FC LAB

Le vecteur hydrogène énergie

cnrs utbm UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ ensmm École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques UBFC UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

femto-st SCIENCES & TECHNOLOGIES IFSTTAR SATIE Ampère lemta icb

FCLAB - Chiffres clés

Unité de Service et de Recherche CNRS

- 4 tutelles
- 6 laboratoires partenaires

Personnels

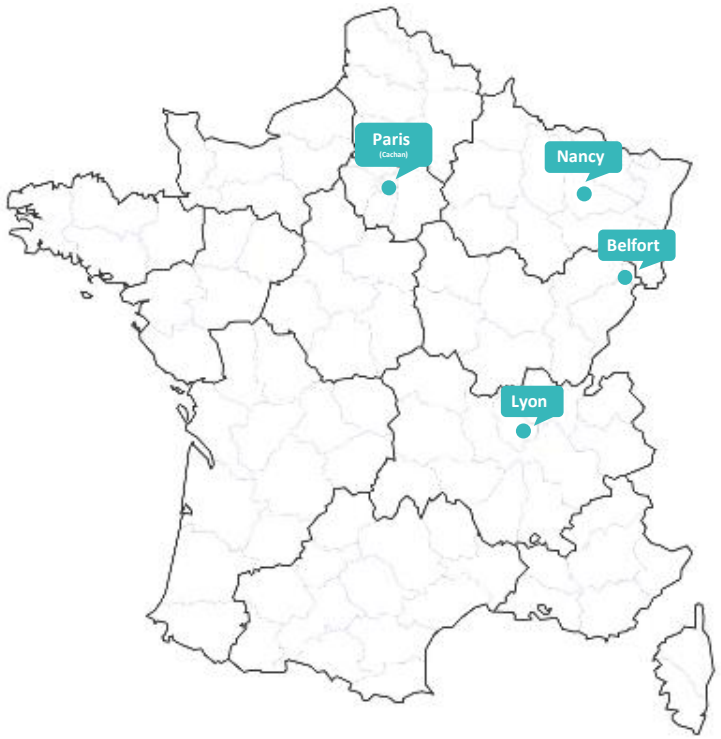
- 180 personnes dont 50 doctorants

Bilan depuis 2012

- + 70 thèses de doctorat
- 13 HDR

Projets (depuis 2012)

- + 11 M€ d'aide obtenue sur des programmes de recherche
- 3,1 M€ de projets industriels (dont 2,2 M€ depuis 2016)
- 1 start-up créée en 2017



FC LAB

Plateforme pile à combustible

Héberge FCLAB et FEMTO-ST / Energie / SHARPAC

Équipement publique unique en Europe

- caractérisation / essais en condition d'usages
- intégration de systèmes PAC pour le transport et le stationnaire

Investissements

- 8 M€ dans l'infrastructure
- 5 M€ dans les installations d'essai

FC LAB

Plateforme pile à combustible

Bancs d’essais

- de 500 W à 120 kW
- banc vibro-climatique
- bancs roulants et démonstrateurs échelle 1

Capacité à effectuer des tests de très longue durée (24h/7j)

SMQ ISO 9001 en cours de certification

FC LAB

Quelques réalisations emblématiques pour le transport

2009 : véhicule laboratoire militaire

2011 : premier véhicule H2 français immatriculé

2014 : première flotte H2 française

2019 : première remorque frigorifique H2 au monde

FC LAB

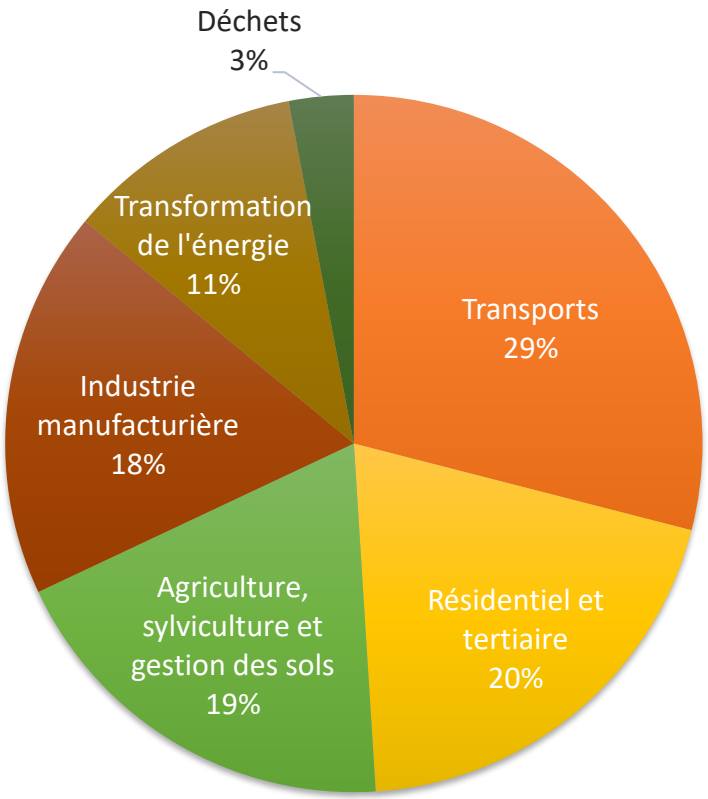
Éléments fondamentaux de l’hydrogène-énergie

FC LAB

L'hydrogène dans la problématique énergétique globale

Hydrogène : un vecteur énergétique incontournable pour le climat

- **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 $MtCO_2$)
  - 2050 : réduction de **25%**



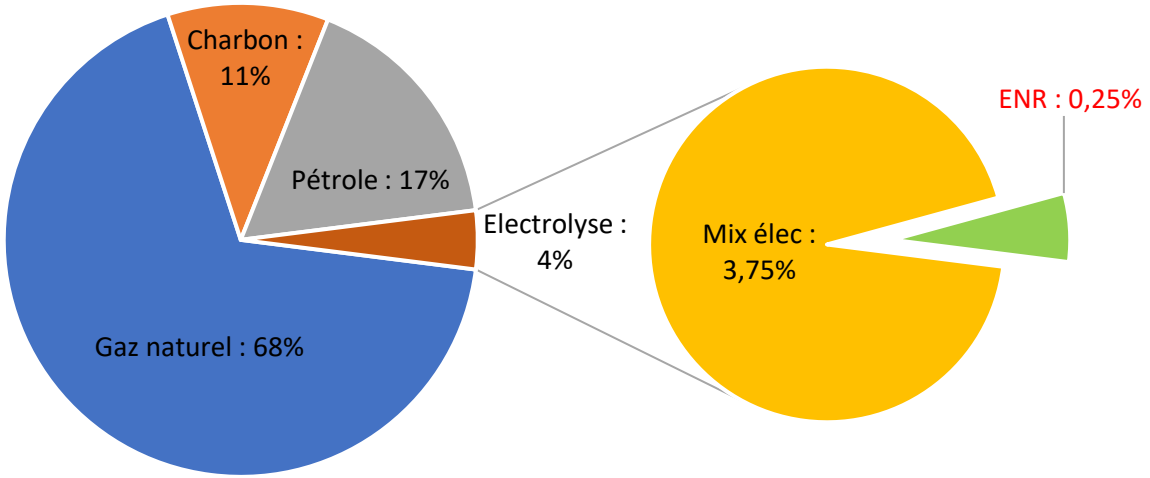
Répartition des émissions de GES en France en 2017

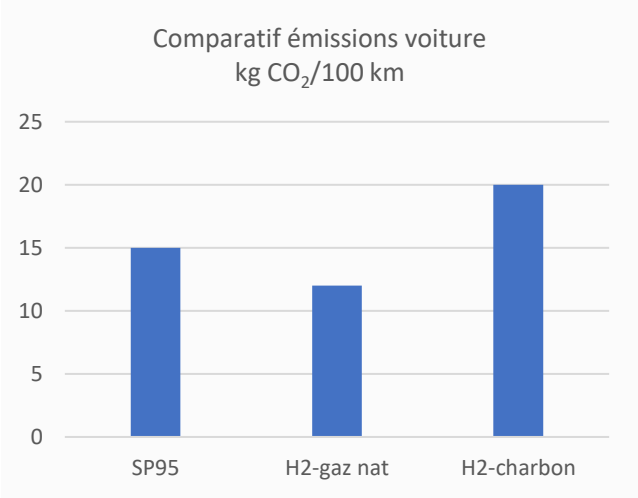
Production de l'hydrogène

Une production aujourd'hui essentiellement carbonée

- H_2 Ressources fossiles
- H_2 Bas carbone : captation CO_2 ou électrolyse faiblement carbonée (nucléaire)
- H_2 Électrolyse : source primaire électrique sans émissions de CO_2

Ressources primaires pour la production d'H2 - monde



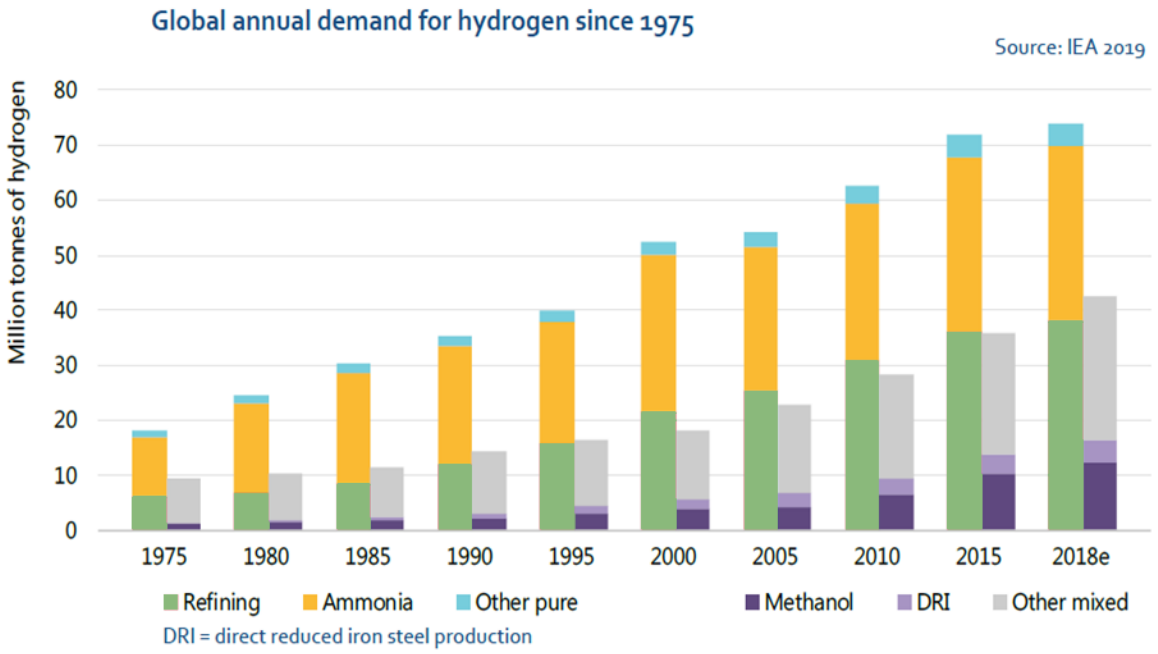


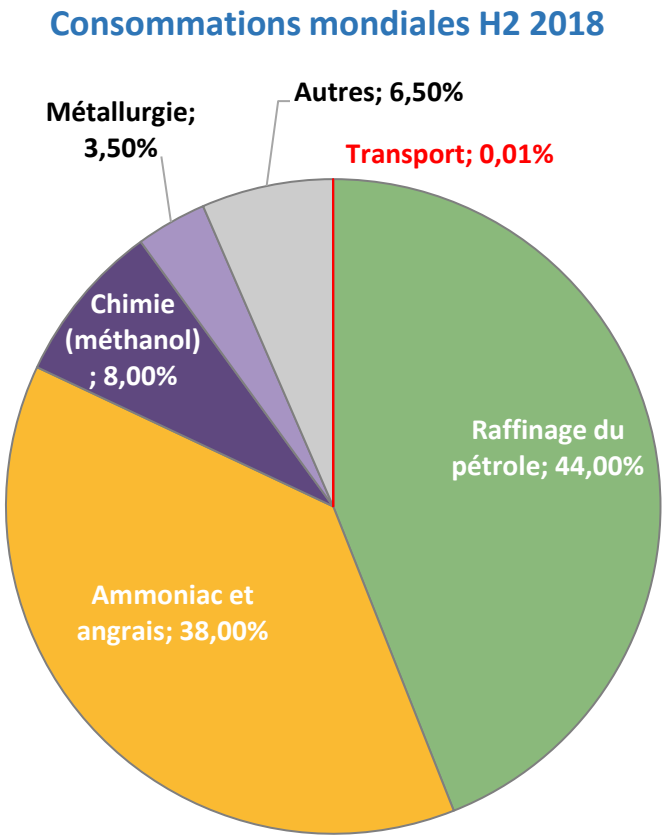
Usages de l'hydrogène

Principaux usages courants → 120 Mt en 2019

- Raffinage
- Production d'ammoniac
- Production de méthanol
- Métallurgie

➔ **Conversion progressive en** H_2

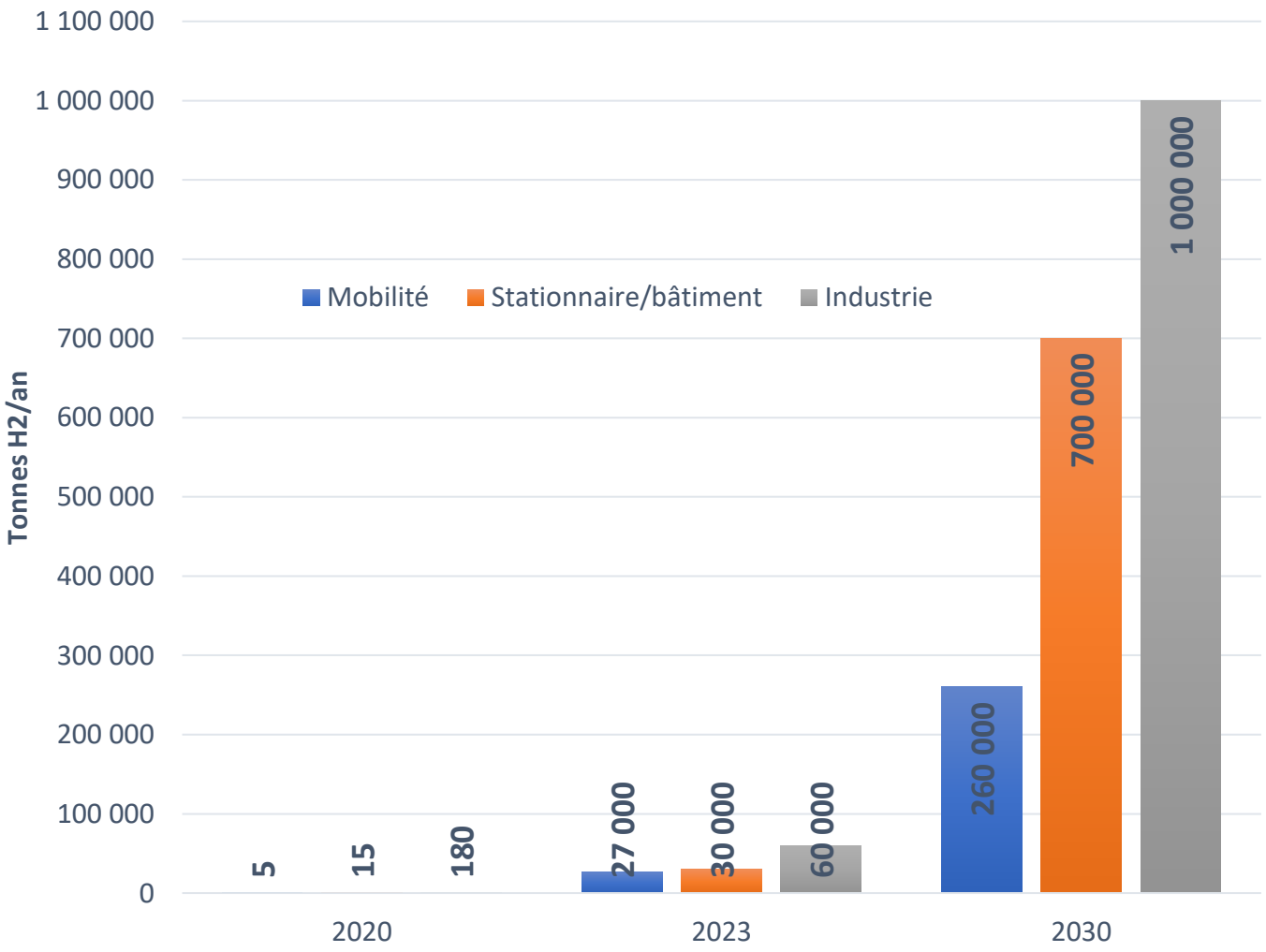




Perspectives

Prévision du marché français de l'hydrogène H_2 ou H_2 d'ici 2030

Source : AFHYPAC



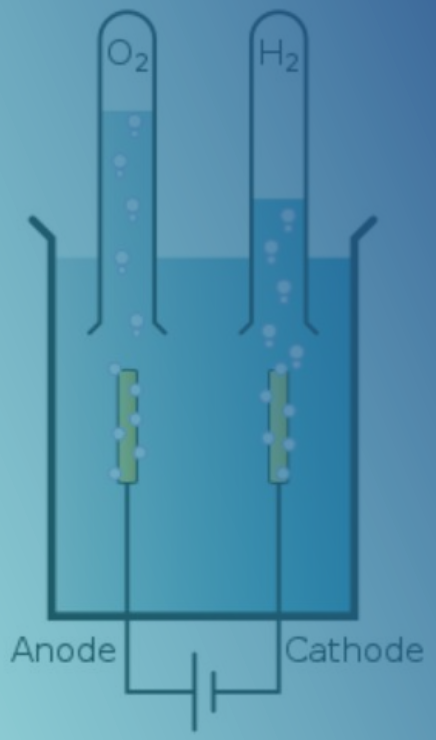
Systèmes et composants de la chaine de valeur hydrogène-énergie

FC LAB

Système électrolyseur

- Technologies
- Système électrolyseur PEM
- Positionnement du territoire local

Technologies d'électrolyseurs



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/Nm^3
  - Durée de vie importante : > 60 000 h
  - Cout
- Inconvénients
  - Risque de fuite d'électrolyte (corrosif)
  - Mal adapté à des productions électriques variables (photovoltaïque / éolien)
- Entreprises leaders

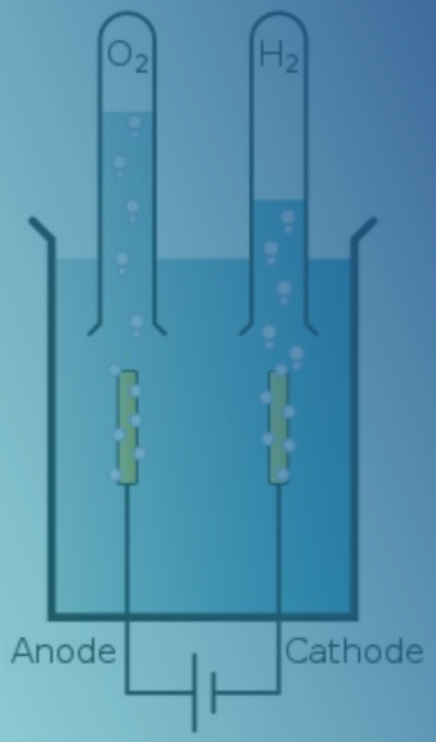
IHT (Suisse), ELT (Allemagne), Hydrogenics (Canada), Angstrom Advanced (USA), NEL Hydrogen (Danemark), McPhy Energy (France), Toshiba (Japon)…

Électrolyseur PEM

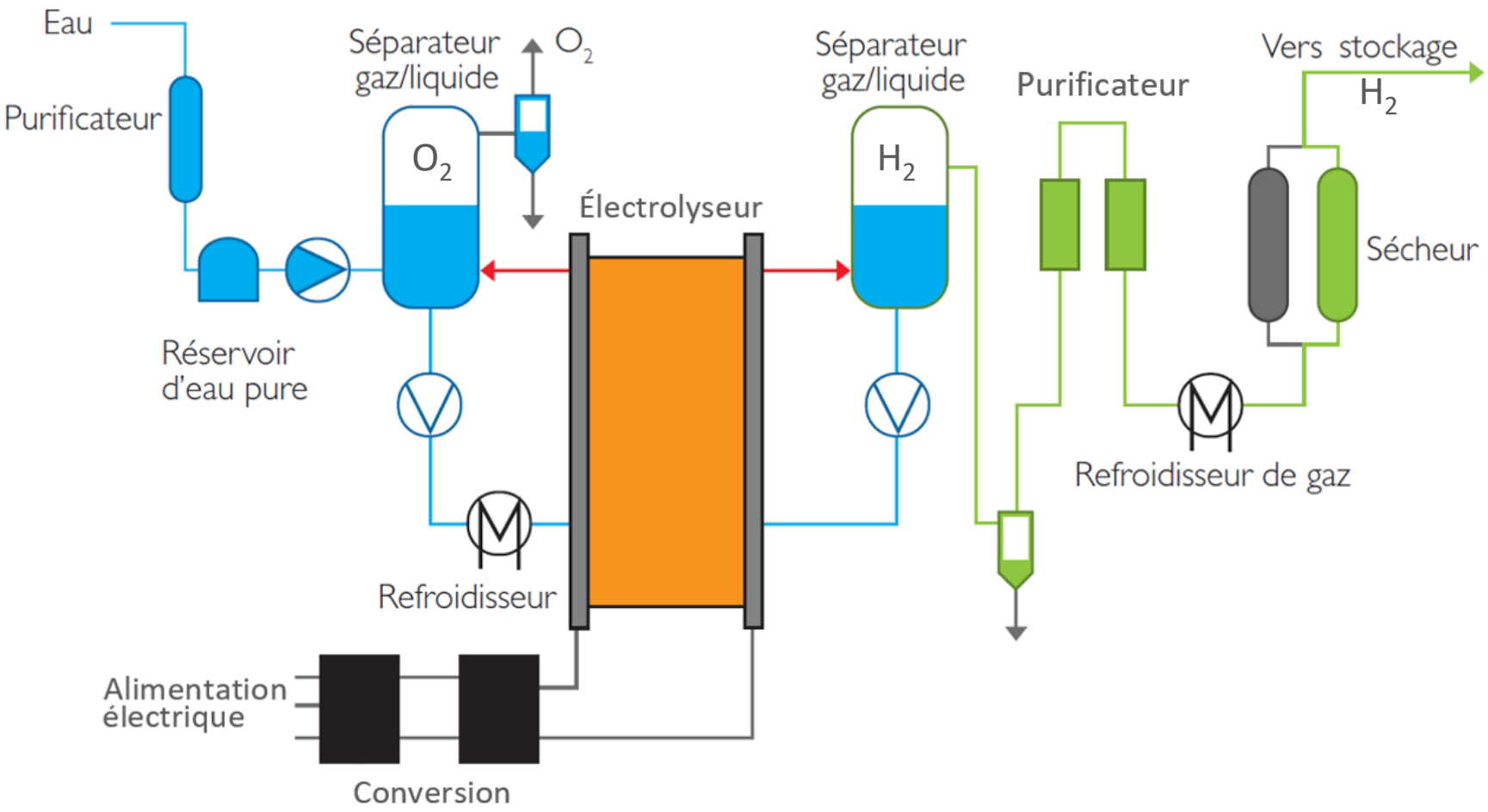
- Avantages
  - Compacité et simplicité de fonctionnement
  - Performances équivalentes à l'alcalin
  - Particulièrement adapté au couplage à une source d'énergie renouvelable intermittente
  - Fort potentiel de développement
  - Fonctionnement sous pression (90 bar max)
- Inconvénients
  - Coût (platine)
  - 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)…

Système électrolyseur PEM



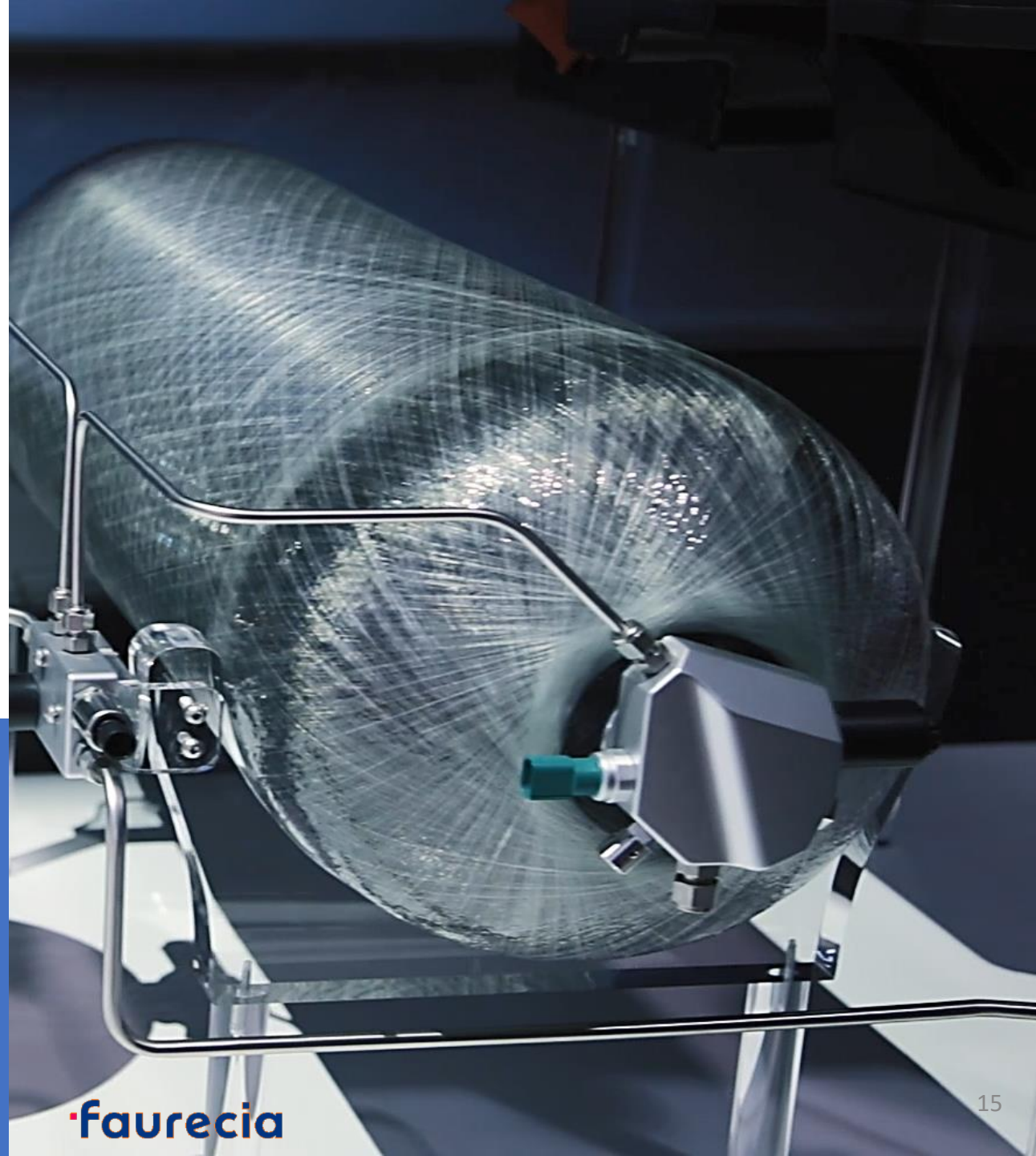
Système électrolyseur PEM



Source : ADEME

Stockage de l’hydrogène

- Les technologies



Technologies de stockage d'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 maitrisé
  - 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

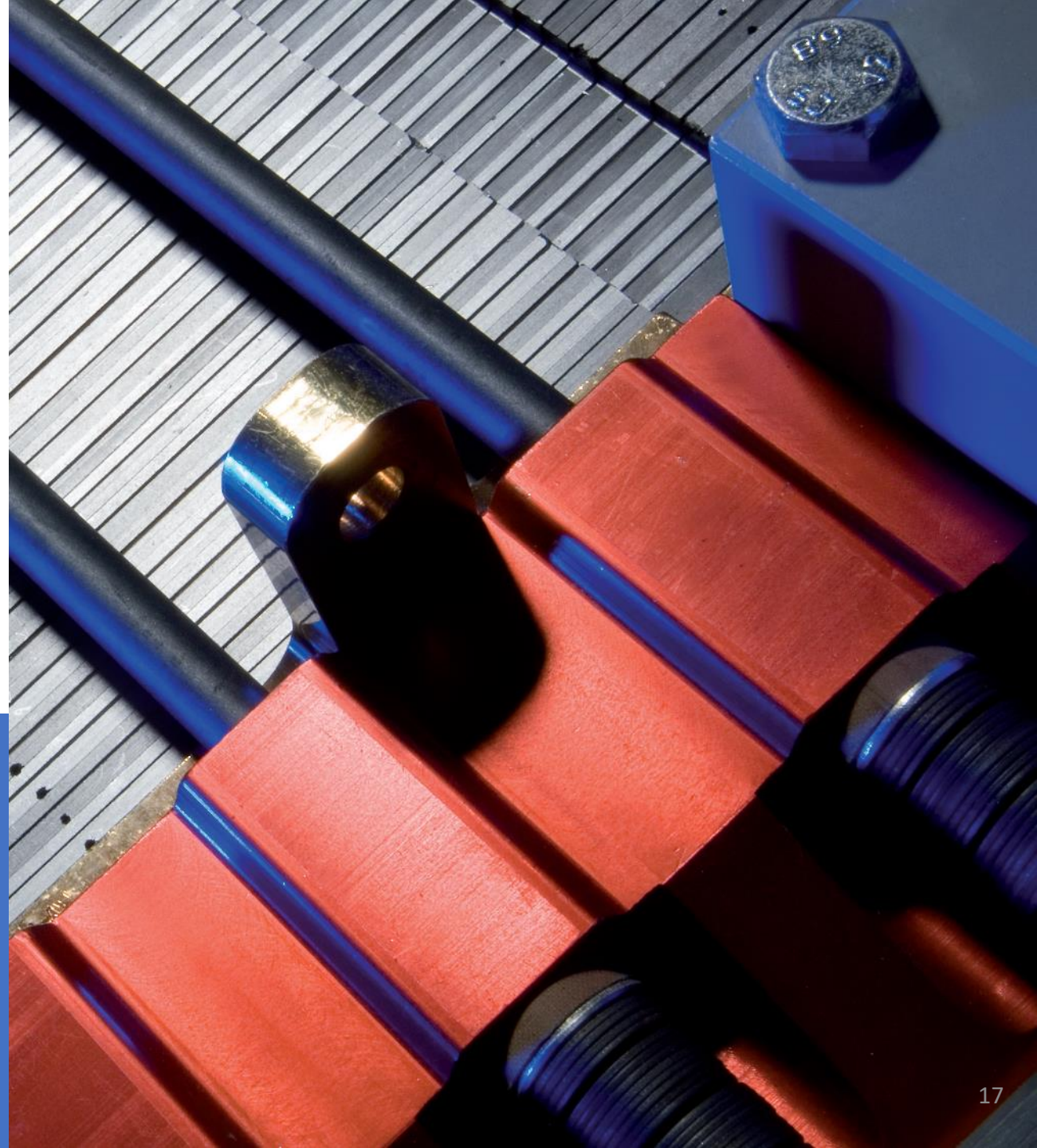
Cycle thermique lors de l'utilisation

- 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

*masse H2 stocké/masse réservoir

Système pile à combustible

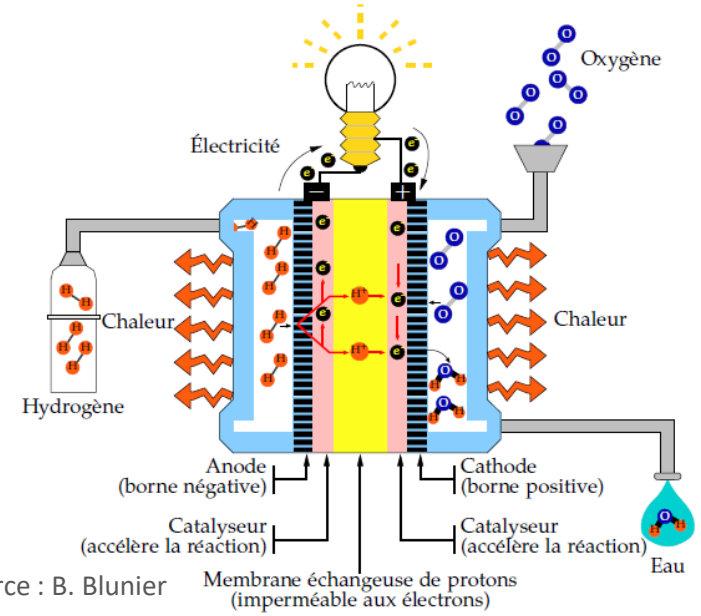
- Technologie PEMFC
- Constructeurs de pile PEMFC
- Système pile à combustible



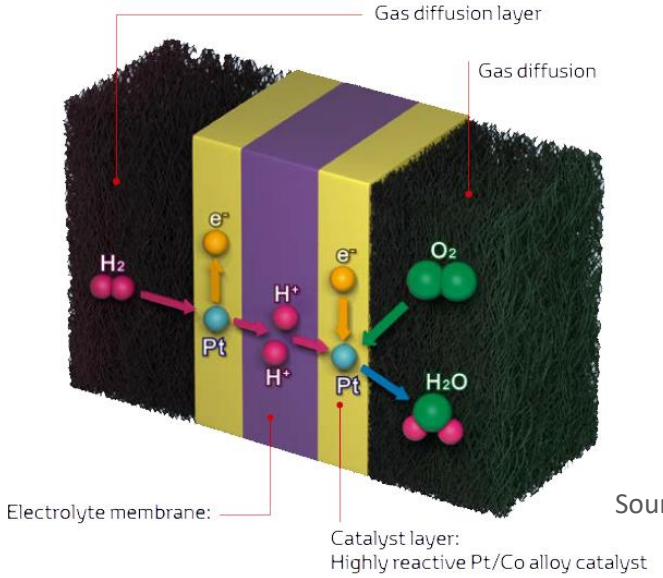
Pile à combustible PEMFC

Technologie la plus adaptée au transport et bâtiment

- **Principaux avantages**
  - Électrolyte solide : pas de risque de fuite
  - Plage de température faible : démarrage à froid rapide
  - Puissance massique élevée (> 3 kW/kg)
  - Densité de courant élevée (> 2,5 A/cm²)
- **Principaux inconvénients**
  - Utilisation de platine comme catalyseur
  - Hydratation de la membrane
  - Sensibilité au monoxyde de carbone (CO)
  - Durée de vie : objectif automobile – 5000 / 7000 h



Source : B. Blunier



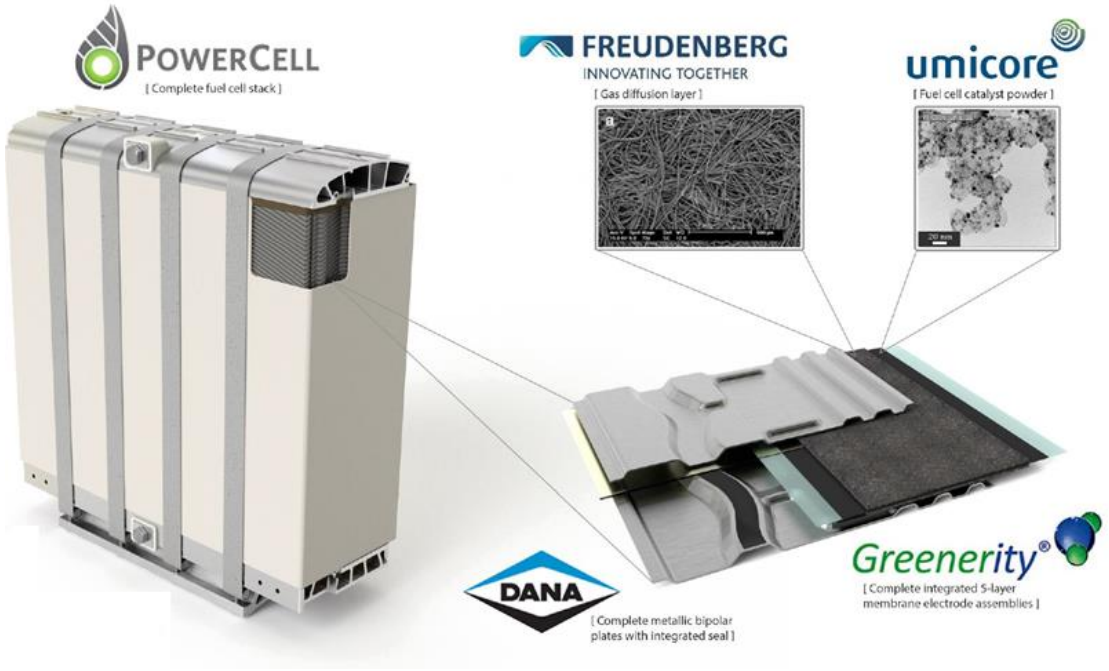
Source : Toyota

Fabricants de pile à combustible PEMFC

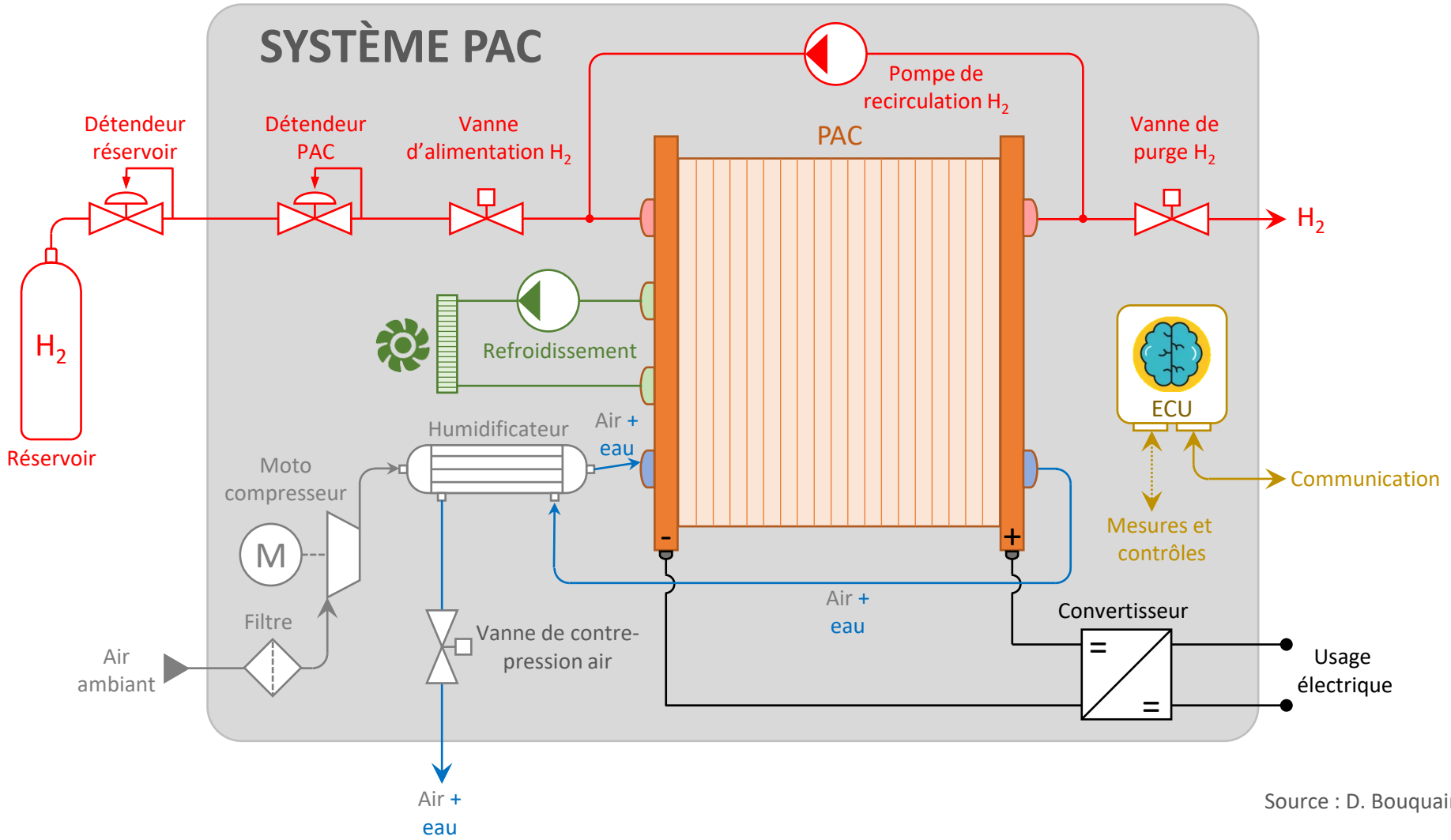
- **Principaux acteurs nationaux**
  - Symbio, Helion Hydrogen Power, Axane

- **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

- **Composant complexe qui nécessite des moyens, des compétences et des partenariats forts**



Système pile à combustible



Source : D. Bouquain

- **Composants à forte valeur ajoutée encore à « améliorer »**
  - PAC
  - Compresseur et la gestion de la boucle d'air
  - Convertisseur DC/DC

« Nouveaux » usages de l’hydrogène : quelques exemples

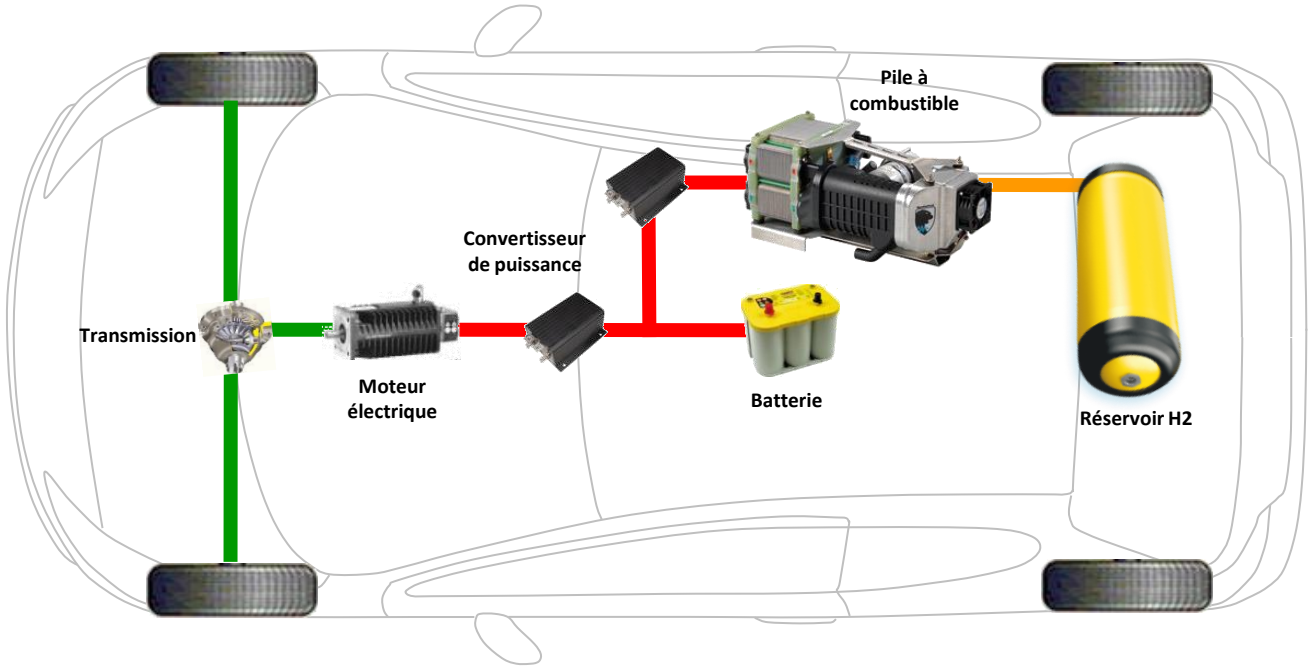
FC LAB

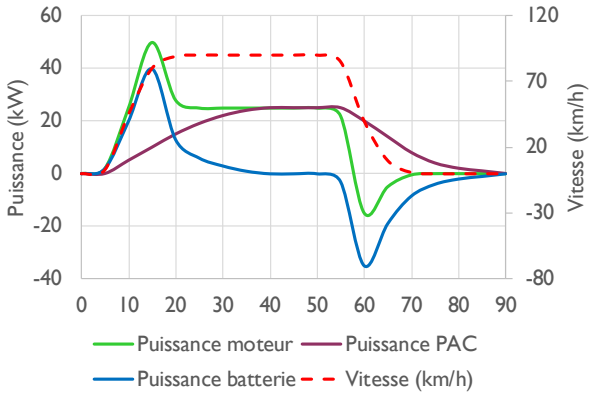
Le transport

- Transport terrestre
- Aéronautique

Architecture de base ➔ Système hybride

- La PAC a un temps de réponse « lent »
- La batterie fournit/absorbe les phases transitoires
- Éviter les fonctionnement à puissance nulle de la PAC (min 10% de charge)
- Gérer l'énergie des 2 réservoirs (H2 et batterie)





FC LAB

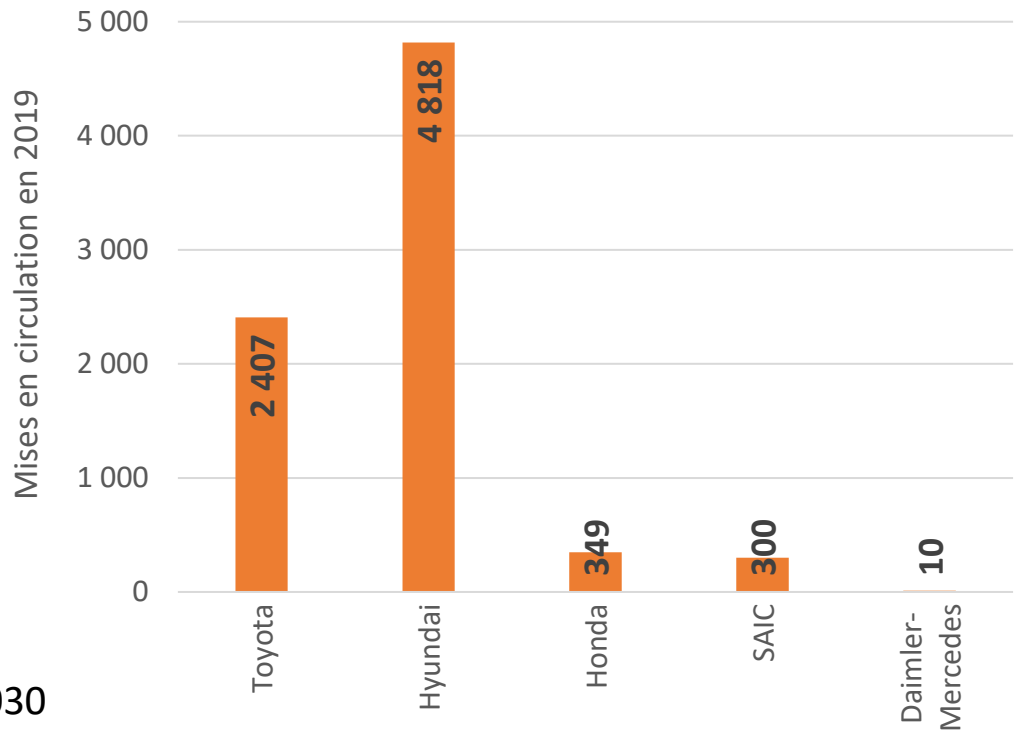
Transport terrestre

Automobile

- **19 000** voitures en circulation dans le monde
  - France : 340 véhicules
  - Monde : **+ 7900 en 2019**

- 5 constructeurs
  - Toyota
  - Hyundai
  - Honda
  - SAIC (Chine)
  - Daimler-Mercedes

- Feuille de route ambitieuse de Hyundai
  - 700 000 ventes de systèmes PAC d'ici 2030

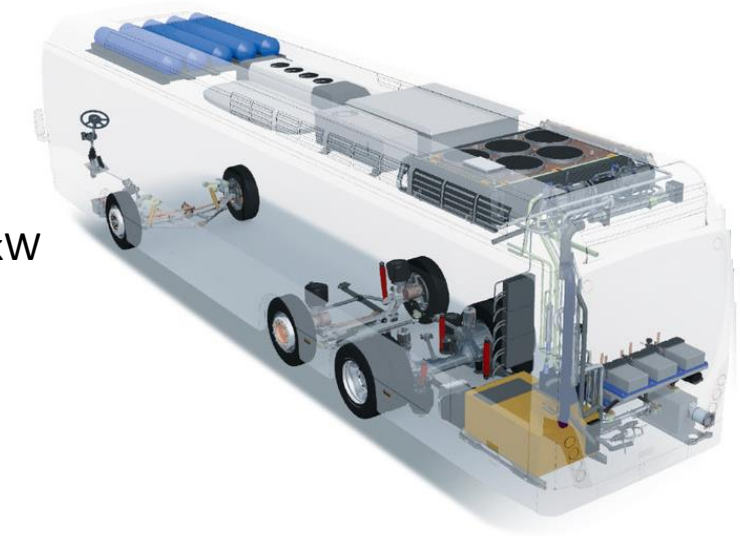


FC LAB

Transport terrestre

Bus urbains

- Systèmes à forte hybridation par batterie
  - Cycles urbains
  - « Grosse » batterie + groupe électrogène H2 de 30 à 70 kW

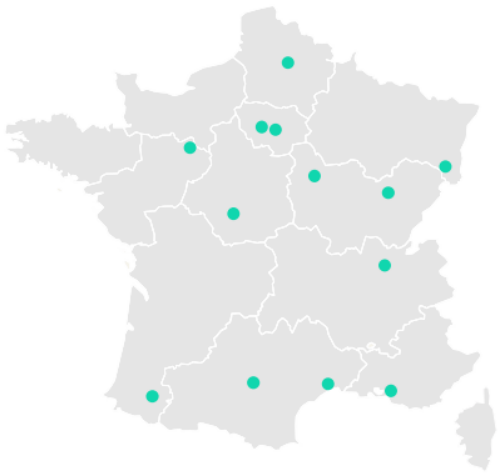


Source : VanHool

- +10 entreprises européennes
  - Marché en forte croissance et fort potentiel

Projets bus H2 fin 2019

Safra	Lens - Houdain	6	2019
VANHOOL	Versailles	2	2019
VANHOOL	Pau	8	2019
CaetanoBus SOLARIS	Grand Paris	2	2020
Safra	Le Mans	10 / 1	2019
	Marseille / Fos-su(Mer	3	2020
	Belfort Montbéliard	19 / 1	2020



2021	21	Dijon Métropole
2021	2	Lyon Métropole
2023	6 - 8	Toulouse
2023	21 - 51	Montpellier
2023	6	Châteauroux
-	5	Auxerre
-	3	Chaumont

2019 Date de1er déploiement — En circu-lation — En test — En projet — Safra Constructeur retenu — Projet lauréat de l'AAP ADEME Mobilité H_2

Source : EnergyLab, La Filière Hydrogène-énergie En France

Transport terrestre

Camions : 3,5 – 40 tonnes

- Fortes contraintes en puissance et stockage
  - Moteur : 250 à 750 kW
  - Consommations H2 : 7,5 à 16 kg H2/100 km (voiture : 1 kg H2/100 km)

- Plusieurs constructeurs positionnés dont Hyundai
  - Constructeur le plus avancé – modèle Xcient
    - Puissance 260 – 380 kW
    - PAC 2 x 95 kW
    - 32 kg H2 → 400 km
  - Partenariat avec la Suisse
    - 1600 véhicules d'ici 2025
    - 10 premiers véhicules livrés

FC LAB

Transport terrestre

Ferroviaire

- Décarbonation des réseaux non électrifiés
  - Transports régionaux
  - Fret + manœuvres

- Alstom
  - Leader trains régionaux → 2 Coradia ILint H2 en exploitation pendant 2 ans
  - Plusieurs commandes et partenariats conséquents

- Fret
  - Plan national proposé par l'Alliance 4F
  - H2 → un des axes majeurs
  - Fret longue distance

FC LAB

Engins spéciaux … un fort potentiel

- Chariots de manutention H2
  - 30 000 aux USA, 500 en Europe, qq centaines en Asie
  - Produit industriel

- Mobilité légère urbaine
  - Mobypost
  - Balayeuses …

- Engins de service
  - Collecte d’ordures ménagères

- Manutention lourde

- Engins de chantier …

➔ Besoin de Powerpack H2

FC LAB

Aéronautique

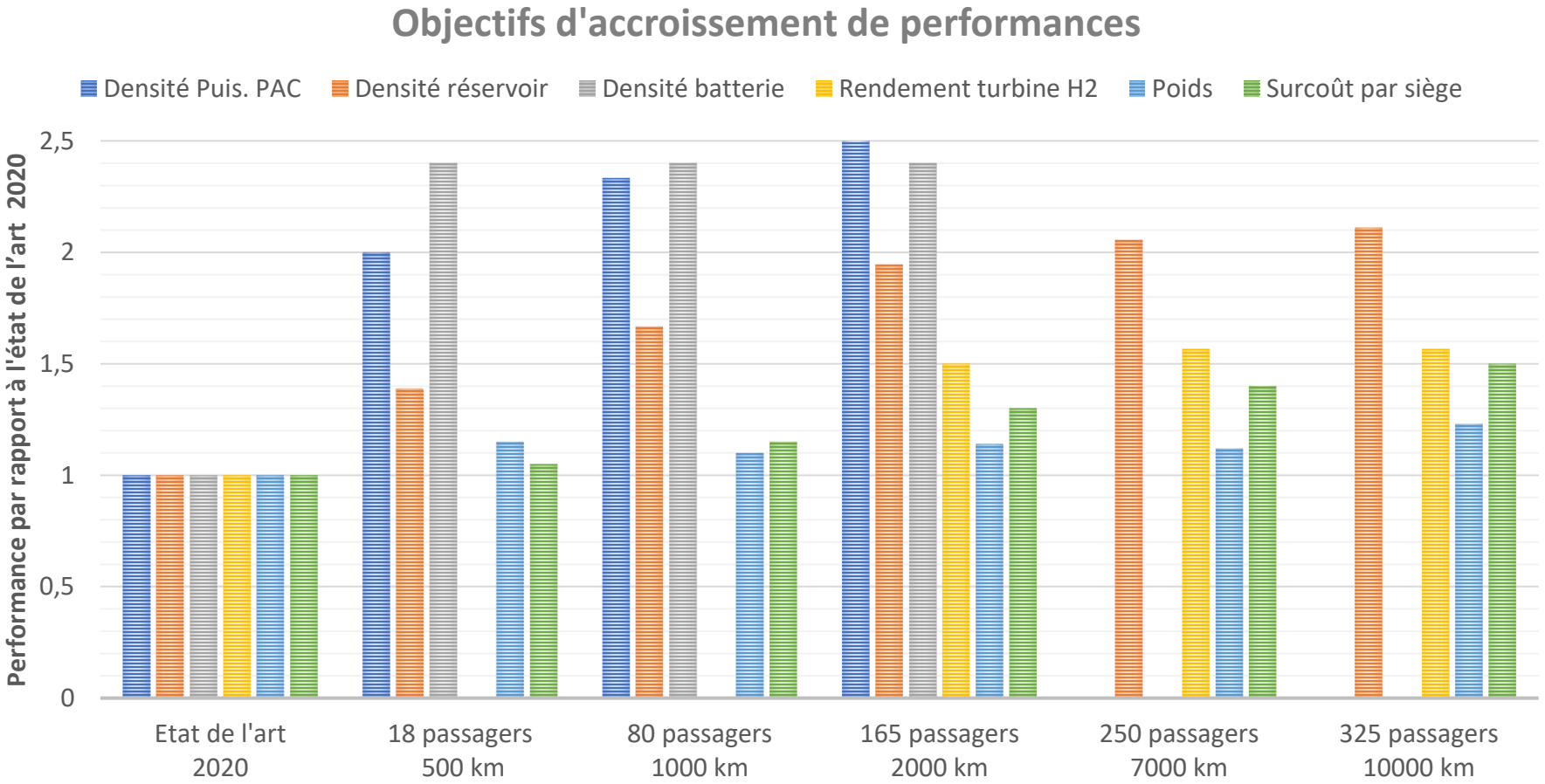
De fortes contraintes technologiques

Quelques démonstrateurs de faible puissance

- Problématiques de densité de puissance et de stockage des systèmes

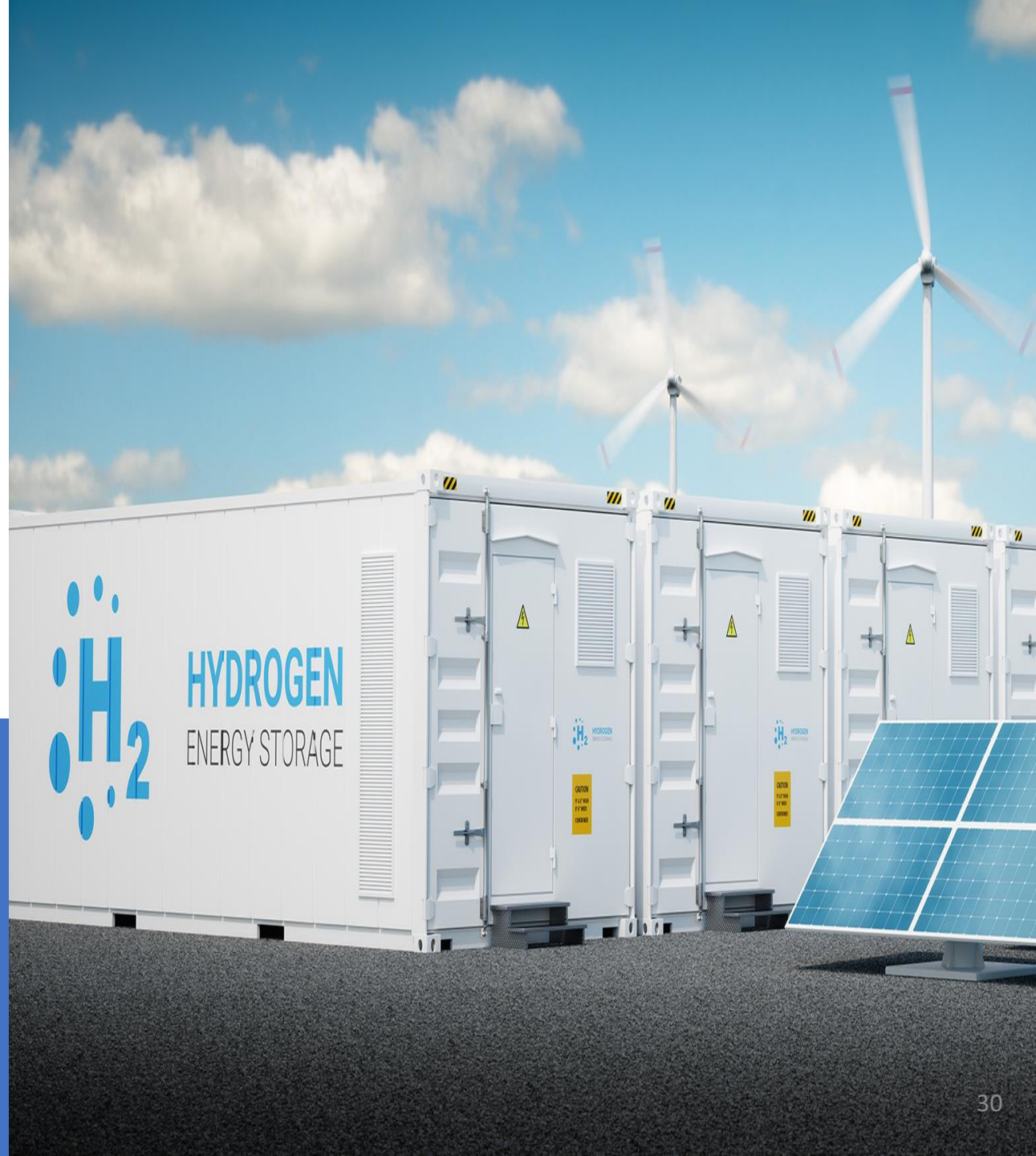
➔ Développer localement en premier lieu l'aviation « légère »

Source : Avions Mauboussin



Systèmes stationnaires

- Stockage des ENR intermittentes
- Turbines à gas H_2
- Micro-réseaux électriques



Intermittence des énergies renouvelables

- **Modification du mix de production électrique**
  - ↗ sources de productions intermittentes
  - ↘ parc nucléaire

  → Nécessité de pouvoir lisser la production par du stockage d'énergie

- **H2**
  - Maximisation du potentiel des ENR
  - Stockage saisonnier ou à court terme
  - Complément aux STEP et batteries
  - Usages de l'H2 produit également pour d'autres besoins

Conversion des turbines à gaz à l'hydrogène

- **Les turbines à gaz modernes peuvent fonctionner avec plusieurs carburants**

- **Plusieurs essais concluants**
  - 30% H2 + 70% gas nat. ➔ réduction de 10% du CO_2 et maintien des NO_X
  - 1995 : GE a démontré la capacité de ses turbines à fonctionner jusqu'à 90% d'H_2

  → Des travaux de R&D encore à mener : températures de flamme, cycles d'allumage, réduction des NO_X …

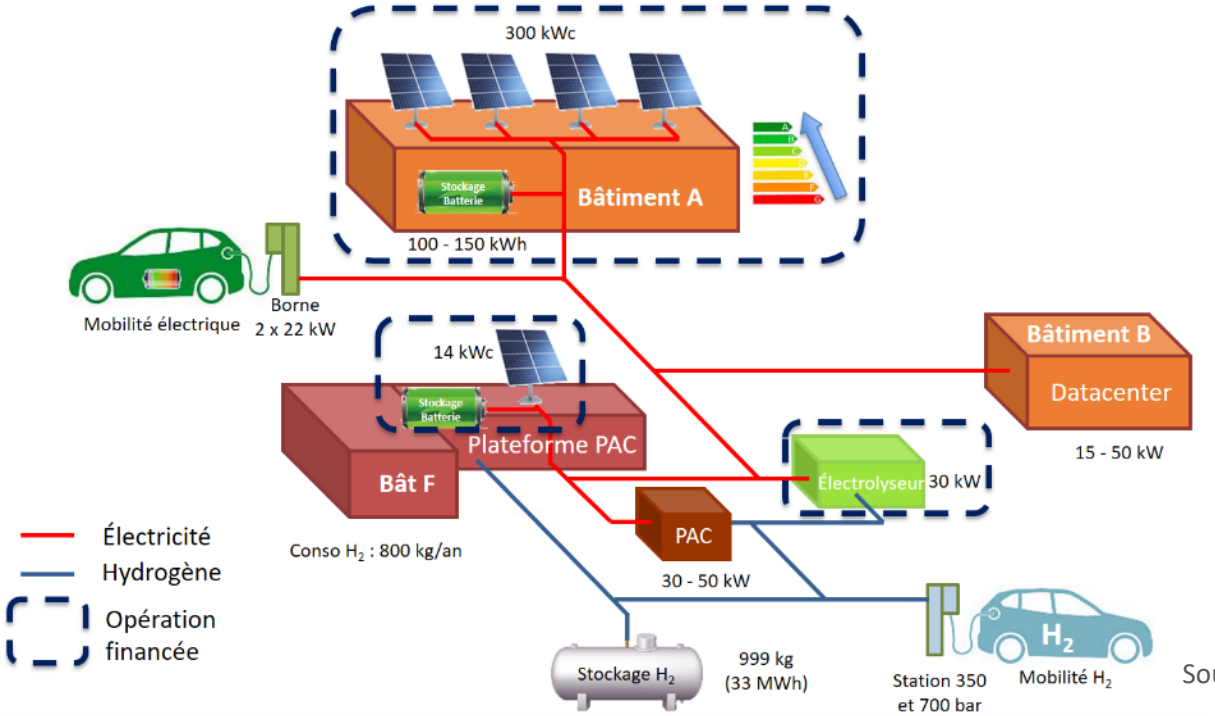
- **Marché du neuf en déclin mais potentiel important de rétrofit**

  ➔ **parc de plus de 600 turbines Alstom et GE en Europe !**

Réseaux électriques allant du quartier à la ville

- **Constituants**
  - Sources d'énergies dont ENR
  - Systèmes de stockages : batterie, H2 …
  - Consommateurs de diverses nature : logements, tertiaire, industries …
  - Gestion de l'énergie → minimiser l'impact sur le réseau et réduire les GES

- **Exemple de proposition de démonstrateur à échelle 1 → campus UTBM de Belfort (TI)**



Source : D. Bouquain

Conclusion

- Une dynamique inédite depuis quelques mois
  - Engouement des politiques → plans à grande ambition
  - Premières solutions industrielles
- Vecteur H2 : une partie des solutions aux problématiques environnementales
  - Objectif d'une production (quasi) décarbonée
  - Centralisation ou décentralisation de la production et du stockage
  - Stockage en quantité sur de longues périodes
  - Indépendance énergétique
- Des problématiques technologiques encore à lever
  - Cout des équipements et matériaux
  - Durée de vie des PEMFC
  - Organisation de la filière

FC LAB

www.fclab.org

cnrs utbm UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ ensmm École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques UBFC UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ