



FC LAB
PAVE THE WAY FOR H₂ ENERGY

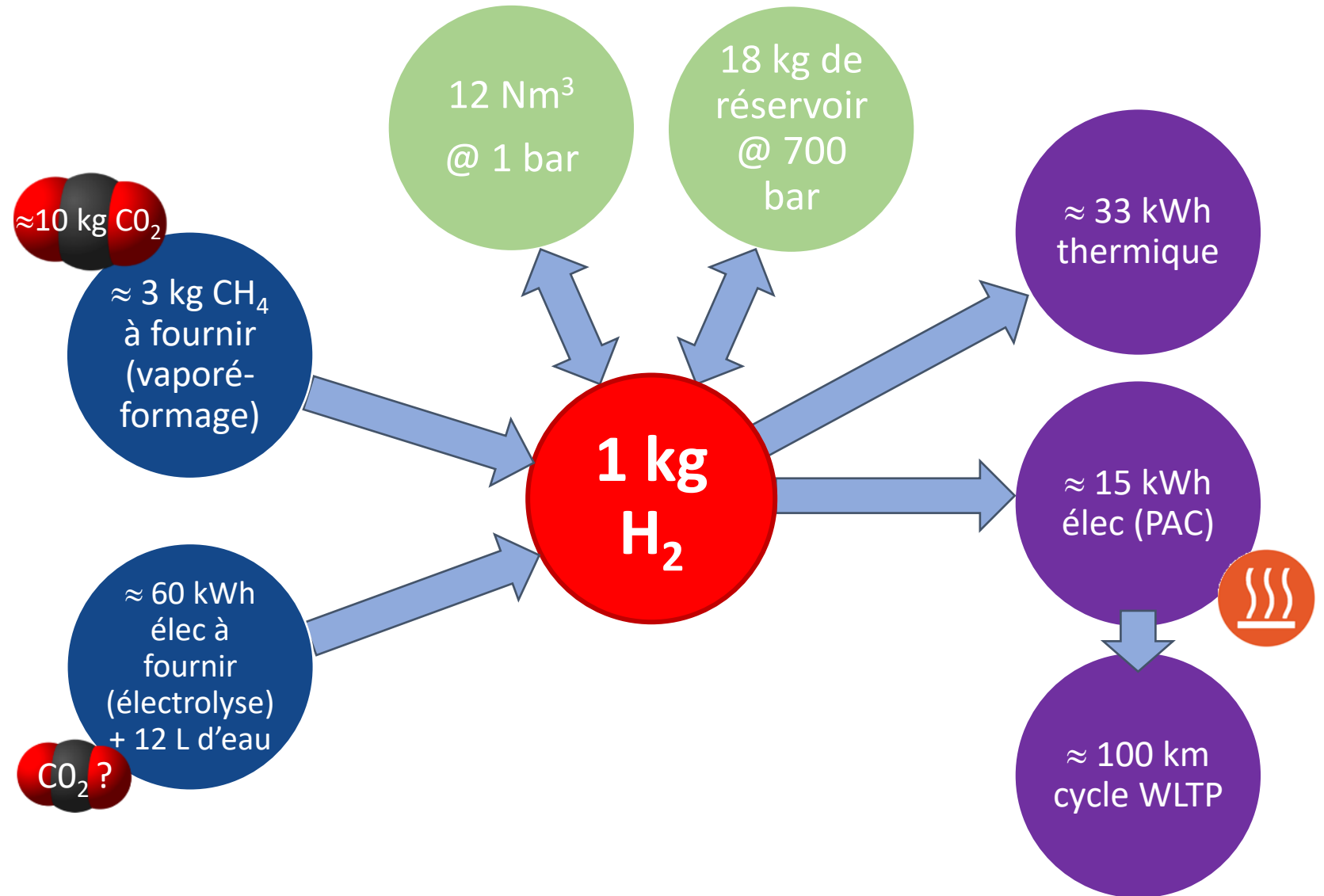
La filière Hydrogène Energie

David BOUQUAIN



Éléments fondamentaux de l'hydrogène-énergie

Quelques ordres de grandeur

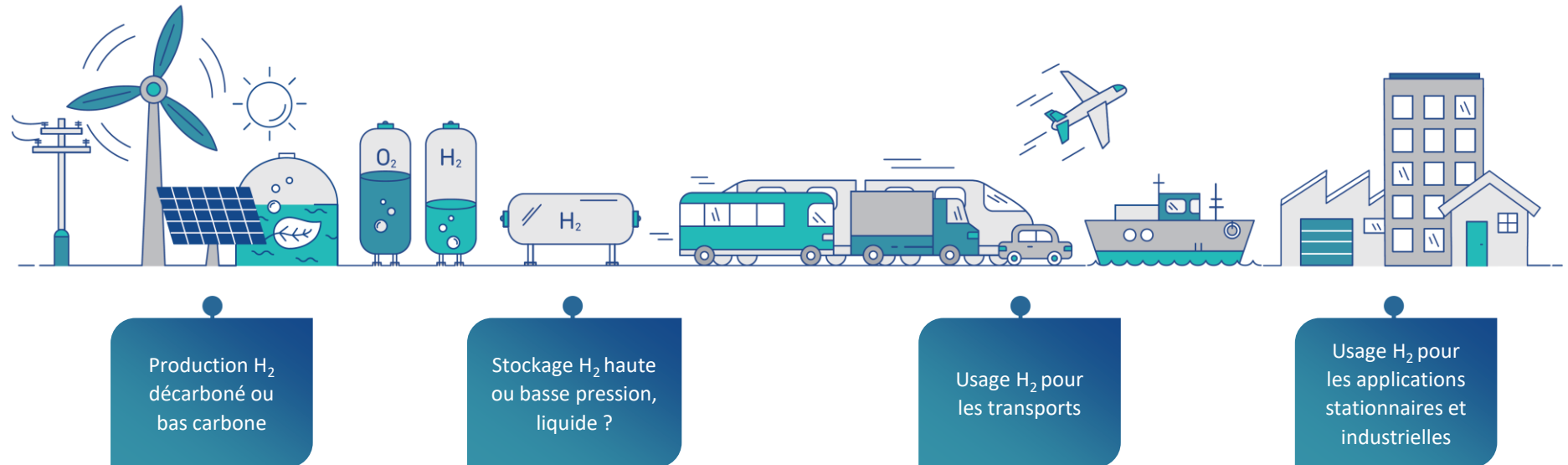


L'hydrogène dans la problématique énergétique globale

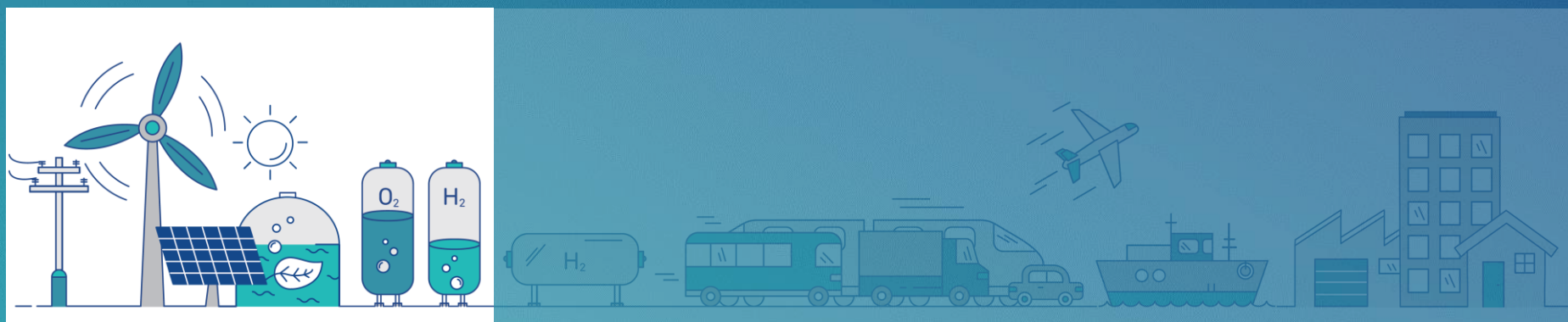
Hydrogène → un vecteur énergétique incontournable

- Fort potentiel de réduction des émissions GES sur quasiment toutes les filières
- Objectifs français de réduction grâce à l'hydrogène
 - 2030 : réduction de 4,5% par rapport à la référence 2017 (452 MtCO₂)
 - 2050 : réduction de 25%

Source : Rapport CITEPA. S. B. Colas ROBERT, «Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. RAPPORT NATIONAL D'INVENTAIRE / FORMAT SECTEN,» 2019



Production de l'hydrogène par électrolyse



Production de l'hydrogène

Les principaux procédés

○ Vaporeformage du gaz naturel

- 10-12 kg CO₂/kg H₂
- 1 à 2,5 €/kg H₂

○ Gazéification du charbon

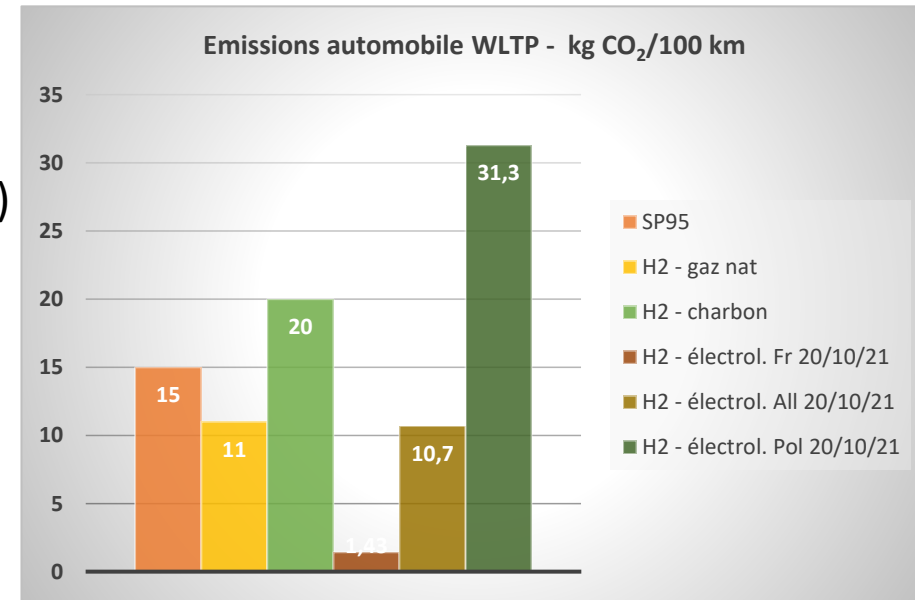
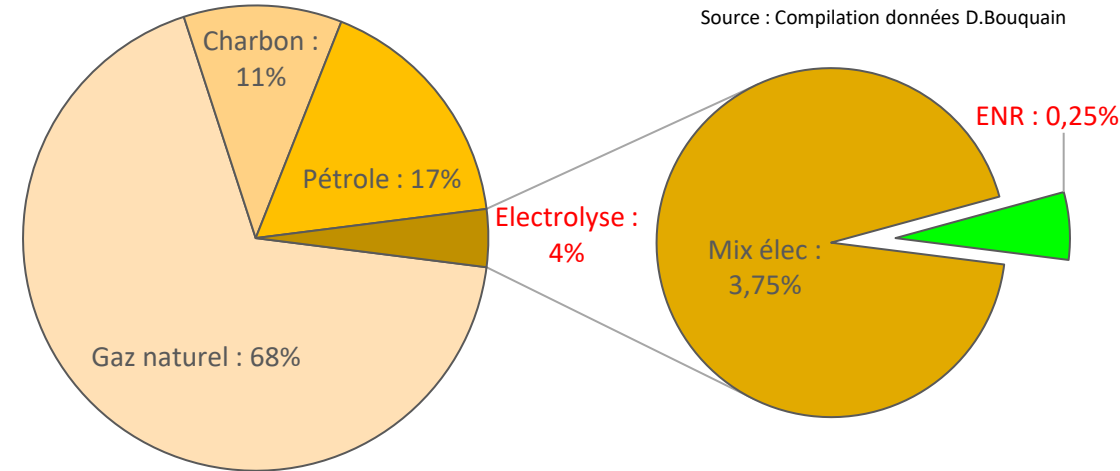
- 20 kg CO₂/kg H₂
- 1,5 à 3 €/kg H₂

○ Electrolyse de l'eau

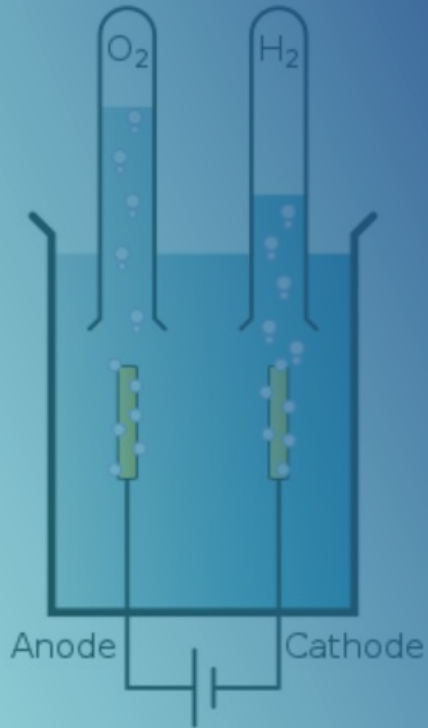
- coût et émissions dépendent du mix énergétique (France ≈4 kg CO₂/kg H₂)

➔ Favoriser H₂ renouvelable ou bas-carbone

Ressources primaires pour la production mondiale d'H₂



Électrolyseur : production d'hydrogène à partir d'électricité non carbonée → 2 technologies industrielles



Électrolyseur alcalin

- Avantages
 - Technologie mature
 - Systèmes de forte puissance
 - Bons rendements : 5,5 kWh/Nm³
 - Durée de vie importante : > 60 000 h
 - Coût
- Inconvénients
 - Risque de fuite d'électrolyte (corrosif)
 - **Mal adapté à des productions électriques intermittentes (photovoltaïque / éolien)**
- Entreprises leaders

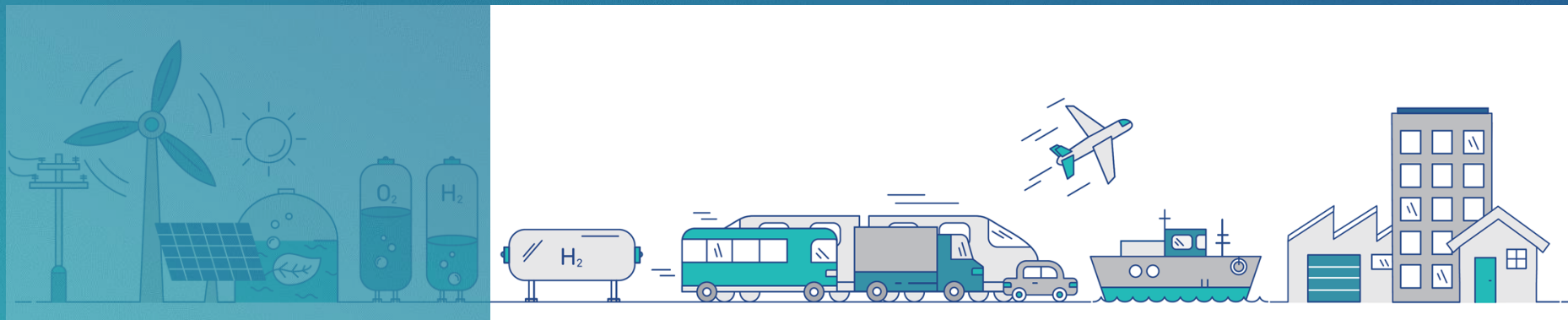
IHT (Suisse), ELT (Allemagne), Hydrogenics (Canada), Angstrom Advanced (USA), NEL Hydrogen (Danemark), McPhy Energy (France), Toshiba (Japon)...

Électrolyseur PEM

- Avantages
 - Compacité et simplicité de fonctionnement
 - Performances équivalentes à l'alcalin
 - **Particulièrement adapté au couplage à une source d'énergie intermittente**
 - Fort potentiel de développement
 - Fonctionnement sous pression (90 bar max)
- Inconvénients
 - Coût (platine)
 - Durée de vie encore limitée : 40 000 h
 - Encore en phase d'industrialisation pour une utilisation de masse
- Entreprises leaders

Proton OnSite (USA), Hydrogenics (Canada), Helion Hydrogen Power / AREVA H2GEN (France), ITM Power (UK), Siemens (Allemagne), Green Hydrogen (Danemark)...

Stockage de l'hydrogène



3 principales technologies

Stockage sous pression réservoirs types I à IV

Usages transport ou
stationnaire

Réservoirs types I à IV de 30
à 700 bar

■ Avantages

- Durée de vie
- Sécurité
- Processus industriel

■ Inconvénients

- Coût
- Durée de fabrication
- **Densité de stockage*
maximale limitée : 6 %.**
Objectif DOE : 6,5 % à 2030

Stockage sous forme liquide

Hydrogène liquide à -253°C

Réservoirs cryogéniques

■ Avantages

- **La meilleure densité de
stockage* : 15%**
- Processus industriel maîtrisé
- Basse pression

■ Inconvénients

- Coût
- Durée de stockage très limitée
(24 h)
- Dispositif de fabrication de H₂L

Stockage sous forme solide

Absorption dans des
hydrures métalliques

Cycle thermique lors de
l'utilisation

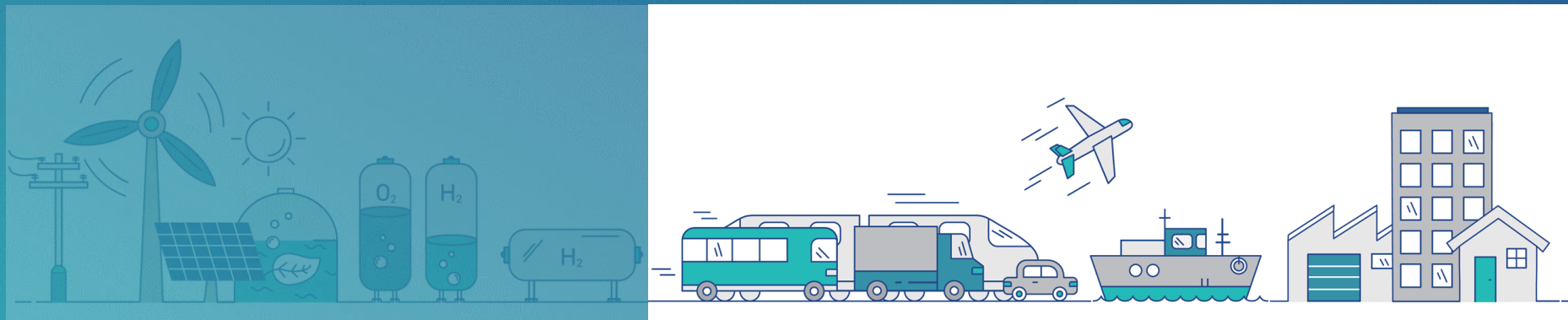
■ Avantages

- Stockage basse pression
- Sécurité
- Densité volumique

■ Inconvénients

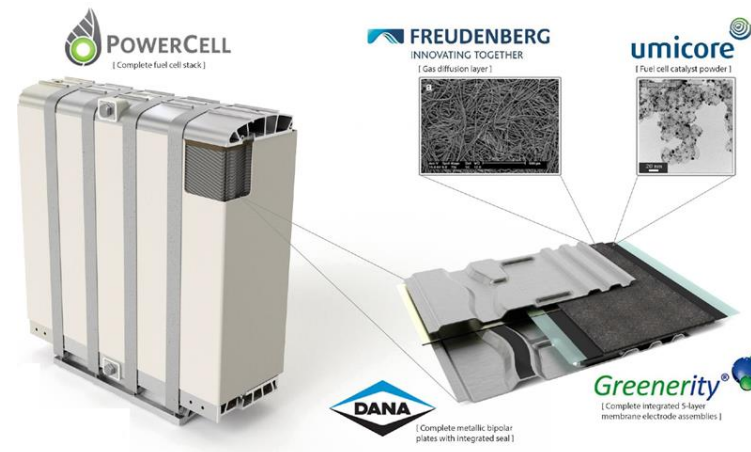
- **Densité de stockage <1,5 %
pour des systèmes basse
température**
- Durée de remplissage élevée
- Gestion thermique du
réservoir

Usage : la pile à combustible



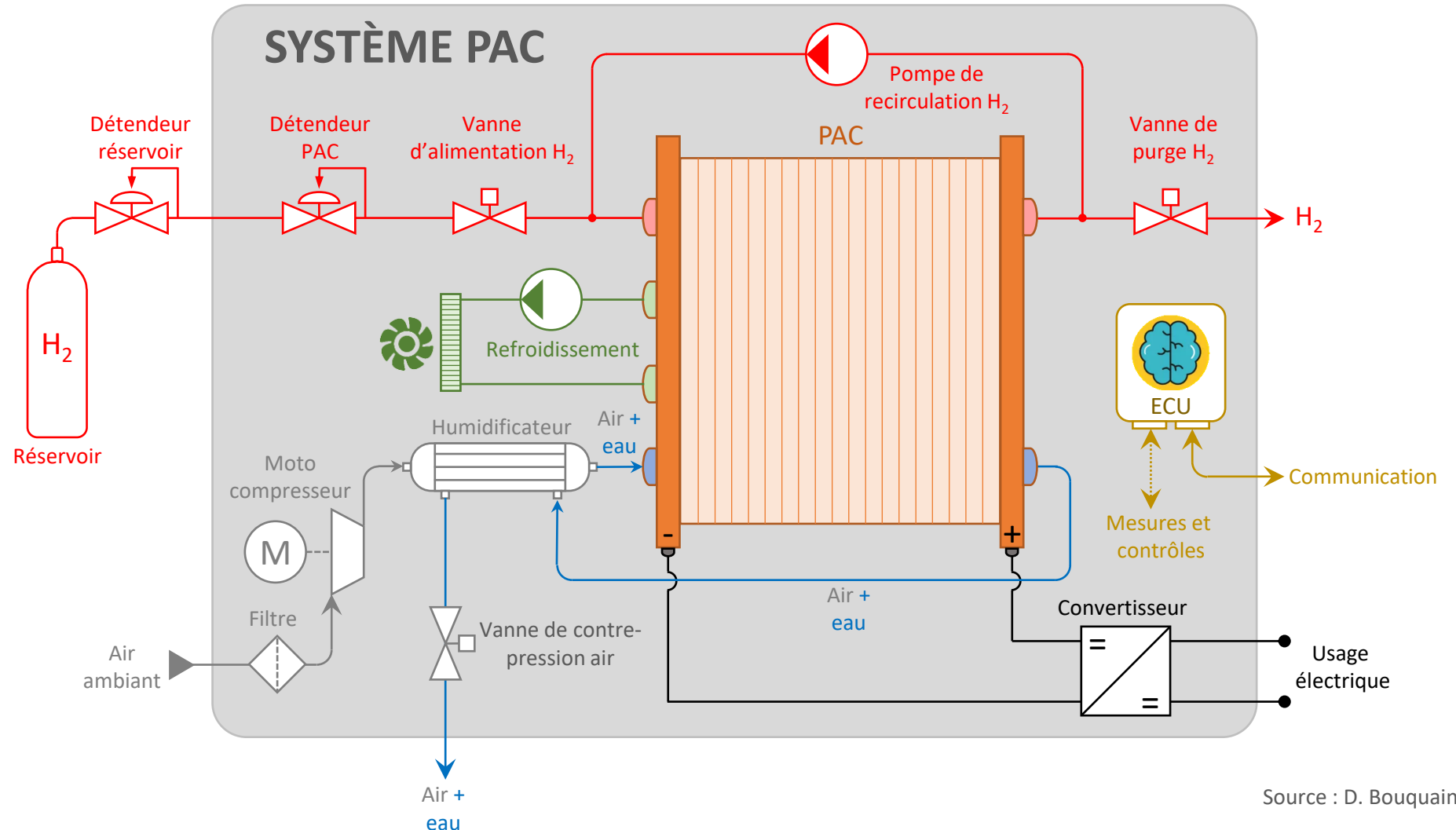
Fabricants de pile à combustible PEMFC

- **Application transport ou stationnaire**
 - Principaux Technologie PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)
 - ~3 kW/litre et ~3 kW/kg (stack seul)
- **acteurs nationaux**
 - Symbio, Helion Hydrogen Power, Axane
- **Principaux acteurs internationaux**
 - Ballard, Hydrogenics, Nuvera Fuel Cells, PowerCell, Horizon Fuel Cell, SFC, Pronton Motor, Elringklinger...
 - Constructeurs auto H2 : Honda, Nissan, Toyota, Hyundai, SAIC → fabriquent leurs propres piles
- **Système complexe qui nécessite des moyens, des compétences et des partenariats forts**



Système pile à combustible

De nombreux équipements périphériques



○ Composants à forte valeur ajoutée

- PAC
- Compresseur et la gestion de la boucle d'air
- Convertisseur DC/DC → bien souvent non fourni dans les systèmes « sur étagère »

Pile à combustible

Système pile à combustible

○ Exemple : systèmes PAC Cummins (ex Hydrogenics)

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Comes with low pressure cathode air delivery
- -46°C sub-zero shutdown capability

Technical Data

Rated Electrical Power	33 kW continuous
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	60 to 120 V _{DC}
Peak Efficiency	55% ¹⁾
Response	< 5 s from off to idle < 3 s from idle to rated power
Fuel	Dry Hydrogen >99.98%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 60% ethylene glycol / DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55°C operating -40 to +65°C storage (<2°C with automated freeze shutdown feature)
Communication	CAN v2.0A (standard 11 bit)

¹⁾ Efficiency based on LHV of H₂, 25°C, 101.3 kPa, including onboard parasitic loads, excluding radiator fan and water pump

- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown

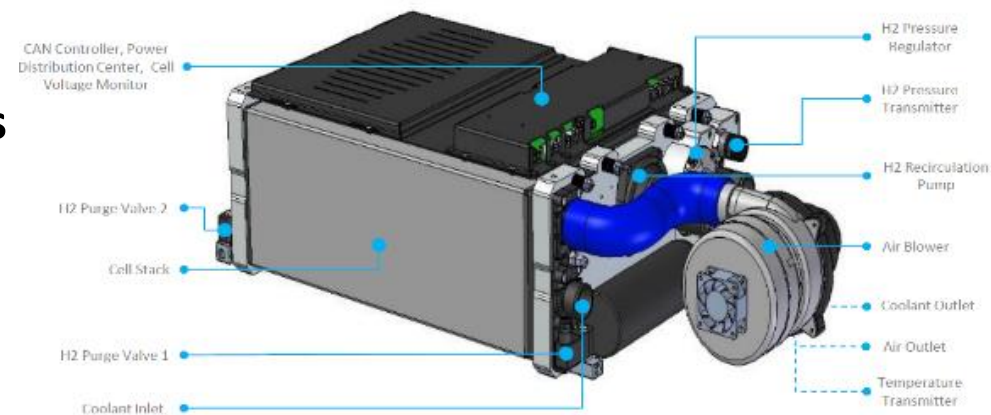
Physical

Dimensions L x W x H ²⁾	605 x 410 x 265 mm
Mass ³⁾	61 kg
Volume ³⁾	66 L

²⁾ Excluding air delivery and optional water pump

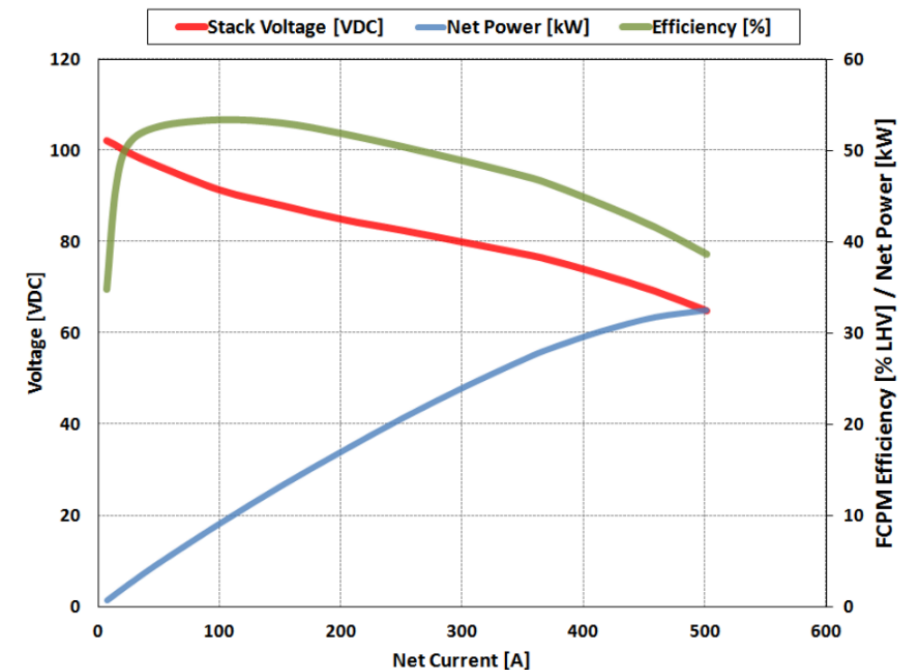
³⁾ Including air delivery and optional water pump

Hydrogenics HyPM™ HD Powermodule – Scope of Supply.



Includes furthermore (not shown)

- Coolant Pump
- Wiring Harnesses and Cabling
- Connectors
- Reverse Current Diode
- Current Sensor
- Air Filter
- Air Flow Transmitter
- DI-Filter
- Hoses and tubing
- Control Software
- USB to CAN Dongle



Système pile à combustible

- Challenges techniques sur les composants et processus de fabrication d'un système pile à combustible hydrogène

	Maturité	Intégration	Coût	Verrous
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #90EE90; margin-right: 5px;"></div> Maitrise <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #FFD700; margin-right: 5px; margin-top: 2px;"></div> Progrès nécessaires <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #FF0000; margin-right: 5px; margin-top: 2px;"></div> Points durs </div>				
Stack				
Assemblage membrane electrode				Coût, Humidification intégrée, Catalyseur ⁵ , température de fonctionnement
Plaque bipolaire				
Intégration des cellules – Stackage		↗		Capacitaire industriel, Robotisation du Process
Humidification externe				
Durabilité		n.a.		>7000h pour applications automobiles
Système pile à combustible				
Compresseur	↘	↘	↘	Compromis coût / perfo / encombrement
Tuyauterie hydrogène				
Recirculation hydrogène				Pompe, éjecteur, injecteur
Gestion thermique (échangeur / ventilateur)				Dimensionnement et intégration critiques sur « full power »
Pompes				
Filtration d'air				Capacité d'absorption vs pics de pollutions + fréquents
Contrôle / commande				
Capteurs	↗	↗	↗	
DCDC				
Système de stockage de l'hydrogène				
Réservoir	↗		→	Coût, process, masse, facteur de forme
Tête de bouteille	↗	↗	→	Coût, Compacité, Intégration de fonctions
Ligne de remplissage – Safety	↗	↗	→	Disponibilité raccord 700 bars
Adaptation du système				
Intégration géométrique du système	↗	↗	↗	
Gestion thermique	↗	↗	↗	

Source : PFA

↗ → ↘ = évolution par rapport à 2017

Nouveaux usages de l'hydrogène

Transport

VP et VUL



Bus et VL



Offroad



Ferroviaire



Aérien et maritime



Autres usages

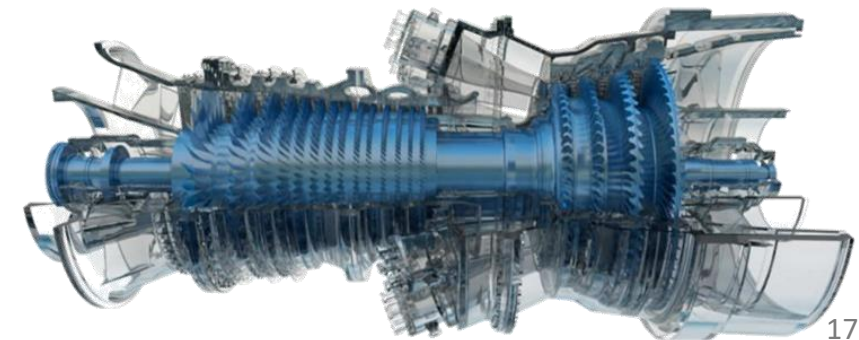
Bâtiment : Fourniture de chaleur et d'électricité via l'hydrogène



Stockage des ENR intermittentes

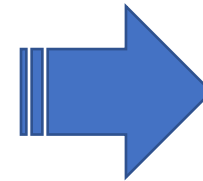


Conversion des turbines à gaz à l'hydrogène



Des écosystèmes territoriaux à structurer

- **Stratégies de déploiement en fonction de la géographie et du tissu industriel local**
 - Production
 - Stockage
 - Usage
- **Mobiliser les entreprises et leurs fournisseurs en capacité de concevoir, construire et maintenir**
 - des composants
 - des briques technologiques
 - des systèmes clé en main



Développer rapidement les technologies pour être présent sur le marché



www.fclab.fr



UNIVERSITÉ DE
FRANCHE-COMTÉ

