

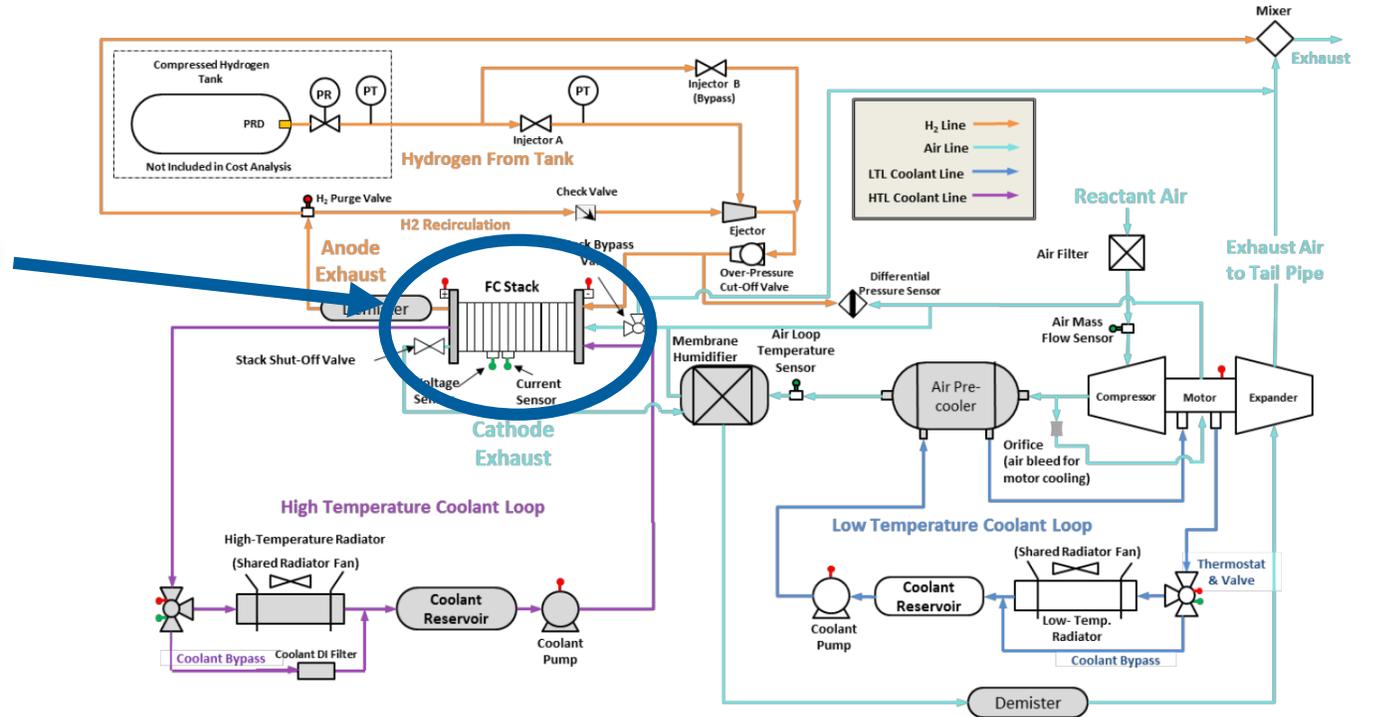
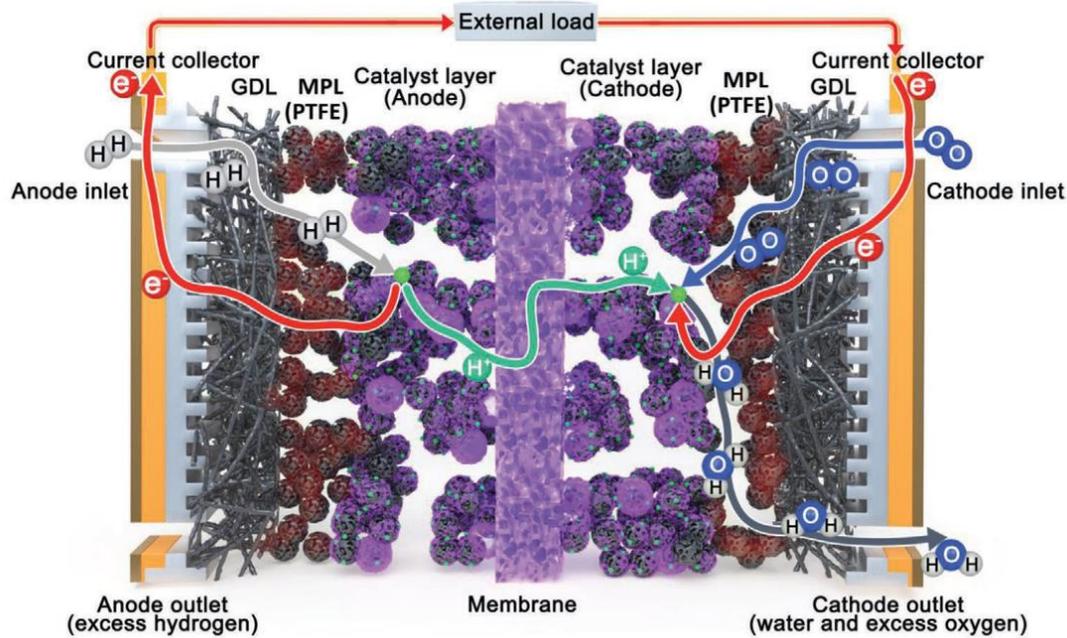


| PSL  | PERSEE

Les piles à combustible pour la mobilité lourde : enjeux et axes de recherche

Pedro AFFONSO NOBREGA

LA PILE À COMBUSTIBLE PEM



Suter, T. A. M. et al. Engineering Catalyst Layers for Next-Generation Polymer Electrolyte Fuel Cells: A Review of Design, Materials, and Methods. *Adv. Energy Mater.* 2101025 (2021) doi:10.1002/AENM.202101025.

Figure 10. Flow schematic for the 2018, 2020, and 2025 automotive fuel cell systems

James, B. D., Huya-Kouadio, J., Houchins, C. & Desantis, D. Fuel Cell System and Hydrogen Storage Cost Analysis View project Cost Analysis of Transportation Fuel Cell Power Systems View project. *Transp. Fuel Cell Cost Anal.* (2018) doi:10.13140/RG.2.2.12165.99049.

LA MOBILITÉ LOURDE

Les semi-remorques transportent une grande partie des tonnes.km

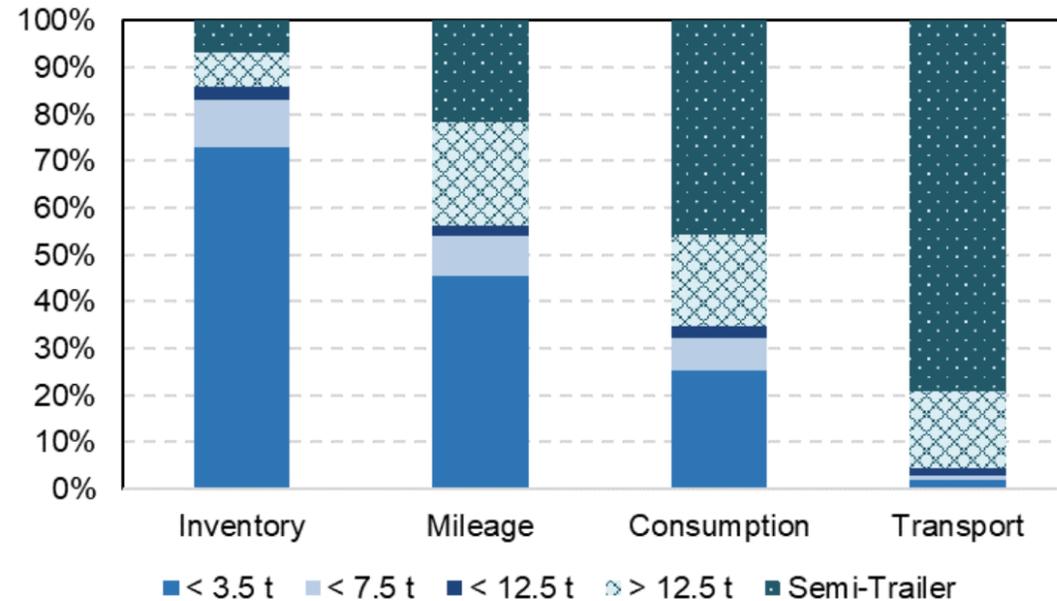


Figure 2. Distribution of the key figures: Inventory (vehicle stock), mileage (distance driven; km), fuel consumption, and transport performance (ton kilometers) of commercial vehicles by vehicle class in 2017.

Source: Peters *et al.* 2021. "Future Power Train Solutions for Long-Haul Trucks." *Sustainability: Science Practice and Policy* 13 (4): 2225.

LA MOBILITÉ LOURDE

Pourquoi la mobilité lourde ?

- Augmentation du poids avec l'énergie embarquée plus faible que pour les batteries
- Autonomie et remplissage rapide (?)
- Infrastructure plus simple à mettre en œuvre que pour les véhicules particuliers



<http://greengt.com/industrie-de-la-mobilite/>

	BEV	FCEV
Consommation d'énergie	138 kWh _{el} /100km	7 kgH ₂ /100 km
Capacité batterie	700 kWh _{el}	70 kWh _{el}
Masse batterie (140Wh/kg)	≈5000 kg	≈500 kg
Capacité réservoir H ₂	-	45 kg
Masse réservoir H ₂	-	≈500 kg

= 350 kWh_{el}/100 km
(≈50 kWh_{el}/kgH₂)

Données issues de Hyundai Xcient et le ICCT :
<https://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient-fuel-cell>
<https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23.pdf>
<https://theicct.org/publication/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-jul22/>

Pour la densité du stockage H₂ :
Gangloff et al. 2017. "Design Space Assessment of Hydrogen Storage Onboard Medium and Heavy Duty Fuel Cell Electric Trucks."
Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage 14 (2): 021001.

LA MOBILITÉ LOURDE

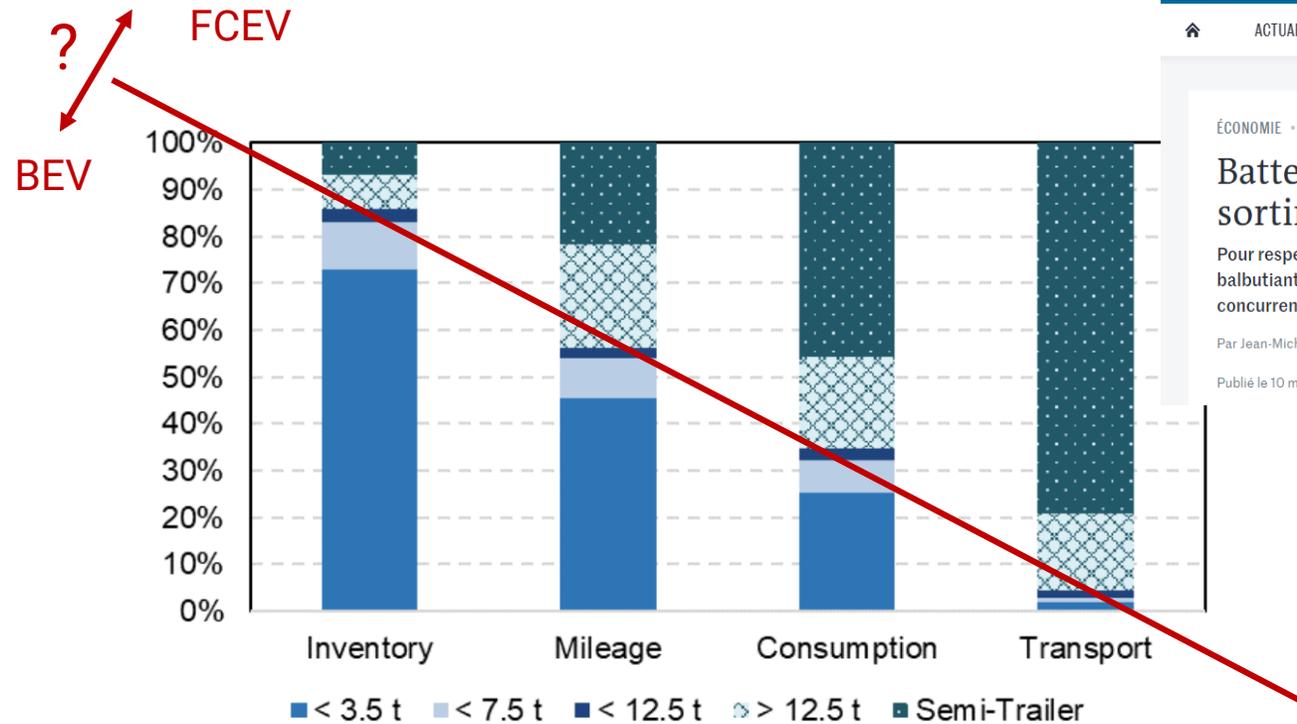


Figure 2. Distribution of the key figures: Inventory (vehicle stock), mileage (distance driven; km), fuel consumption, and transport performance (ton kilometers) of commercial vehicles by vehicle class in 2017.

Source: Peters et al. 2021. "Future Power Train Solutions for Long-Haul Trucks." *Sustainability: Science Practice and Policy* 13 (4): 2225.

LA MOBILITÉ LOURDE

- Coût
- Durabilité
- Intégration

Table 1. Technical System Targets: Class 8 Long-Haul Tractor-Trailers (updated 10/31/19)

Characteristic	Units	Targets for Class 8 Tractor-Trailers	
		Interim (2030)	Ultimate ⁹
Fuel Cell System Lifetime ^{1,2}	hours	25,000	30,000
Fuel Cell System Cost ^{1,3,4}	\$/kW	80	60
Fuel Cell Efficiency (peak)	%	68	72
Hydrogen Fill Rate	kg H ₂ /min	8	10
Storage System Cycle Life ⁵	cycles	5,000	5,000
Pressurized Storage System Cycle Life ⁶	cycles	11,000	11,000
Hydrogen Storage System Cost ^{4,7,8}	\$/kWh (\$/kg H ₂ stored)	9 (300)	8 (266)

Marcinkoski, J., Ram Vijayagopal, Jesse Adams, Brian James, John Kopasz, and Rajesh Ahluwalia. 2019. "Hydrogen Class 8 Long Haul Truck Targets." 19006. U.S. Department of Energy. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19006_hydrogen_class8_long_haul_truck_targets.pdf.

LE COÛT

Coût de la pile à combustible

- Massification de la production
- Baisse des coûts des matériaux (Pt, ionomère PFSA, plaques bipolaires)
- Baisse de coûts du système (compresseur, humidificateur)

Coût du stockage

Coût de l'H₂ (bas carbone)

- Baisse du coût de production de l'H₂
- Baisse du coût des stations et augmentation du taux d'utilisation

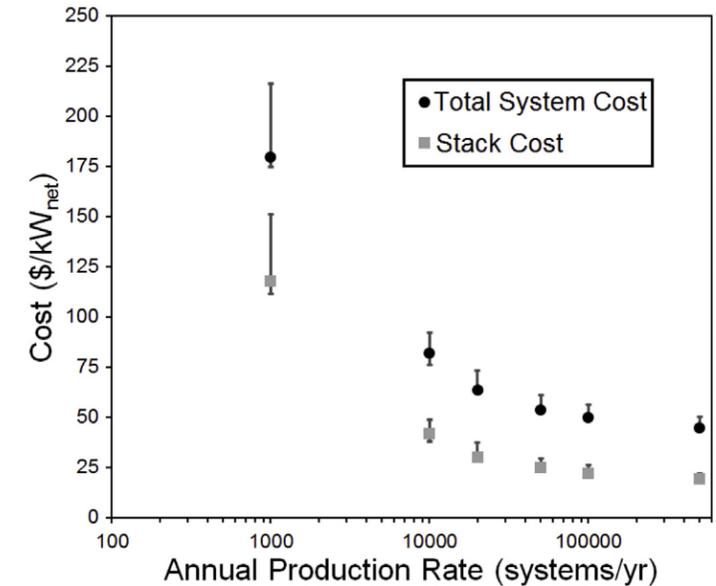


Fig. 6. Estimated fuel cell stack and total costs for 80 kW_{net} automotive fuel cell system at various annual production rates. The error bars represent the middle 90% confidence range of Monte Carlo sensitivity analysis of system cost.

Thompson et al. 2018. "Direct Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Cost Analysis: System and High-Volume Manufacturing Description, Validation, and Outlook." Journal of Power Sources 399 (September): 304–13.

LA DURABILITÉ

- Facteurs de dégradation
 - Stress thermique
 - Stress mécanique
 - Gel-dégel
 - Cycles d'usage
 - Polluants atmosphériques
 - Cycles démarrage-arrêt
 - Engorgement des cellules

- Améliorations possibles

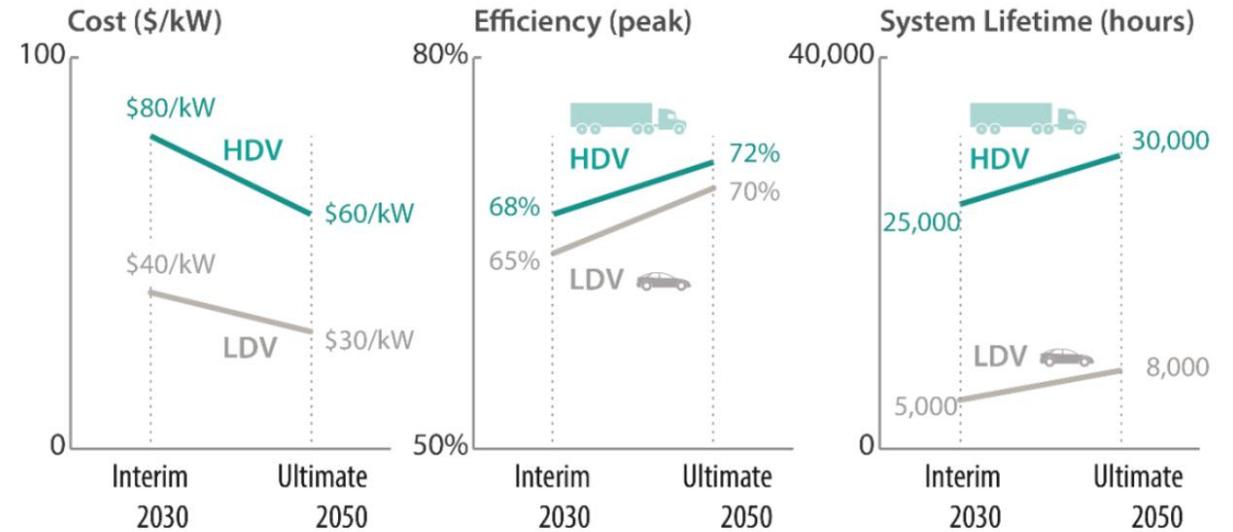
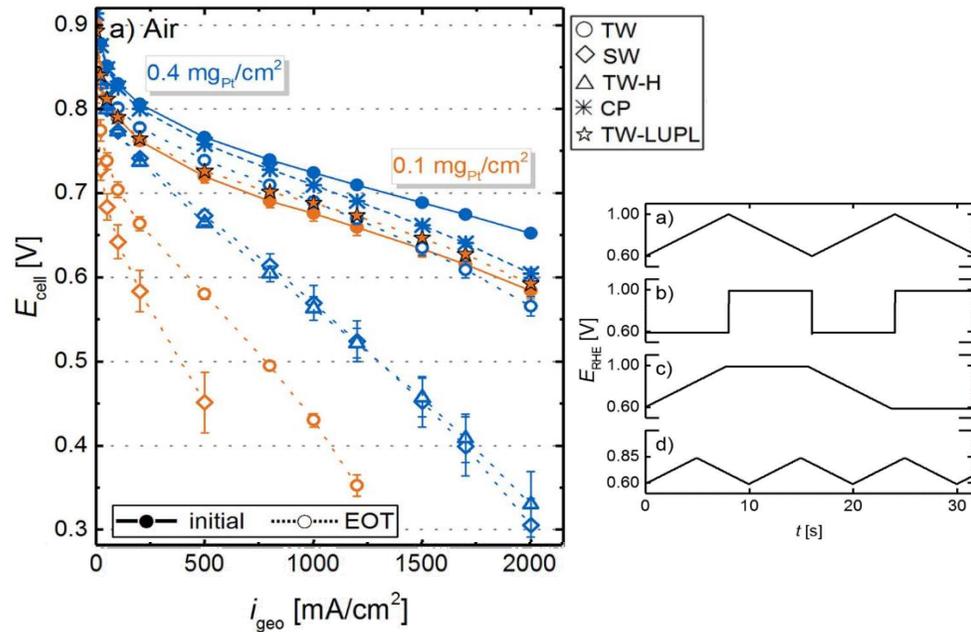
- Nouveaux matériaux
- Stratégies de contrôle et commande health-conscious

(Alimentation en air, humidification, gestion thermique, hybridation, protocoles de démarrage/arrêt ou démarrage à froid)

Vichard et al. Hybrid fuel cell system degradation modeling methods: A comprehensive review. J. Power Sources 506, 230071 (2021).

LA DURABILITÉ

- Compromis entre coût et durée de vie



Cullen et al. 2021. "New Roads and Challenges for Fuel Cells in Heavy-Duty Transportation." Nature Energy 6 (5): 462–74.

Adapté de Harzer et al. 2018. "Cathode Loading Impact on Voltage Cycling Induced PEMFC Degradation: A Voltage Loss Analysis." Journal of the Electrochemical Society 165 (6): F3118.

L'INTEGRATION

- Contraintes de gestion thermique

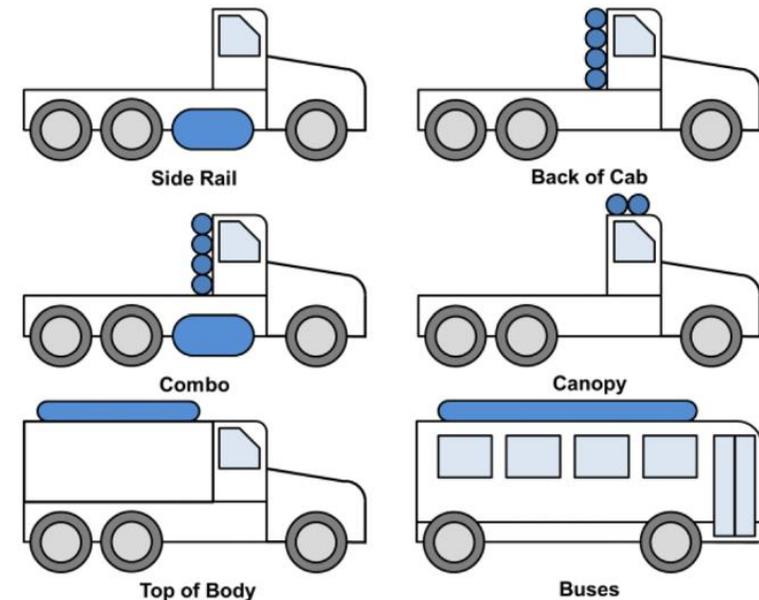
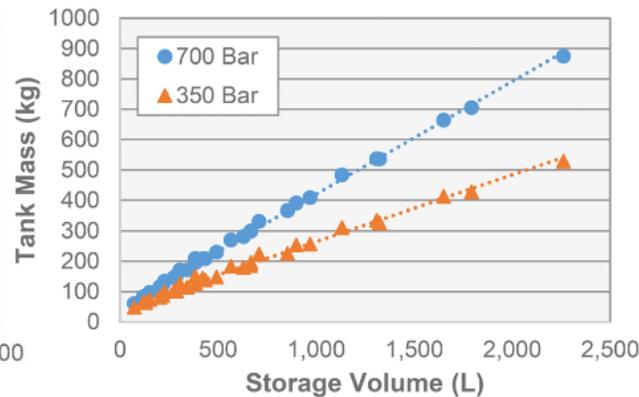
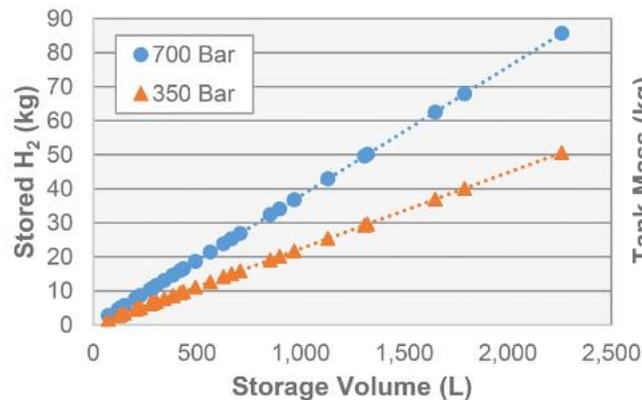
- Opération à 70 °C - 80 °C
- 35% - 60% de rendement



Radiateur 1.5-2x plus grand !

Pardhi et al. 2022. "A Review of Fuel Cell Powertrains for Long-Haul Heavy-Duty Vehicles: Technology, Hydrogen, Energy and Thermal Management Solutions." Energies 15 (24): 9557.

- Réservoir d'hydrogène



LA RECHERCHE À PERSEE



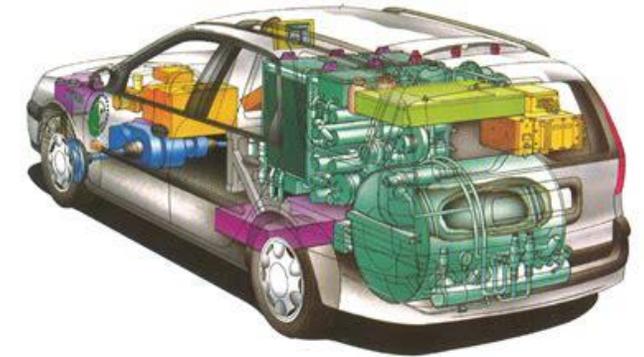
1990 - 1994 Reformage NH_3 – Thèse R. Metkemeijer
Conception procédé , couplage avec une pile à combustible alcaline



1994 - 1998 Projet FEVER – Thèses D. Picot, L. Rouveyre
Intégration système véhicule, caractérisation stack
Renault, Air Liquide, Ansaldo, De Nora, Volvo

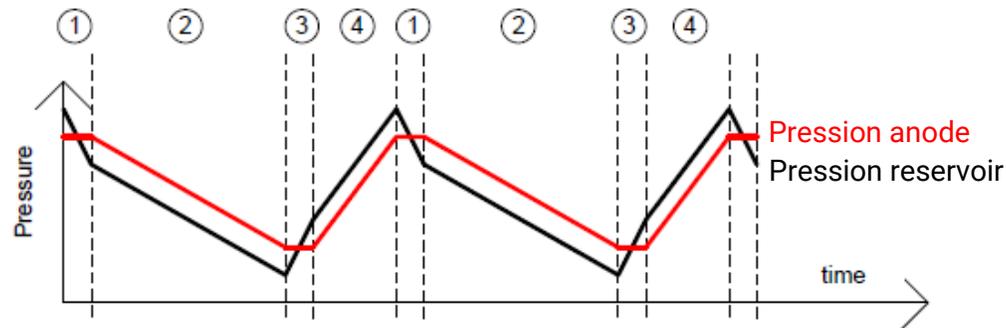
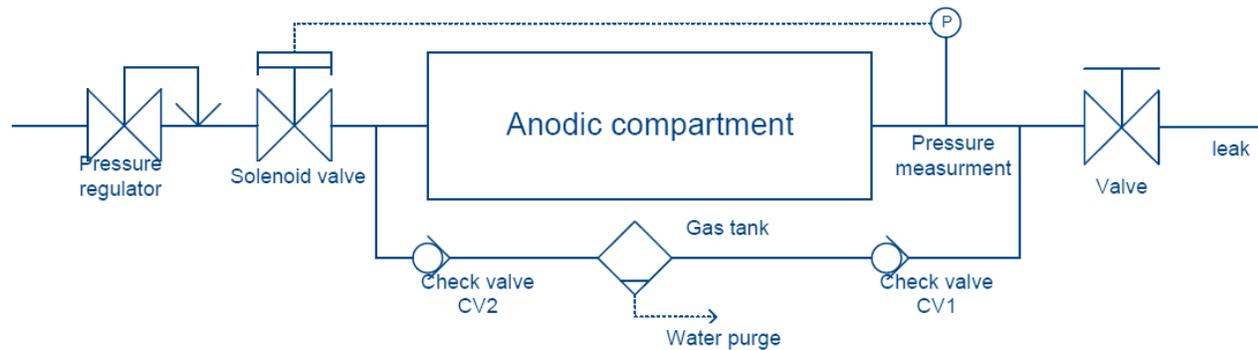


2011 - 2014 Projet NEIGE – Thèse B. de Grisard
Boucle de recirculation H_2
Symbio FC



- Véhicules de demain : les piles à combustible
- Suivons le fluor
- Chimie francophone africaine (Cotonou, 1998)

LA RECIRCULATION ANODIQUE PASSIVE



① RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
 INSTITUT NATIONAL
 DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
 COURBEVOIE

⑪ N° de publication : **3 017 488**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

⑫ N° d'enregistrement national : **14 50986**

⑬ Int Cl⁸ : **H 01 M 8/04 (2014.01)**

⑫ **BREVET D'INVENTION** **B1**

⑭ CIRCUIT DE PURGE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.

⑮ Date de dépôt : 10.02.14.

⑯ Priorité :

⑰ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑱ Demande(s) d'extension :

⑲ Demandeur(s) : SYMBIOFCCELL Société anonyme — FR et ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT DES METHODES ET PROCESSUS INDUSTRIELS Association loi de 1901 — FR.

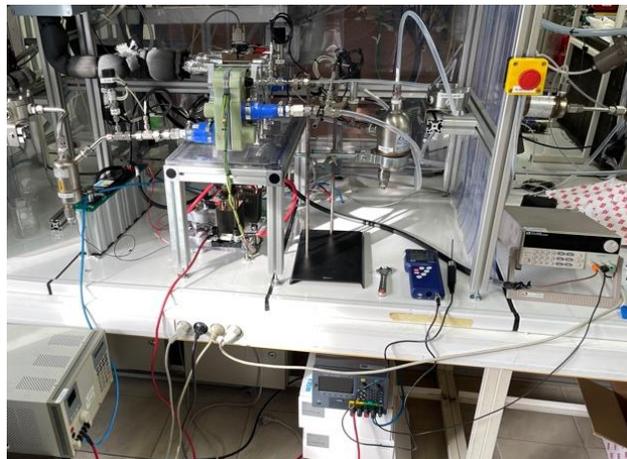
LA RECHERCHE À PERSEE

Humidification d'une pile à combustible

- Etude 12 mois + thèse (en cours)
- Essais *short-stack*

Hybridation thermique et électrique pour la mobilité lourde

- Post-doc 18 mois
- Essais *short-stack*



LA RECHERCHE À PERSEE



DuraSys-PAC

- Projet ciblé du Programme et Equipements Prioritaires de Recherche H₂ (ANR)
- Thèse 36 mois (démarrage 10/2022)
- Développement d'AST spécifiques mobilité lourde
- Essais mono-cellule
- Modélisation de la dégradation



LA RECHERCHE À PERSEE

Effet de polluants sur les piles à combustible

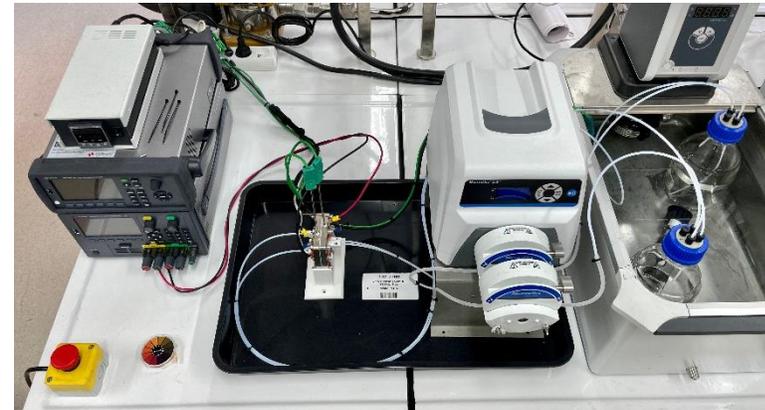
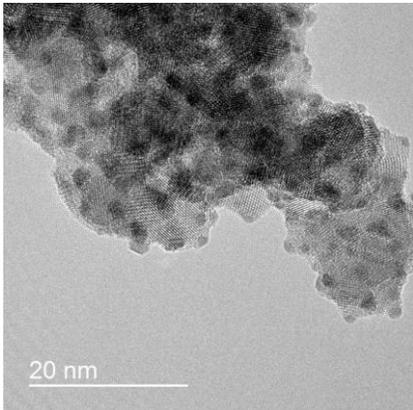
- Thèse CIFRE 36 mois (démarrage 01/2022)
- Essais longue durée en mono-cellule (24h/24h, 7j/7)
- Modélisation de la dégradation



LA RECHERCHE À PERSEE

Mais aussi d'autres sujets...

- Matériaux pour les piles à combustible et l'électrolyse
- Electrolyse de l'ammoniaque
- Photocatalyse du CO₂
- Développement de la filière hydrogène à l'échelle d'un territoire



LA RECHERCHE À PERSEE

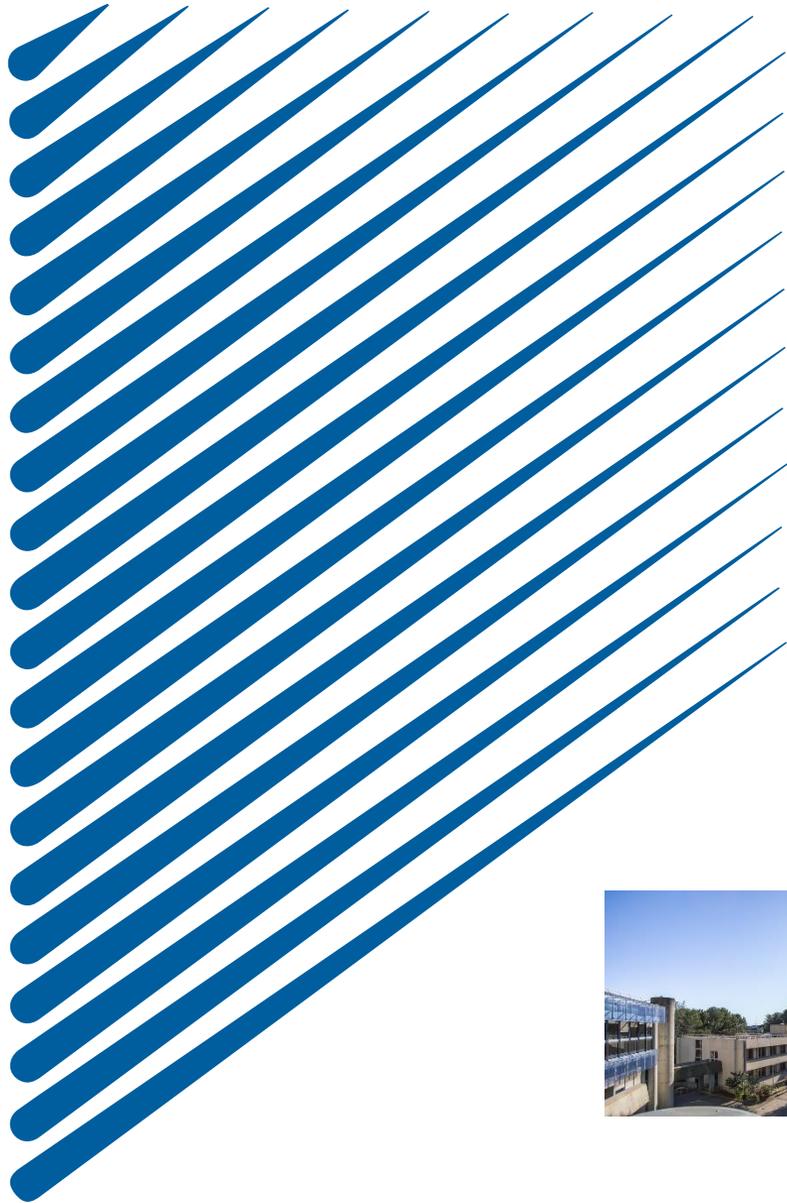
Moyens expérimentaux

- Caractérisation de stacks/systèmes jusqu'à 10 kW
- Bancs mono-cellule pile à combustible PEM et électrolyse PEM et AEM
- Utilisable en 24h/24 - 7j/7



A RETENIR

- Le meilleur H₂ est celui qu'on n'utilise pas ! (Sobriété > Batterie > H₂)
- Freins à l'adoption de l'H₂ dans la mobilité lourde : coût, durabilité, intégration
- A PERSEE, ces sujets sont au cœur de nos activités !



| PSL  | PERSEE

Merci pour votre attention !

pedro.affonso_nobrega@minesparis.psl.eu

