $E_{th}$  délivrée par la pile serait:

$$E_{th} = - \frac{\Delta H}{n F}$$

En fait, d'après le second principe de la thermodynamique, la part correspondant à l'entropie ne peut être transformée en travail électrique. Or, le travail est égal à la variation d'enthalpie libre au cours de la réaction chimique.

$$W = - \Delta G$$

Le travail récupérable correspond au déplacement des électrons dans le circuit extérieur. Il est égal à:

$$W = n F (E_a - E_c)$$

avec  $E_a$  et  $E_c$  les potentiels à l'anode et à la cathode. Le travail maximal récupérable par la pile (quand les pertes peuvent être négligées) est donc:

$$W_{max} = n F (E_a - E_c)_{max}$$

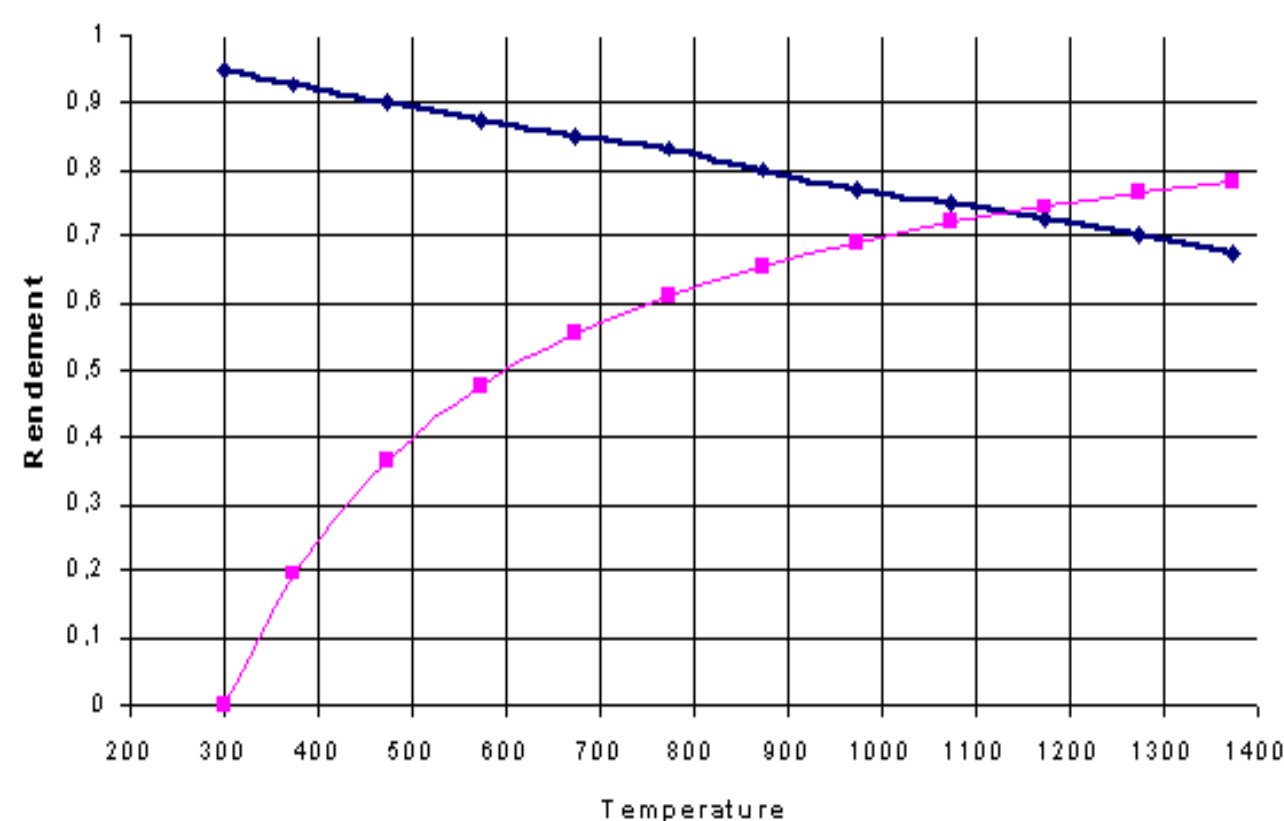
La tension maximale récupérable est donc  $E_{rev}$ :

$$E_{rev} = - \frac{\Delta G}{n F}$$

La tension maximale aux bornes de la pile s'exprime donc en fonction de la température:

$$(E_a - E_c)_{max} = E_{rev} = - \frac{(\Delta H - T \Delta S)}{n F}$$

La variation d'entropie étant négative (diminution du nombre de moles), la tension maximale aux bornes de la pile diminue quand la température augmente. Le rendement théorique de la pile, soit le rapport entre  $E_{rev}$  et  $E_{th}$ , diminue donc lui aussi en fonction de la température.

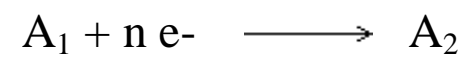


**Rendement d'une pile H2/O2 comparé au rendement de Carnot (Tu = 300K)**

La différence entre le potentiel de la cathode et celui de l'anode représente en fait la **fem** de la pile:

$$E = E_{cathode} - E_{anode}$$

Le potentiel de chaque électrode s'obtient grâce à **la loi de Nernst** qui le relie à la concentration des réactifs et produits de la réaction électrochimique ayant lieu à l'électrode. Pour la réaction:



on a un potentiel (par rapport à l'électrode d'hydrogène (= 0 à 25°C)) :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{A1}}{a_{A2}}$$

où les  $a$  représentent les activités des espèces Red et Ox.

Lorsque le courant est non nul, la tension de la pile sera inférieure à cette tension d'équilibre. Ceci est dû à la présence de surtensions aux électrodes. Elles proviennent des cinétiques réactionnelles dont les vitesses ont des valeurs finies.

### Types de Piles

- **AFC** (*Alkaline fuel Cell*),
- **PEMFC** (*Polymer Exchange Membran Fuel Cell*),
- **DMFC** (*Direct Methanol Fuel Cell*),
- **PAFC** (*Phosphoric Acid Fuel Cell*),
- **MCFC** (*Molten carbonate Fuel Cell*),
- **SOFC** (*Solid Oxid Fuel Cell*).

### APPLICATIONS STATIONNAIRE

Selon que la pile alimentera une ou plusieurs entités, qu'elle sera ou non reliée au réseau, on peut avoir de nombreuses configurations possibles. Ci dessous sont donnés quelques exemples.

La pile est ici alimentée en méthane et en air. Le reste de l'hydrogène et du CO présents dans les gaz de l'anode sont brûlés avec le reste de l'oxygène présent dans l'air de la cathode, la chaleur obtenue permet de chauffer les gaz qui pénètrent dans la pile puis est distribuée au réseau. La différence entre les deux architectures suivantes (avec PEMFC et SOFC) vient de la présence d'un reformeur avec la PEMFC et le niveau de chaleur distribuée au réseau.

## PRODUCTION CENTRALISEE

Parmi les types de production d'électricité, on peut trouver pour les piles différents types d'application: les applications de secours, la production d'appoint reliée ou non au réseau ou une production centralisée d'électricité.

Les piles à combustible dépassent rarement la taille d'1 MW, cependant des études sont faites sur des centrales de plusieurs centaines de MW. Celles-ci pourraient ainsi remplacer les centrales thermiques trop polluantes. Cependant seules les piles "haute température", c'est à dire les MCFC et SOFC sont adaptées à de telles applications: on peut en effet leur adjoindre une turbine à vapeur ou à gaz (voire les deux derrière une SOFC) et ainsi produire de l'électricité avec un rendement très élevé: des rendements de plus de 70% sont annoncés.

De même que les installations de cogénération, ces systèmes peuvent servir à la production décentralisée d'électricité. De construction modulaire, avec des faibles nuisances sonores, ces installations peuvent être installées près des utilisateurs.

## LES TRAVAUX DU GROUPE

### Publications – Brevets:

#### **Internationales:**

M. Helaimi, M.Benghanem, B. Belmadani “ **An APWM with frequency tracking control for high frequency resonant inverter for induction heating application**” Acta Electrotechnica et informatica, 2009.

M. Helaimi, M.Benghanem, B. Belmadani “ **Robust PI-like fuzzy logic controllers for high frequency resonant inverter for induction heating application**” International review of electrical engineering, 2009.

A. Kansab, F. Belouazani, B. Belmadani “ **Neural networks control of high frequency inverter for induction heating cooking**” International review of electrical engineering, 2009.

T. Tahri , S.A. Abdul-Wahab , A. Bettahar , M. Douani , H. Al-Hinai, Y. Al-mulla « **Simulation of the condenser of the seawater greenhouse. Part I: Theoretical development** » Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009

T. Tahri , S.A. Abdul-Wahab , A. Bettahar , M. Douani , H. Al-Hinai, Y. Al-mulla « **Simulation of the condenser of the seawater greenhouse. Part II: Application of the developed theoretical model** » Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009.

### Communications:

#### **- Internationales:**

D. Benyoucef, M. Yousfi, B. Belmadani “ **Rf discharge characteristics from particle model based on two optimized Monte Carlo methods for collision treatment**” 29 th ICPIG, July 12-17, 2009, Cancun, Mexico.

T. Tahri , S.A. Abdul-Wahab , A. Bettahar , M. Douani , H. Al-Hinai, Y. Al-mulla

« **Dessalement de l'eau de mer en utilisant de l'énergie solaire dans la serre agricole**» Monastir, Tunisie 2009.

#### **- Nationales :**

M. Helaimi, M.Benghanem, B. Belmadani “ **A control power scheme of class D inverter for induction cooking application: analysis and simulation**” CGE'06, 13-14 Avril, EMP, Algerie.

Zine Laabidine Boudjemaa, B; Belmadani, M. Zerikat, M. Bounadja” **Commande vectorielle par régulateur Pi flou du moteur asynchrone à double alimentation avec découplage non linéaire par retour d’état**” ICSIP’09, May 2-4 2009, Guelma, Algérie.

**Soutenances:**

- P.F.E.:

1. Amoura Mohammed et Rahal Oqbi « **Contribution à l’étude de l’influence des paramètres de fonctionnement sur la performance d’un condensateur Air-eau** » Projet de fin d’étude, université de Chlef, Juin 2009
2. «Fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation en filtre active» Juin 2009.
3. «Modélisation d’un système éolien à une génératrice asynchrone à cage » Juin 2009.
4. - Détection, Classification et localisation des défauts dans les réseaux par les techniques intelligentes.
5. - Dimensionnement d’un hacheur survolteur dans une chaîne piles à combustibles- réseaux électriques.
6. Conception et réalisation de deux étages redresseur-onduleur d’une mini-éolienne pour application domestique

- Magister:

**Seddiki zahira**

*Optimisation de l’écoulement de puissances dans un système d’énergie électrique par la méthode du point intérieur*

**Rahmouni naima**

**Amélioration de la stabilité d’un réseau électrique à l’aide d’un upfc à base d’un onduleur à trois niveaux**

**Bessaad Taieb**

*Commande des onduleurs multiniveaux asymétriques application à la conduite d’une machine asynchrone triphasée.*

**Boutaba Samia**

*Amélioration de la stabilité d’un réseau électrique par l’utilisation d’un ASVC*