

Préparation agrégation génie électrique  
Epreuve de dossier

*TIMIN J-Louis*

*le 03.04.11*

- [1] **Piles à combustibles** P. STEVENS, F. NOVEL-CATTIN, A. HAMMOU, C. LAMY, M. CASSIR Techniques de l'ingénieur D3340 8-2000.
- [2] **Pile à Combustible. Enjeux - Technologies - Applications – Perspectives** Marie-Cécile PERA L2ES Belfort, Diaporama pédagogique 2006/2007.
- [3] **Association en parallèle de générateurs pile à combustible PEMFC** James GARNIER Extraits du mémoire de thèse de doctorat L2ES Belfort, juin 2006.
- [4] **LES PILES BASSE TEMPÉRATURE PEMFC. Les verrous scientifiques et technologiques** F. JOUSSE, J. GRANIER CLEFS CEA - N° 44 - HIVER 2000-2001, pp.48-56.
- [5] **Fuel Cells and Load Transients** C. WANG, M.H. NEHRIR IEEE power & energy magazine, pp.58-63.
- [6] **Axane (Air Liquide) piles à combustible Documentations:**  
MOBIXANETM Le générateur électrique portable autonome, CommPacTM Base The Hydrogen and Fuel Cell stationary power solution, Comm Pac M Backup/UPS The Hydrogen and Fuel Cell stationary, backup power solution, AUXIPACTM Le générateur électrique intégré pour véhicules, <http://www.axane.fr/> (04-2004)
- [7] **Piles à combustible : la technologie des piles à combustible pour BTS, IUT, Universités, Ecoles d'Ingénieurs**  
Documentation de la société Systèmes Didactiques, 2006, 4p.

## **1 Le principe des Piles A Combustible**

1.1 Historique *[doc. 1 et 2]*

1.2 Principe de fonctionnement *[doc. 2]*

## **2 Les différentes types de Piles A Combustibles *[doc. 1 et 2]***

2.1 PAC basse température

2.2 PAC moyenne température

2.3 PAC Haute température

## **3 Performances des Piles PEMFC**

3.1 La membrane : le coût du coeur *[doc. 4]*

3.2 Les plaques bipolaires *[doc. 4]*

3.3 Système hybride « PEMFC-batterie » *[doc. 5]*

## **4 Les domaines d'applications *[doc. 6]***

## **5 Conclusion *[doc. 7]***

# 1 Le principe des Piles A Combustible

## 1.1 Historique

# PILE A COMBUSTIBLE

1839



[www.techno-science.net/forum/](http://www.techno-science.net/forum/)

Sir William Grove  
50 cellules élémentaires  
Quelques  
**milliampères/cm<sup>2</sup>**  
Tension **0,73V**

1969



[www.hynet.info/hydrogen\\_e/fuelcells/](http://www.hynet.info/hydrogen_e/fuelcells/)

Module Pratt & Whitney  
Mission Apollo 11- NASA  
Puissance **1,5kW**

1987

Mark II- New-York  
Unité de production  
d'énergie (hydrogène-  
air à acide  
phosphorique)  
Puissance **4,5MW**

[1] Piles à combustibles (Technique de l'ingénieur)

[2] Pile à Combustible. Enjeux - Technologies - Applications – Perspectives (L2ES Belfort)

# 1 Le principe des Piles A Combustible

## 1.2 Principe de fonctionnement

# PILE A COMBUSTIBLE

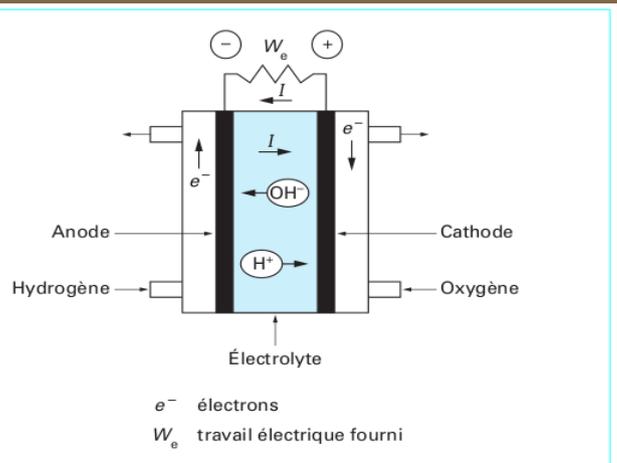
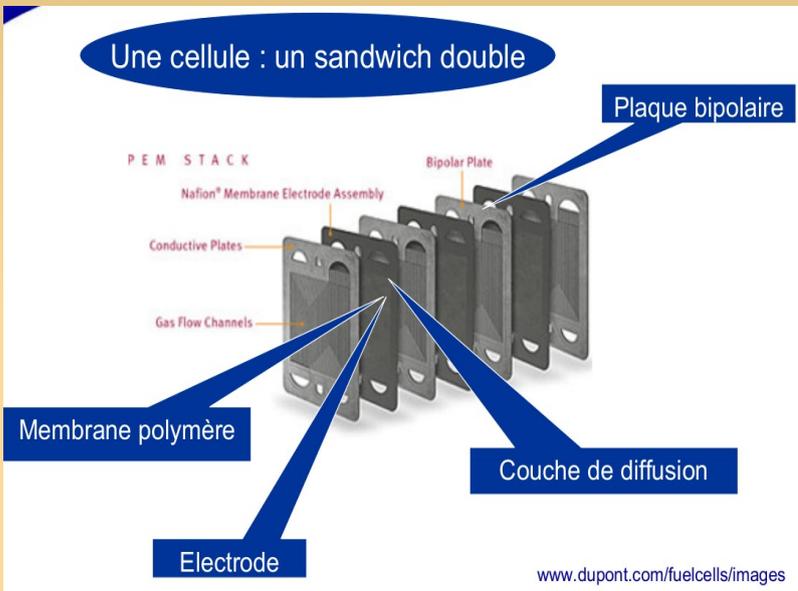
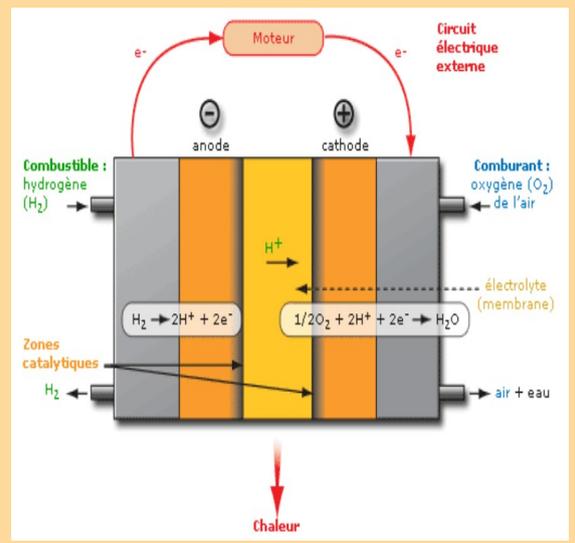


Figure 1 - Schéma de principe d'une pile à combustible hydrogène/oxygène



Energie électrique



Combustible et carburant



[1] Piles à combustibles (Technique de l'ingénieur)  
 [2] Pile à Combustible. Enjeux - Technologies - Applications - Perspectives (L2ES Belfort)

# 1 Le principe des Piles A Combustible

# PILE A COMBUSTIBLE

## 1.2 Principe de fonctionnement

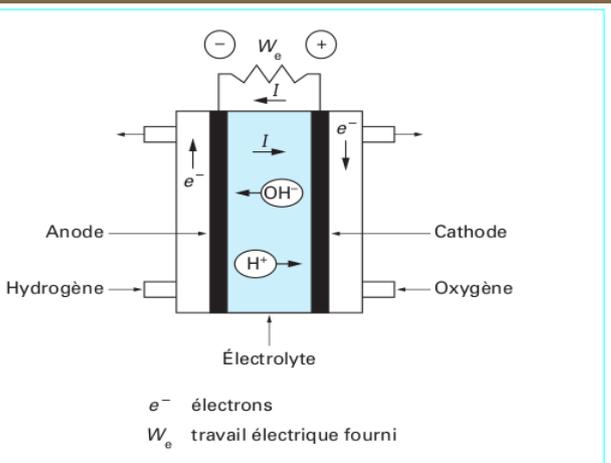


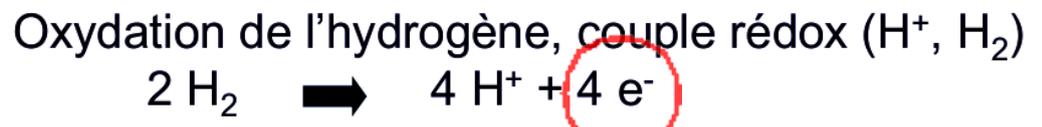
Figure 1 - Schéma de principe d'une pile à combustible hydrogène/oxygène

### Réactions :

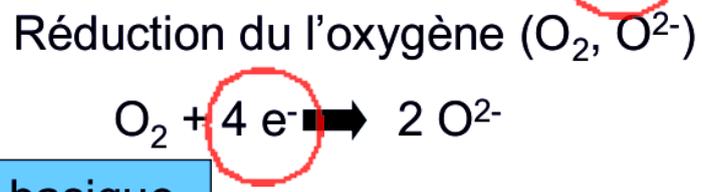
- Oxydation électrochimique de l'hydrogène (anode)
- Réduction électrochimique de l'oxygène (cathode)

### En milieu acide

Anode

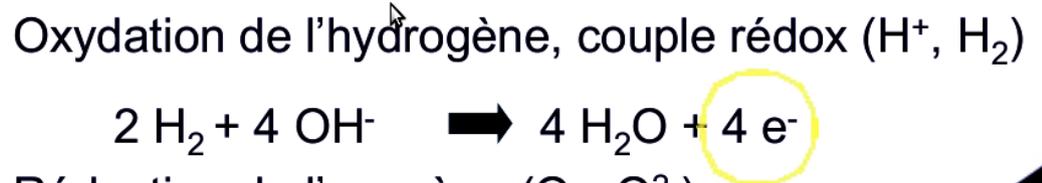


Cathode

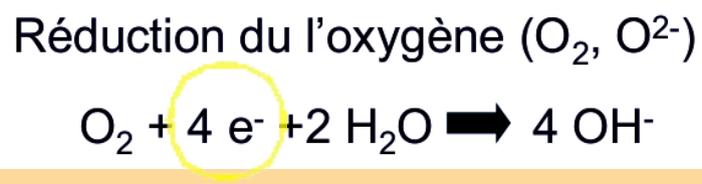


### En milieu basique

Anode



Cathode



Cas de le pile hydrogène oxygène



[1] Piles à combustibles (Technique de l'ingénieur)  
 [2] Pile à Combustible. Enjeux - Technologies - Applications - Perspectives (L2ES Belfort)

Température de fonctionnement	Type d'électrolyte
Basse (60 à 90°C)	PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell) <i>Pile à électrolyte polymère (ou PEMFC)</i>
	ACF (Alkaline Fuel Cell) <i>Pile alcaline</i>
Moyenne (200°C)	PAFC (Phosphorique Acide Fuel Cell) <i>Pile à acide phosphorique</i>
Haute (600 à 800°)	MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) <i>Pile à carbonate fondu</i>
	SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) <i>Pile à oxyde solide</i>

# 2 Les différents types de Piles A Combustibles

# PILE A COMBUSTIBLE

## 2.1 PAC basse température

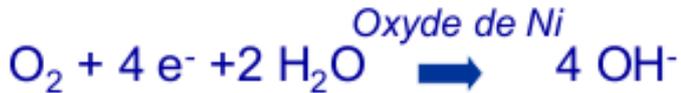
### PEFC

En milieu basique pas de métaux nobles nécessaires à T°C basse

Anode



Cathode



Électrolyte (KOH) hydroxyde de potassium liquide

Développement durant les 60's et 70's (missions Appolo)

En déclin

☺T°C : 65°C-200°C (grande plage d'utilisation)

☺Faible surtension d'activation (bonnes performances)

☺Faible coût (électrolyte bon marché, pas de métaux nobles)

☺Mise en œuvre assez simple (en particulier gestion de l'eau)

⊗Grande sensibilité au CO<sub>2</sub> : alimentation H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> purs

⊗Risques de fuite d'électrolyte

⊗Mauvaise dynamique



# 2 Les différents types de Piles A Combustibles

## 2.2 PAC moyenne température

# PILE A COMBUSTIBLE

PAFC

### Pile à acide phosphorique / Phosphorique Acide Fuel Cell

Électrolyte (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) acide phosphorique liquide immobilisé dans une matrice poreuse

T°C : 180°C-250°C

☺Technologie mature / pré-industrialisation : ONSI Corp. devenu UTC Fuel Cell (USA) et Fuji Electric, Toshiba, Mitsubishi Electric (Japon)

Application en stationnaire/production décentralisée sur niches

Nombreux démonstrateurs : 50 à 200kW, voire 11MW

☺Bonne fiabilité, durée de vie démontrée (10000 h)

☹Coût élevé (catalyseur en métaux nobles)

☹Sensibilité au CO ( diminue avec la T°C) et au soufre

☹Système reste complexe

Milieu acide

$2 H_2 \rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$

$O_2 + 4 e^- \rightarrow 2 O^{2-}$



[www.hynet.info/hydrogen\\_e/fuelcells](http://www.hynet.info/hydrogen_e/fuelcells)

MCFC

Pile à carbonate fondu / Molten Carbonate Fuel Cell

Électrolyte liquide à haute température : sel d'ions carbonate CO<sub>3</sub><sup>-</sup> qui se déplacent de la cathode vers l'anode

Regain d'intérêt très récent pour cette technologie, à confirmer

T°C : 600°C-700°C

Application en stationnaire/production décentralisée pour des applications de cogénération commerciales et industrielles en remplacement de groupes électrogène diesel

Nombreux démonstrateurs principalement dans la gamme 100 à 200kW

☺CO<sub>2</sub> doit être fourni à la cathode : gestion du transfert de CO<sub>2</sub>

☺CO est un combustible, reformage interne d'hydrocarbure

☺Catalyseurs non nobles : à l'anode nickel, à la cathode oxyde de nickel

☺Technologie mature / pré-industrialisation

Milieu acide

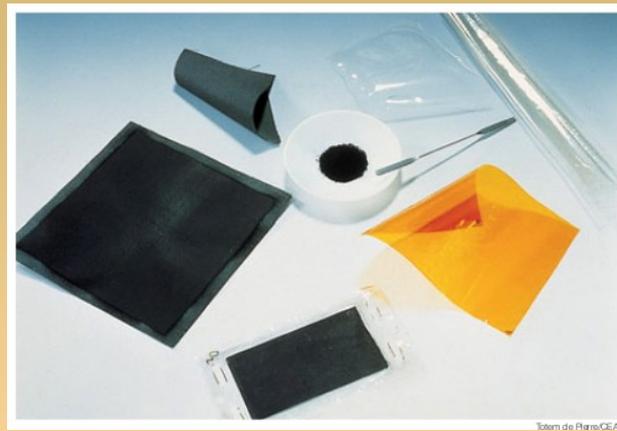


# 3 Performances des Piles PEMFC

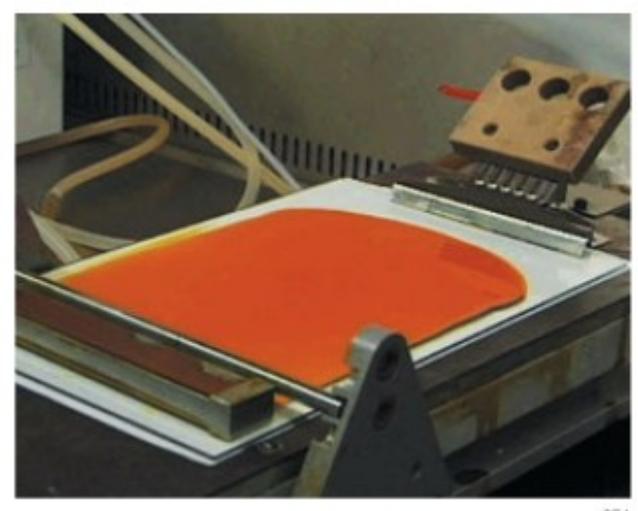
# PILE A COMBUSTIBLE

## 3.1 La membrane : le coût du coeur

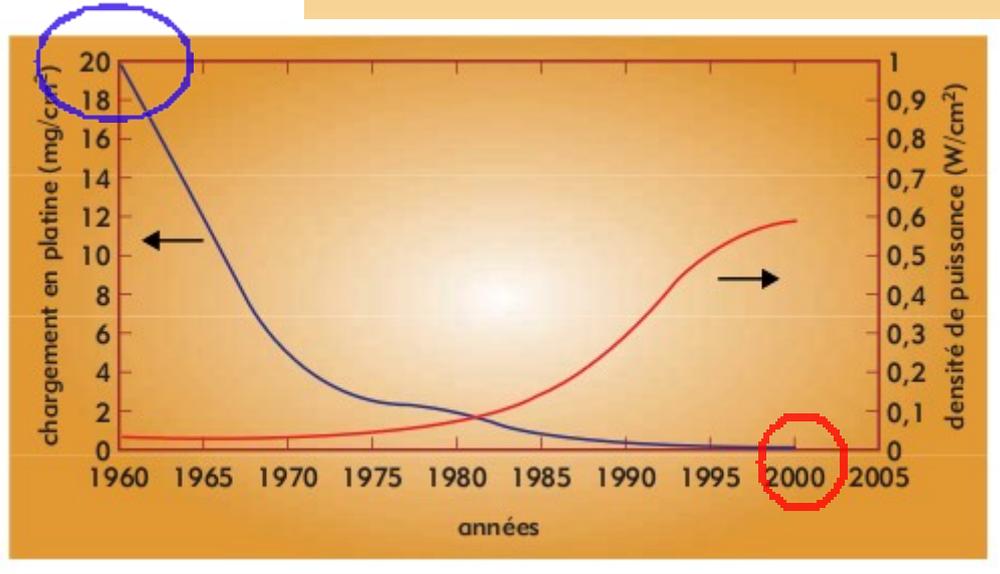
- Laisse passer les ions
- Bloque les électrons
- Non perméable au gaz
- Bonne résistance mécanique
- Maintien une teneur en eau élevée



Réalisation de membrane pour pile à combustible PEMFC par coulée de solution de polymères.



Polymère perfluoré



Electrodes de platine métallique (10 à 50euros/Kw !!!)

Très petites particules de platine (2 à 3 nanomètre)

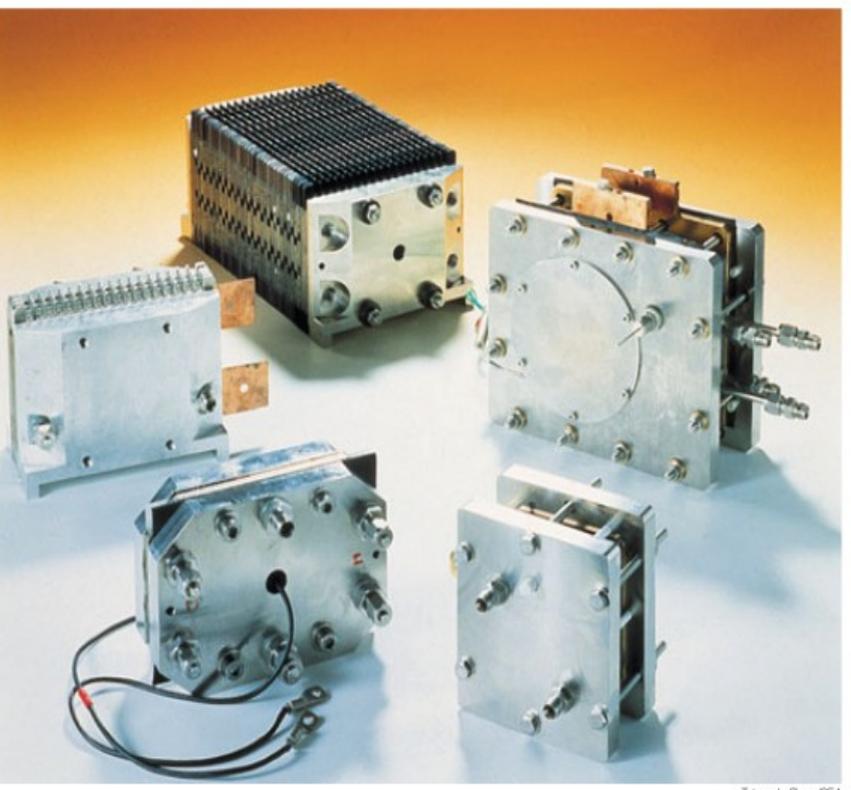
[4] LES PILES BASSE TEMPÉRATURE PEMFC. Les verrous scientifiques et technologiques

# 3 Performances des Piles PEMFC

## 3.2 Les plaques bipolaires

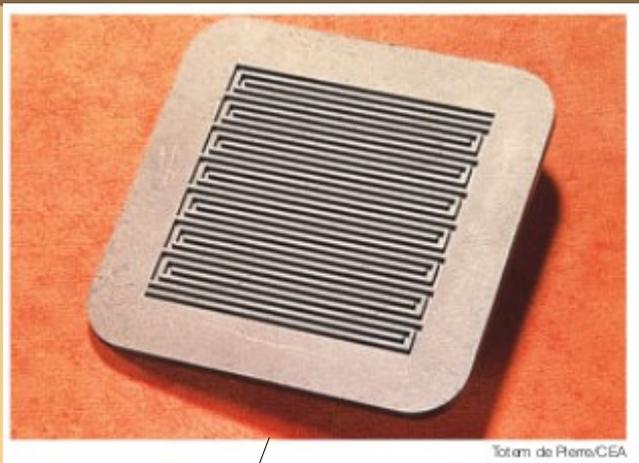
Collecte le courant, distribue et sépare les gaz à l'anode et à la cathode (10mm à 1mm selon les fabricants)

Éléments de piles réalisés au CEA pour des études de transferts de masse dans le cœur de pile d'une part (en haut à droite) et de matériaux d'autre part (en haut à gauche et en bas).



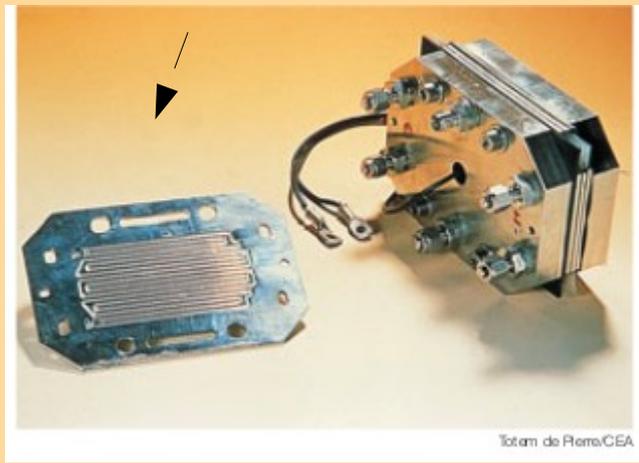
Totem de Pierre/CEA

# PILE A COMBUSTIBLE



Totem de Pierre/CEA

Graphite  
 $R > 10s/cm^2$



Totem de Pierre/CEA

Tôle métallique (surface active)  
Diminution de 27% de la masse par unité de surface active !2



# 3 Performances des Piles PEMFC

## 3.3 Système hybride « PEMFC-batterie »

# PILE A COMBUSTIBLE

- Atténuation des courants transitoires

Charges provoquant un « courant transitoire »

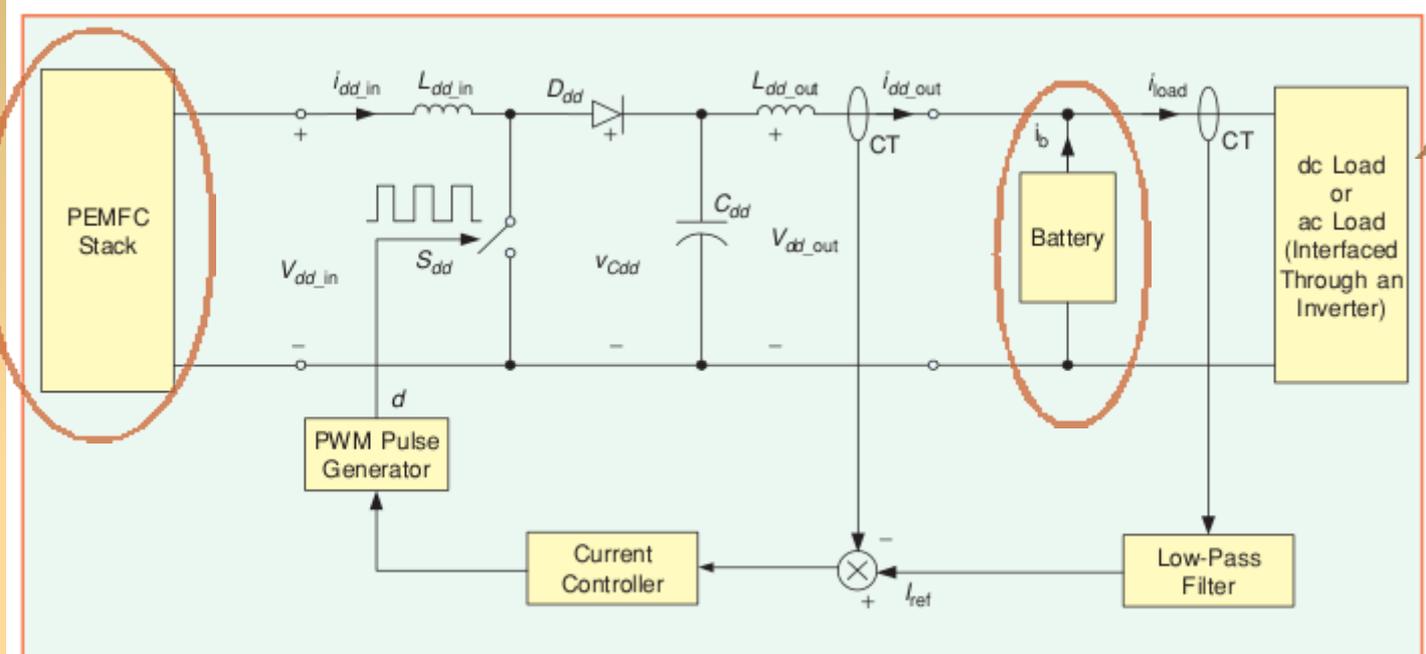


figure 4. Schematic diagram of a hybrid PEMFC-battery system with load transient mitigation control.

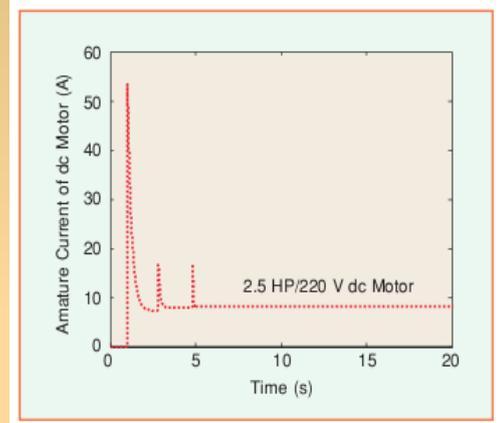


figure 6. Load transient of starting a 2.5 HP 220V dc motor.

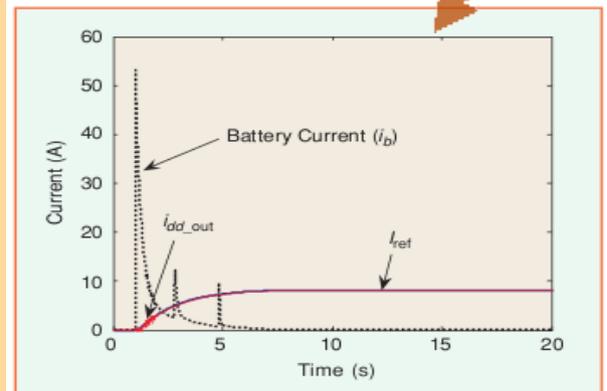


figure 7. Reference signal ( $i_{ref}$ ), battery current ( $i_b$ ), and converter output current ( $i_{dd\_out}$ ) under the load transient for PEMFC.

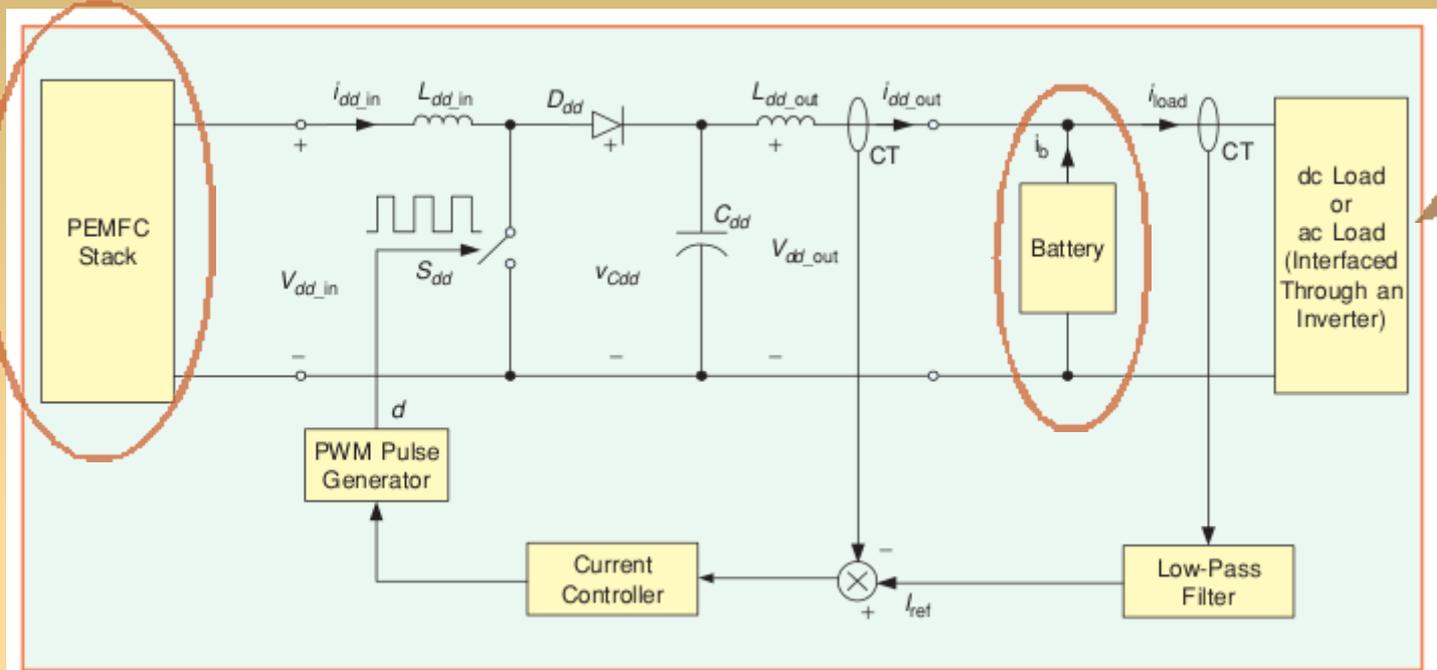


[5] Fuel Cells and Load Transients (EEE power & energy magazine)

# 3 Performances des Piles PEMFC

## 3.3 Système hybride « PEMFC-batterie »

# PILE A COMBUSTIBLE



Charges provoquant un « courant transitoire »

figure 4. Schematic diagram of a hybrid PEMFC-battery system with load transient mitigation control.

Tension de sortie de la PAC si pas de régulation en courant

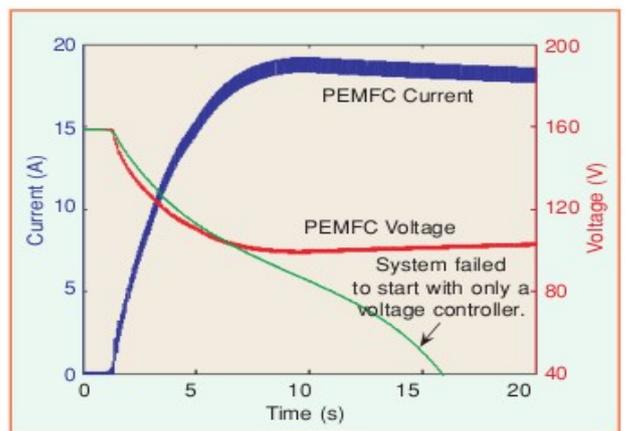


figure 8. The PEMFC output current and voltage responses to the dc motor load transient.

[5] Fuel Cells and Load Transients (EEE power & energy magazine)

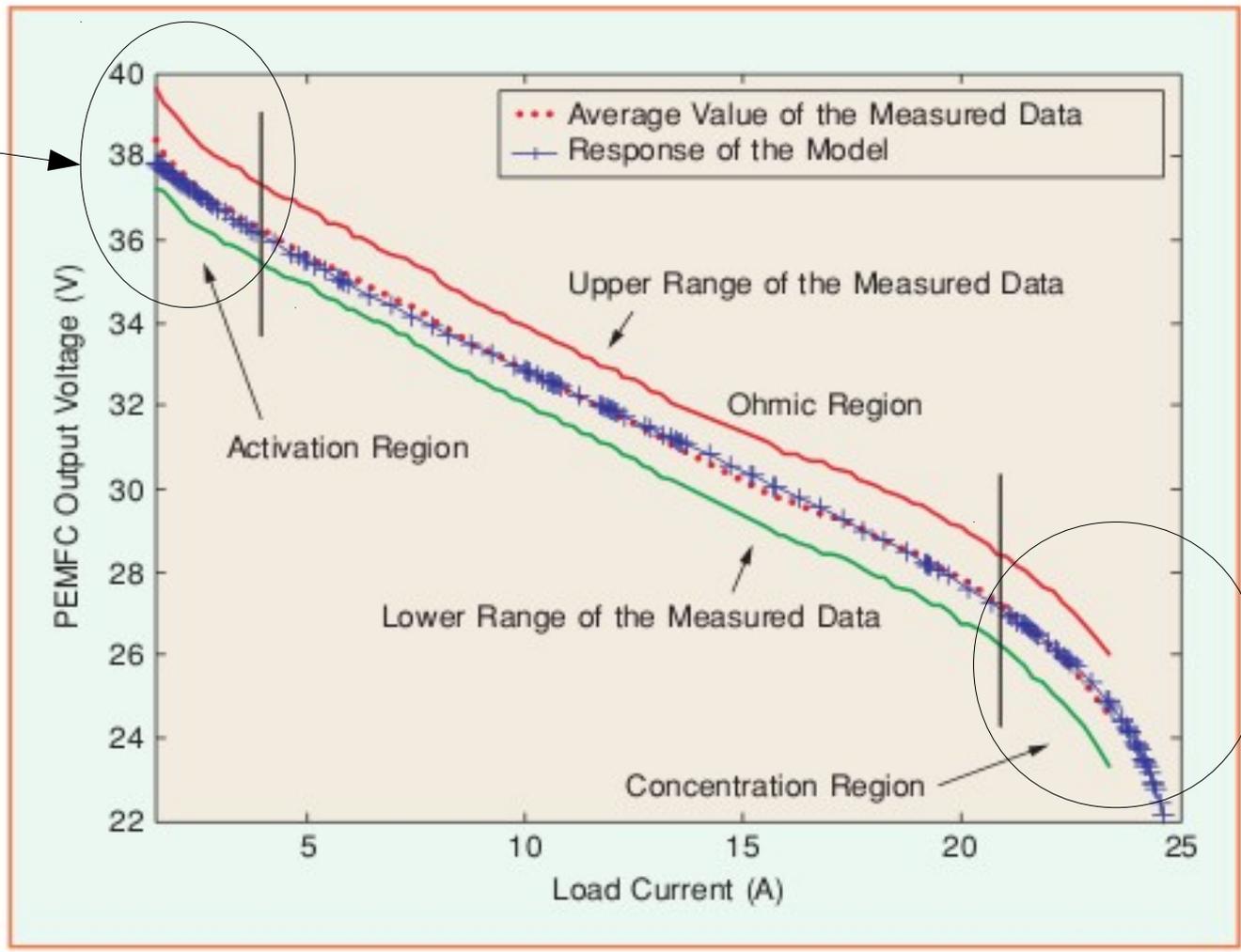
# 3 Performances des Piles PEMFC

# PILE A COMBUSTIBLE

## 3.3 Système hybride « PEMFC-batterie »

Aparissement en réactif

Pile PEMFC de 500W



chute de tension importante

figure 2. Simulated and experimental steady-state response of PEMFC.

[5] Fuel Cells and Load Transients (EEE power & energy magazine)

# 3 Performances des Piles PEMFC

# PILE A COMBUSTIBLE

## 3.4 mesure de l'impédance interne

Principe : générer une perturbation sinusoïdale  $V_{ac}$  à la fréquence  $f_{ac}$  relevé de la variation de courant.

$P=300W$   
 $V_{max}=20V$   
 $0 < I < 20A$   
 $10mHz < f < 50kHz$



Générale		Générateur de fréquence et analyseur	
Plage de fréquence	DC – 8 MHz	Plage de fréquence	10 $\mu$ Hz to 1 MHz
Résolution ADC/DAC	16 bit	Précision	< 0.05%
Distorsion harmonique	> 60 dB	AC amplitude range	1 mV to 1 V

Tableau 2. 1:caractéristiques techniques du IM6

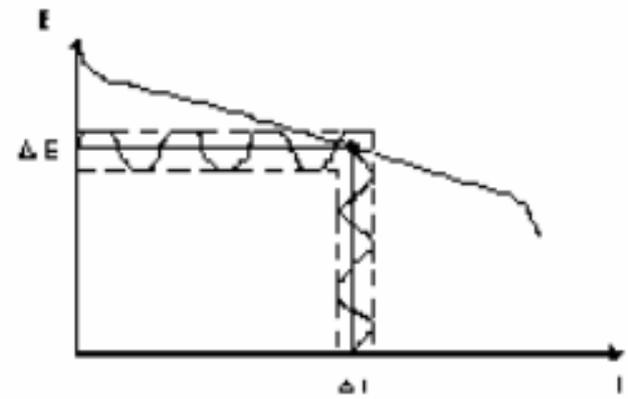


Figure 2.1 : Principe de la spectroscopie

[5] Fuel Cells and Load Transients (EEE power & energy magazine)

# 3 Performances des Piles PEMFC

## 3.4 mesure de l'impédance interne

Principe : générer une perturbation sinusoïdale  $V_{ac}$  à la fréquence  $f_{ac}$  relevé de la variation de courant.

$P=300W$

$V_{max}=20V$   
 $0 < I < 20A$   
 $10mHz < f < 50kHz$



# PILE A COMBUSTIBLE

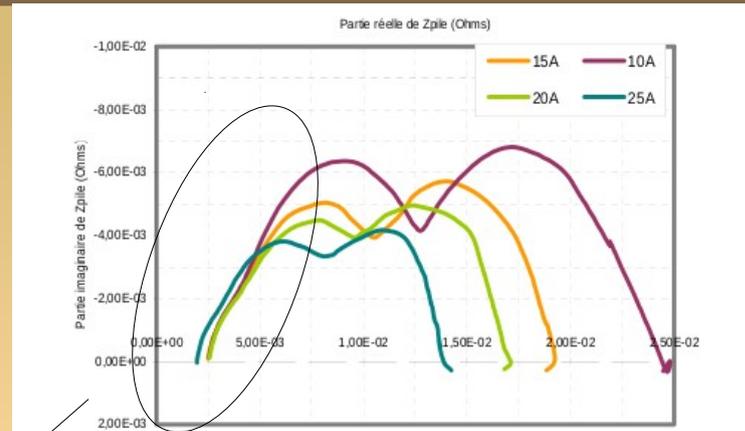


Figure 2.10 : Impédance mesurée avec correction du stack 3 cellules  
 Stœchiométrie  $H_2=2$ ,  $O_2=5$ ,  $T_{stack}=58^\circ C$ , hygrométrie 100%  
 $\tau_{di}=0.1 s$ ,  $\tau_{di}=0.009 s$ ,  $Cd_p=19e-6$ ,  $Cdc=23e-6$

Stabilité de l'impédance pour  $f < 50kHz$

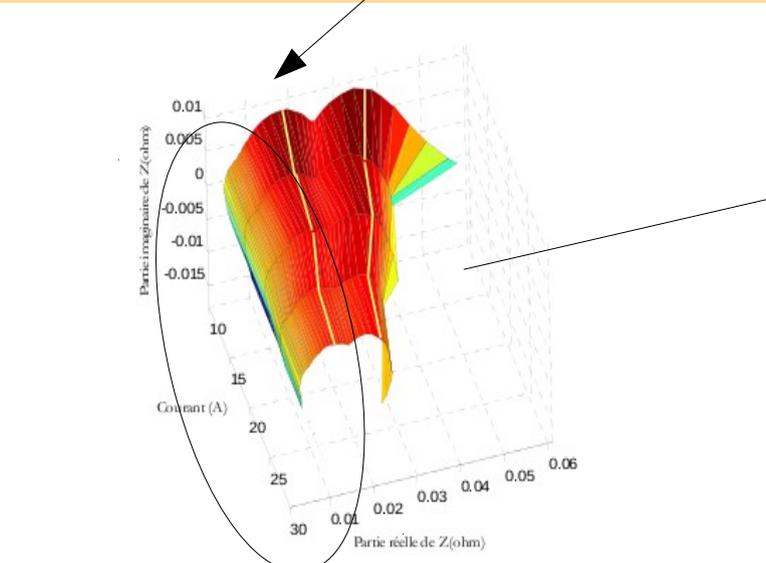


Figure 2.11 : Diagramme d'impédance mesuré aux bornes du stack BZ120  
 $FSA=2$ ,  $FSC=5$ ,  $T=55^\circ C$ ,  $0 < I < 25A$

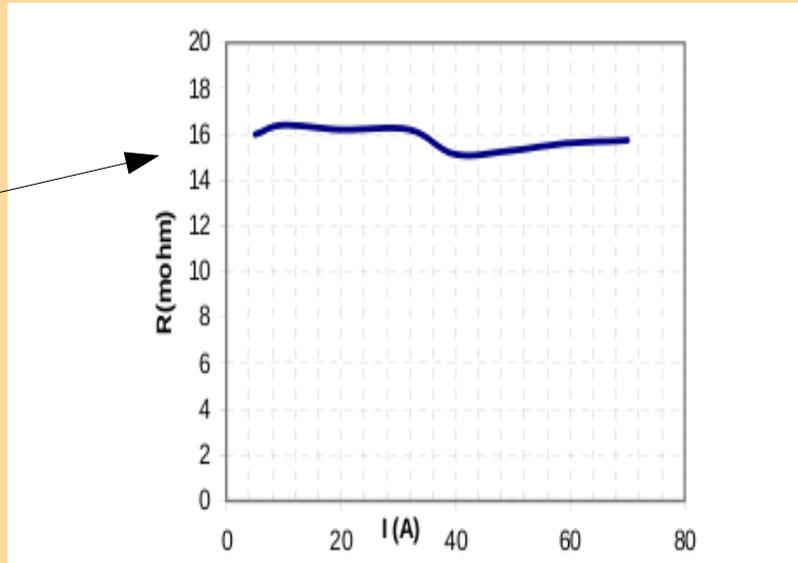


Figure 2.12 : Variation de l'impédance haute fréquence du stack

[5] Fuel Cells and Load Transients (EEE power & energy magazine)

# 4 Les domaines d'applications

## 4.1 Portables

# PILE A COMBUSTIBLE



Le tableau suivant permet de comparer quelques caractéristiques de la pile à combustible avec celles d'un groupe électrogène :

Caractéristiques	MOBIXANE™	GENSET Diesel
Puissance	2,5 kW	5 k VA
Puissance maximum	< 5 secondes	< 1 minute
Pics de démarrage	200 % PN pendant 1 sec	120 % PN pendant 1 sec
Volume	150 litres	400 litres
Masse	55 kilos	150 kilos
Emissions	aucune	CO2, Nox, CO...
Niveau de bruit @ 1 m	45 dba	85 dba
Utilisation intérieure*	Oui	Non
Qualité sinusoïde (THD)	+/- 3 %	irrégulière

\* avec ventilation adéquate

### MOBIXANE (Axane-Air liquide)

- Compact
- Portable
- Silencieux

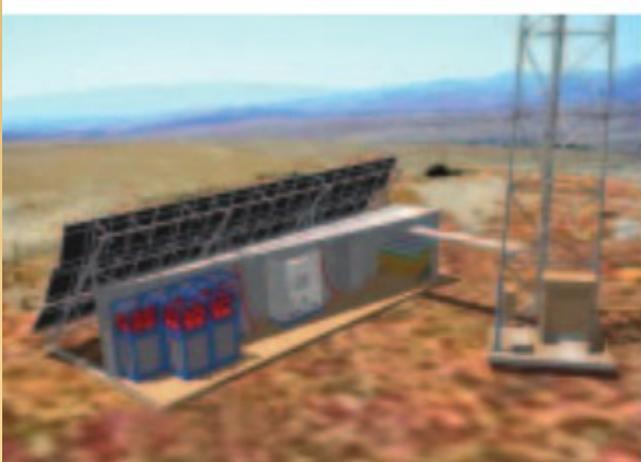


[6] Axane (Air Liquide) piles à combustible Documentations (Mobixane)

# 4 Les domaines d'applications

## 4.2 Stationnaire

# PILE A COMBUSTIBLE



### Technical specifications

- Power range . . . . . From 0.5 to 5 kW (1 or 2 modules)
- Overload capacity . . . . . From 5 to 10 kW (depending on the configuration)
- User voltage . . . . . 110 V AC / 60 Hz or 230 V AC / 50 Hz  
48 V DC - Battery charger mode 48 VDC
- Output sinusoid . . . . . THD<sup>1</sup> < 5% with resistive load
- Electrical protection . . . . . surge protection and short circuit
- Sound pollution . . . . . 45 dba at 1 meter
- Weight w / o storage . . . . . 600 kg
- Dimension . . . . . 115 x 170 x 210 cm
- Maximum power . . . . . Instantaneous
- Storage temperature . . . . . -55°C to +70°C
- Operating temperature . . . . . -20°C to +45°C
- Maximum altitude . . . . . Up to 3 000 meters operating
- EC label . . . . . in process
- UL/CSA labeling . . . . . in process

<sup>1</sup> Total Harmonic Distorsion



### CommPac Base (Axane-Air liquide)

- Générateur de puissance
- Complément installation photovoltaïque et éolienne

[6] Axane (Air Liquide) piles à combustible Documentations (CommPac Base, Comm Pac ackup/UPS)

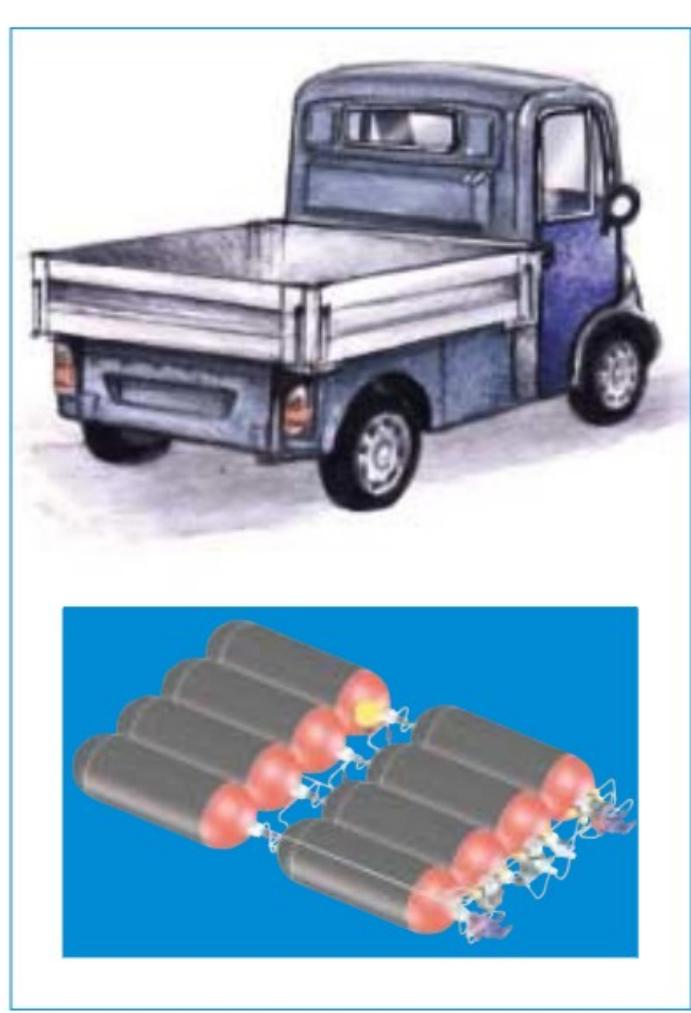
# 4 Les domaines d'applications

## 4.3 Transports

# PILE A COMBUSTIBLE

### Auxipac (Axane)

- Grande autonomie
- Silencieux
- Non polluant
- Léger et maniable

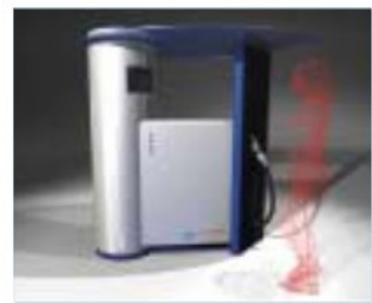


### SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

- Puissance nette : ..... 2,5 kW
- Pics de puissance : ..... 5 kW sur 1 seconde
- Tension utilisateur : ..... 110 V AC / 60 Hz - 230 V AC / 50 Hz - 48 V DC
- Sinusoïde de sortie : ..... +/- 3 %
- Protection électrique : ..... sur intensité et court circuit
- Nuisances sonores : ..... 45 dba à 1 mètre
- Poids : ..... 55 kg
- Dimensions : ..... 66 x 48 x 48 cm (150 litres)
- Transitoire de puissance : ..... instantanée
- Température de stockage : ..... -30° C à + 70° C
- Température en fonctionnement : .. -20° C à + 45° C
- Altitude maximum : ..... jusqu'à 3 000 mètres en fonctionnement
- Marquage CE : ..... en cours
- Marquage UL/CSA : ..... en cours

### Alimentation Hydrogène

- H<sub>2</sub> : ..... 99,99 % (hydrogène pur)
- 2 possibilités de recharge :
  - vide contre plein : ..... avec échange standard de rack
  - station de remplissage : ..... directement connectée au véhicule



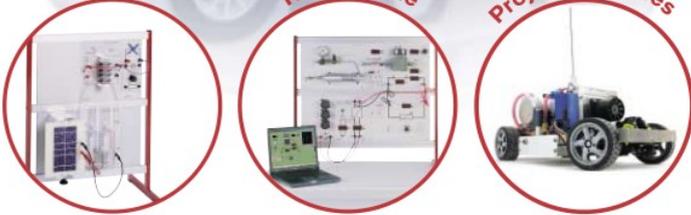
[6] Axane (Air Liquide) piles à combustible Documentations (Auxipac)

Exploitations  
pédagogiques

**Piles à combustible**  
La technologie des piles à combustible pour  
BTS, IUT, Universités, Écoles d'Ingénieurs



Physique    Technologie    Projets d'études




Module de puissance Nexa®

Logiciel et Didacticiel

Outils pédagogiques

Module de puissance Nexa® didactisé  
Pile à combustible de 1,2 kW montée sur un rack de 19"

Module réservoir d'hydrure de métal

Module contrôle d'énergie

Charge électronique CC

Pile à combustible 1200 W

[7] Piles à combustible : la technologie des piles à combustible pour BTS, IUT, Universités, Ecoles d'Ingénieurs