

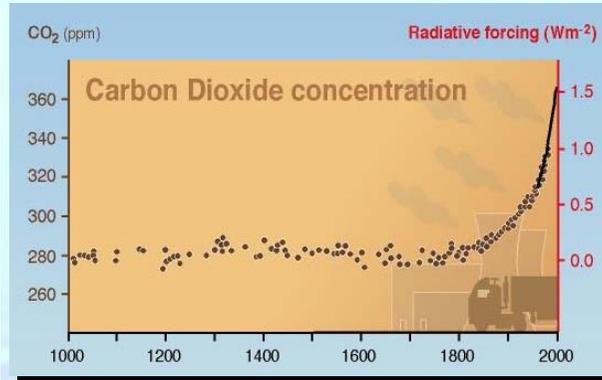
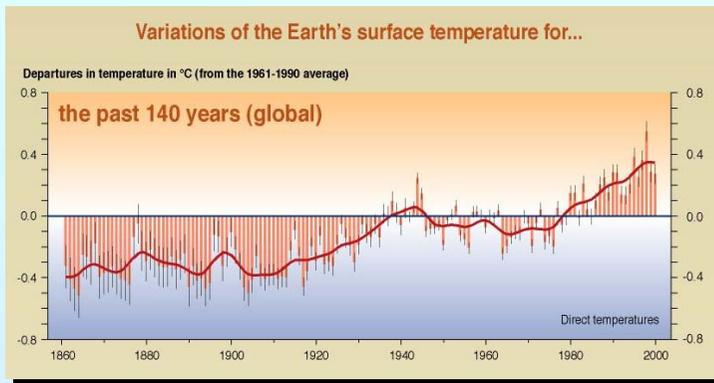


***La Pile à Combustible et la  
cogénération***

**Thierry PRIEM**

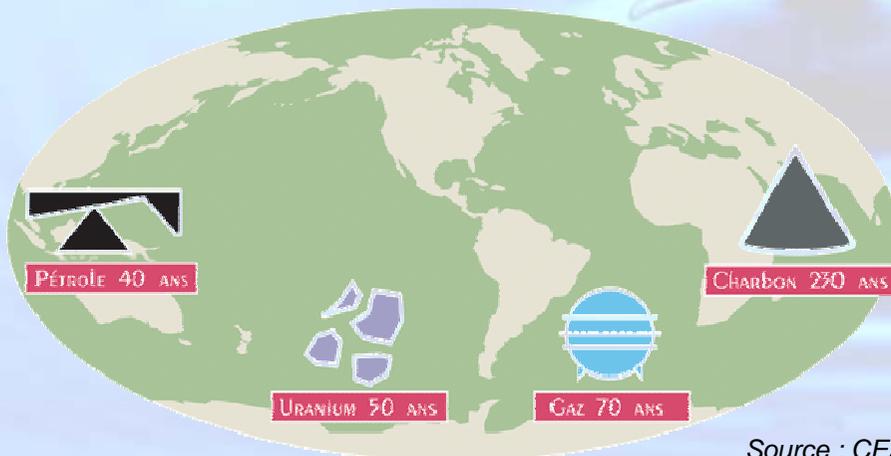
# La problématique énergie

## ● Augmentation des gaz à effet de serre et réchauffement climatique



Source : GIEC

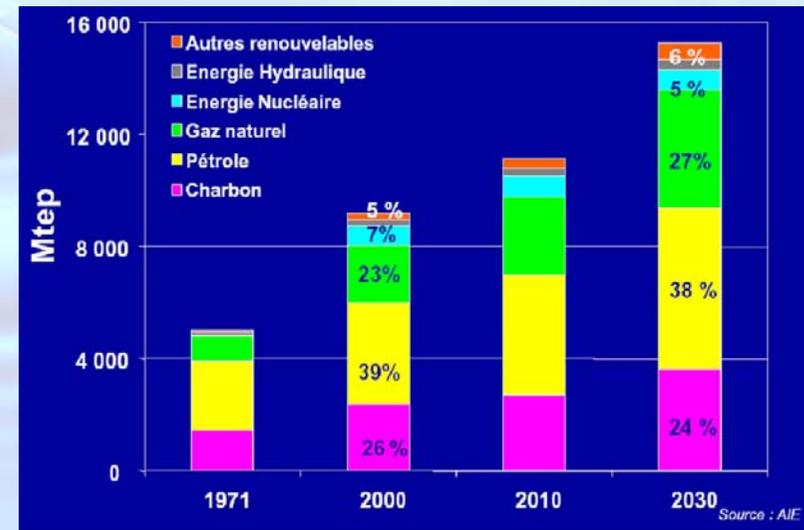
## ● Raréfaction des ressources en énergie fossile



Source : CEA  
© www.cea.fr - 2003

DES RÉSERVES D'ÉNERGIES POUR COMBIEN DE TEMPS ?

## ● Demande mondiale en énergie en croissance



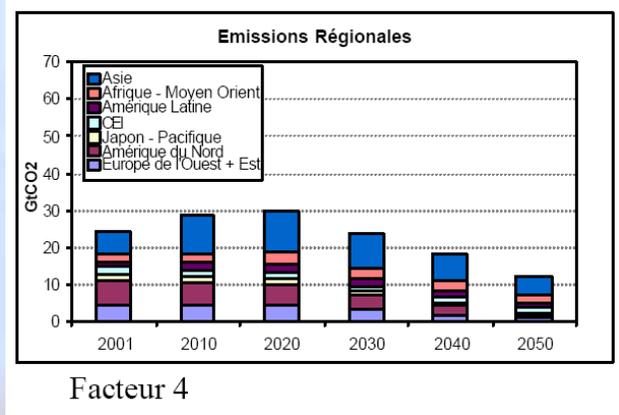
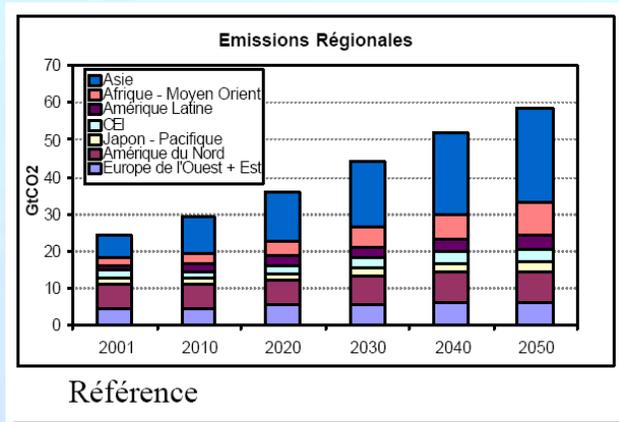
Source : AIE

# La problématique énergie

## Les enjeux

- Lutter contre le changement climatique
- Renforcer la sécurité d'approvisionnement
- Améliorer la compétitivité économique

## Les réponses



### ● Le facteur 4

- Réduction par quatre à cinq d'ici 2050 des émissions globales de gaz à effet de serre des pays développés par rapport à leur niveau de 1990

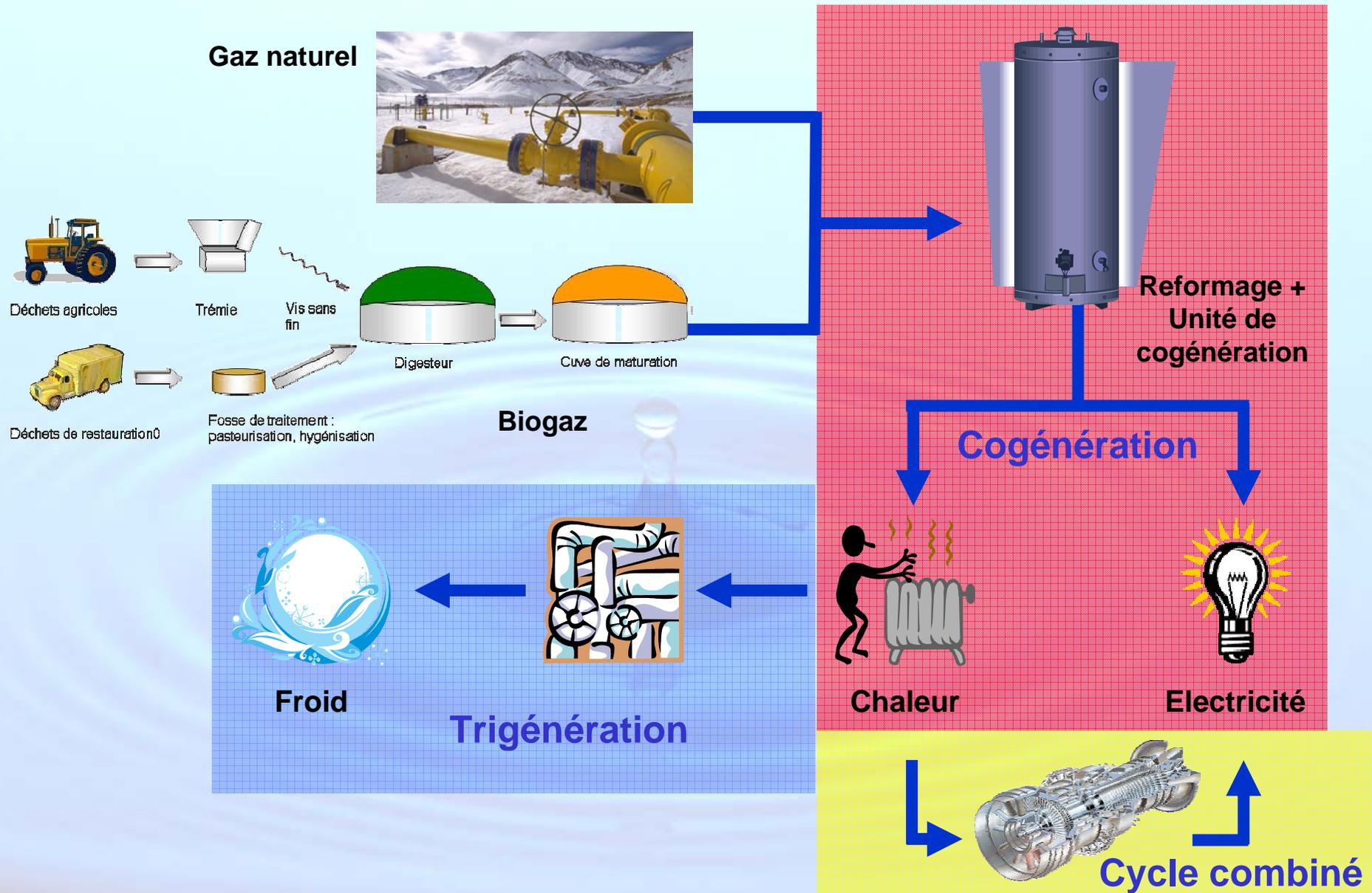
### ● Le mix énergétique

- Trois sources d'énergie primaire : fossile, nucléaire, renouvelable
- Trois vecteurs énergétiques : électricité, chaleur, **hydrogène**



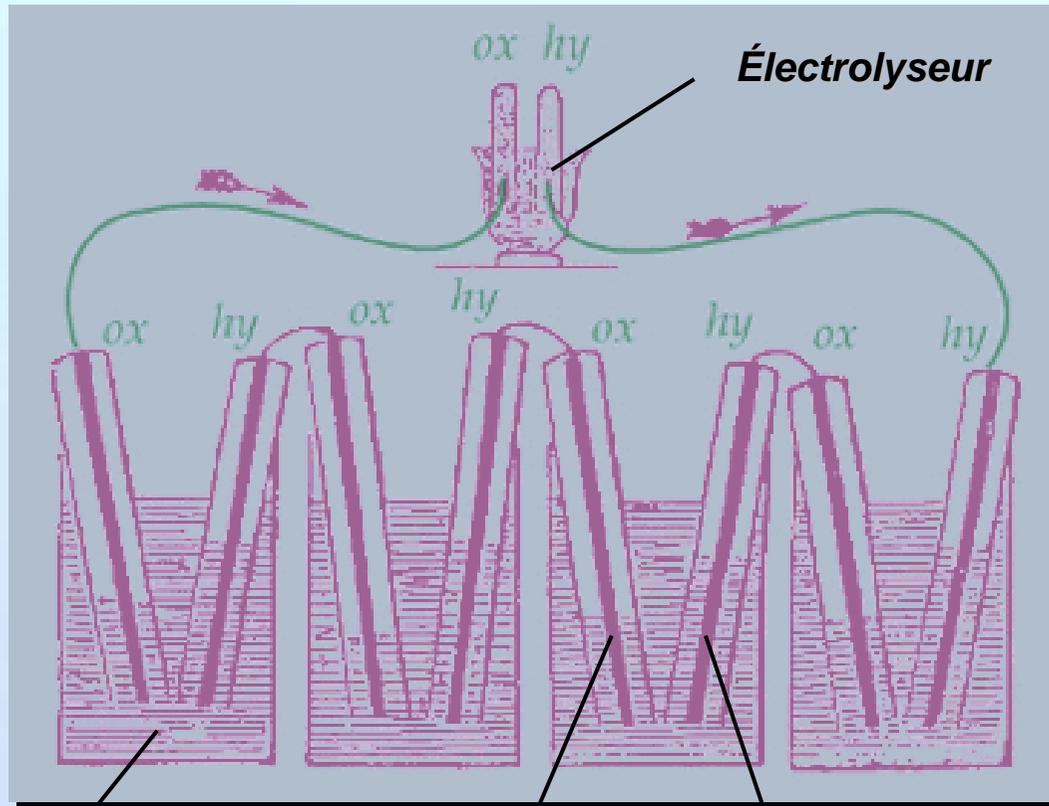
Source : Enerdata

# Le principe de la cogénération

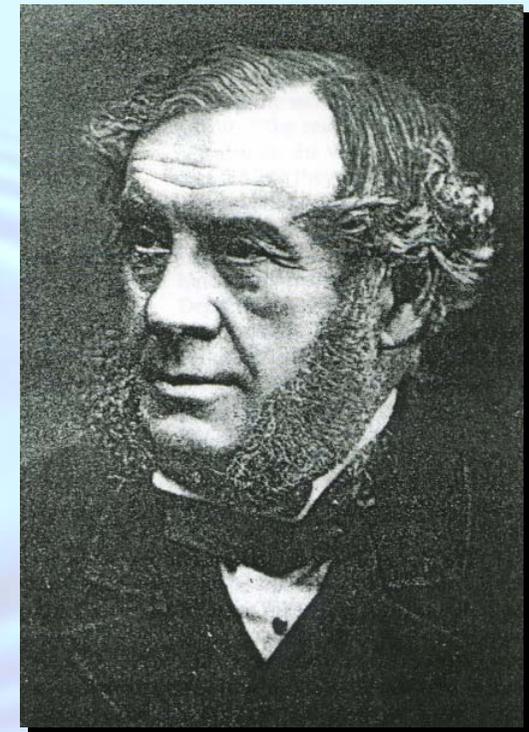


# L' « invention » de la Pile à Combustible

➔ **1839** : Sir William GROVE « invente » la Pile à Combustible



La Pile de Grove (4 cellules en série)



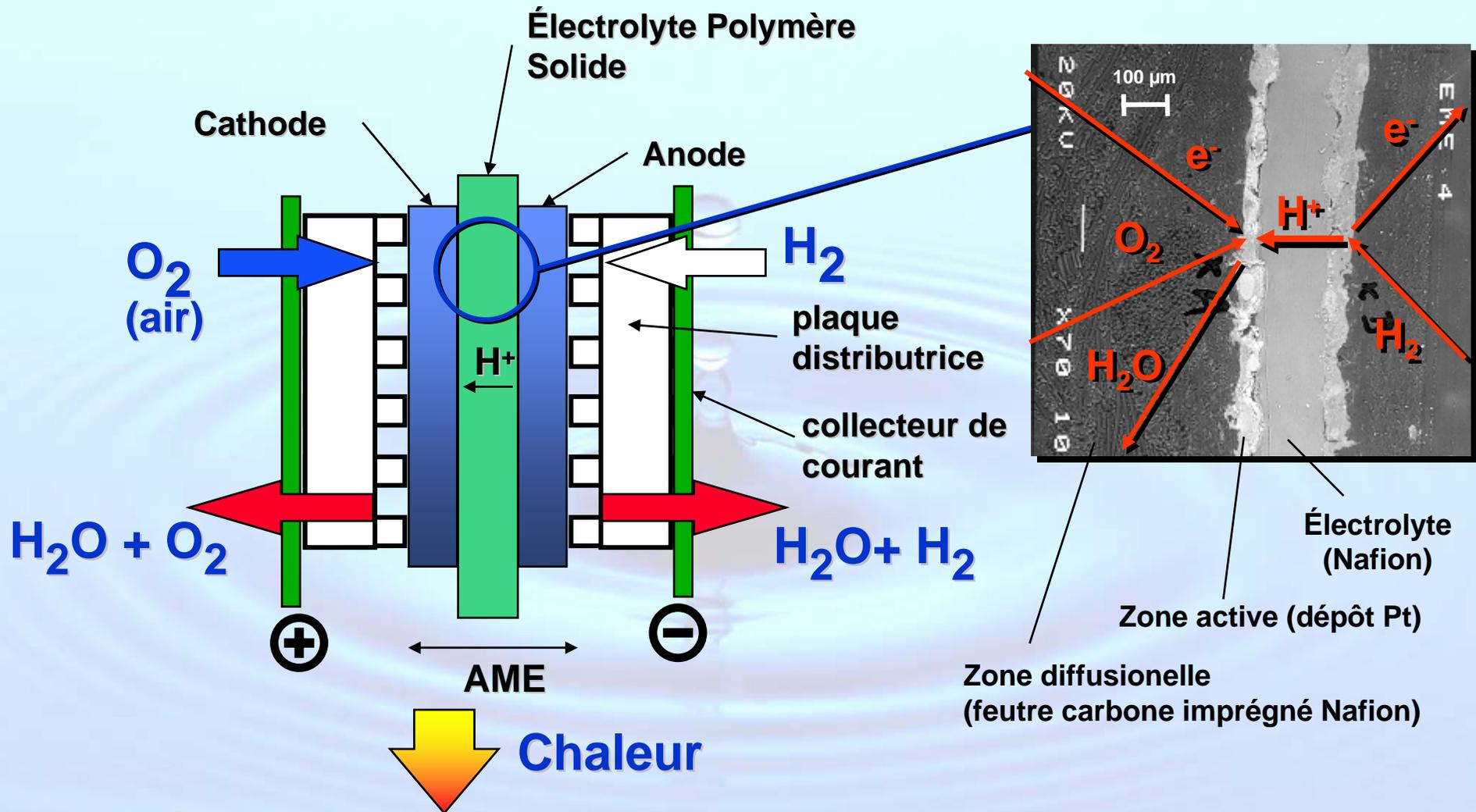
Sir William Grove  
(1811-1896)

Acide sulfurique  
dilué

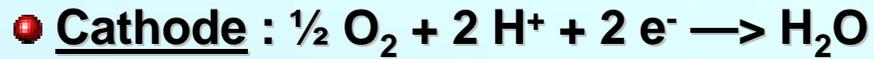
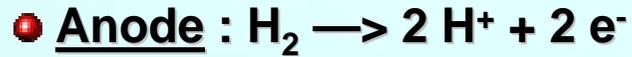
Feuillards de platine

# Le principe de la pile à combustible

## Exemple de la Pile à Membrane échangeuse de protons



# Un peu d'électrochimie

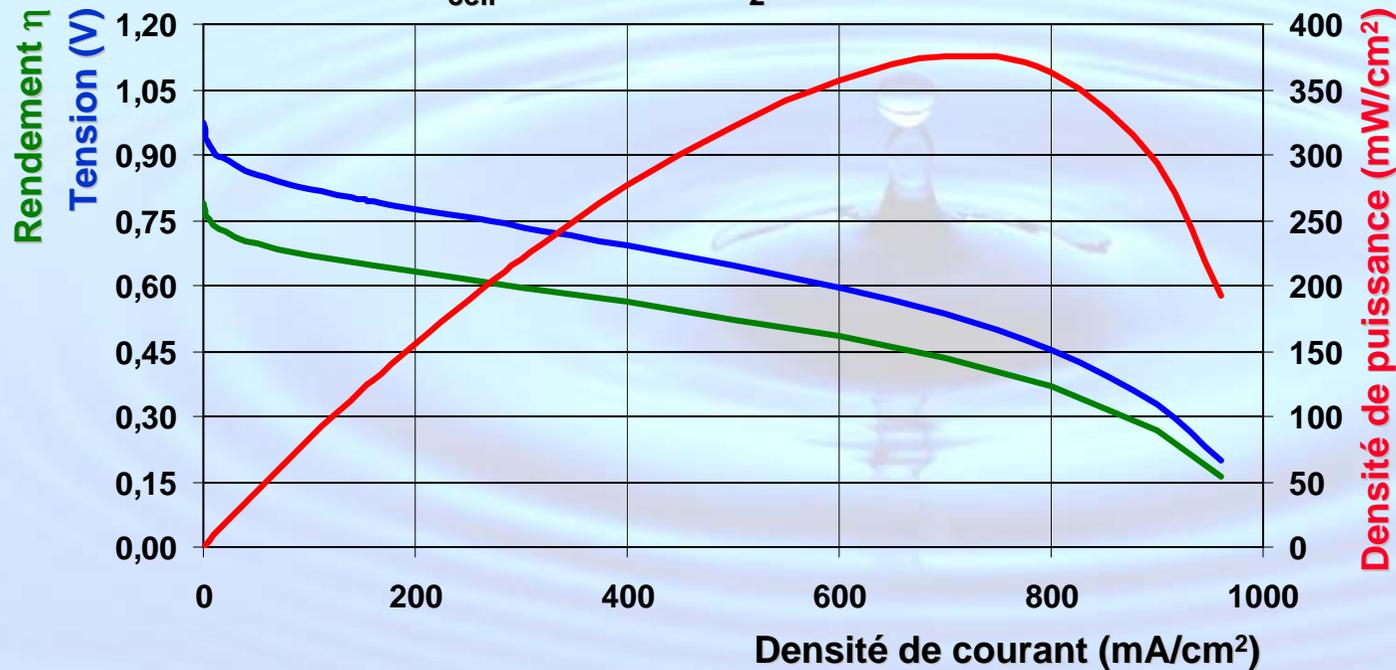


$$V_0 = E_0(\text{O}_2) - E_0(\text{H}_2) = 1,23 \text{ V (H}_2\text{O liq.)}$$

$$\text{Rendement de cellule : } \eta = V/V_0$$

Courbe de polarisation d'une monocellule PEMFC

$T_{\text{cell}} = 80^\circ\text{C}$  -  $P \text{ H}_2/\text{air} = 4 \text{ bars}$



Point de fonctionnement standard

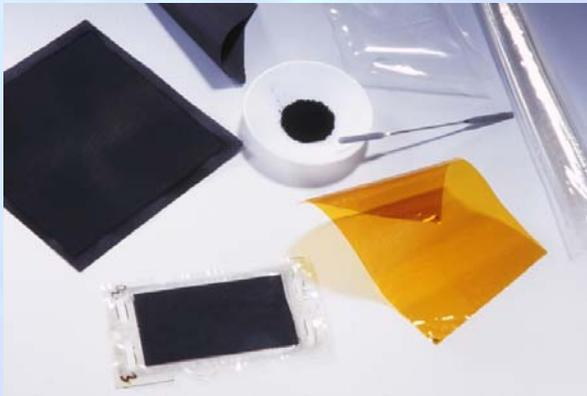
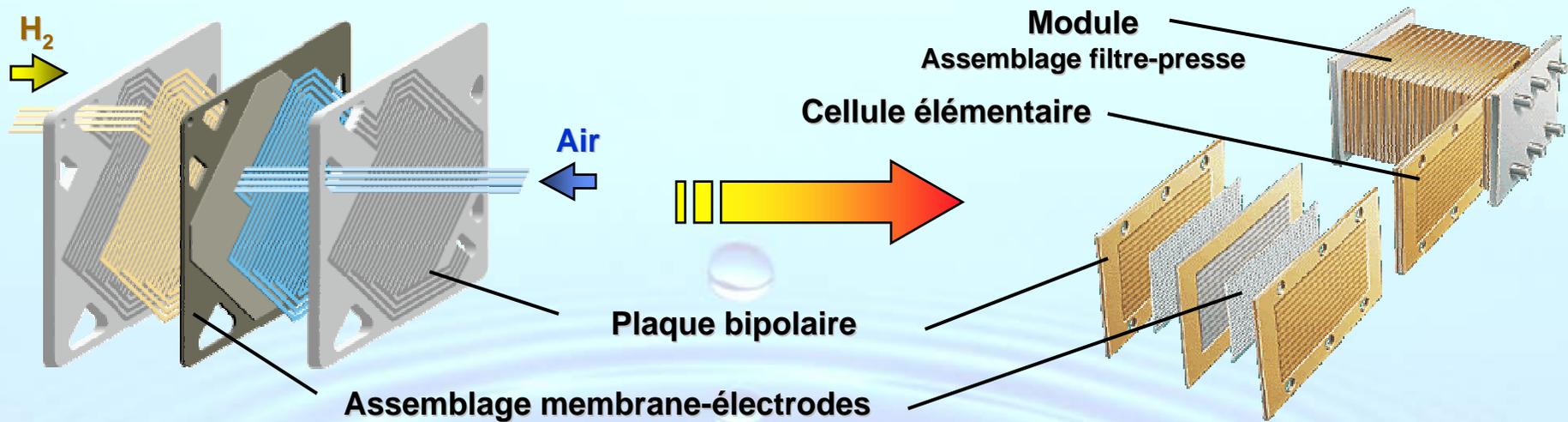
- $T = 80^\circ\text{C}$
- $i = 600 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{\text{cell}} = 0,6 \text{ V}$
- $\eta = 50 \%$

# Les différentes piles à combustible

Type de pile	Anode (Catalyseur)	Electrolyte	Cathode (catalyseur)	Température
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	Polymère perfluoré ( $-SO_3^-H^+$ ) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	- 20 – 80 °C
Méthanol direct (DMFC)	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6 H^+ + 6 e^-$ (Pt)	Polymère perfluoré ( $-SO_3^-H^+$ ) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60 – 80 °C
Membrane échangeuse de protons HT (HT-PEMFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	Polybenzimidazole (PBI) + acide phosphorique (90 %) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	150 – 200 °C
Acide phosphorique (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	$H_3PO_4$ (85-100 %) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	160 – 220 °C
Alcaline (AFC)	$H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ (Pt, Ni)	KOH (8-12 N) $\leftarrow OH^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$ (Pt-Au, Ag)	50 – 250 °C
Carbonate fondu (MCFC)	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$ (Ni +10 % Cr)	$Li_2CO_3/K_2CO_3/Na_2CO_3$ $\leftarrow OH^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2 e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ ( $NiO_x + Li$ )	650 °C
Oxyde solide (SOFC)	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ (Cermet Ni-ZrO <sub>2</sub> )	ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\leftarrow O^{2-}$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$ (Perovskites $La_xSr_{1-x}MnO_3$ )	700 – 1000 °C

# L'architecture d'une pile : de la cellule au module

## Exemple de la Pile à Membrane échangeuse de protons



**Composants, électrodes et AEM**



**Cellule unitaire PEMFC**



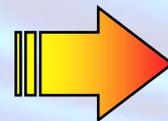
**Module PEMFC  
FCgen-1030V3 de 1,2 kW  
pour cogénération domestique**

# L'architecture d'une pile : du module au système

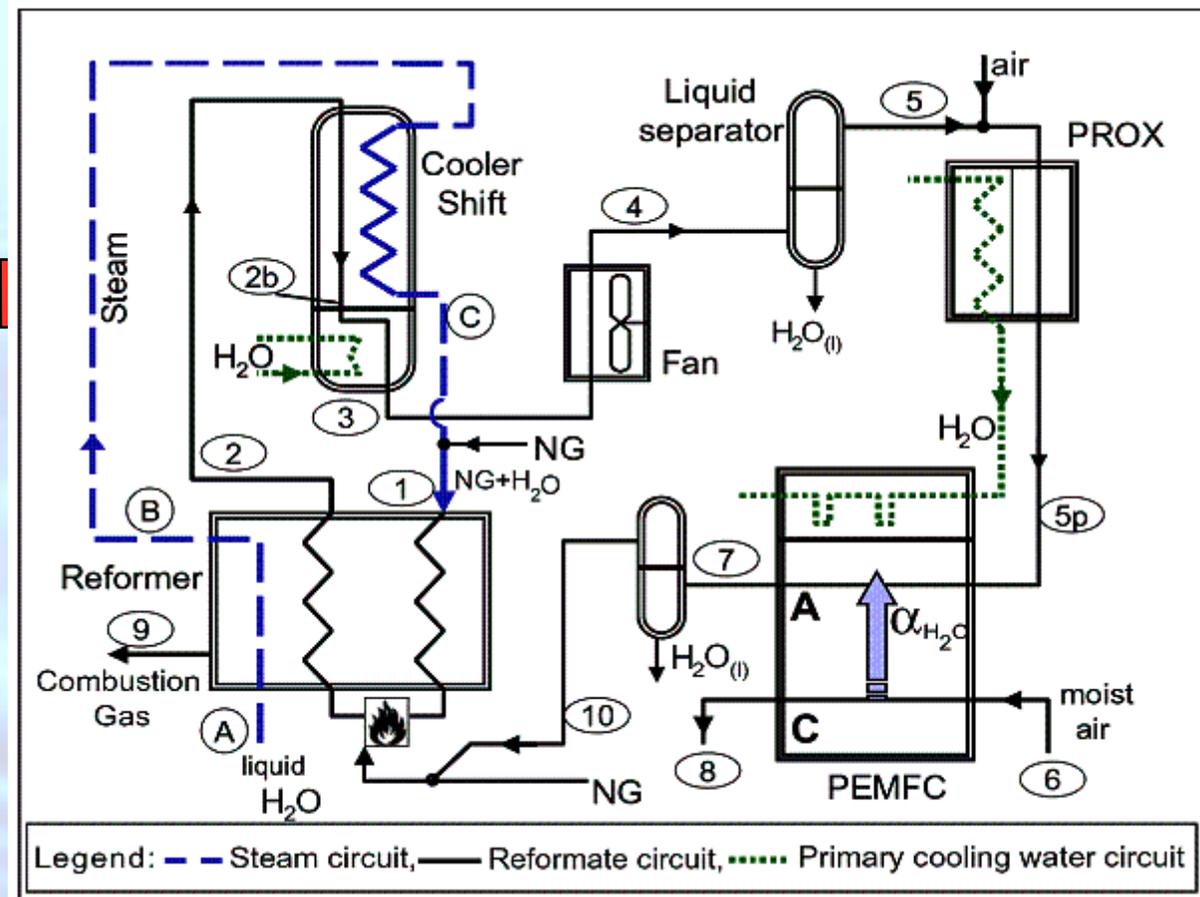
## Exemple de la Pile à Membrane échangeuse de protons



**Fabrication module**



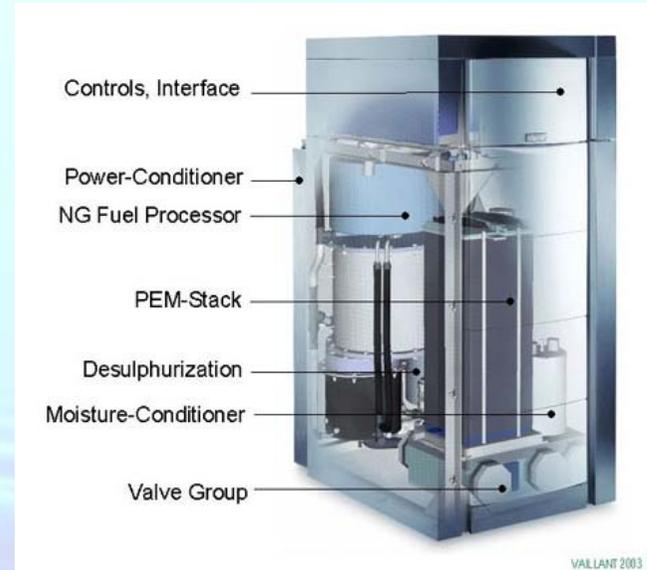
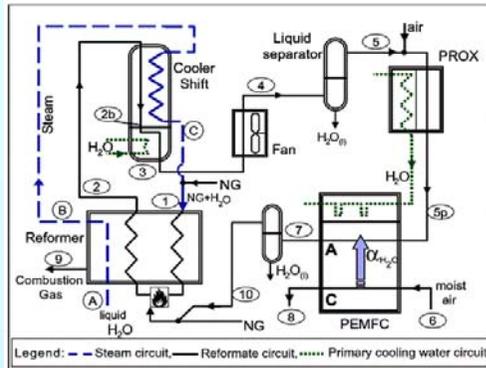
**Système Pile à Combustible pour cogénération**



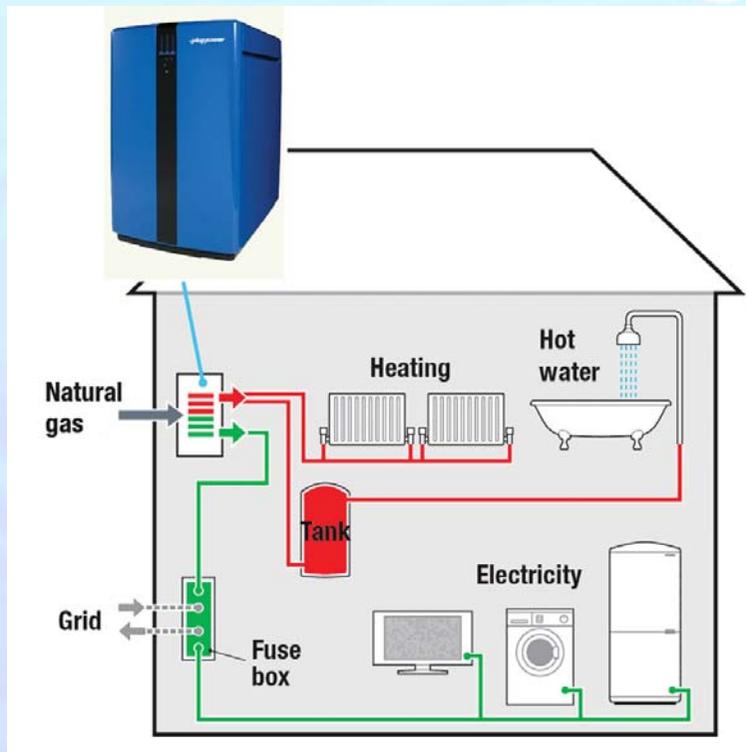
**Intégration module**

# L'architecture d'une pile : l'intégration système

## Exemple de la Pile à Membrane échangeuse de protons



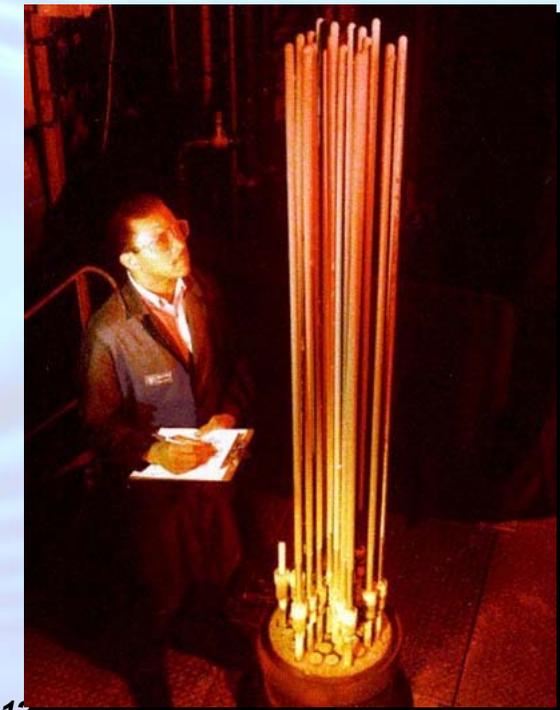
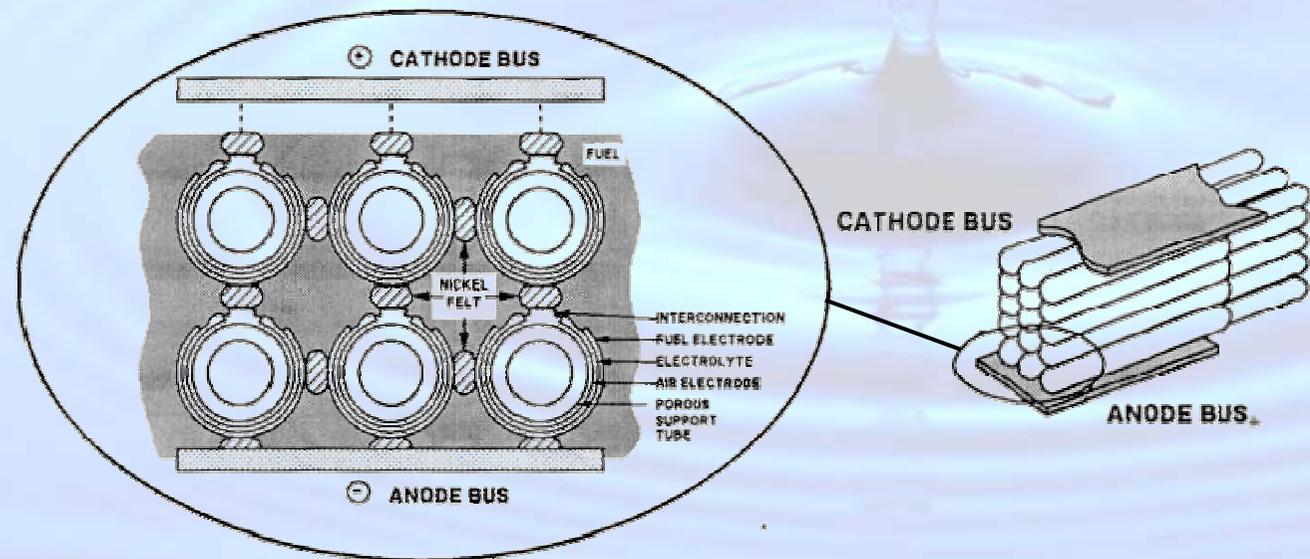
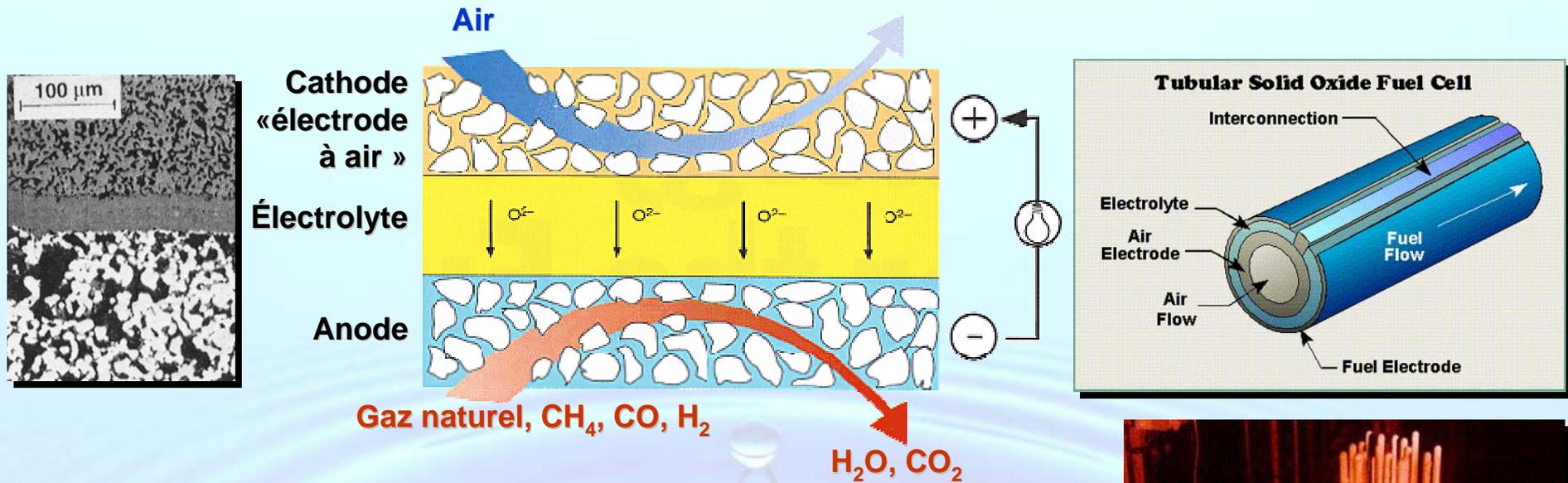
*Intégration système*



*Intégration habitation*

# L'architecture d'une pile : de la cellule au module

## Exemple de la Pile à oxyde solide (technologie tubulaire Westinghouse)



# Quelques exemples de Piles à Combustible PEMFC

**BALLARD®**



**Module FCgen-1030V3  
de 1,2 kW**

**plug power®**  
FUEL CELL SYSTEMS

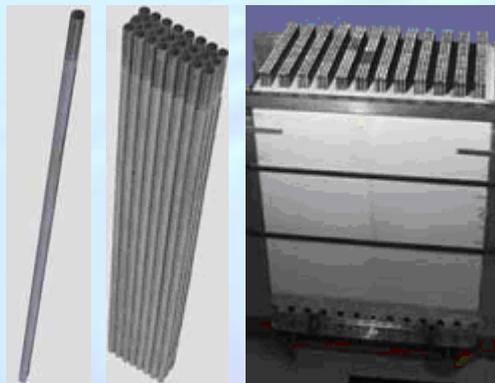


**PEMFC HT  
Système de 2.5 kW à 5.0 kW  
composé de deux modules**

# Quelques exemples de Piles à Combustible

## Les différentes technologies SOFC

- Architecture tubulaire (SIEMENS)
- Architecture plane (TOPSOE)
- Micro SOFC tubulaire (AIST)

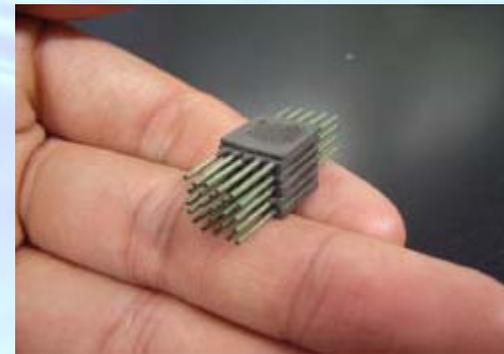


Cell 110 W  
Bundle 3 kW  
Stack 125 kW

**SIEMENS : architecture tubulaire**



**TOPSOE : Module SOFC de 1 kWe** réalisé à partir de cellules 12x12 cm<sup>2</sup>



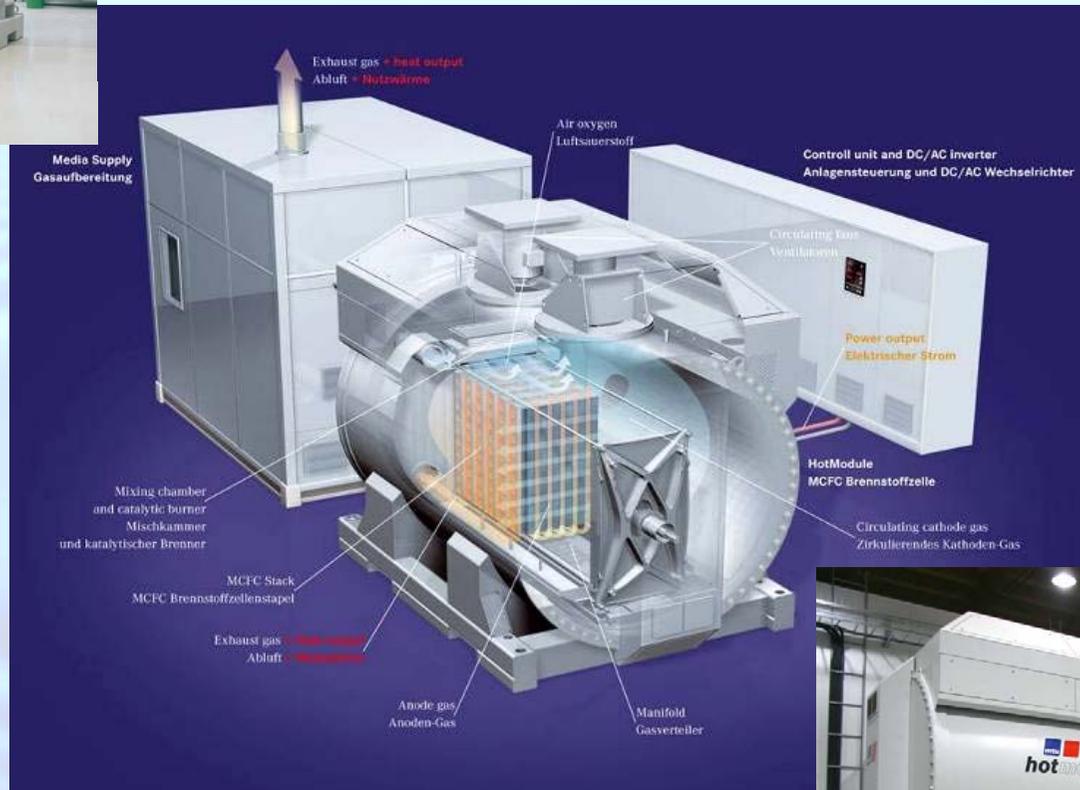
**Micropile SOFC AIST (Japon) et Toho Gas Co. (2007)**  
puissance de l'ordre de 2W/cm<sup>3</sup> à 550°C  
**SOFC tubulaire** (tubes d'un diamètre compris entre 0.8 et 2 mm)

# Quelques exemples de Piles à Combustible MCFC



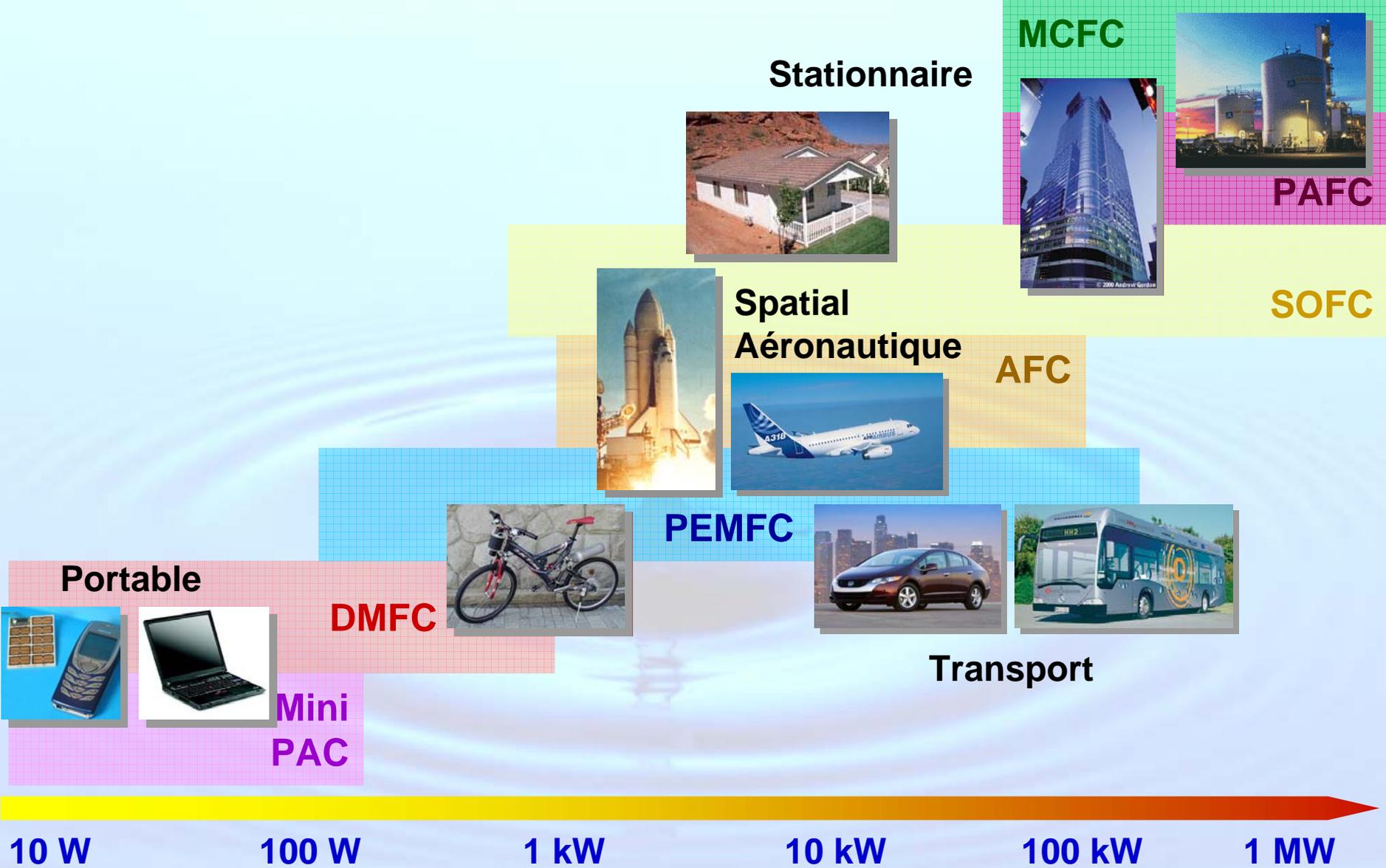
CFC  Solutions

***CFC Solutions GmbH :***  
***Unité MCFC de 250 à 500 kW***



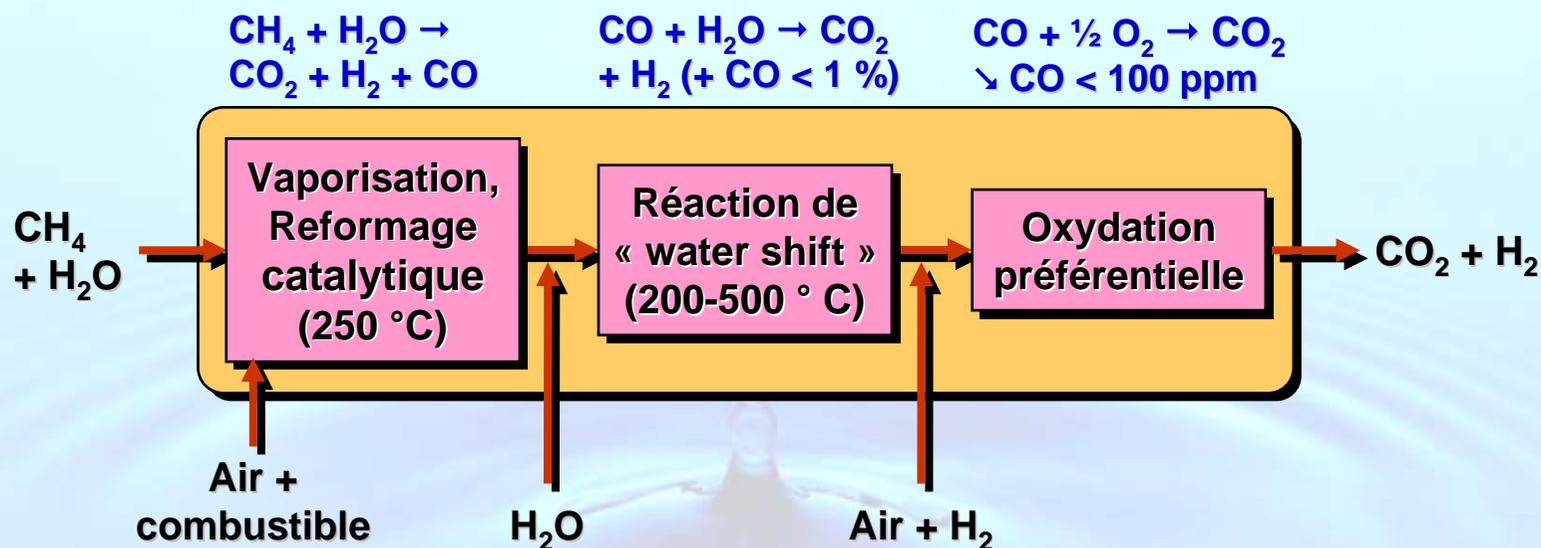
*La Pile à Combustible et la cogénération (Salon Interclima, 10 février 2010)*

# Les applications des Piles à Combustible

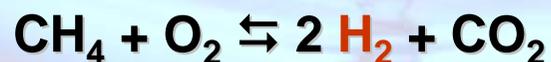


# Le reformage du gaz naturel

- Vaporeformage :



- Oxydation partielle :



- Reformage autothermique (ATR) :

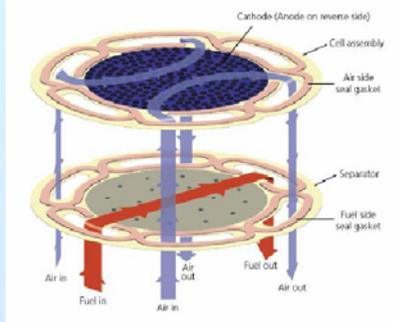
Combinaison du vaporeformage et de l'oxydation partielle

# Les applications des Piles à Combustible

## Le stationnaire : la micro cogénération domestique

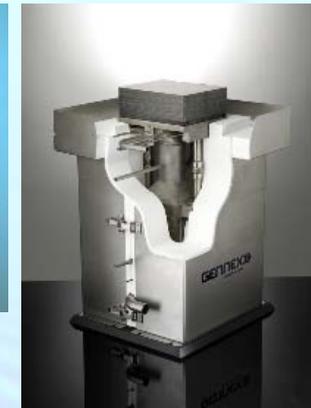
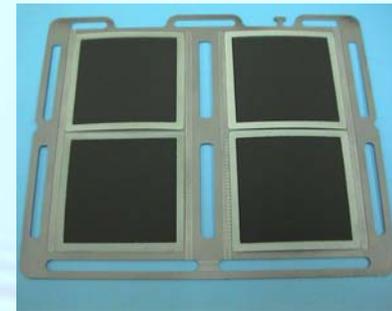


Cellule à Electrolyte Support



Système Net-Gen (1 kW)

Cellule à Anode Support



Module Gennex (1 kW)

Accord pour développer une chaudière intégrée de micro-cogénération domestique pour le marché français entre :

- Ceramic Fuel Cells Limited
- Gaz de France
- De Dietrich Thermique



Développement de chaudières de micro-cogénération de 1 kW



# Les applications des Piles à Combustible

## La cogénération collective

Le projet CELLIA :

- Pile à combustible dédié au secteur du logement social démarré en 2006. La pile installée par Dalkia en partenariat avec de l'OPAC de Paris, contribuera à fournir 20 % de besoins en énergie à 283 logements sociaux à Paris.
- Production d'électricité et de chaleur à partir du gaz naturel. L'électricité produite fait l'objet d'un contrat de rachat avec EDF.
- Pile MCFC de MTU : 230 kW électrique et 180 kW thermique

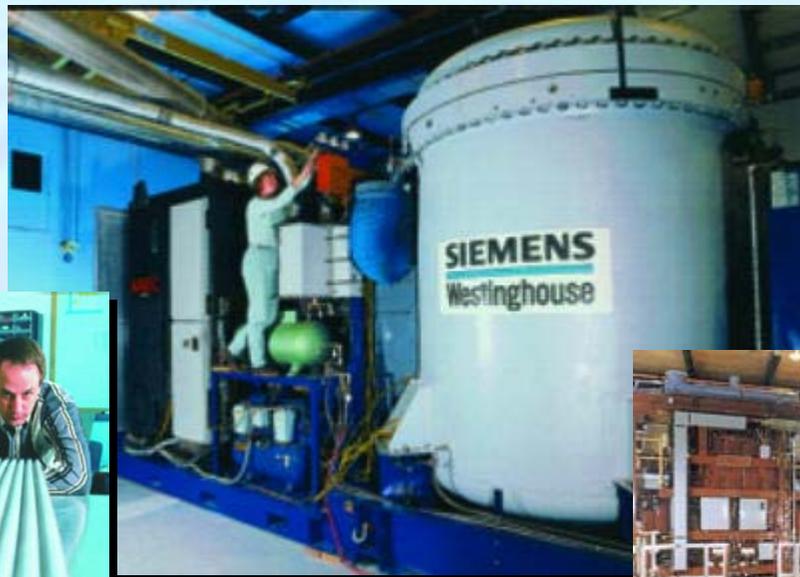
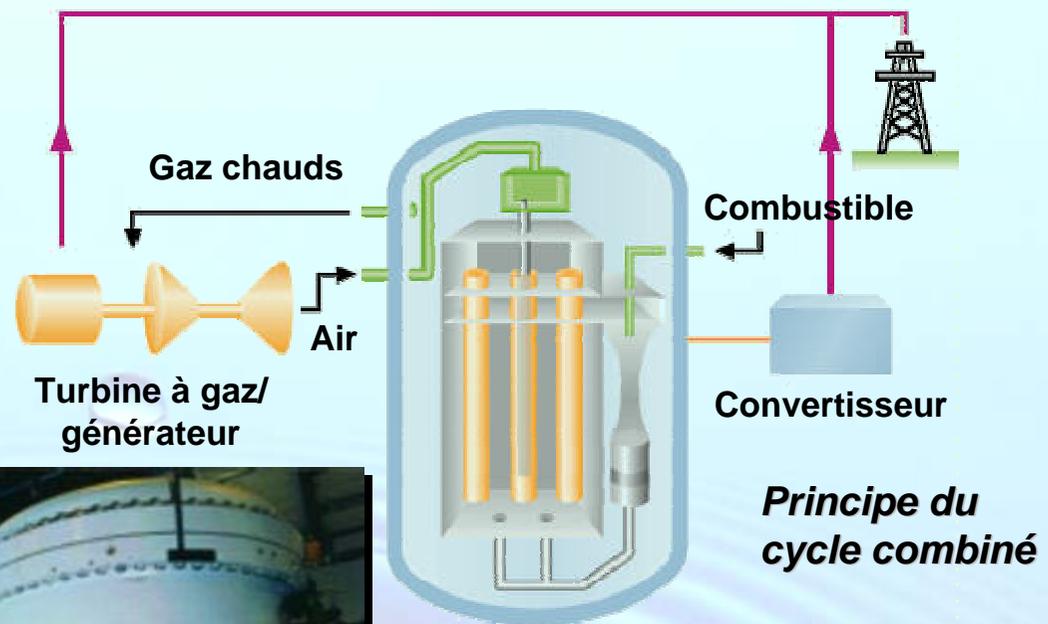
2 objectifs majeurs :

- étudier le comportement de la pile sur une durée longue, (6 ans minimum) afin de démontrer la viabilité technique de cette technologie
- engranger l'expérience nécessaire à faire progresser la recherche sur l'utilisation de la pile à combustible appliquée au chauffage de logements

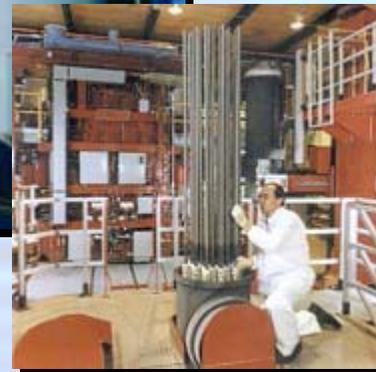


# Les applications des Piles à Combustible

## Le cycle combiné



**Siemens Westinghouse :**  
*unité de 220 kW couplée  
à une turbine à gaz*



**SIEMENS**  
Westinghouse

# Les atouts de la pile à combustible

- **La réduction des gaz à effet de serre et les économies d'énergie**
  - ✦ **Les piles à combustible permettent de générer un courant électrique de façon continue avec des rendements élevés :**
    - ✓ **Le rendement électrique dépasse actuellement les 40 % et peut atteindre 70 % lors du couplage d'une pile haute-température avec une turbine à gaz**
    - ✓ **Le rendement total (électrique + thermique) est aujourd'hui de l'ordre de 80 % et devrait atteindre 90 %**
  - ✦ **Les piles à combustible contribuent ainsi aux économies d'énergie et participent à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>**
  - ✦ **Grande flexibilité au niveau du combustible : gaz naturel, biogaz, hydrogène, alcool...**

# Les atouts de la pile à combustible

## ● La protection de l'air

- ✦ Une pile à combustible, fonctionnant avec de l'hydrogène pur ou du gaz naturel, ne rejette ni oxydes de soufre ni particules
- ✦ Lorsque l'hydrogène est obtenu à partir de gaz naturel, une pile à combustible ne rejette que :
  - ✓ Des quantités infimes de  $\text{NO}_x$  et de CO
  - ✓ 4 mg/kWh de  $\text{NO}_x$  et des traces de CO pour la PAFC de Chelles
  - ✓ A titre indicatif, le label ange bleu pour les chaudières individuelles : 65 mg/kWh de  $\text{NO}_x$  et 50 mg/kWh de CO

## ● La limitation des nuisances sonores

- ✦ Le processus électrochimique de la pile ne génère pas de bruit
- ✦ Seuls les systèmes auxiliaires (ventilation, circulateurs...) engendrent un bruit faible

## ● Maintenance limitée (pas de pièce en mouvement)

# Exemples de programmes phares



**callux** (nip)  
Praxistest Brennstoffzelle fürs Eigenheim

Projet de démonstration de systèmes de chauffage basés sur les piles à combustible

- Le projet de démonstration de systèmes de chauffage "Callux", débuté en septembre 2008, devrait accélérer la commercialisation de systèmes de chauffage basés sur le principe des piles à combustible.
  - 9 partenaires
  - Budget de 86 M€, dont 45 M€ de financements par les partenaires
  - Durée de 7 ans
- Plus de 800 systèmes seront installés jusqu'en 2010 dans des habitations afin de pouvoir évaluer leur compatibilité à être utilisés quotidiennement jusqu'en 2015.



PEMFC (70°C)  
Performance max.  
1,0 kWe/1,7 kWth



SOFC  
Puissance max.  
1,0 kWe/2,0 kWth



HT PEMFC  
Puissance max.  
4,6 kWe/1,5 - 7 kWth



SOFC  
Puissance max.  
1 kWe/approx. 20 kWth

# Exemples de programmes phares



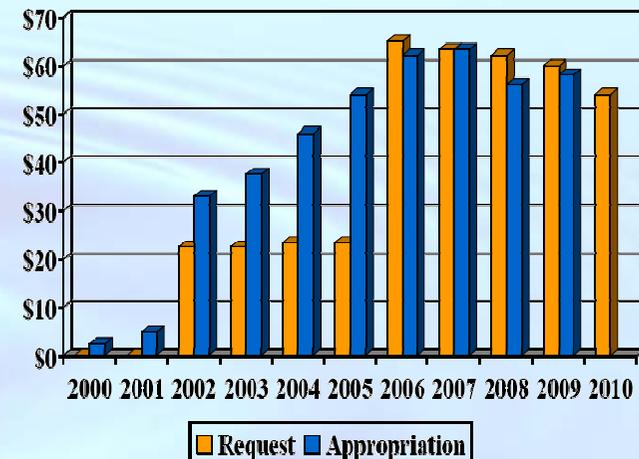
Pacific Northwest  
National Laboratory  
Operated by Battelle for the  
U.S. Department of Energy

- Le programme SECA démarré en 1999 rassemble l'état, l'industrie, et la communauté scientifique afin de développer la technologie SOFC pour diverses utilisations.
- Le programme SECA a pour objectif la mise sur le marché des systèmes SOFC entre 3 kW et 10 kW pour des applications stationnaire, transport et défense.

## Partenaires industriels



Système 3 kW



## Evaluation des coûts de production industrielle

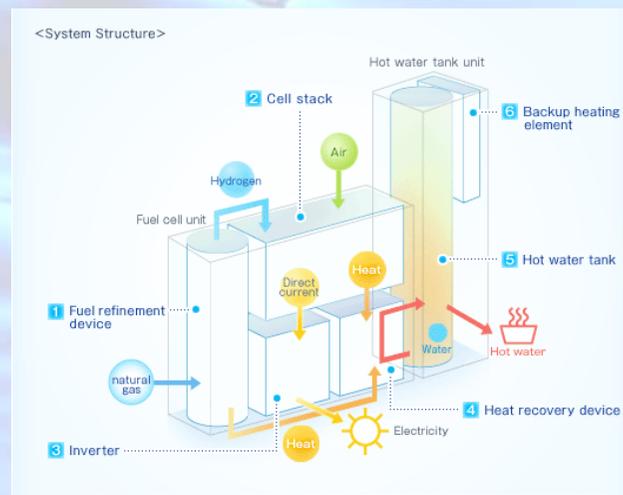
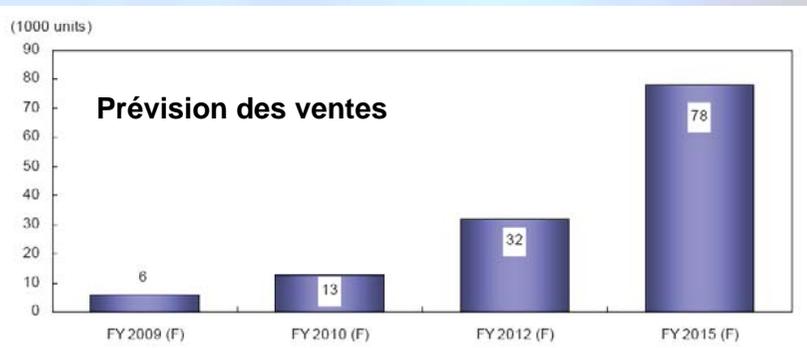
- Module ~ \$175/kW
- Système < \$700/kW

# Exemples de programmes phares



## Déploiement de la commercialisation de systèmes de chauffage basés sur les piles à combustible

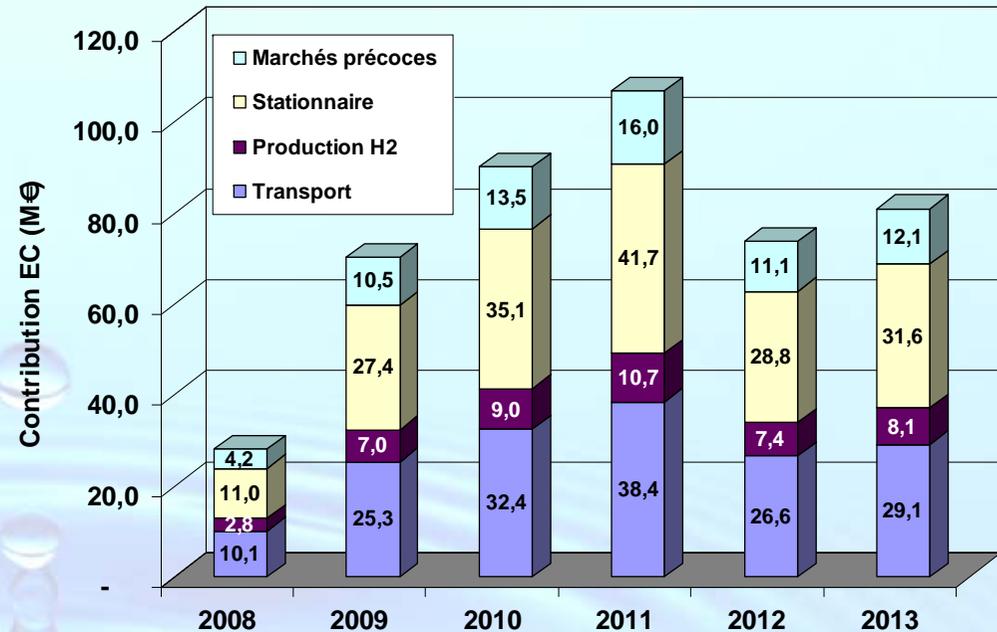
- 6 gaziers japonais ont lancé la vente d'une unité résidentielle de cogénération sous la marque commune ENE-FARM en mai 2009.
  - Tokyo Gas, Osaka Gas, Toho Gas, Saibu Gas, Nippon Oil Corporation, Astomos Energy Corporation
- Unité de cogénération de 700 W d'électricité et 900 W de chaleur.
  - Fabricants : Toshiba Fuel Cell Power Systems Corporation, ENEOS Celltech Co., Ltd et Panasonic Corporation
- Pour l'année 2009, le ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) subventionne la moitié des coûts d'installation à hauteur de 10 500 € par unité.
- Les ventes des systèmes pile à combustible ENE-FARM ont été soutenues par la publicité réalisée par les promoteurs immobiliers.



# Exemples de programmes phares



- 2008 : Lancement du JTI « Hydrogène et Piles à Combustible »
  - Période 2008 - 2013
- Budget total : 940 M€ dont 470 M€ d'aide européenne
- 175,6 M€ d'aide sur la thématique « Stationnaire »



Application Area	Targets 2010	Targets 2015	
		Volume	Cost and Technology
Stationary Power Generation & CHP	3 - 7 MW installed electrical capacity in the EU for pre-commercial demonstration	~ 100 MW installed electric capacity	Cost of €4,000 - 5,000/kW for micro CHP Cost of €1,500 - 2,500/kW for industrial/commercial units

# Merci de votre attention

**Thierry Priem**

**Responsable du Programme Hydrogène & Piles à Combustible**

**CEA Grenoble  
17, rue des Martyrs  
38054 Grenoble cedex 9**

**[thierry.priem@cea.fr](mailto:thierry.priem@cea.fr)**

