

# CARNAUTO

---

La pile à combustible PEM pour la mobilité



Plus d'innovations pour la compétitivité des PME de l'automobile et de la mobilité

- I. Présentation CARNAUTO
- II. Introduction sur l'hydrogène : Caractéristiques, marchés, applications et road map
- III. Introduction sur la technologie PEMFC :
  - a. Fondamentaux et architecture de principe
  - b. Caractéristiques et chiffres clés
- IV. Technologie PEMFC :
  - a. Étapes de conception/réalisation/qualification du matériau jusqu'au système
  - b. Evolution des performances de cellules et de stack sur 15 ans
- V. Moteurs à combustion interne hydrogène pour véhicules
- VI. Technologie PEMFC : Sécurité, normes et réglementations
- VII. Conclusion sur la technologie PEMFC : Analyse technico-économique

# Les instituts Carnot

---

## La recherche pour les entreprises

- Les instituts Carnot : **structures de recherche publiques** qui prennent des engagements forts pour développer la **recherche partenariale** au bénéfice de **l'innovation des entreprises** – de la PME au grand groupe – et des acteurs socio-économiques. Le réseau regroupe 39 instituts Carnot (labellisés par l'ANR). Plus d'info : <http://www.instituts-carnot.eu/fr>
- Carnauto : 9 instituts Carnot impliqués dans la filière automobile et mobilité. Objectif : **renforcer la compétitivité et l'attractivité** des ETI, PME et TPE en facilitant leur accès à l'innovation.

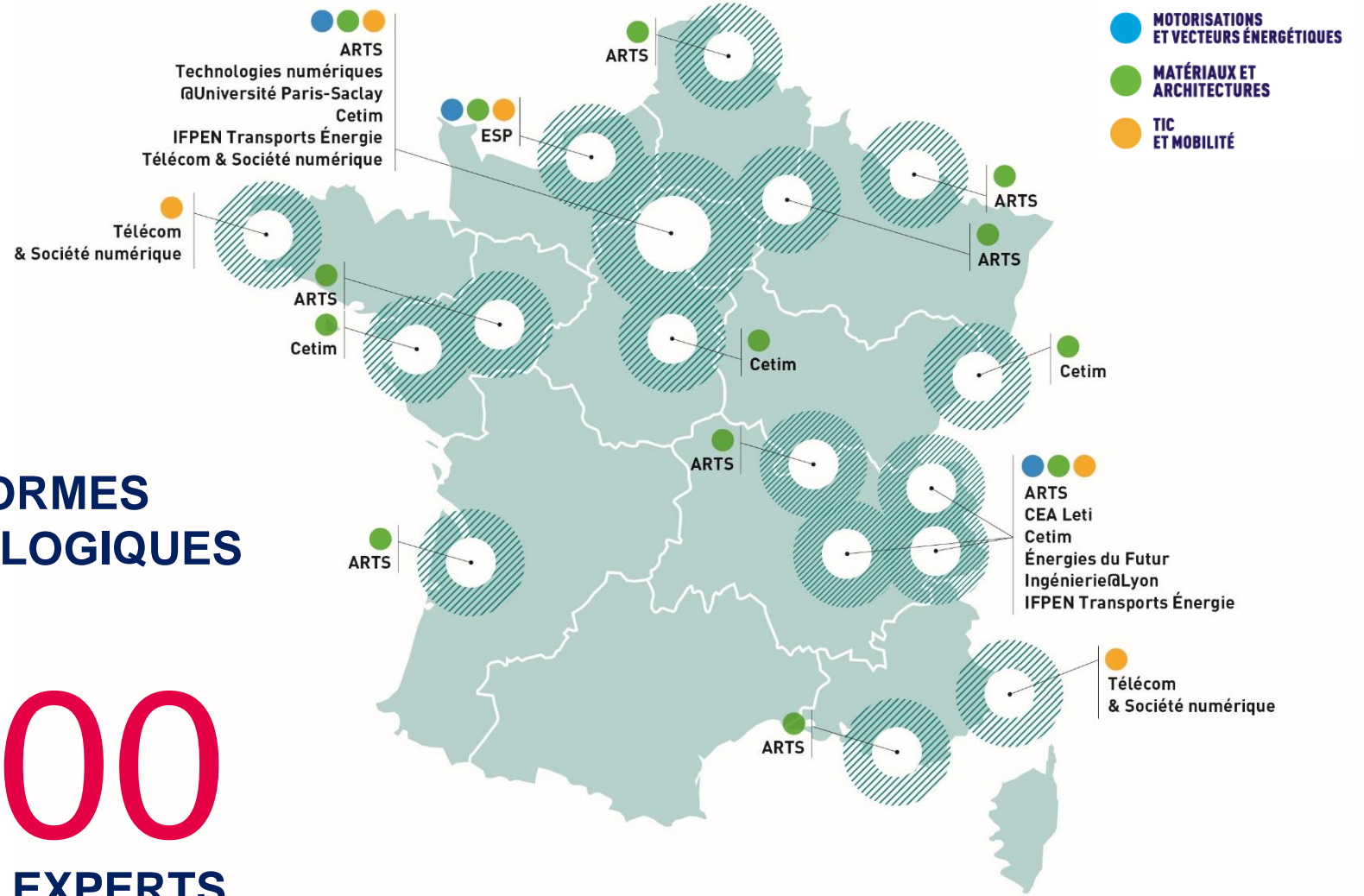
# L'action filière Carnauto

Un fort ancrage en région

**9** INSTITUTS  
CARNOT

**50** PLATEFORMES  
TECHNOLOGIQUES

**8000**  
EXPERTS



Nous suivre, nous contacter



[www.carnauto.fr](http://www.carnauto.fr)



[entreprises@carnauto.fr](mailto:entreprises@carnauto.fr)



Carnauto

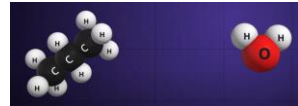
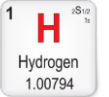


[@FiliereCarnauto](https://twitter.com/FiliereCarnauto)

# L'HYDROGÈNE : CARACTÉRISTIQUES, MARCHÉS ET APPLICATIONS

- **Caractéristiques:**

- L'élément chimique **le plus abondant de l'univers** et le troisième à la surface de la terre.
- Sur Terre, l'hydrogène est combiné sous forme d'**eau** ou **hydrocarbures**.
- **Densité énergétique massique très élevée**, densité énergétique volumique faible.

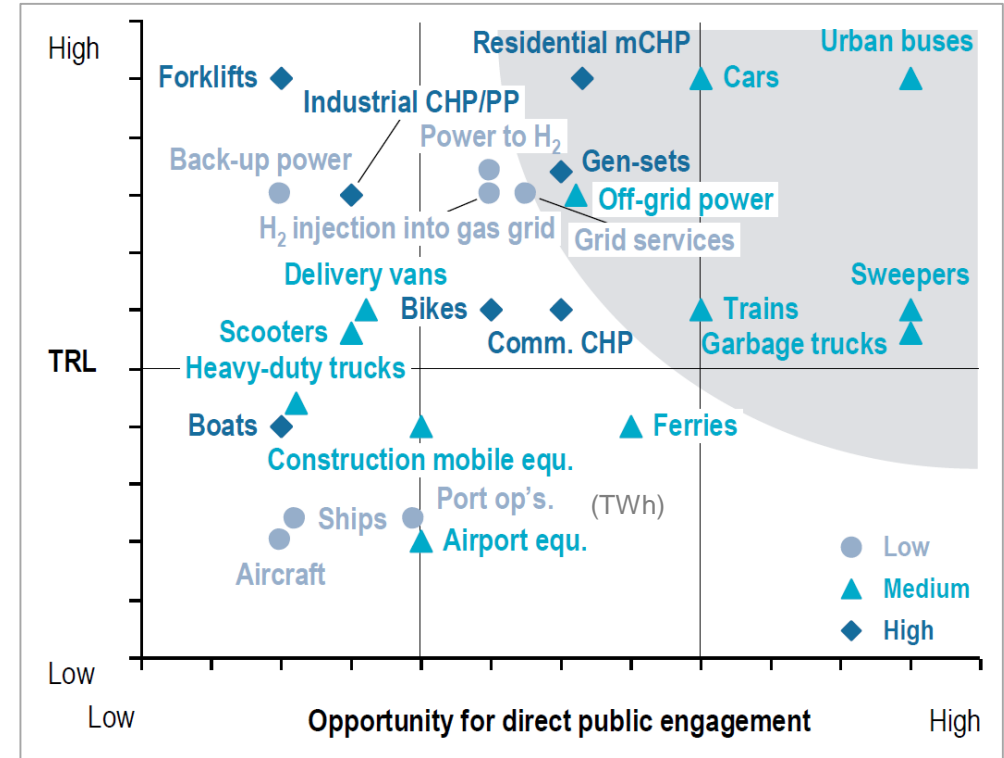
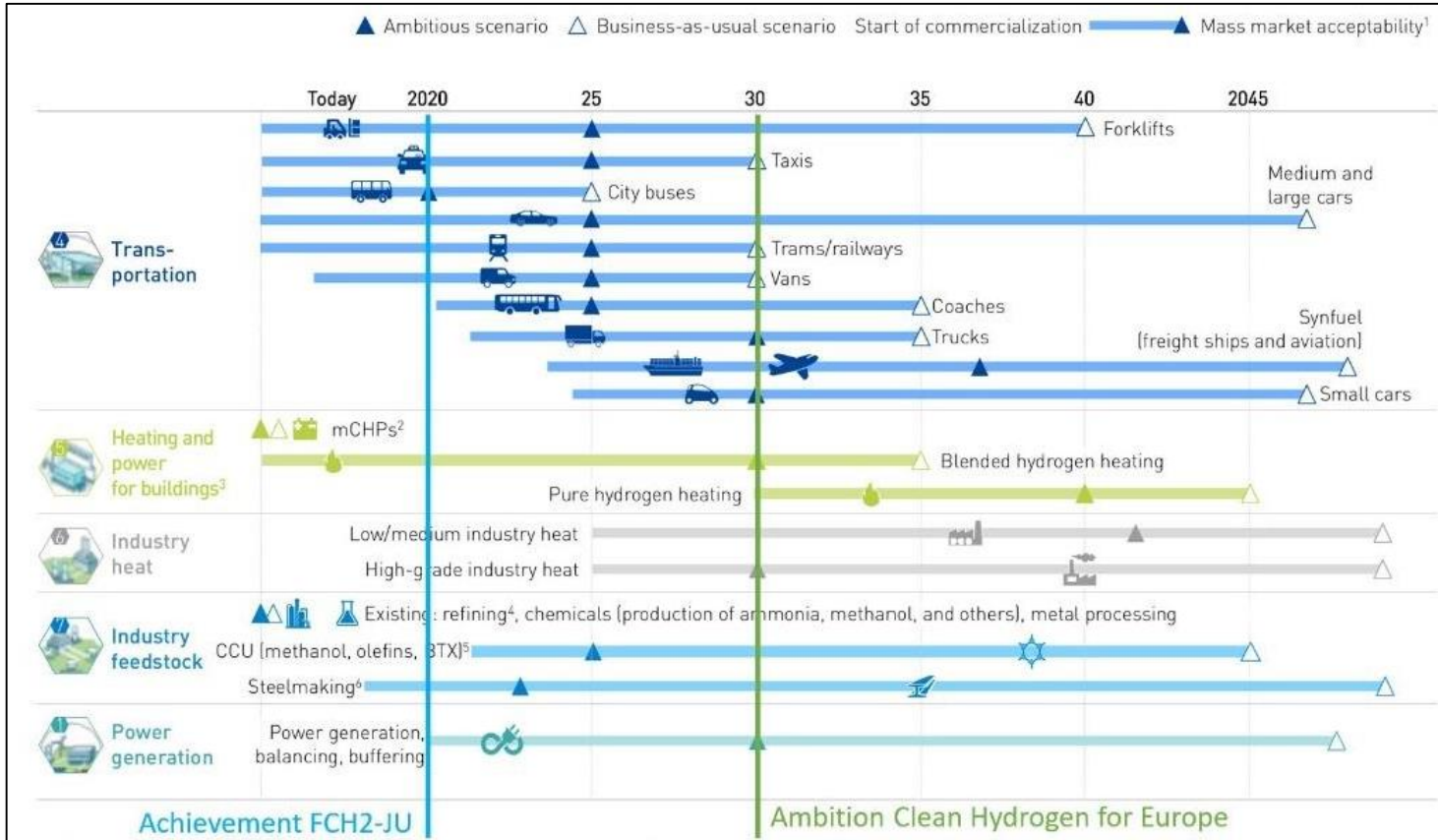


- **1 kg d'hydrogène c'est ...**

- ~ 33 kWh (pouvoir calorifique inférieur, 120 MJ)
- ~ 3 kg d'essence (~ 11 kWh/kg)
- ~ 25 litres à 700 bars (poids du réservoir env. 20 kg/kg H<sub>2</sub>) VS ~4 l essence équivalent énergie PCI
- ~ **16 kWh électriques en sortie de pile à combustible** (rendement électrique ~ 50% ; ~ 50% chaleur)
- ~ **100 km pour un véhicule de classe moyenne**
- 1 à 2 jours d'autonomie pour une maison tout confort (hors chauffage)
- 5 à 10 € selon les méthodes de production utilisées ~ €/km véhicule thermique de classe moyenne

- **Une filière à part entière**





• **Future issues**

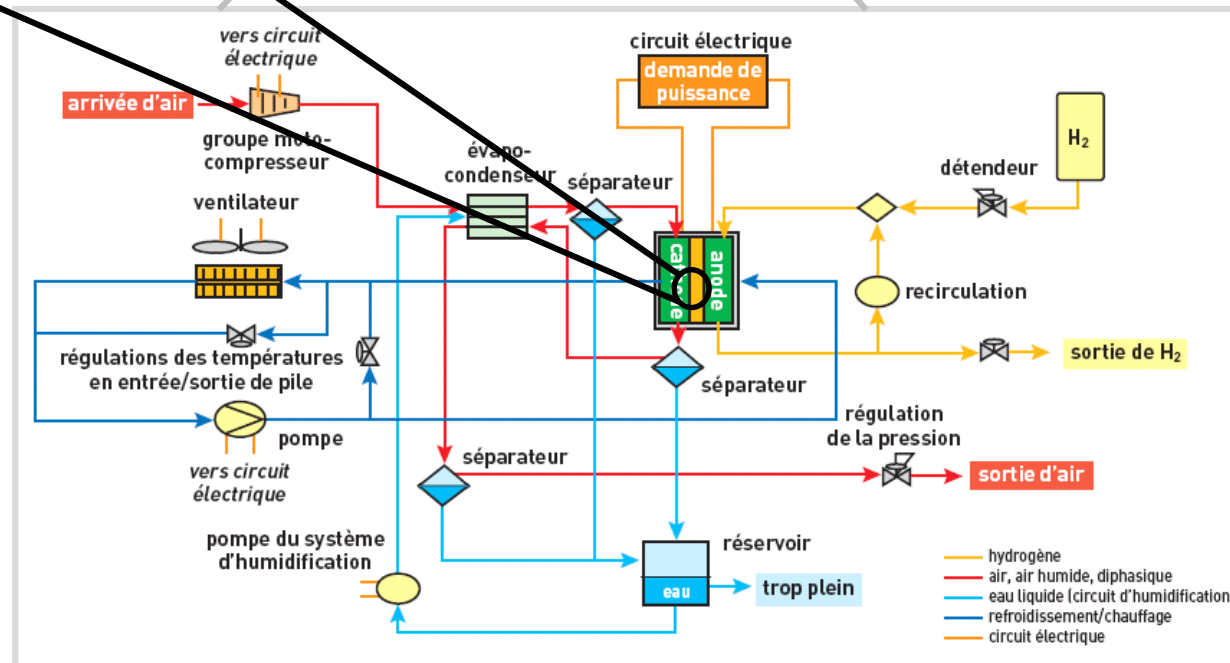
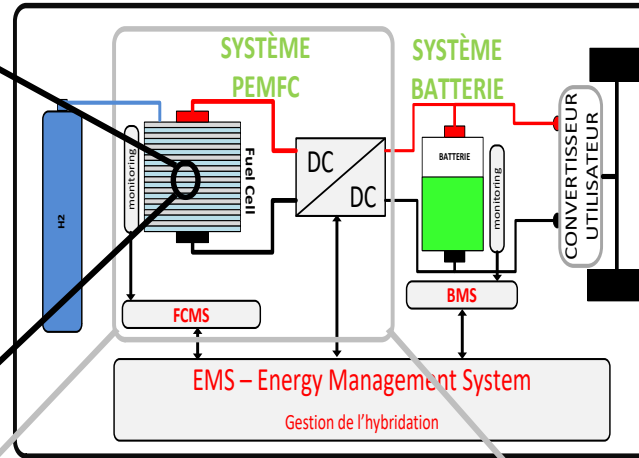
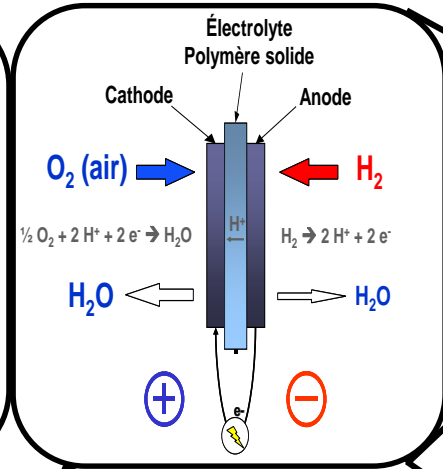
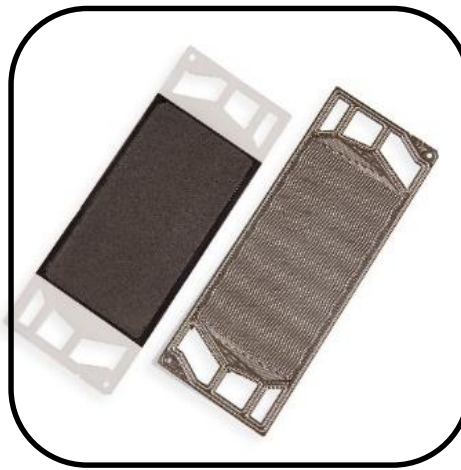
- CAPEX Cost reduction (massive production, Catalyst concentration reduction)
- « Green » Hydrogen availability
- Rules, Codes and Standard bodies adapted for medium duty vehicles

Sources: Hydrogen council, FCH2JU, France Mobility,

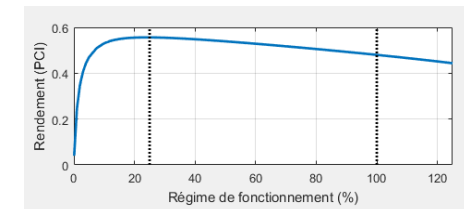


# TECHNOLOGIE PEMFC : FONDAMENTAUX ET CARACTÉRISTIQUES

# PEMFC : FONDAMENTAUX ET ARCHITECTURE DE PRINCIPE

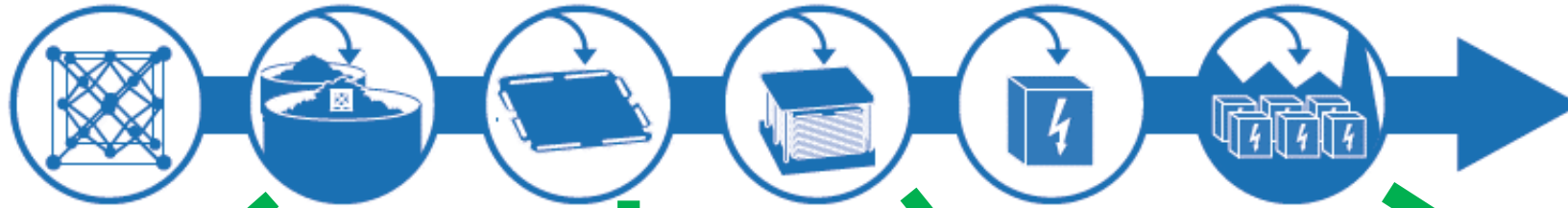


- La puissance (taille du générateur électrique) est découplée de l'énergie stockée (taille des réservoirs) : si forte énergie embaquée -> densité d'énergie principalement pilotée par taille réservoir.
- Densité de puissance système (80 kW) : 650 W/L et 650 W/Kg.
- Densité d'énergie du stockage H2 : 400 Wh/L et 750 Wh/Kg (net système).
- Possibilité d'hybridation avec batterie : possibilités d'optimisation rendement, durabilité, coût, masse, volume, .....
- Recharge rapide en énergie (remplissage réservoir 5 kg H2 700/350 bars en 3 à 5 minutes).
- Rendement système :
  - $\approx 50\%$  Elect par rapport au PCI ( $\sim 33$  kWh/kg H2), soit  $\sim 16,5$  kWh/kg H2 net système.
  - $\approx 80\%$  Elect+chaleur (en cogénération : Tpile  $\approx 80^\circ\text{C}$ ).
  - Consommation auxiliaires :  $\approx 10\%$  en conditions nominales le principal consommateur est le compresseur.

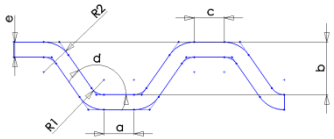


- Auto-décharge stockage H2 quasi nulle (<1% p/a), autonomie indépendante de la température ambiante.
- Démarrage rapide (< 1 minute), même à température négative.
- Durée de vie d'un système pile pour application auto  $\approx$  3500 à 5000 heures (pas de vieillissement calendaire) ; application stationnaire  $\approx$  10000 à 20000 heures.
- CAPEX/OPEX :
  - Système 80 kW  $\approx$  1000 à 3000 €/kW pour 1 unité ; 45 \$/ kW en projection pour marché automobile de masse (500 000 unités par an).
  - Réservoirs 700 bars  $\approx$  30 \$/ kWh net système en projection pour marché automobile de masse (500 000 unités par an, 5.6 kg H2/réservoir, réf. DOE).
  - Combustible :  $\approx$  10 €/kg H2, soit  $\approx$  0,64 €/kWh net système.

# TECHNOLOGIE PEMFC : DU MATÉRIAU JUSQU'AU SYSTÈME

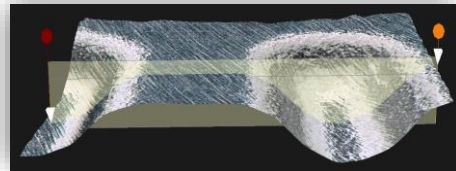


**MATERIAL DESIGN  
and  
CHARACTERISATION**



- Catalyst
- Ionomer
- GDL/MPL
- Ink formulation
- Bipolar plate design
- Stack balance of plant

**COMPONENTS  
and PROCESSES**



- Electrode manufacturing
- MEA
- Bipolar plates forming welding, coating
- Air tightness control
- Machining, 3D printing

**STACK:  
MANUFACTURING  
and QUALIFICATION**



- Stack assembly
- Test/qualification
- Performance
- Durability
- Water management

**SYSTEM  
DEVELOPMENT and  
INTEGRATION**

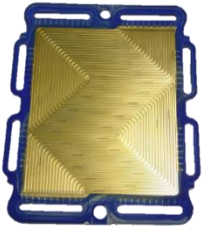


- Auxiliary components characterization
- System assembling
- System Control
- Integration in demonstrators

2005

**G** GENEPAC

Peugeot (PSA)



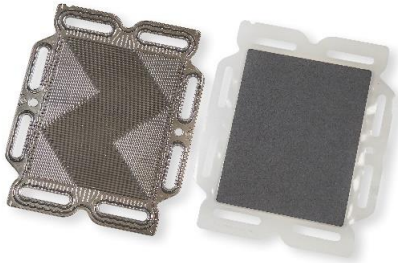
0,8A/cm<sup>2</sup> @ 0,675V

Cell pitch : 1,4 mm

2008

**F** FHYSIPAC

Symbio



1A/cm<sup>2</sup> @ 0,675V

Cell pitch : 1,3 mm

2012

**N** NEIGE

Symbio



1,4A/cm<sup>2</sup> @ 0,675V

Cell pitch : 1 mm

2015

**Z** Design

Zodiac



1,4A/cm<sup>2</sup> @ 0,675V

Cell pitch : 1 mm

2019

**GEN1b**

Faurecia



1,6A/cm<sup>2</sup> @  
0,675V

Cell pitch : 1 mm

2019

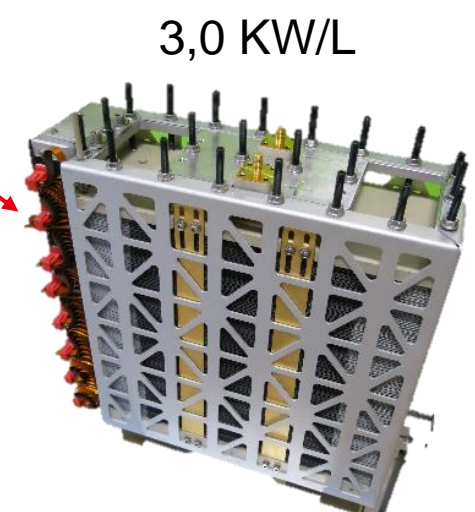
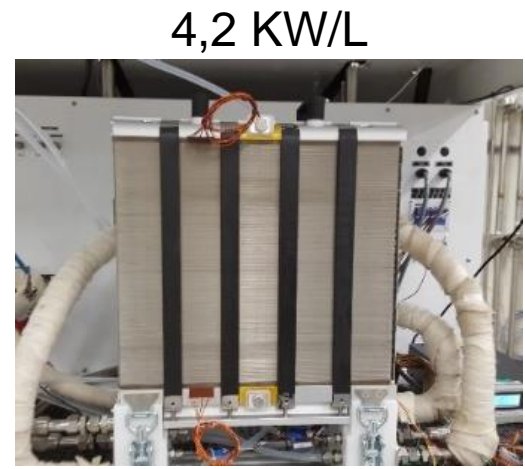
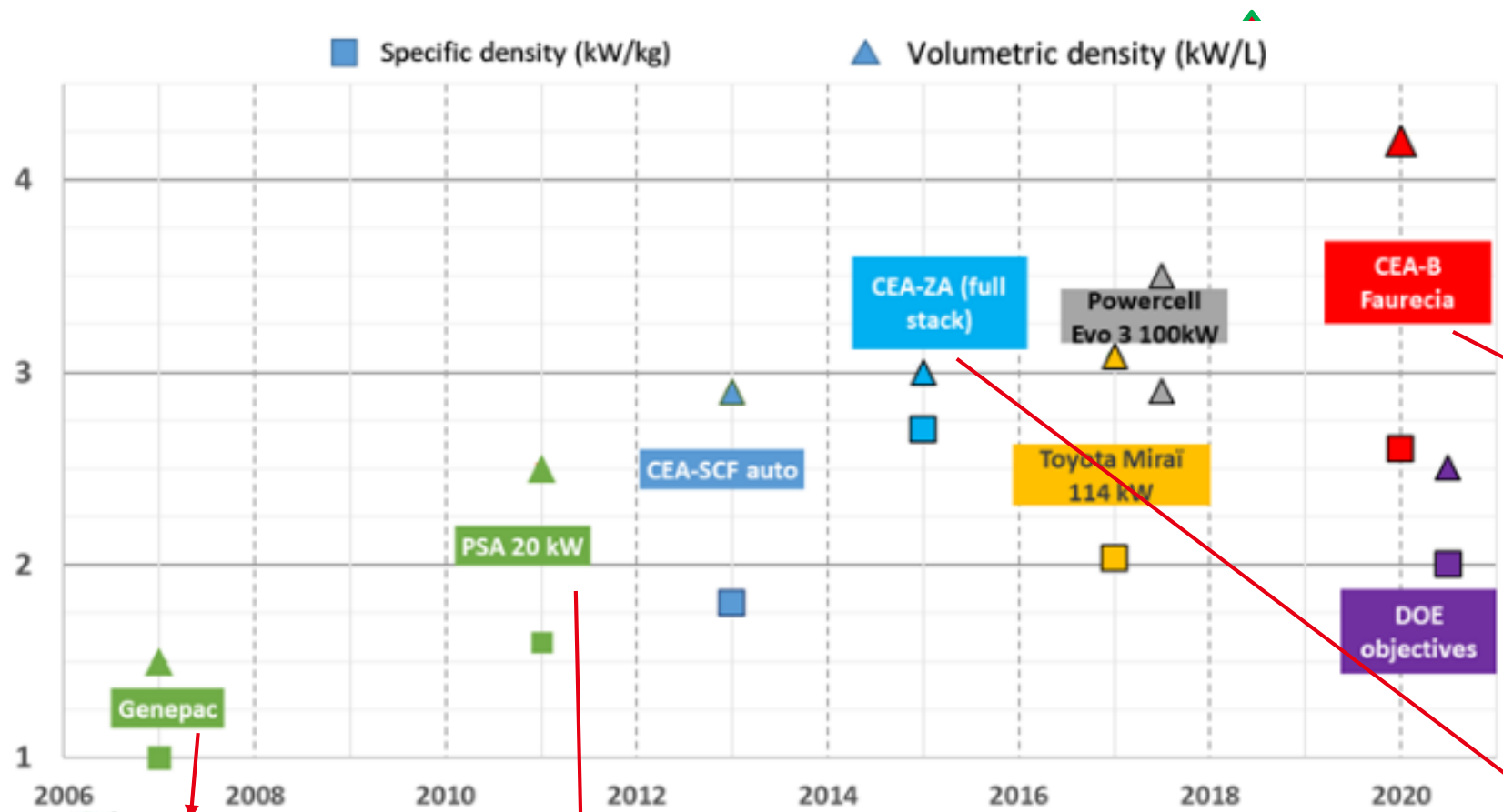
**PrintPAC**

CEA



1,5A/cm<sup>2</sup> @  
0,675V

Cell pitch : 0,8 mm





# MOTEURS À COMBUSTION INTERNE HYDROGÈNE POUR VÉHICULES

## Pourquoi est ce une option à considérer ?

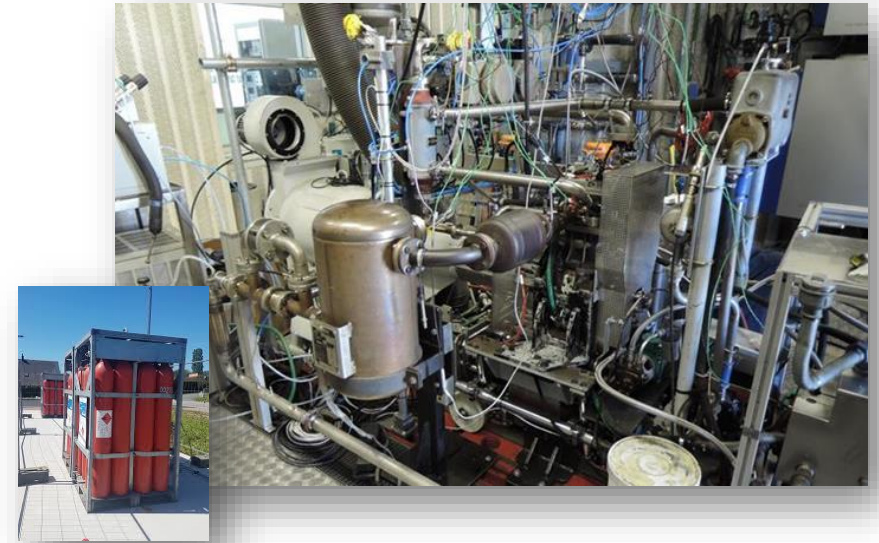
- **Très économique:** base technologique connue, lignes de productions existantes, grande durabilité.
- **Très souple en utilisation:** pas d'impact pureté hydrogène, pas d'impact conditions météo extérieures, capacité bi-fuel si besoin → d'autonomie

## Quels sont les développements en cours

- Adapter la combustion pour limiter les émissions de NOX.
- Augmenter la puissance spécifique.
- Augmenter le rendement

## CARNAUTO et vous → Opportunité


- CARNAUTO dispose de bancs d'essais moteurs et de "bancs d'organes" adaptés à l'hydrogène
- De nombreux composants doivent être adaptés/modifiés: injecteurs, système d'alimentation, métallurgie, contrôle moteur → **des nouvelles opportunités d'application pour des technologies "historiques"**



Banc moteur monocylindre H2 : Carnot IFPEN TE

# TECHNOLOGIE PEMFC : SÉCURITÉ, NORMES ET RÈGLEMENTATIONS

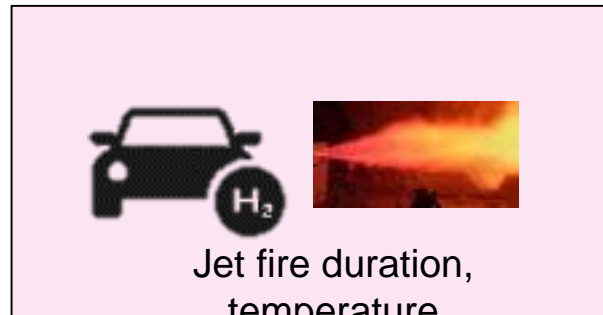
## DISPERSION



Orientation and size of the hydrogen jet

Arch shaped tunnel vs open space, length, slope, ventilation...

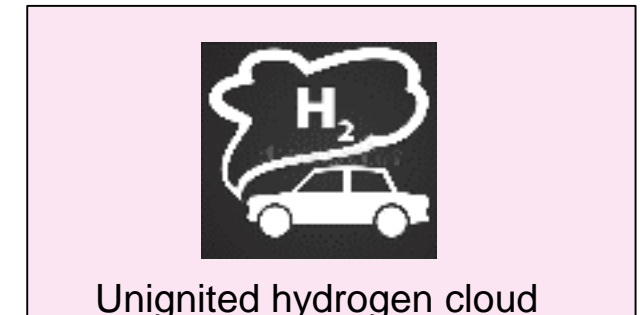
## JET FIRE



Jet fire duration, temperature

Effects of an external fire on H<sub>2</sub> vehicle and global behaviour

## EXPLOSION



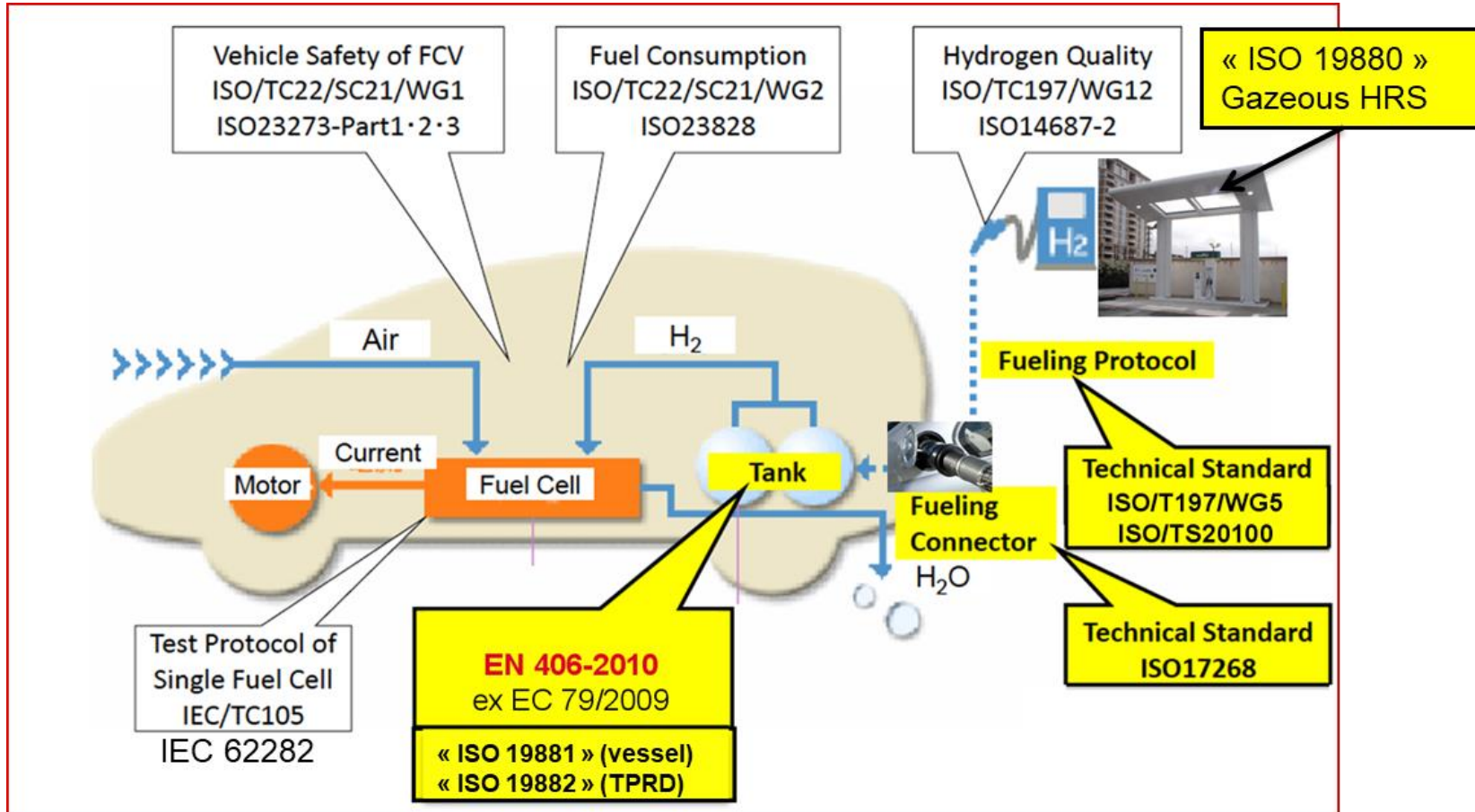
Unignited hydrogen cloud

Effect of a tank rupture after TPRD default

Mise en œuvre et analyse de ces différents scénarii en environnement réel



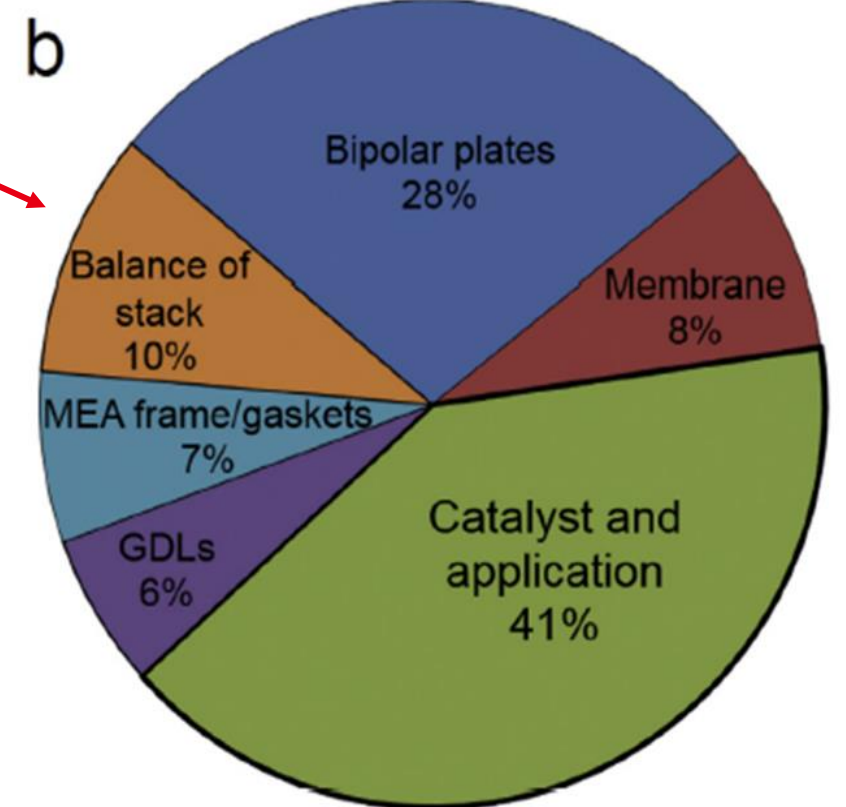
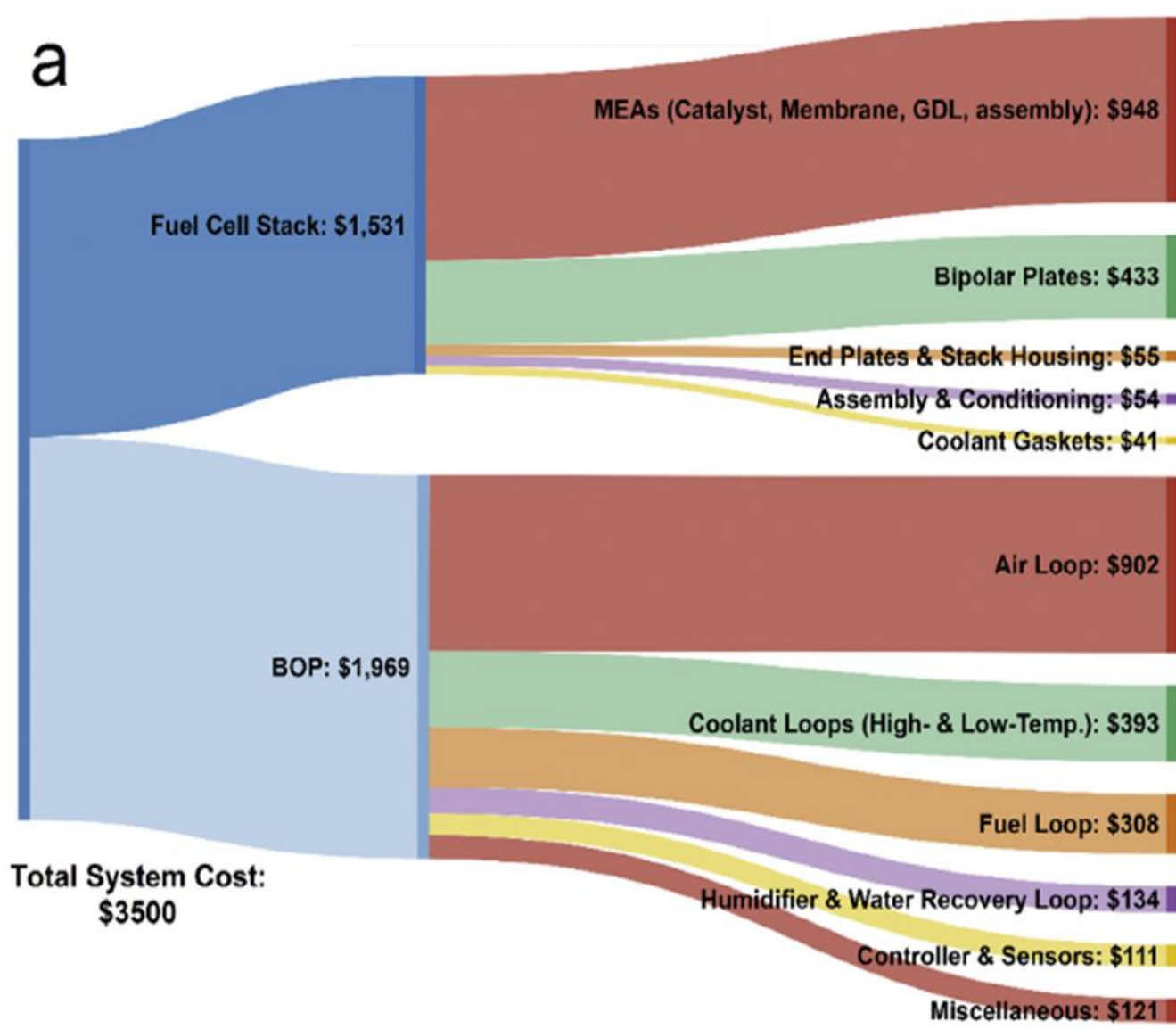
Consolidation de solutions techniques de sécurité



ISO 15916 : « Basic considerations for the safety of hydrogen systems »  
NF M58-003 : « Installation des systèmes mettant en œuvre l'H<sub>2</sub> »

# CONCLUSION: DONNÉES TECHNICO-ÉCONOMIQUES

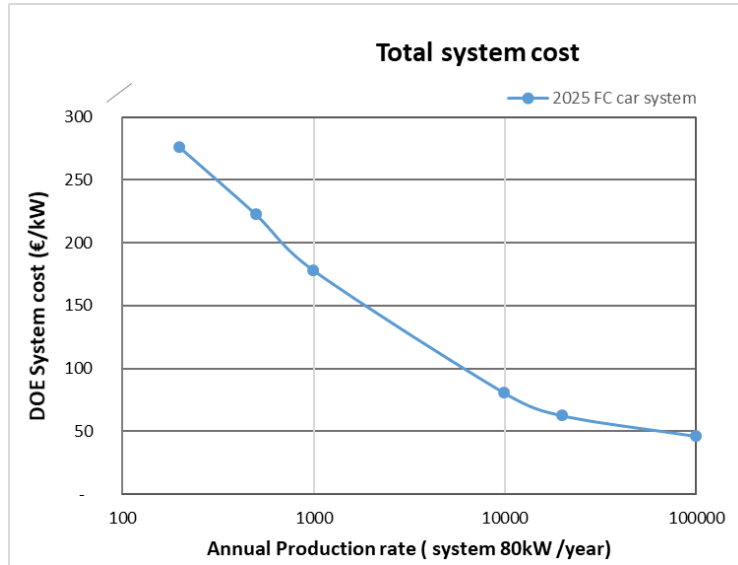
# PILE À COMBUSTIBLE PEMFC 80 KW : PROJECTION DE RÉPARTITION DES COUTS



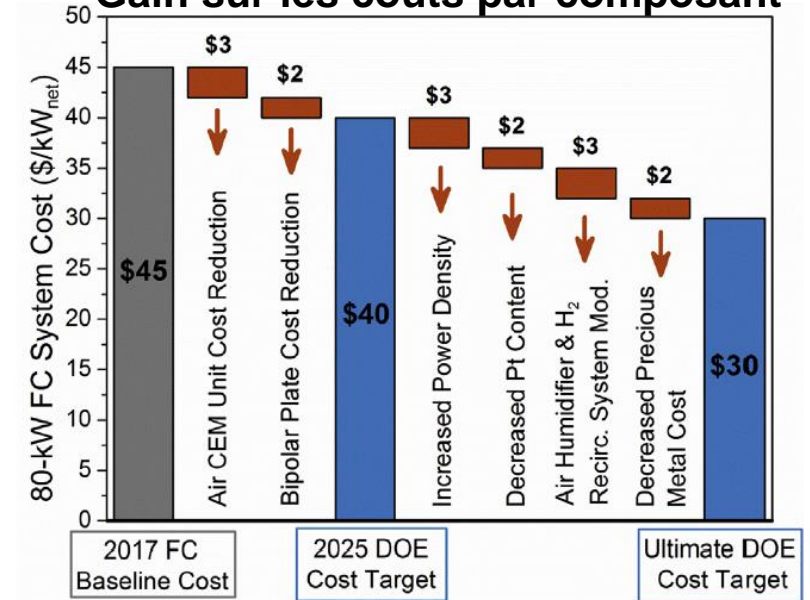
Projection sur des grands volumes (500 K/Y) réalisée en 2017 sur les couts par composant d'un système PEMFC

# PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES COUTS DE SYSTEMES PEMFC POUR LA MOBILITE (80 KW)

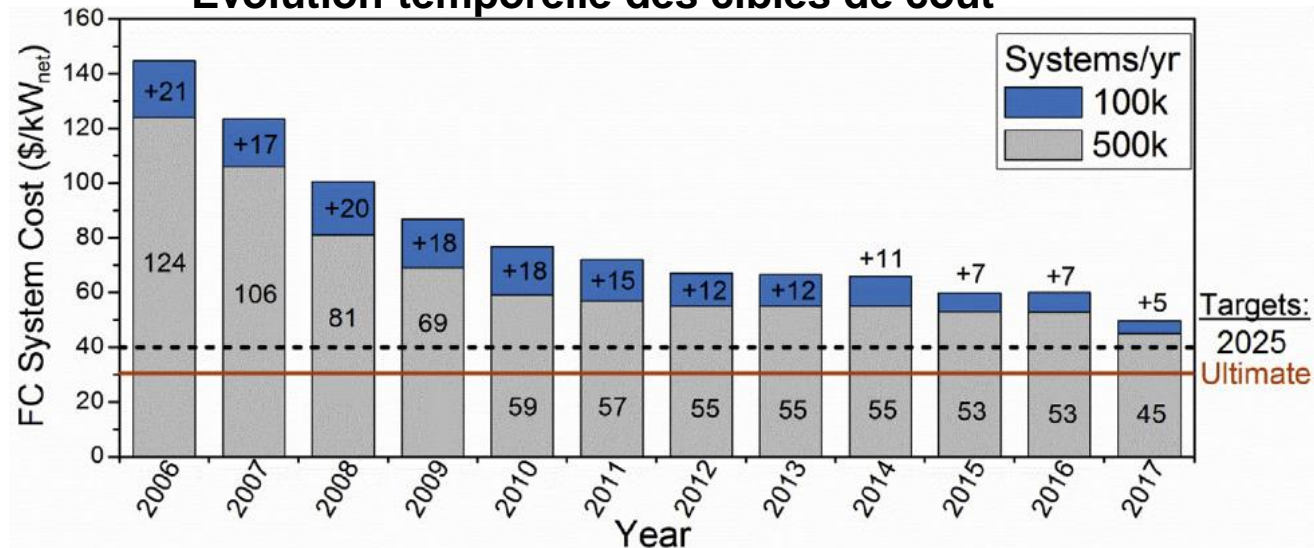
## Effet de volume sur les couts



## Gain sur les couts par composant



## Evolution temporelle des cibles de cout





# SOURCES D'INFORMATIONS ET DE DOCUMENTATION

## Génériques hydrogène :

- [CARNAUTO revue de presse](#)
- [CARNAUTO actualités](#)
- [Association FRANCE HYDROGENE](#)
- [The Future of Hydrogen - AIE \(Agence Internationale de l'Energie\) - 2019](#)

## Appels à projets H2

- [AAP ADEME générique](#)
- [AAP ADEME hydrogene et autres AAP décarbonation](#)

## Quels sont les atouts de l'hydrogène ?

- Hydrogène -J6368 V2 - Karine SURLA- Techniques de l'Ingénieur 2019

## L'utilisation de l'hydrogène en mobilité

- [Rapport Hydrogen Council Scaling up - 2017-pp 26 et suiv.](#)
- [SRIA HYDROGEN EUROPE july 2020 pp 80 à 109](#)
- The Future of Hydrogen - AIE - 2019- pp 123-160