

l'hydrogène et la mobilité bas carbone

ENTRÉE LIBRE & GRATUITE

20 NOV

20h30 - CCI
du Territoire
de Belfort

BAR DES SCIENCES

Avec **Marie-Cécile Pera**, directrice de FCLAB, Centre de Recherche et de Service sur l'Hydrogène Énergie et enseignante chercheuse en génie électrique à l'université Marie et Louis Pasteur.

?!
le pavillon
des sciences



RECIF



REAR

IM pays de
montbéliard
AGGLOMÉRATION

Montbéliard

BELFORT

Festival de la Transition
ÉCOLOGIQUE ET NUMÉRIQUE
du mardi 3 NOV. au dimanche 8 DEC. 2025

IESF
INSTITUT ÉCOLOGIQUE ET
SCIENTIFIQUE DE FRANCE

INSA GR
FRANCHE COMTE

CCI TERRITOIRE
DE BELFORT

L'hydrogène et la mobilité bas carbone

Bar des Sciences

Marie-Cécile PERA
Université Marie et Louis Pasteur

Qui suis-je ?



Marie-Cécile Péra

Professeure des Universités à l'Université Marie et Louis Pasteur

Enseignante à l'IUT Nord Franche-Comté, département Génie Electrique et Informatique Industrielle

Chercheuse à FEMTO-ST, département Energie

Directrice de FCLAB

Plateforme Hydrogène Energie

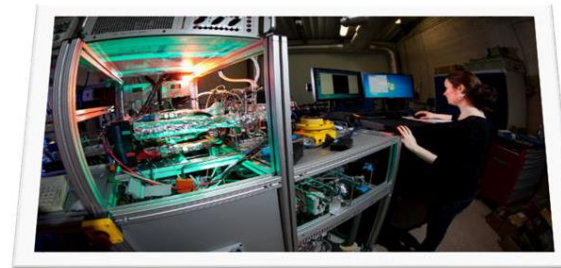
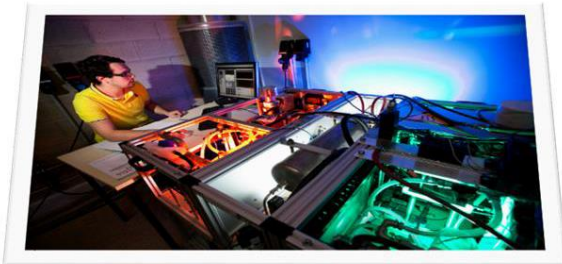
Co-fondatrice et Associée de la société H2SYS



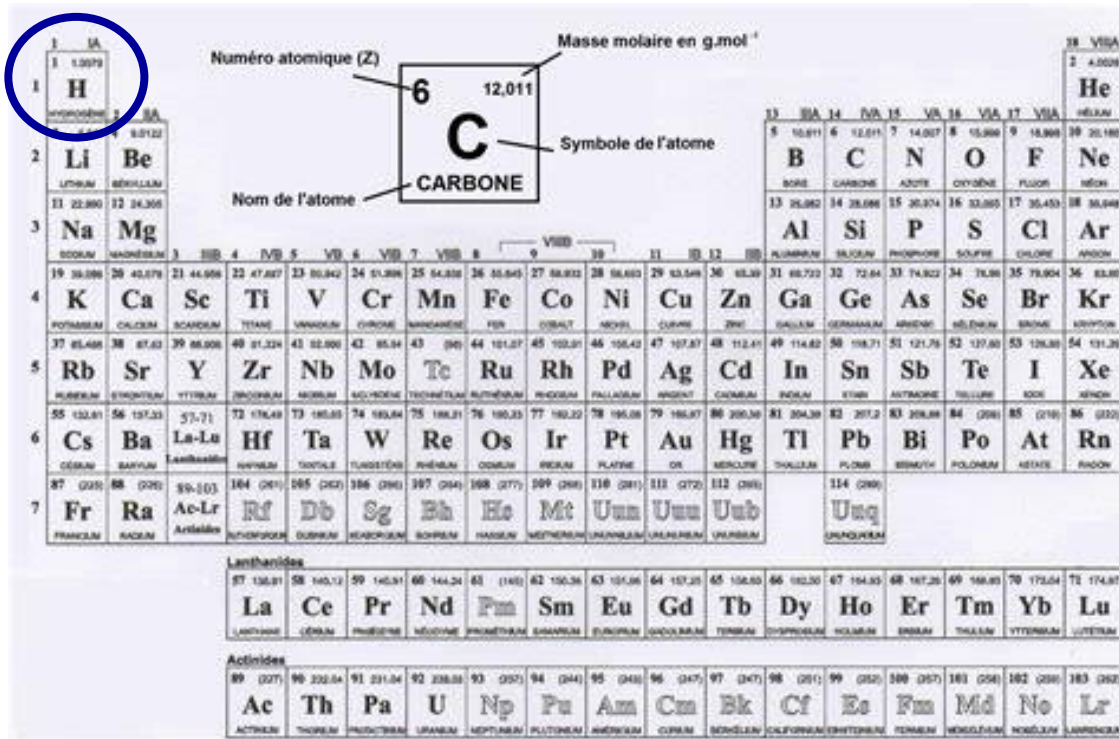
Sommaire



1. Qu'est-ce que l'hydrogène ?
2. Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?
3. Quelles applications de mobilité ?



Qu'est-ce que l'hydrogène?



Numéro atomique (Z)

Masse molaire en g.mol⁻¹

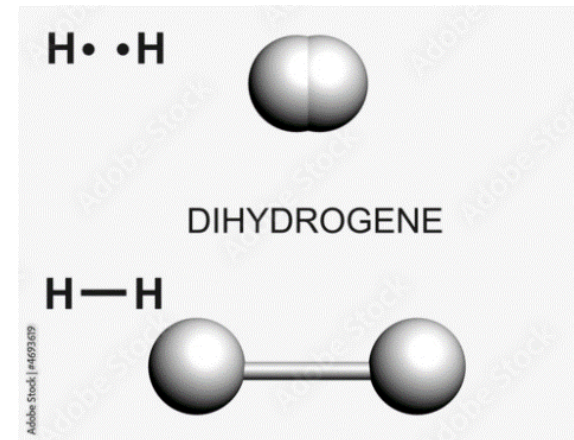
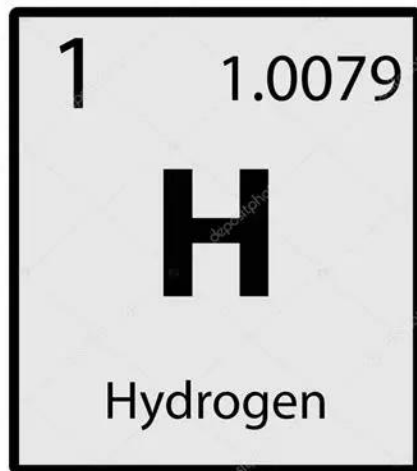
Symbole de l'atome

Nom de l'atome

CARBONE

1	1.0079
H	
Hydrogen	

Qu'est-ce que l'hydrogène?

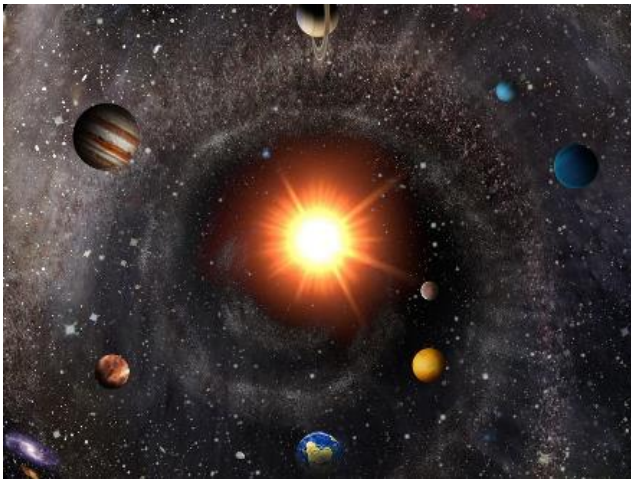


- ✓ Gazeux à pression et température ambiante
- ✓ Température de liquéfaction -253°C

Qu'est-ce que l'hydrogène?

- **L'élément dominant dans l'univers**

- ✓ 75 % en masse et 92 % en nombre d'atomes
- ✓ Etoiles majoritairement constituées d'hydrogène (découverte faite par Cecilia Payne en 1925)



Représentation logarithmique de l'Univers : Pablo Carlos Budassi



Cecilia Payne-Gaposchkin

L'hydrogène est-il une source d'énergie?

- **Sur Terre**

- ✓ Atome le plus abondant sur Terre également mais
 - ✓ soit combiné à l'oxygène : eau H_2O
 - ✓ soit combiné au carbone : hydrocarbures (pétrole, gaz)
 - ✓ soit combiné à C et O : biomasse végétale
- ✓ Gisements naturels découverts (hydrogène natif)
 - ✓ Ressources potentielles encore à définir
 - ✓ Conditions et techniques d'exploitation inconnues

Ce n'est pas une source d'énergie à ce jour

Qu'est-ce que l'hydrogène ?



Moyens de production

• Procédés thermiques : les plus utilisés

- ✓ Reformage du CH_4 : craquage de la molécule en carbone et hydrogène grâce à de la vapeur d'eau ($> 700^\circ\text{C}$)
 - ✓ 9 kg de CO_2 / kg H_2
 - ✓ Emissions moyennes véhicule neuf en 2024: 93,5 g/km
 - ✓ Pour 100 km → 9,35 kg de CO_2 .
- ✓ Oxydation partielle du pétrole.
- ✓ Gazéification du charbon.

• Procédés électrolytiques

- ✓ Electrolyse de l'eau
 - ✓ 4 kg de CO_2 / Kg H_2 (mix énergétique français)
 - ✓ 57 kWh / Kg H_2
 - ✓ 22 litres d'eau / Kg H_2

• Procédés photolytiques : en laboratoire

- ✓ Energie solaire directement utilisée pour décomposer H_2O en H_2 et O_2 .

Qu'est-ce que l'hydrogène ?

- Une production aujourd'hui extrêmement carbonée



Ressources fossiles

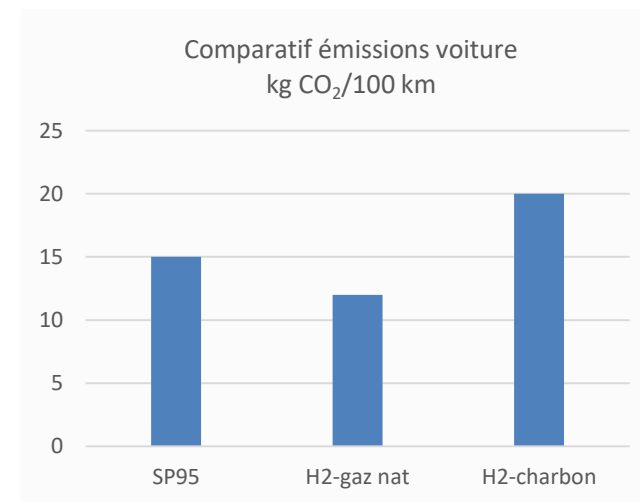
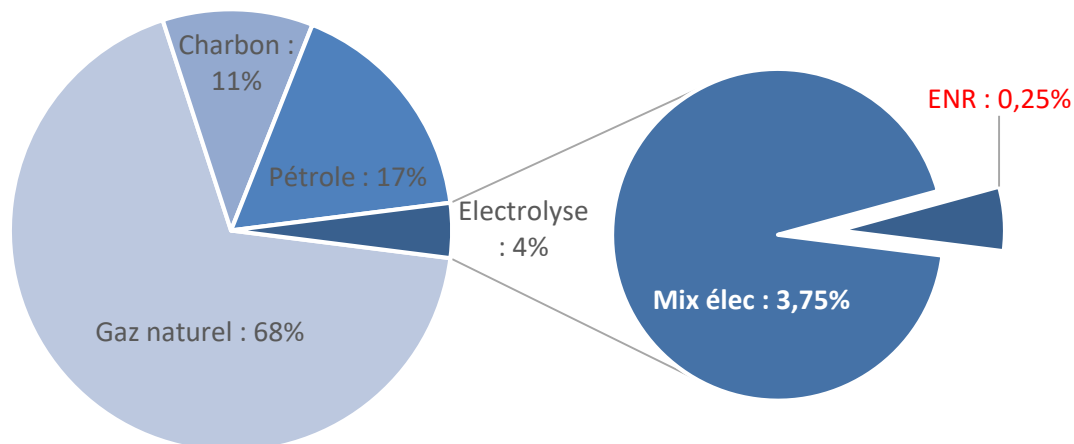


Bas carbone : captation CO₂ ou électrolyse faiblement carbonée (nucléaire)







Électrolyse : source primaire électrique sans émissions de CO₂

Ressources primaires pour la production d'H2



Qu'est-ce que l'hydrogène ?



-  Ressources fossiles :
vaporeformage ou électrolyse à forte émission de CO₂
-  Vaporeformage avec captation CO₂, réutilisé ou stocké
-  Électrolyse : source primaire électrique à faibles émissions de CO₂
-  Électrolyse : source primaire électrique sans émissions de CO₂
- ...

Articles L811-1 à L813-3 du code de l'énergie modifié 10 mars 2023
Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné

- **H₂ renouvelable** produit à partir de sources d'énergie renouvelables : < **X** kg CO₂/kg H₂
- **H₂ bas-carbone** produit à partir de sources d'énergie non renouvelables : < **X** kg CO₂/kg H₂
- **H₂ carboné** : > **X** kg CO₂/kg H₂
- ➔ **X** : seuil défini par arrêté du ministre chargé de l'énergie
- ➔ Fixé à 3,38 kg CO₂/kg H₂ le 1^{er} juillet 2024* (=seuil défini par l'UE en février 2023)

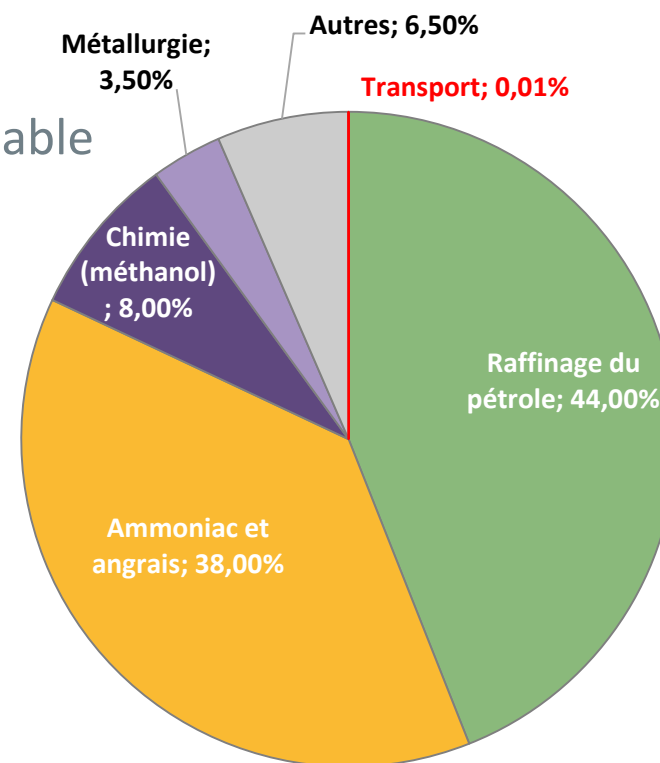
*<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049870616>

Usages multiples d'H₂

- **Principaux usages courants ➔ 100 Mt en 2024**

- ✓ Raffinage
- ✓ Production d'ammoniac
- ✓ Production de méthanol
- ✓ Métallurgie
- ✓ Conversion progressive en H₂ décarboné ou renouvelable

Consommations mondiales H₂



L'hydrogène en quelques chiffres

- **Avantages**

- ✓ Molécule très énergétique : 33 kWh/kg (12 kWh/Kg gasoil)
 - ✓ 1Kg de H₂ pour 100km en berline
- ✓ Ni polluant en basse atmosphère, ni toxique
- ✓ Pas d'émission de CO₂ lors de sa combustion dans l'air ou l'oxygène
- ✓ C'est le plus léger des gaz → grande diffusion dans l'air = sécurité
- ✓ Molécule réductrice : se combine avec O₂ pour donner de l'eau et de l'énergie

- **Inconvénients**

- ✓ Combustion dans l'air produit des NOx
- ✓ Faible énergie volumique
 - ✓ 3 Wh/litre pour H₂ sous forme gazeuse
 - ✓ 1350 Wh/litre sous forme liquide à -253 °C
 - ✓ 9 000 Wh/litre pour l'essence

→ Pour produire autant d'énergie calorifique qu'1 litre d'essence, il faut 4,3 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars

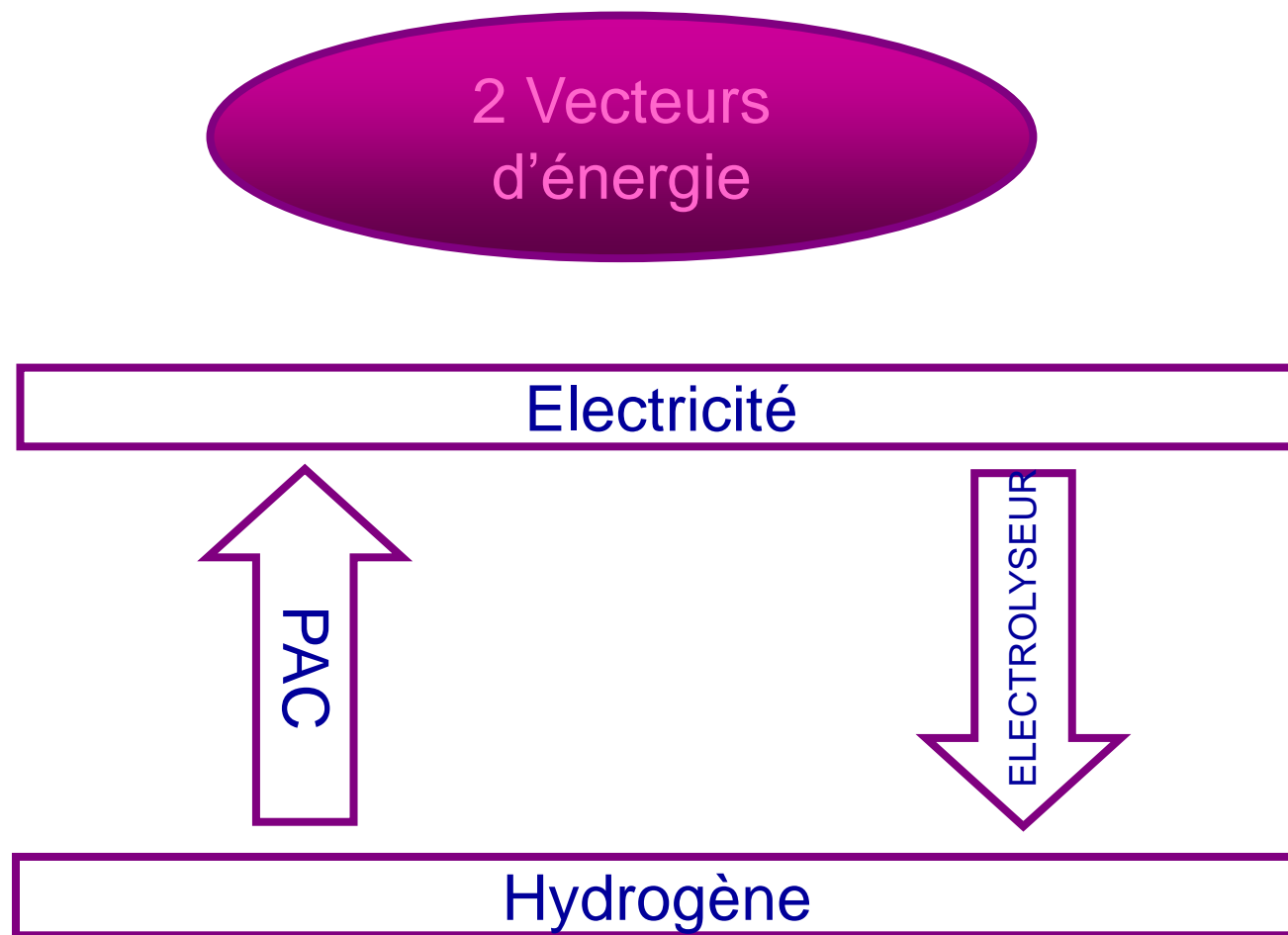
Qu'est-ce que l'hydrogène ?



- **N'existe pas de gisements naturels (sous sa forme moléculaire)**
- **Nombreuses solutions de production**
- **Techniques de production maîtrisées**
- **Techniques de transport maîtrisées**
- **Versatilité des usages**

C'est un vecteur d'énergie

Deux vecteurs d'énergie qu'on peut coupler



Deux vecteurs d'énergie complémentaires

2 Vecteurs
d'énergie

Electricité

Hydrogène

Ne se stocke pas (« pas d'accumulation
d'électrons »)
Stockage électrochimique court terme
(batteries)

Stockage d'énergie chimique
Long terme

Stockage d'H₂



- **Selon son conditionnement**

- ✓ Gazeux à basse, moyenne ou haute pression (de quelques dizaines de bar à 700 bar).
- ✓ Liquéfié à -253°C → nécessite un système de maintien en température et une isolation performante.
- ✓ Solide par absorption dans des matériaux.

- **Stockage sous forme de gaz comprimé**

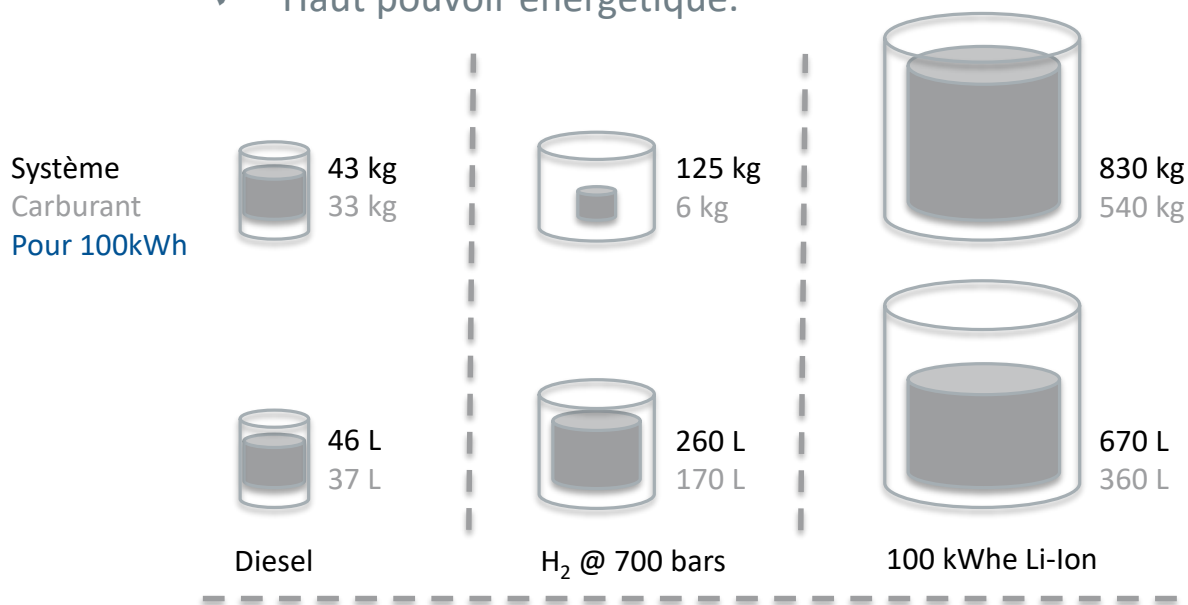
- ✓ Densité énergétique volumique H₂ très faible (62 kg H₂.m⁻³ à 700 bars) → Nécessité de comprimer à très haute pression pour diminuer la taille du stockage.
 - ✓ Ex. pour un véhicule : Autonomie de 600 km → 5 à 6 kg d'H₂ à 700 bars → volume de 85 à 150 l.
- ✓ Réservoirs à 700 bars très onéreux car structure résistante en fibre de carbone et une couche imperméable en acier → 6 000 €/kg H₂ avec objectif de moitié prix.
- ✓ Réservoirs à 500 bars → 700 €/kg H₂.
- ✓ Réservoirs traditionnels à 200 bars → 500 €/kg H₂.
- ✓ Pour les consommations dépassant plusieurs dizaines de milliers de m³/h d'H₂ → réseaux de canalisations d'H₂.
- ✓ Power-to-gas → Transport de 2 à 5% de volume d'H₂ dans les réseaux de gaz classiques.

Vecteur d'énergie H₂

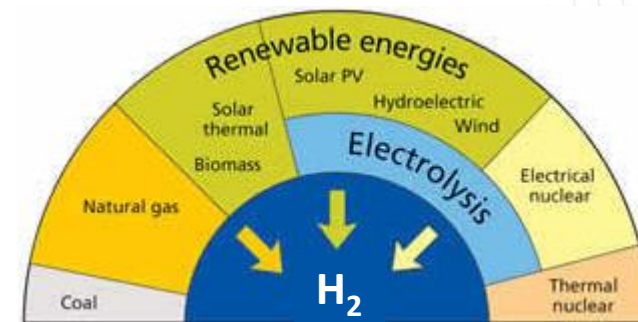
Un atout pertinent pour la décarbonation ?

- **Production propre avec électrolyseur**

- ✓ Alimenté par EnR
- ✓ Flexibilité au réseau
- ✓ Production décentralisée possible.
- ✓ H₂ peut être stocké pour utilisation ultérieure.
- ✓ Haut pouvoir énergétique.



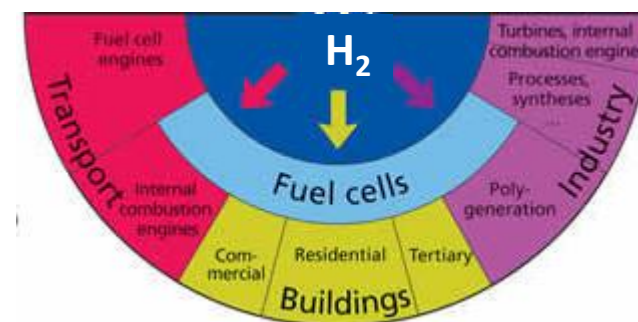
- ✓ H₂ utilisé pour la production d'électricité via une **Pile à Combustible (PAC)**



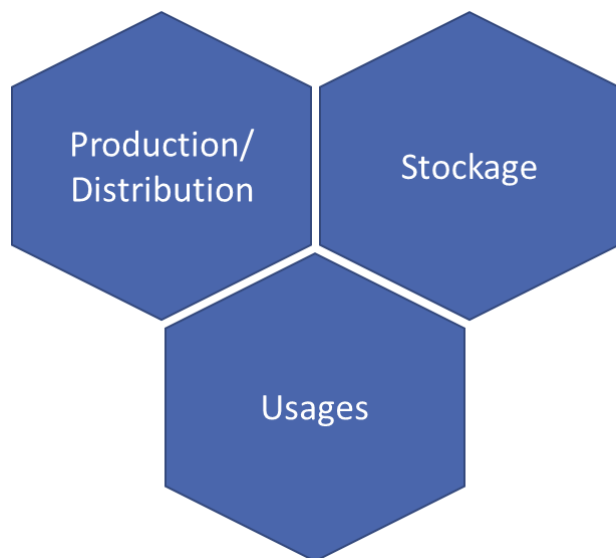
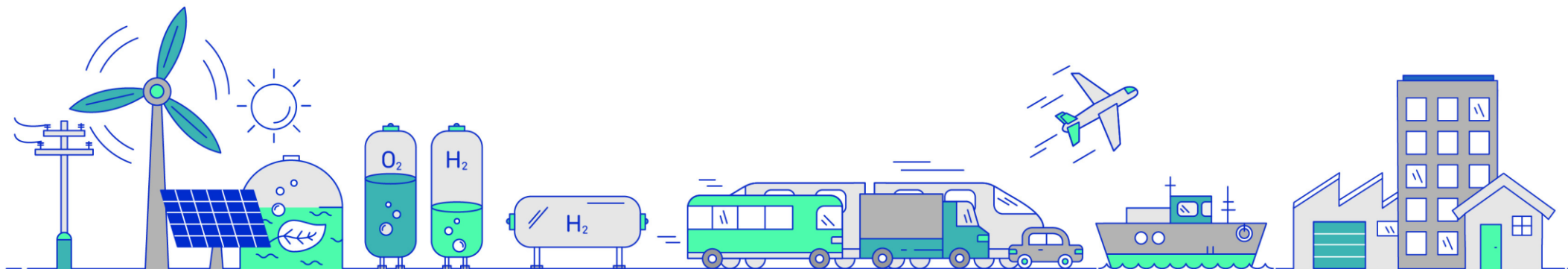
Production



Utilisation



Un écosystème à construire

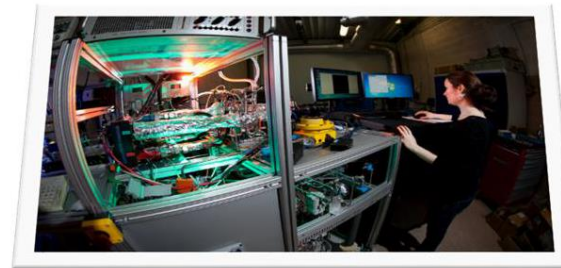
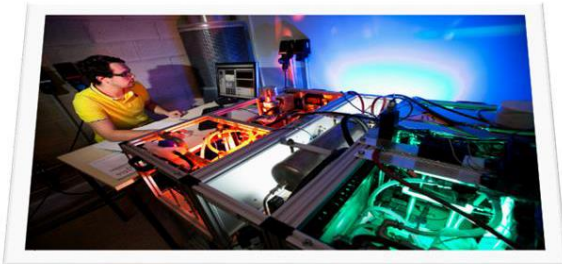


- Ecosystème aux multiples acteurs à construire
- Nouveaux paradigmes à mettre en œuvre vis-à-vis de l'énergie et de ses usages

Sommaire

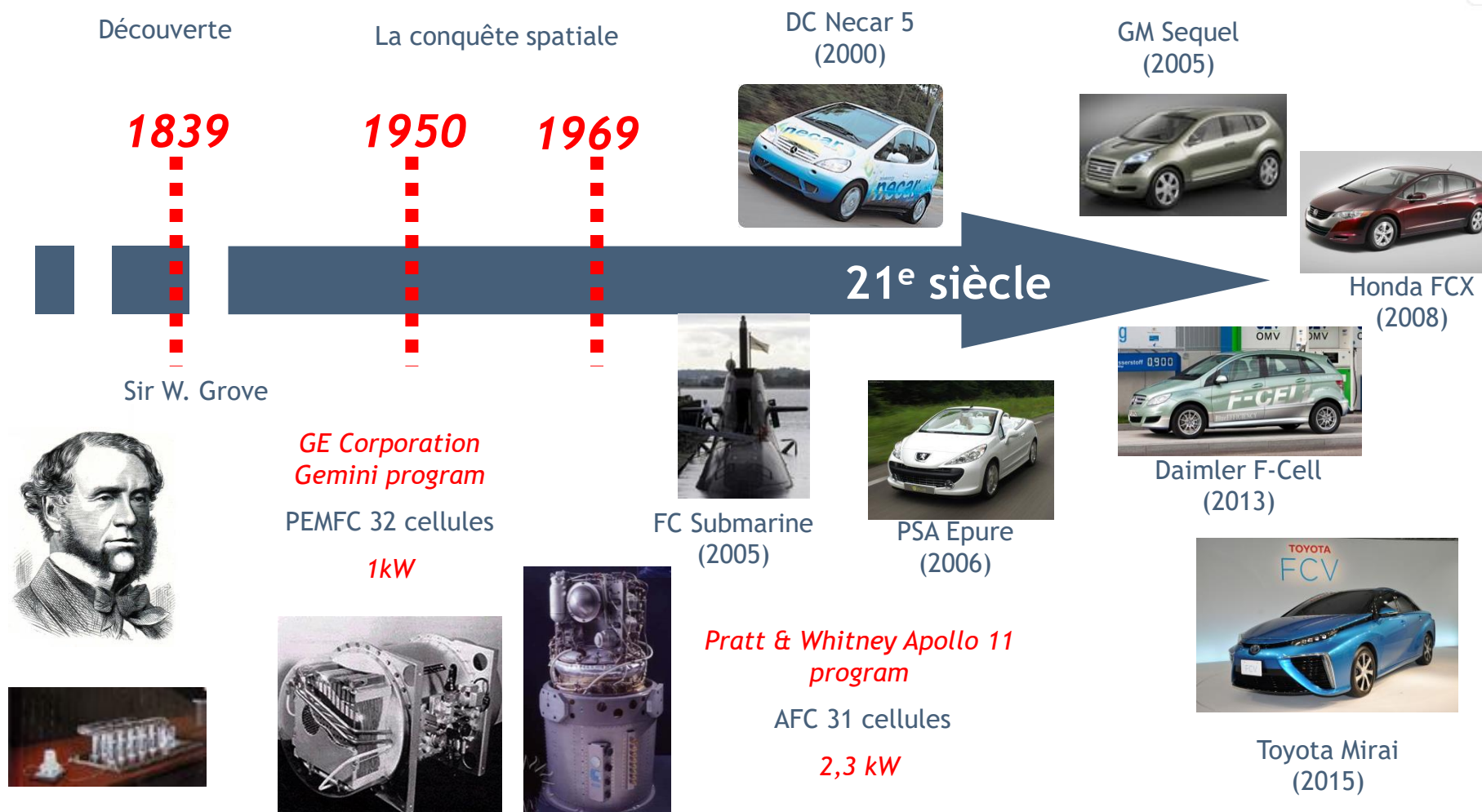


1. Qu'est-ce que l'hydrogène ?
2. Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?
3. Quelles applications de mobilité ?



Pile à combustible

Historique

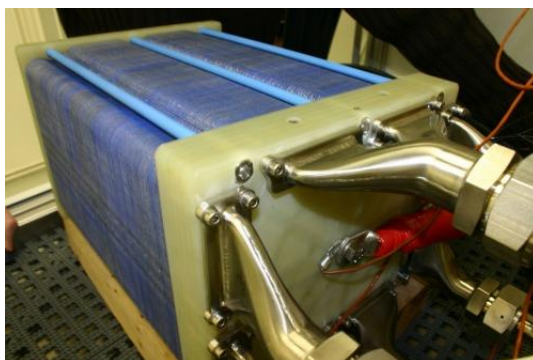


Pile à combustible

C'est un composant électrochimique qui convertit de manière continue l'énergie chimique d'un comburant et d'un combustible (carburant) en énergie électrique (courant continu DC). Le combustible et le comburant sont stockés à l'extérieur du composant et transférés au fur et à mesure que les réactifs sont consommés.

(USFFC Fuel Cell Glossary definition)

CEA



CEA/PSA

Pile à combustible

Principe de fonctionnement

« ... je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constitue, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir ... »

« L'île mystérieuse », Jules Verne, 1875

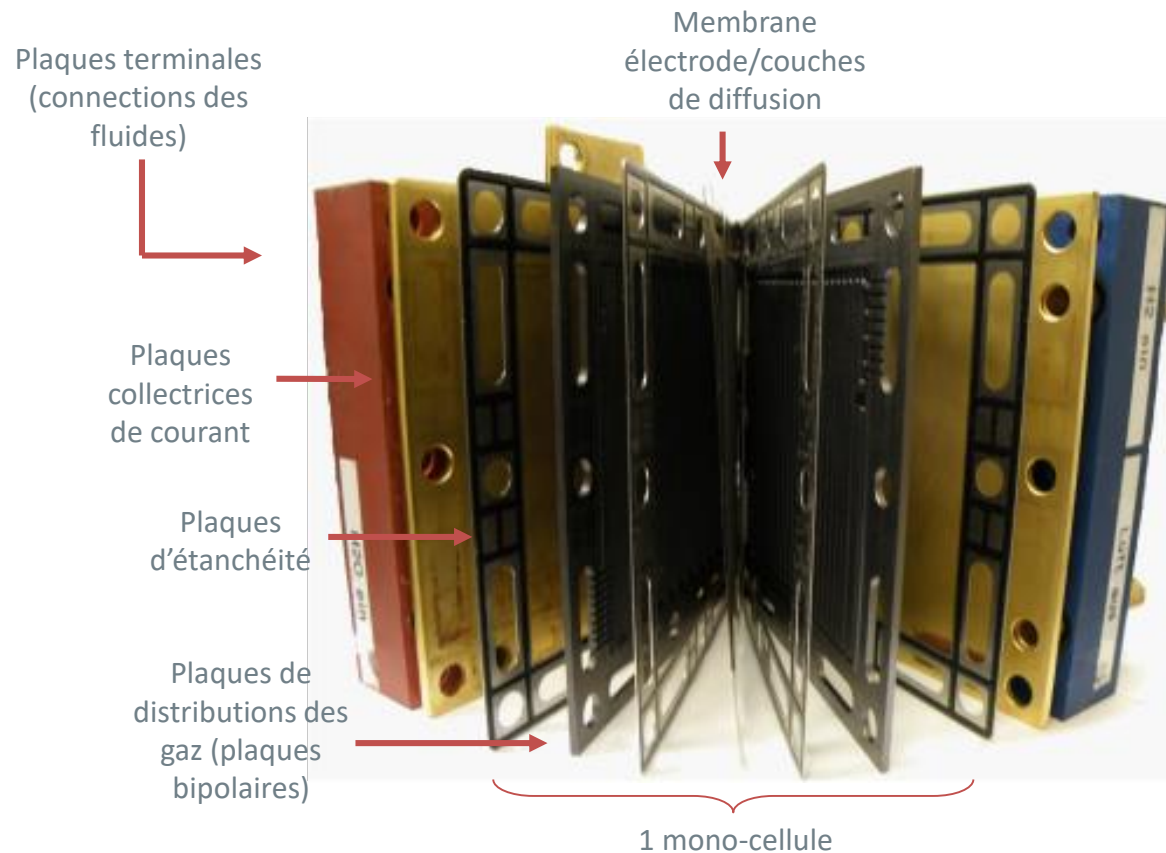


- Piles à Membranes Echangeuses de Protons (PEMFC) → Mobilité électrique
- Piles à Oxydes Solides (SOFC)

Pile à combustible

Principe de fonctionnement

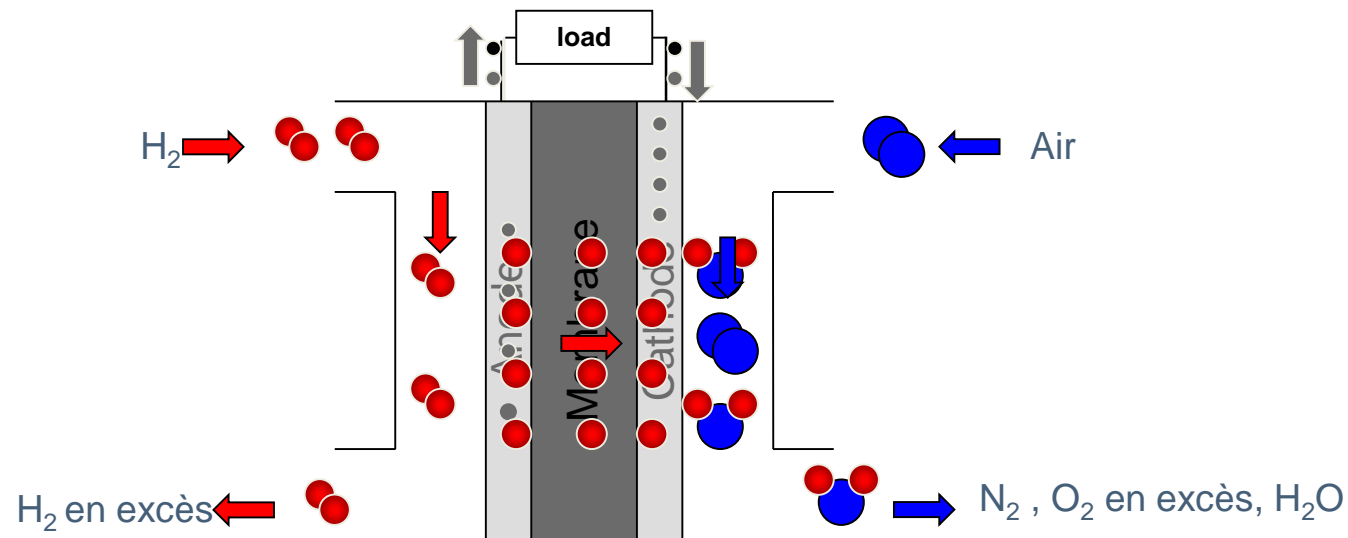
- Une PAC est constituée de :
 - Empilement d'éléments anode/électrolyte/cathode.



Pile à combustible

Principe de fonctionnement

- Une PAC est constituée de :
 - Électrode négative (anode) où a lieu la réaction d'oxydation du combustible/(carburant (H₂))
 - Electrode positive (cathode) où est réduit le comburant (O₂).

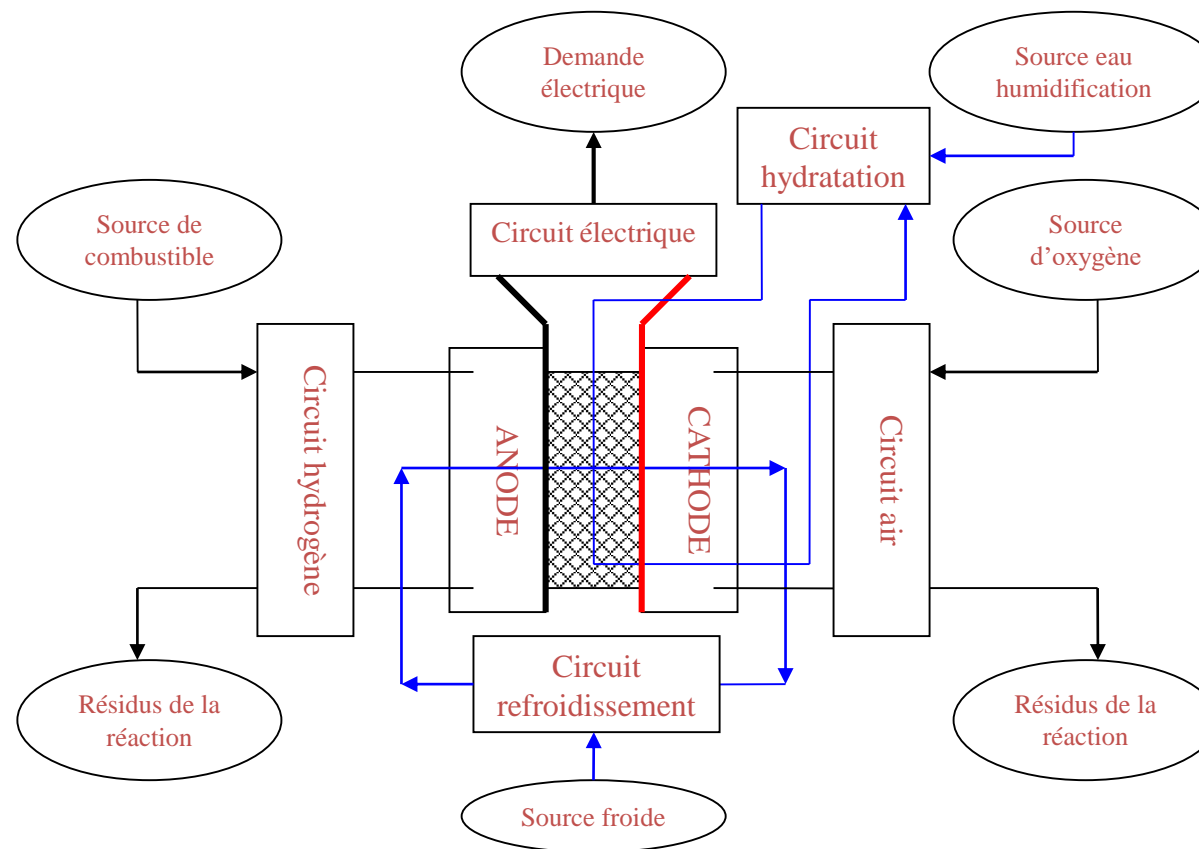


- Anode : $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- Réaction bilan : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Electricité} + \text{Chaleur}$

Pile à combustible

Principe de fonctionnement

- Pour fonctionner, un système PAC doit au minimum être connecté à 5 composantes :



Pile à combustible

Spécifications du marché



	Automobile	Stationnaire (production primaire)	Stationnaire (Backup)
<i>Puissance</i>	50 – 100 kW	1 – 10 kW & 200 kW	1 – 10 kW
<i>Carburant</i>	Hydrogène	Reformat	Hydrogène
<i>Durée de vie</i>	5 000 h	> 40 000 h	< 2 000 h
<i>Fonctionnement</i>	Intermittent	Constant	Intermittent
<i>Tension</i>	> 300 VDC	110/220 VAC	24, 48 VDC or 110 – 220 VAC
<i>Prix</i>	< US\$ 50/kW	< US\$ 1 000/kW	< US\$ 5 000 /kW

Systeme Pile à combustible

Le Systeme Pile à Combustible

• Les verrous ...

Durée de vie

- 3 000 h (transport)
- 40 000 h (stationnaire)

Efficacité et performances

- $\eta_{\text{systeme}} \sim 35 - 40 \%$
- \uparrow Performances cœur
- \downarrow Consommation aux.

Coût

- 1 k€/kWe (transport)
- 3 k€/kWe (stationnaire)



• ... et les objectifs affichés à l'horizon 2030

Durée de vie

- 5 000 h (transport léger)
- 20 000 h (transport lourd)
- 80 000 h (stationnaire)

Efficacité et performances

- $\eta_{\text{systeme}} \sim 50 \%$

Coût

- 50 €/kWe(transport)
- 1 k€/kWe (stationnaire)



Société

- H₂ énergie méconnue
- Marché de l'énergie
- Droit de l'énergie

Systeme Pile à combustible

Le Système Pile à Combustible

• Comment s'approcher des objectifs ?

Durée de vie

- 3 000 h (transport)
- 40 000 h (stationnaire)

Efficacité et performances

- $\eta_{\text{système}} \sim 30 \%$
- \uparrow Performances cœur
- \downarrow Consommation aux.

Coût

- 1 k€/kWe (transport)
- 3 k€/kWe (stationnaire)



Société

- H₂ énergie méconnue
- Marché de l'énergie
- Droit de l'énergie

Durée de vie

- 5 000 h (transport léger)
- 20 000 h (transport lourd)
- 80 000 h (stationnaire)

Efficacité et performances

- $\eta_{\text{système}} \sim 50 \%$

Coût

- 50 €/kWe(transport)
- 1 k€/kWe (stationnaire)



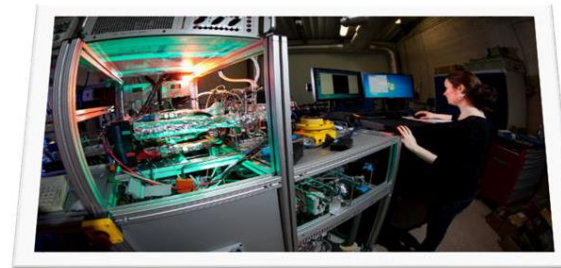
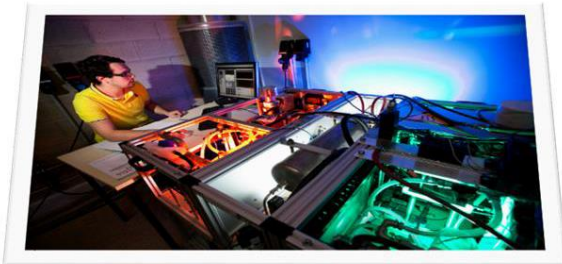
Automatisation
process
> 300 000 unités/an



Sommaire



1. Qu'est-ce que l'hydrogène ?
2. Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?
3. Quelles applications de mobilité ?



Mobilité Hydrogène

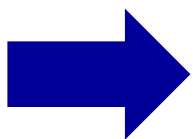


Match Pile à combustible (PàC) / Batteries

- Recharge rapide des réservoirs (qq minutes)
 - Découplage entre énergie et puissance
 - Moindre sensibilité à la température ambiante
 - Filière de recyclage rentable
 - Pas d'autodécharge
-
- Pas de récupération de l'énergie de freinage dans les PàC
 - Dynamique de variation de la puissance plus faible dans les PàC
 - Batteries : 95% de rendement / PàC : 40%
 - Système PàC complexe et source de pannes
 - Réseau de distribution d'H2 très embryonnaire/réseau de recharge
 - Présence de PFAS (dit polluants éternels)
 - Régime dérogatoire d'utilisation des PFAS

} Avantage à la pile
à combustible

} Avantage à la
batterie



Plus de complémentarité que de concurrence : hybridation PàC et batterie

Mobilité Hydrogène

□ Applications marines



Ferry de Norled AS (Norvège) 2021

Source ; France Hydrogène



Propulsion (module de base 100kW)

<https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/marine-modules>

Mobilité Hydrogène



□ Applications marines



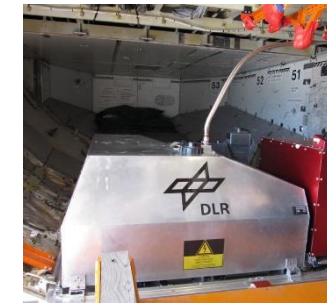
Projet MF Hydra (Norvège) H₂ liquide

Pousseur Elektra (Allemagne)



Mobilité Hydrogène

□ Applications aériennes



2008

FC APU100 kW



2014

Phase de roulage vers les pistes
Roue motrice



Mobilité Hydrogène

□ Aéronef sans pilote



2014

Phantom Eye
Liquid Hydrogen
Autonomy 4 days
Payload 200 kg

2015

Small unmanned aircraft
Fuel cell
Compressed H₂

Mobilité Hydrogène

□ Applications aériennes

Horizon de mise en service incertain :
2035-2050



Avion tout électrique à pile à combustible

Turbofan



Turboprop



Propulsion : liquid H_2 + gas turbine

Mobilité Hydrogène

□ Applications rail

Lancement en 2018

<http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/coradia-ilint-regional-train/>



Train régional : Alstom Coradia iLint

Motivation : pas de pose de caténaire, silencieux et bas carbone

Autonomie	1000 km
Vitesse	200 km/h max
Li-ion battery	--
Service	100 km between 2 cities
Passagers	160 assis



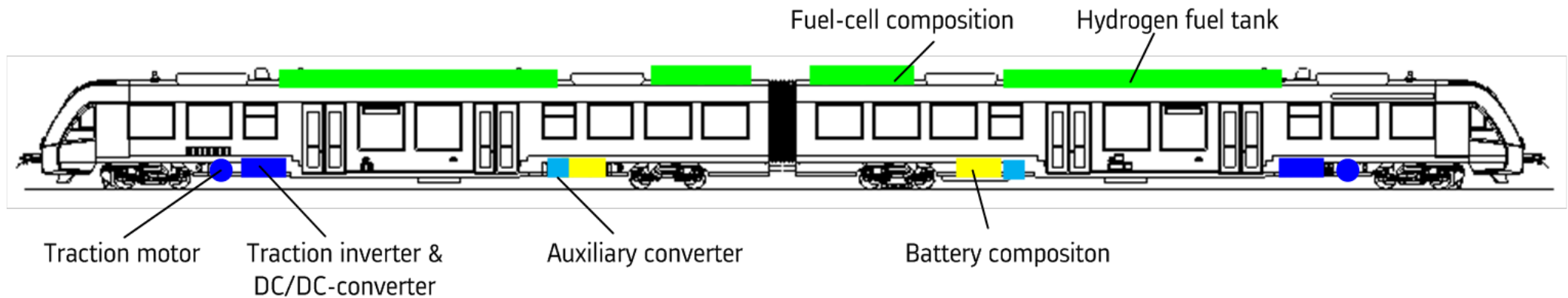
Mobilité Hydrogène

□ En France

- ✓ 80% des lignes regionales ne sont pas électrifiées
- ✓ Emissions de CO₂ d'un TER Diesel = Emissions de 400 voitures thermiques

□ Coradia iLint

- ✓ 42 trains en circulation
- ✓ 1 Million de kilomètres parcourus
- ✓ Plateforme identique à la plateforme diesel



<http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/coradia-ilint-regional-train/>

Mobilité Hydrogène

❑ Remorque autonome frigorifique

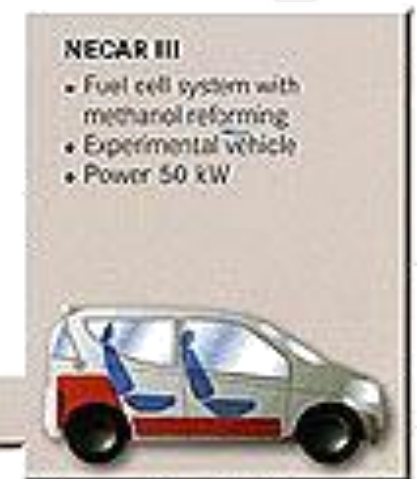
Projet ROAD

- ✓ L'allègement du châssis
- ✓ L'aérodynamisme
- ✓ L'isolation
- ✓ La production d'énergie propre (hydrogène)
- ✓ L'optimisation de la gestion des différents équipements électroniques
- ✓ En cours d'industrialisation



Mobilité Hydrogène

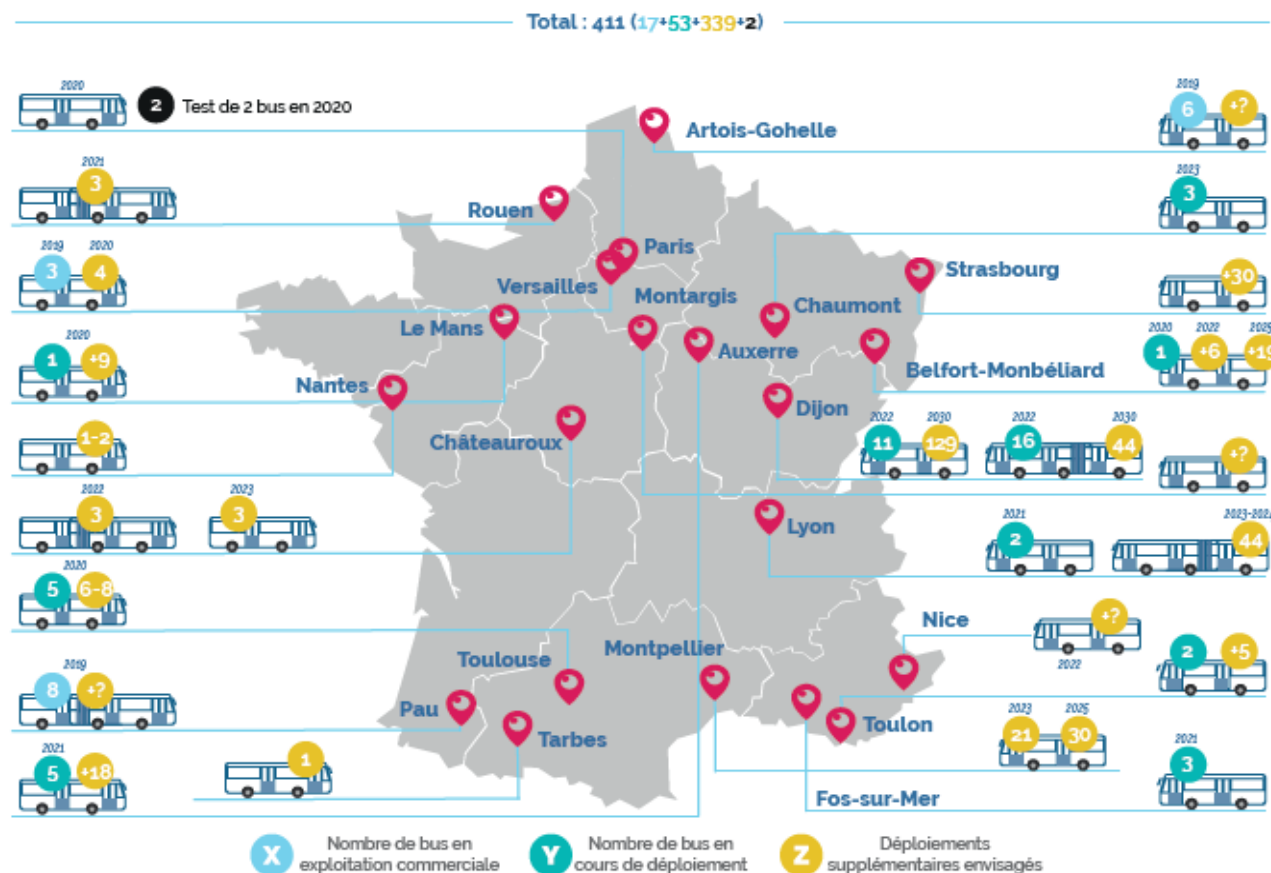
□ Propulsion pour applications routières



Daimler Chrysler et Ballard

Mobilité Hydrogène

□ Véhicules lourds : Bus

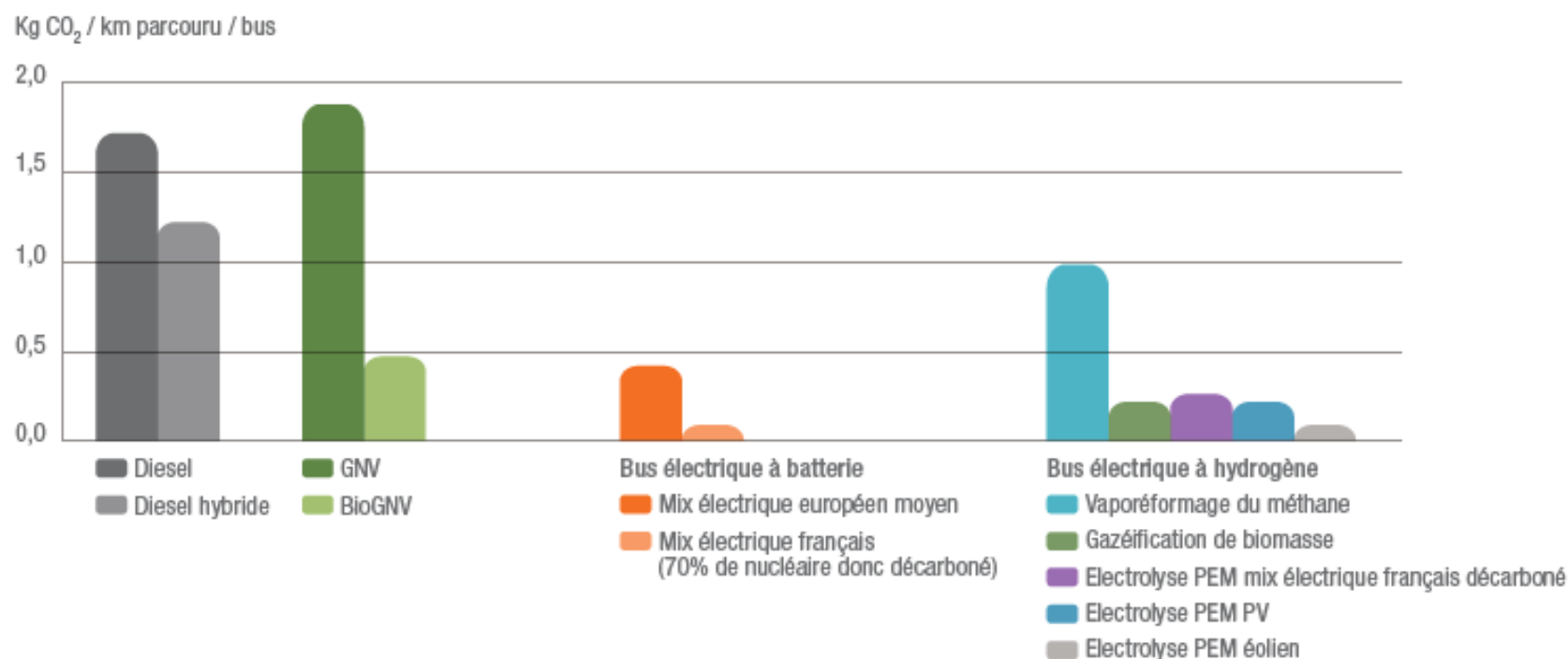


Livre Blanc AFHYPAC, 2019

Mobilité Hydrogène

□ Véhicules lourds : Bus

Bilan environnemental en fonction de l'origine du carburant embarqué



Livre Blanc AFHYPAC, 2019

Mobilité Hydrogène

□ Véhicules lourds : Bus

- **Bus H₂ Optymo : plan de déploiement initial**

- ✓ 7 bus en 2022
- ✓ + 8 bus en 2024
- ✓ + 12 bus en 2025

Coût acquisition bus H2

BUS HYDROGÈNE

Prix d'achat
695 449 €

Prix net
420 838 €

Aides
274 611 €

BUS DIESEL

282 436 €

DIFFÉRENCE

138 402 €



Mobilité Hydrogène

□ Véhicules lourds : Bus

- **Station H₂ à Danjoutin**

- ✓ 400 kg H₂ / jour
- ✓ Electricité d'origine renouvelable (par éolien de Mottenberg en Moselle) / marché de l'énergie virtuel



Mobilité Hydrogène


□ Véhicules légers



Hyundai Nexo 2 à partir de 80 600€



Toyota Mirai à partir de 80 000€

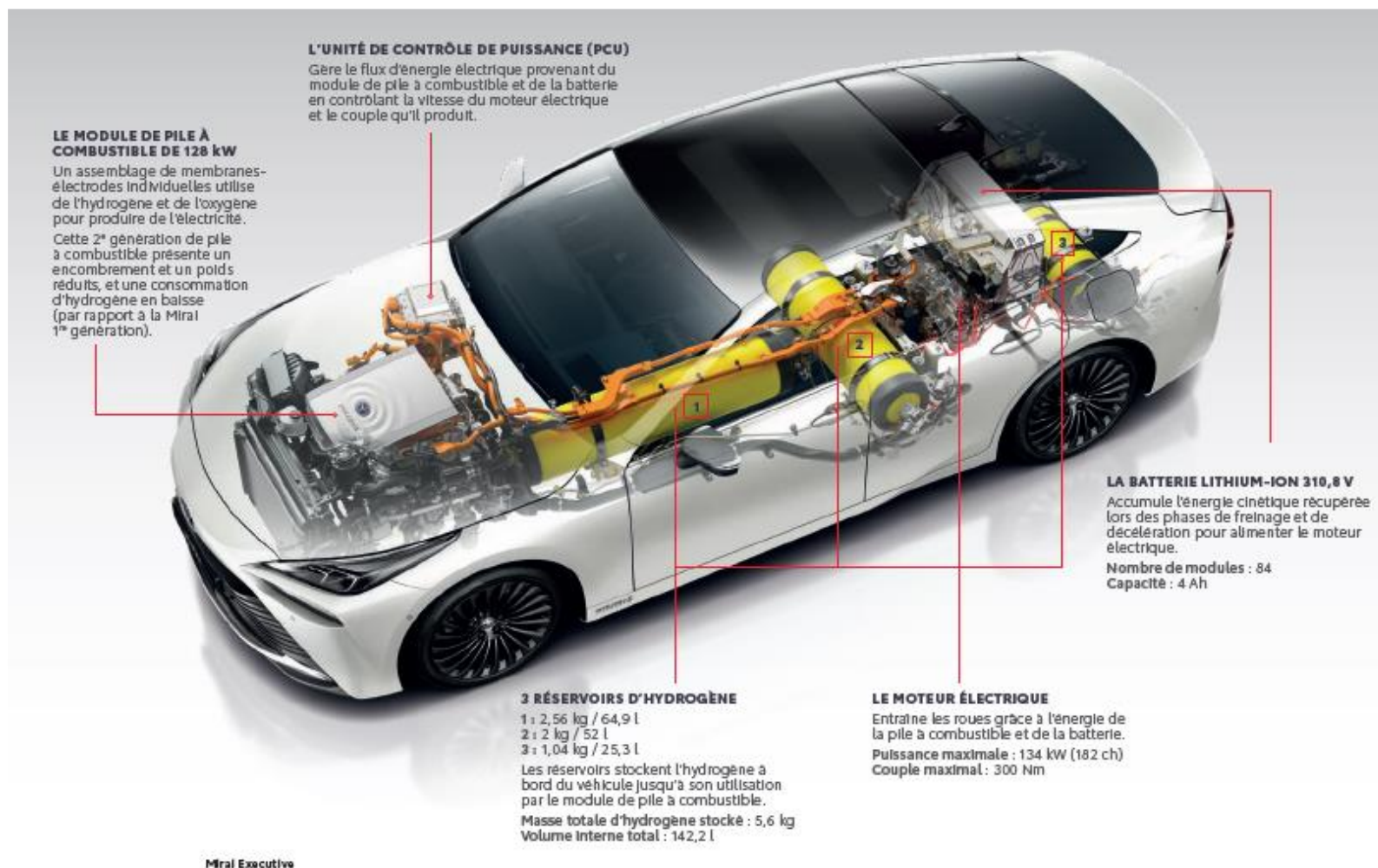


Fuel Cell	190 kW
Batterie Li-ion	80kW/2.64 kWh
Réservoirs H ₂	700 bars, 6.7 kg
Autonomie	700 km
Recharge	5 minutes

Fuel Cell	130 kW
Batterie Li-ion	1.24 kWh
H ₂ tanks	700 bars, 6.3 kg
Autonomie	650 km
Recharge	5 minutes

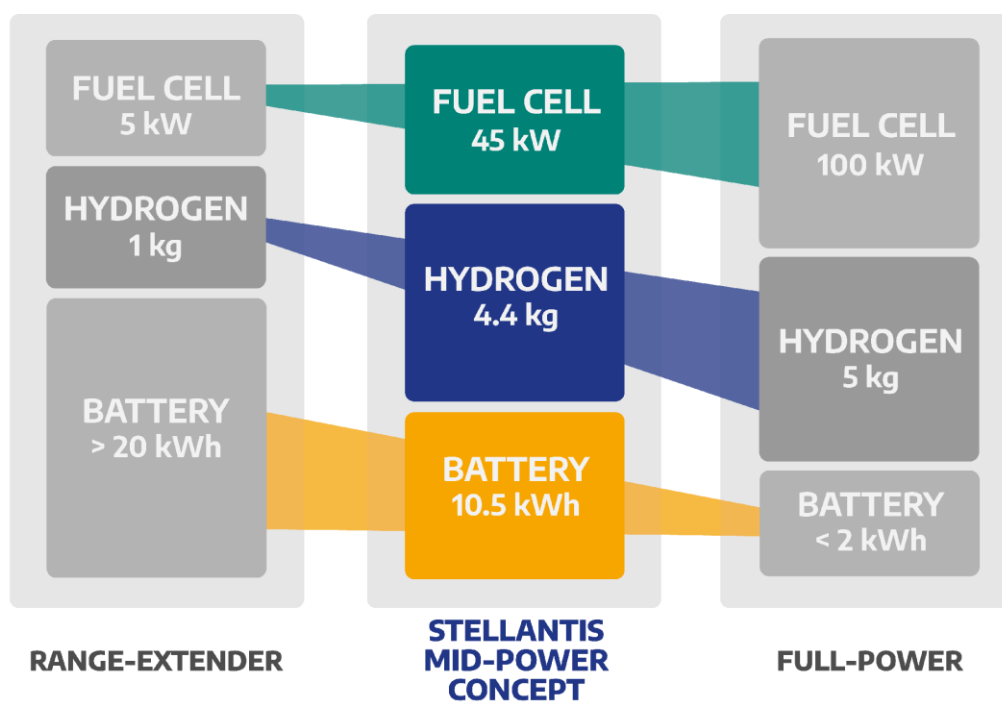
Mobilité Hydrogène

□ Véhicules légers : architecture de la Mirai



Mobilité Hydrogène

□ Véhicules légers : autres options d'architecture



Mobilité Hydrogène



- H2SYS, la start-up Belfortaine



GRUPE ÉLECTROGÈNE HYDROGÈNE
BOXHY®

Un générateur électrique mobile jusqu'à 8 kVA

GRUPE ÉLECTROGÈNE HYDROGÈNE
THYTAN®

Des générateurs électriques stationnaires
jusqu'à 150 kVA



PILE À HYDROGÈNE
AIRCELL®

Des systèmes piles à hydrogène de 500 à 3000 W

SOLUTIONS DIDACTIQUES
MOTHYS®

Un système pédagogique dédié à
l'apprentissage des systèmes hydrogène



Mobilité Hydrogène

- **INOCEL** : installation d'une « Giga Factory » sur un ancien site d'Alstom (bâtiment des Ailettes). Production de stack de piles 300kW pour le transport lourd. Objectif de 700 personnes à horizon 2030.



A retenir



- Un faisceau de solutions à gérer pour faire face à nos besoins énergétiques
→ Hydrogène : une des fleurs du bouquet
- L'hydrogène représente un vecteur énergétique prometteur pour décarboner les secteurs où l'électricité ne peut pas tout résoudre.
- Toutefois, des efforts restent nécessaires pour surmonter les défis technologiques, économiques et infrastructurels.
- Le soutien des politiques publiques est indispensable pour soutenir une filière dont on attend une rapidité de développement et de résultats inédite.
- Les progrès technologiques sont rapides et probants, l'hydrogène devrait être un pilier majeur d'une économie durable à l'horizon 2050.

Merci pour votre attention

