





Ordre du jour



Présentation PVF

-  Remplacer l'H₂ dans le système énergétique
-  Production, stockage et ré-électrification
-  Les applications autour de l'hydrogène (mobilité et autres)
-  La chaîne de valeur et briques technologiques





Missions



Pôle Véhicule du Futur®
Solutions pour véhicules & mobilités du futur

Stimuler **l'innovation**
par des projets collaboratifs de
R&D et les accompagner vers
les marchés

Améliorer la **performance**
des entreprises de la filière auto



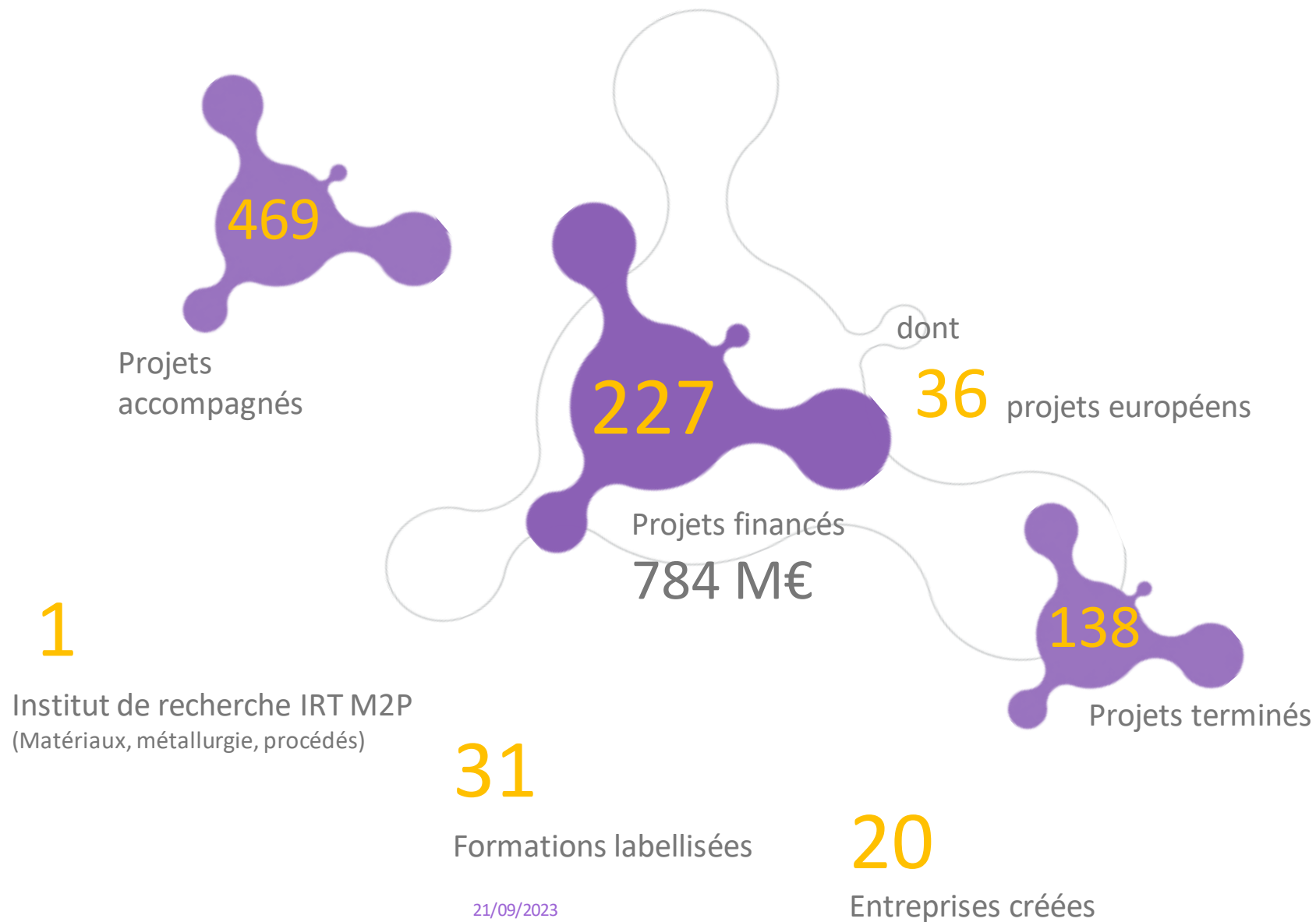
Accompagner la **croissance**
des entreprises

22,5 personnes à votre service
Association créée en 2005





L'innovation en chiffres





Les programmes hydrogène régionaux

Développement d'une f*l*ière i*Ndustrielle et son Ani*M*ation : Hydrogène et sa Structurati*o*n En Grand Est*

Développer une filière industrielle en Grand Est

-  CA industriels locaux.
-  Création d'emplois.

Mettre en œuvre l'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique

-  Hydrogène décarboné.
-  Mobilisation d'aides pour investissements.

Développement d'une Filière Hydrogène en Bourgogne-Franche-Comté

Développer la filière hydrogène en BFC

-  Favoriser les projets d'innovation d'industriels
-  Activités d'animation collective du PVF & du Club H2 BFC

Les objectifs

-  Contribuer à la stratégie régionale, sa connexion avec les initiatives nationales
-  Favoriser l'émergence de projets (R&D, déploiements)
-  Accompagnement des acteurs
-  Animation de l'écosystème

Les clubs hydrogènes régionaux

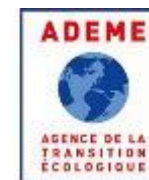


DINAMHySE
Filière Hydrogène Grand Est

Club H₂
BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ



Financé dans le cadre de l'appel à projets
« Be Est Filières d'Avenir » du Grand Plan d'Investissement



Ressources du projet



Jacques HAENN
Animateur du projet
Arrivée : mars 2019



Nicolas QUEROMES
Ingénieur d'étude
Arrivée : novembre 2019

Missions :

- Animer l'écosystème hydrogène régional
- Mobiliser des groupes de travail
- Diffuser l'information et favoriser les échanges

Missions :

- Répondre à vos questions et préoccupations concernant l'hydrogène
- Vous accompagner dans le développement de vos projets
- Communication et sensibilisation



Bertrand BOIVERT
Animateur du projet
Arrivée : février 2023



Nicolas QUEROMES
Ingénieur d'étude
Arrivée : novembre 2019



Le Club H2 BFC

- 🚀 75 membres au 09/05/2023
- 🚀 Tout nouvel adhérent fait l'objet d'un **accord du Cotech**
- 🚀 Les **derniers adhérents** depuis janvier 2023

- 🚀 ARHYZE
- 🚀 AVIONEO
- 🚀 ALPINE RACING
- 🚀 DANIELSON ENGINEERING
- 🚀 AERIS GreenTec
- 🚀 5Discovery
- 🚀 ATAWAY
- 🚀 F2J JAPY
- 🚀 INTHY

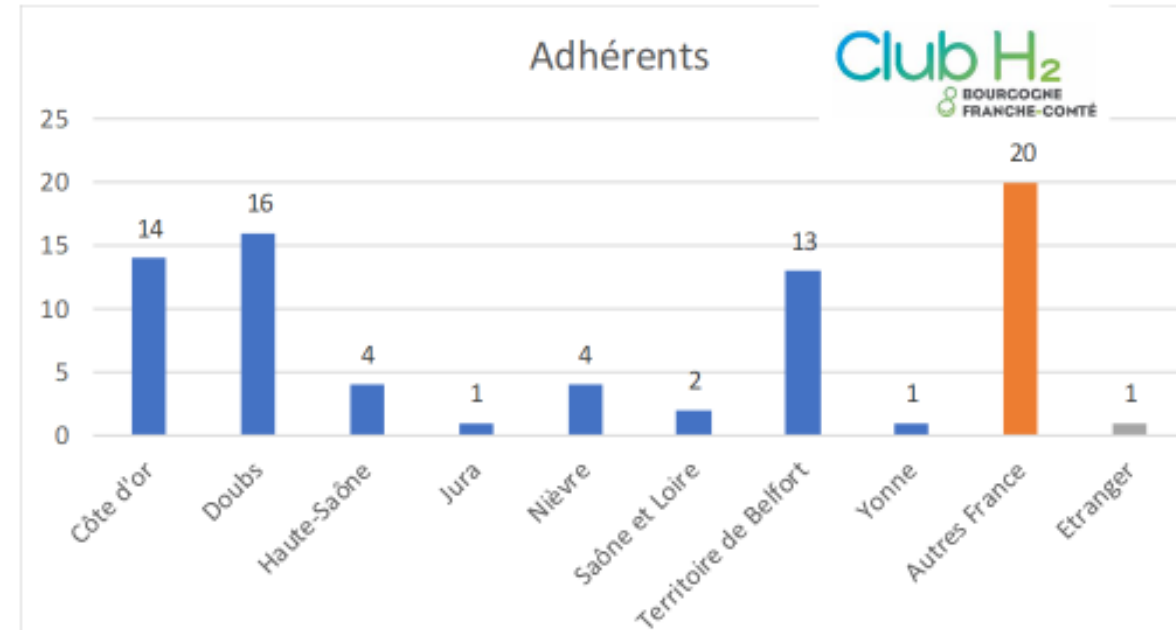
Club H₂
BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ



🚀 + 3 à 4 potentiels dans les semaines à venir (RH2, SON, INOCEL...)



Le Club H2 BFC au 09/05/2023



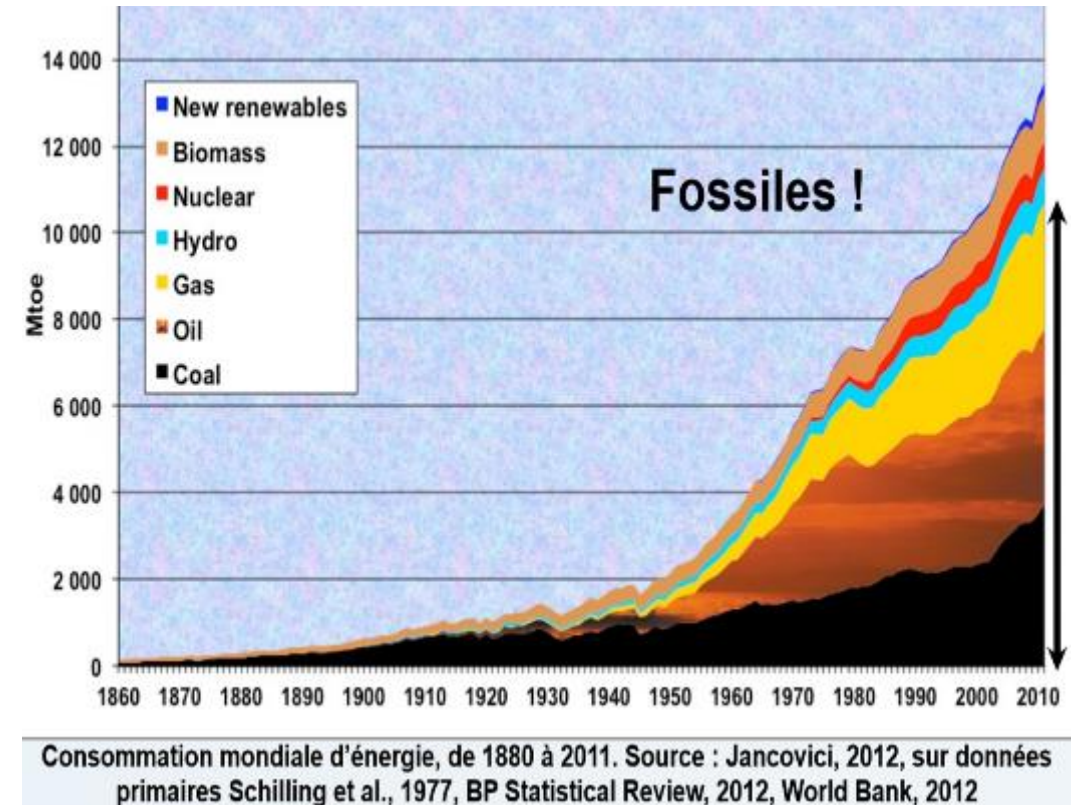
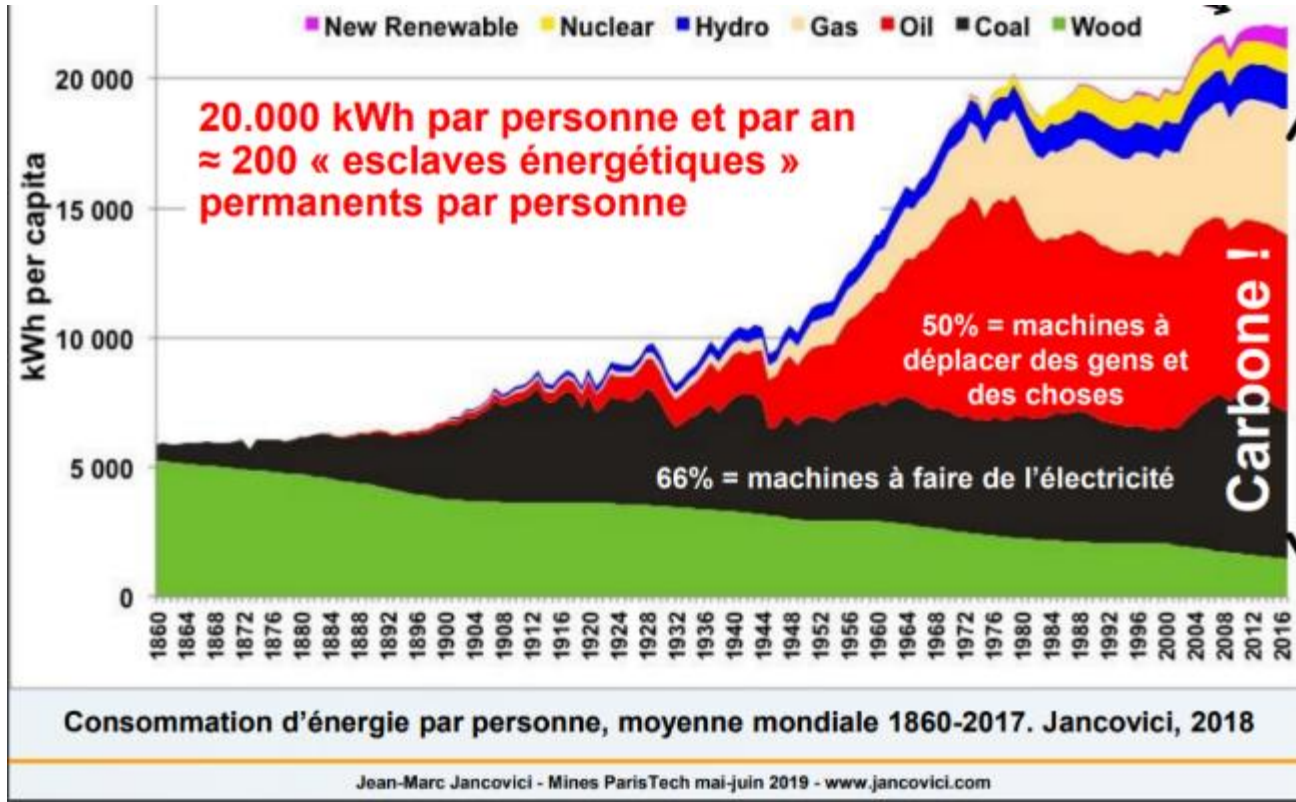
A purple, glossy oval shape with a gradient, positioned to the left of the title.

Ordre du jour

- 🔗 Présentation PVF
- 🔗 Replacer l' H_2 dans le système énergétique
- 🔗 Production, stockage et ré-électrification
- 🔗 Les applications autour de l'hydrogène (mobilité et autres)
- 🔗 La chaîne de valeur et briques technologiques



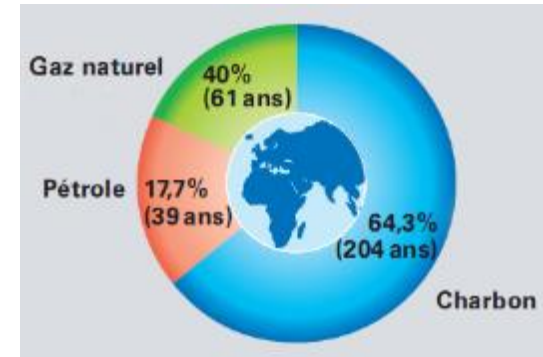
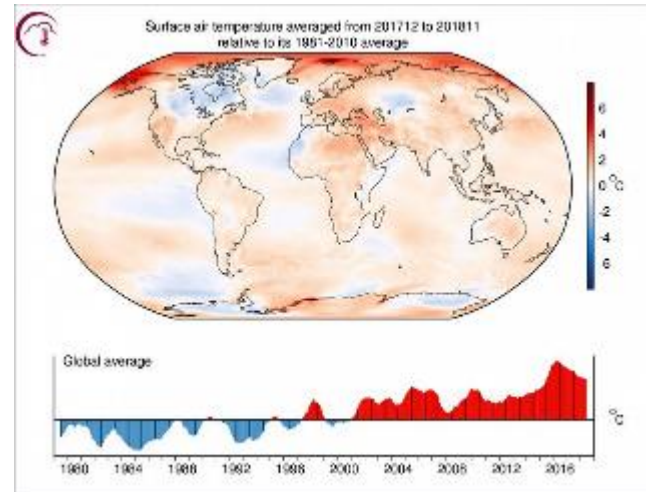
L'énergie dans le monde



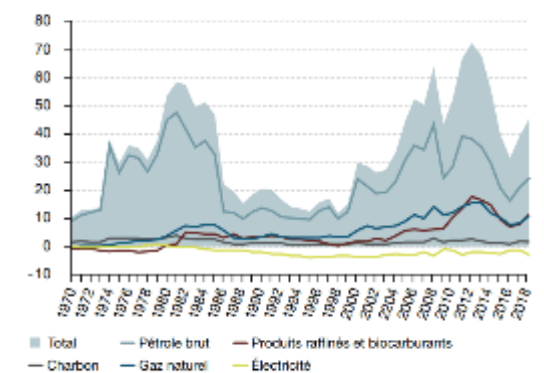
x 4 consommation kWh par personne en 150 ans
x 30 consommation globale en kWh

Problématiques mondiales liées à l'énergie

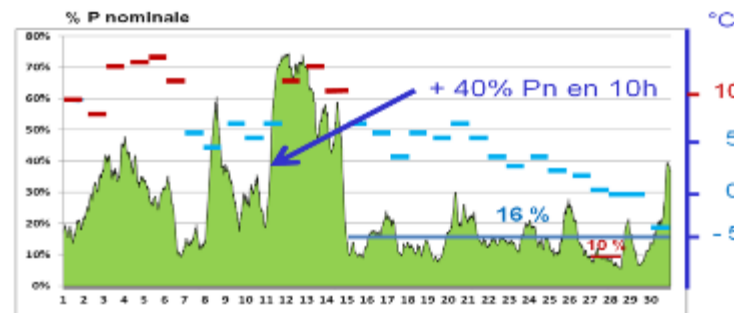
- Pollution de l'air
- Réchauffement climatique
- Etat des réserves de fossiles
- Géopolitique des ressources (et prix)
- Problématique de l'intermittence des EnRs



Graphique 2 : facture énergétique de la France
En milliards d'euros 2018



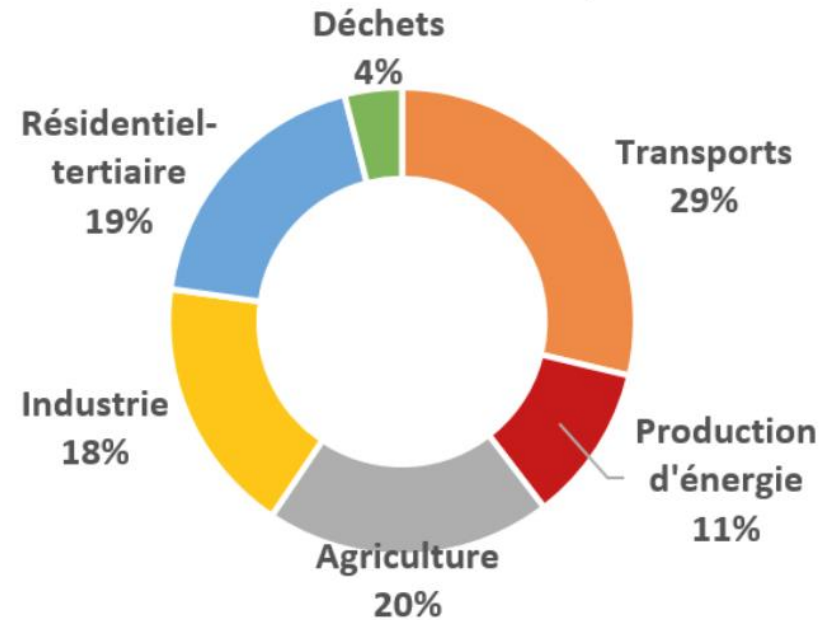
Source : calculs SDES, d'après DGDDI - CRE, enquête auprès des raffineries



- Evolution de la puissance Éolienne en France en novembre 2010 (courbe et échelle de gauche) et de la température moyenne (échelle de droite, en traits rouges journées chaudes et en traits bleus les journées froides)

Bilan carbone de la France

Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre en 2016, en MtCO₂eq



Source : Ministère de la transition écologique et solidaire

A purple, three-dimensional oval shape with a gradient and a shadow.

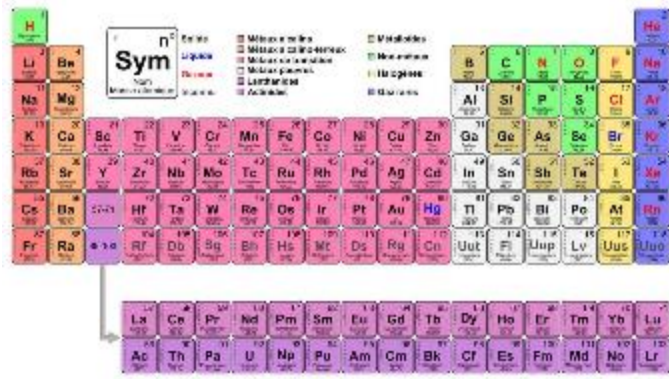
Ordre du jour

- 🔗 Présentation PVF
- 🔗 Replacer l' H_2 dans le système énergétique
- 🔗 Production, stockage et ré-électrification
- 🔗 Les applications autour de l'hydrogène (mobilité et autres)
- 🔗 La chaîne de valeur et briques technologiques





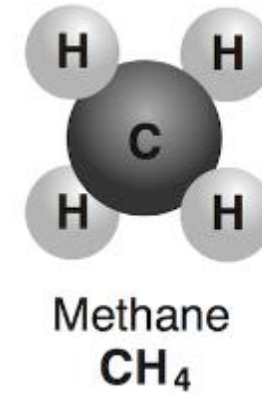
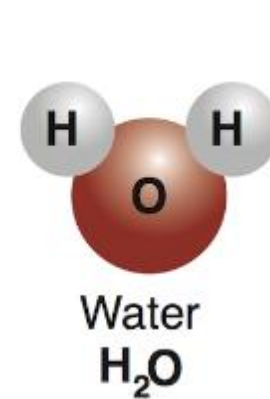
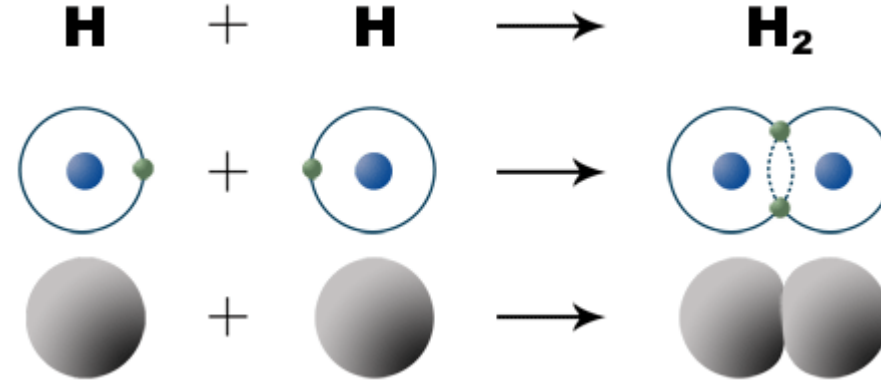
L'hydrogène: la physique



Le plus petit élément

92% des atomes de l'univers

75% de la masse connue



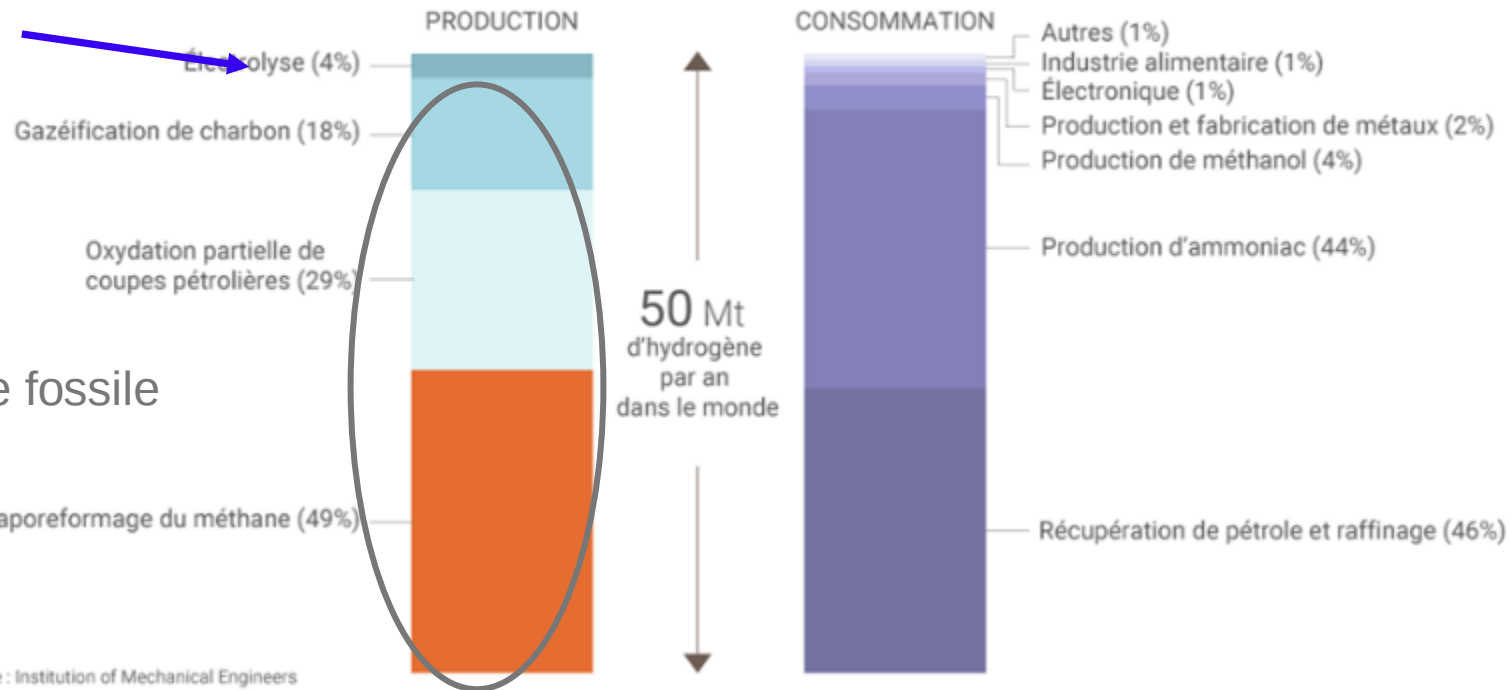
Sur terre le dihydrogène n'est presque pas disponible à l'état naturel. Il est produit par la séparation d'éléments chimiques dont l'atome H est un composant, ce qui coûte de l'énergie



Production et consommation d'hydrogène aujourd'hui

60 millions de tonnes produites en 2019

Hydrogène Production et consommation dans le monde



Gaz de ville
H₂, CO, CO₂

Usage ancien dans l'industrie, méthode de production ancienne
9 million de tonnes en Europe dont 10 % en France

Production d'hydrogène à partir de combustible fossile



Charbon

Hydrocarbure lourd

Gaz naturel

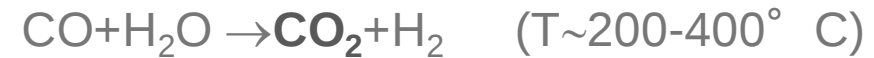
POX: Oxygène pur, ATR: Oxygène pur + eau



Réaction avec la vapeur d'eau



Gaz de synthèse (CO, CO₂, CH₄, H₂O, H₂)



Réaction du gaz à l'eau

Epuration

H₂ pur



Bergen-op-Zoom

- H₂/CO production plant (1999)
- With a Steam Methane Reformer
- Capacity of 32,000 m³/h of H₂ and 8,000 m³/h of CO

De 9 à 16 kg de CO₂ par kilo d'H₂, possibilité de captage



Pourquoi envisager l'hydrogène comme vecteur énergétique propre ?



Alors que 96 % de l'hydrogène provient de ressources fossiles

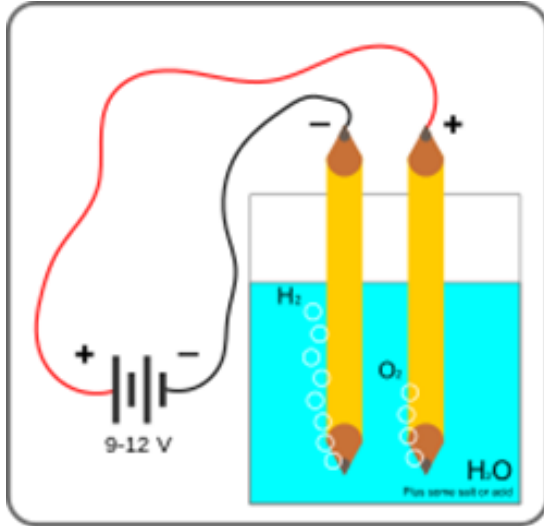
- On peut produire l'hydrogène de manière renouvelable
- Via l'électrolyse de l'eau
 - A partir de la biomasse
 - Par d'autres techniques





Modes de production décarbonés

Electrolyse de l'eau



L'atome d'hydrogène provient de l'eau

$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ avec une enthalpie de dissociation de l'eau : $\Delta H = 285 \text{ kJ/mole}$.

On apporte l'énergie nécessaire à la dissociation sous forme d'électricité (Courant continu).

--> **renouvelable si l'électricité est renouvelable**

Nécessite un milieu conducteur ionique appelé électrolyte

Suivant les électrolytes 3 types d'électrolyses différentes: 2 basse températures (50-90°C):

- l'électrolyse alcaline, la plus ancienne (industrialisée en 1950) électrolyte est une solution de potasse circulante
- l'électrolyse PEM, où l'électrolyte est une membrane polymère acide échangeuse de protons

L'électrolyse haute température (600-1000°C) électrolyse de la vapeur d'eau grâce à des céramiques conductrices des ions oxygènes (O_2^-)



Différentes techniques d'électrolyse de l'eau



Alcalin

Electrolyte: solution de potasse liquide (KOH)

Avantages

Technologie ancienne et très mature

Longue durée de vie des stacks 80 000 h

Grande capacité de production

Catalyseur moins noble

Inconvénients

Faible densité de courant (0,2- 0,4 A/cm²)

Faible flexibilité et réactivité

Electrolyte liquide

Fonctionnement sous pression moins aisé

PEM

Electrolyte: Membrane polymère échangeuse de proton (PEM)

Avantages

Densité de courant élevée (2 A/cm²)

Flexibilité et réactivité élevée

Fonctionnement sous pression aisé

Electrolyte solide

Inconvénients

Moins bonne durée de vie des stack (40 000 h)

Catalyseur métaux noble (Pt, Ir)

Electrolyse de l'eau

SOEC

Electrolyte: Céramique conductrice des ions O²⁻

Avantages

Rendement élevé (électrolyse vapeur)

Catalyseur non noble

Possibilité de réversibilité (Pile /électrolyseur)

Inconvénients

Faible REX et durée de vie

Très peu flexible

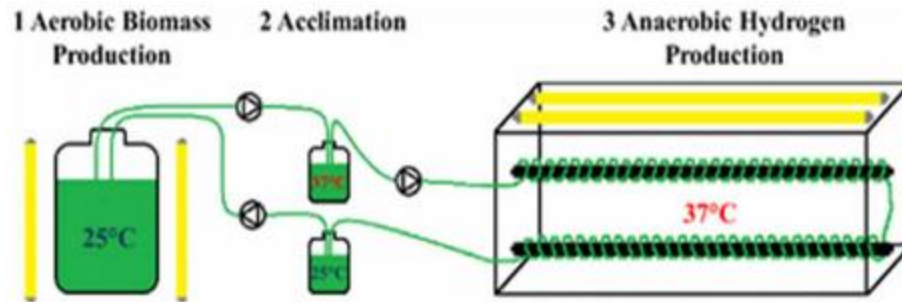
Problème arrêt démarrage

Procédé HT (600-1000° C)
Nécessite chaleur fatale

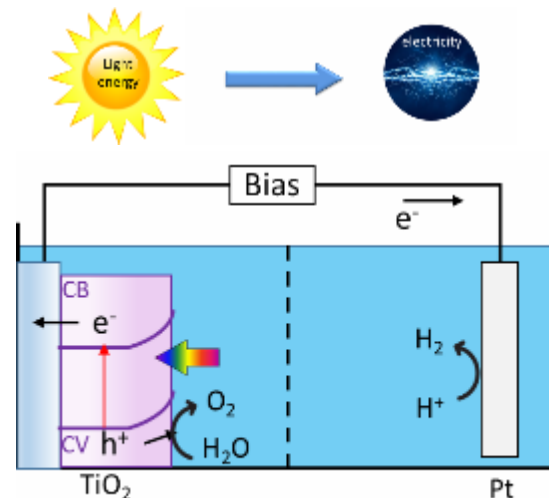
Electrolyse de la vapeur

L'hydrogène - production

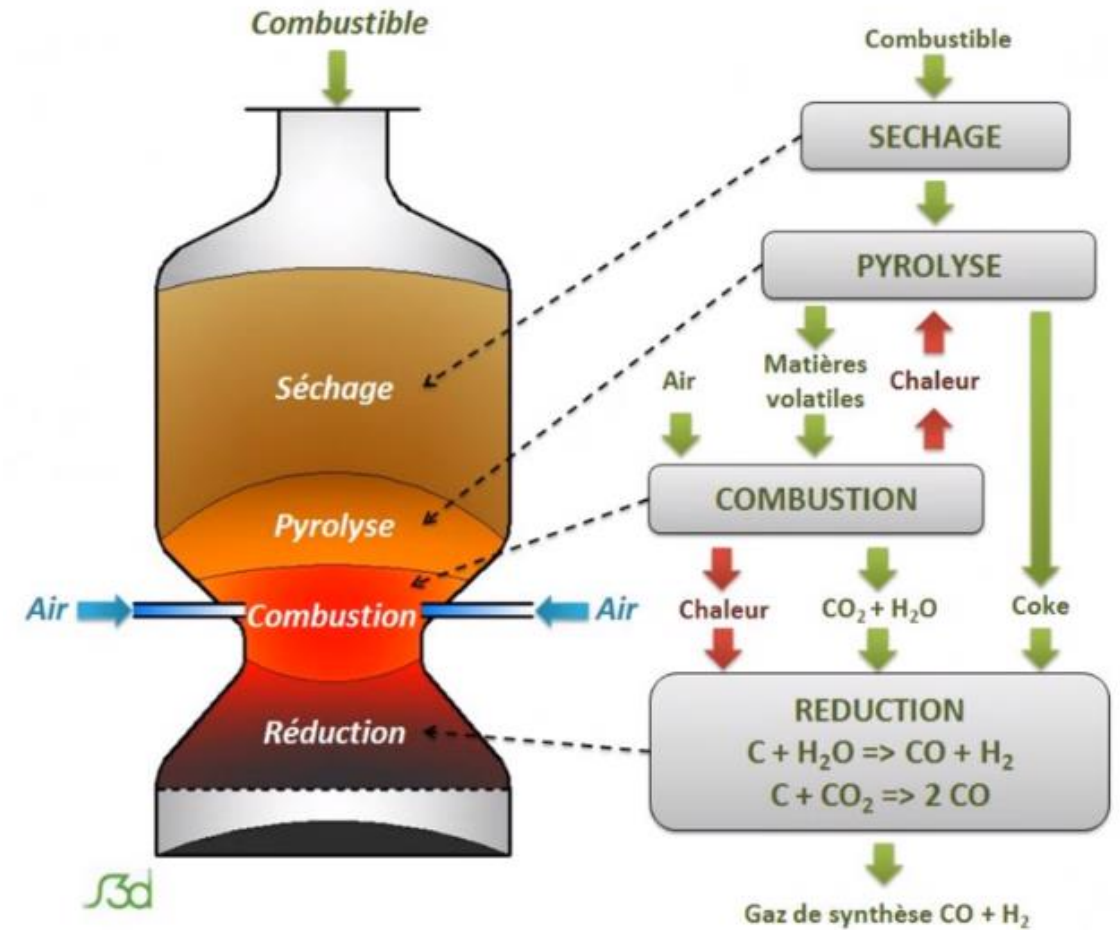
Production biologique d'hydrogène



Production par photocatalyse



Pyrogazéification

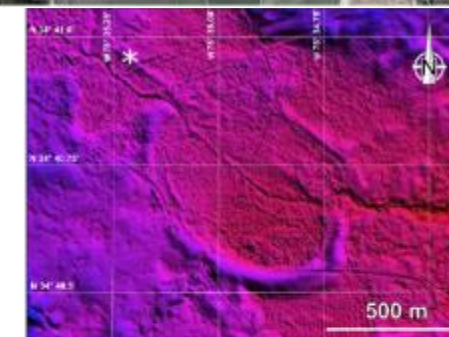
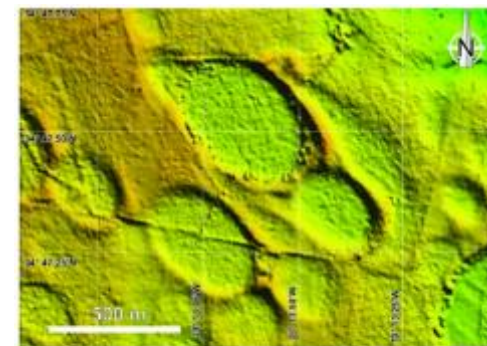




L'hydrogène - natif



- ★ Puits producteur (Mali)
98% H₂ - Altération de minéraux ferreux ?
- ▲ Fuite en surface - Cercles de fées - Carolina Bays, région de Moscou (origine inconnue)
- Granites - Ilimaussaq, Strange Lake, Kola Peninsula (inclusions fluides)
- Ophiolites - Oman, Philippines, Chypre, Nouvelle Calédonie
- Dorsales médio-océaniques (Rainbow, Loky Castel, Lost City)



H2 naturel en BFC



Saint-Parize-le-Chatel
Sondage Hélium + H2

Avant Monts Franc-Comtois
Sondage Hélium + H2

© Conseil régional de Bourgogne

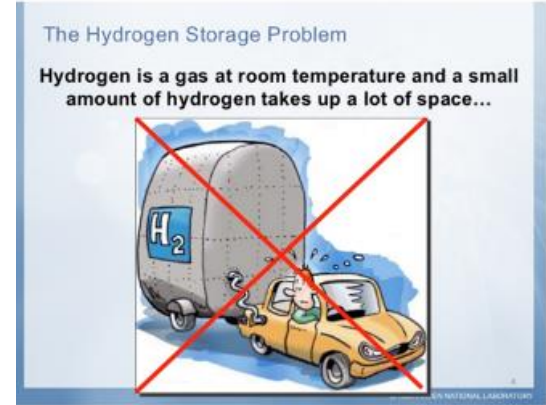


Stockage de l'hydrogène



Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène a une densité très faible à Température et pression ambiante (89 g/m³)
 Avec une voiture à hydrogène on considère une consommation de 1 kg/100 km
 Pour faire 500 km, il faudrait 56 000 litres
 → Pas de sens de le stocker à T et P ambiante, il faut réduire le volume occupé



Compression 200 bar



Hydrures



Liquéfaction

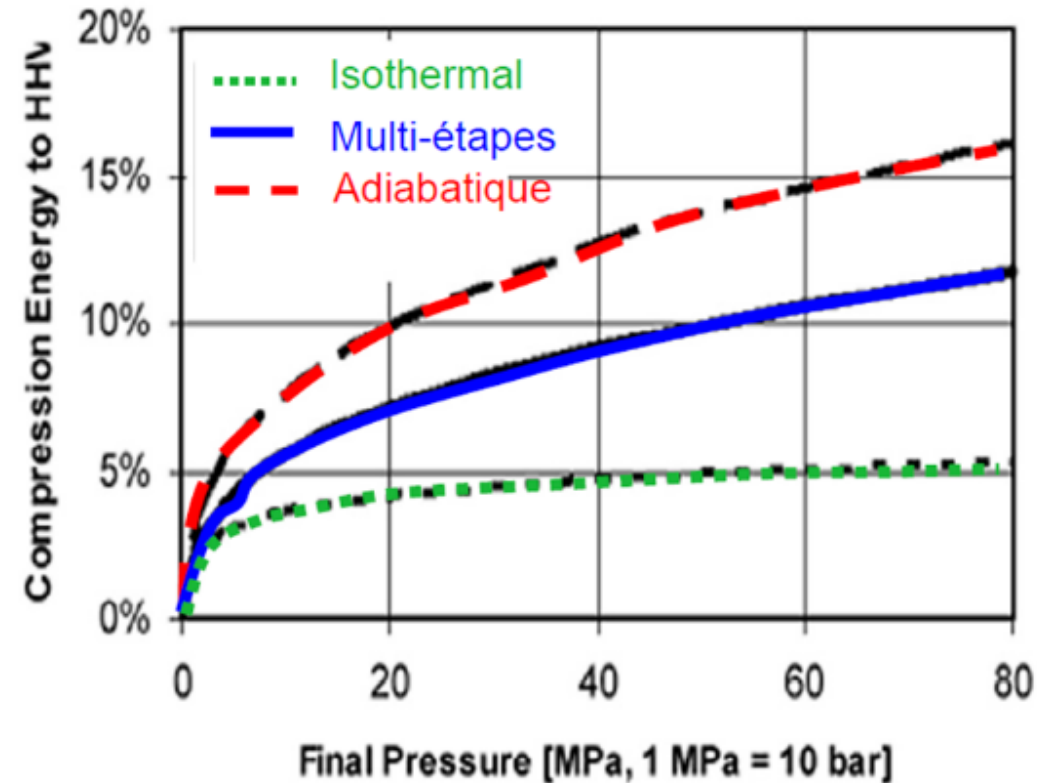


Compression 700 bar



La liquéfaction consomme de 30 à 100 % d'énergie contenue dans hydrogène

Stockage de l'hydrogène: la compression



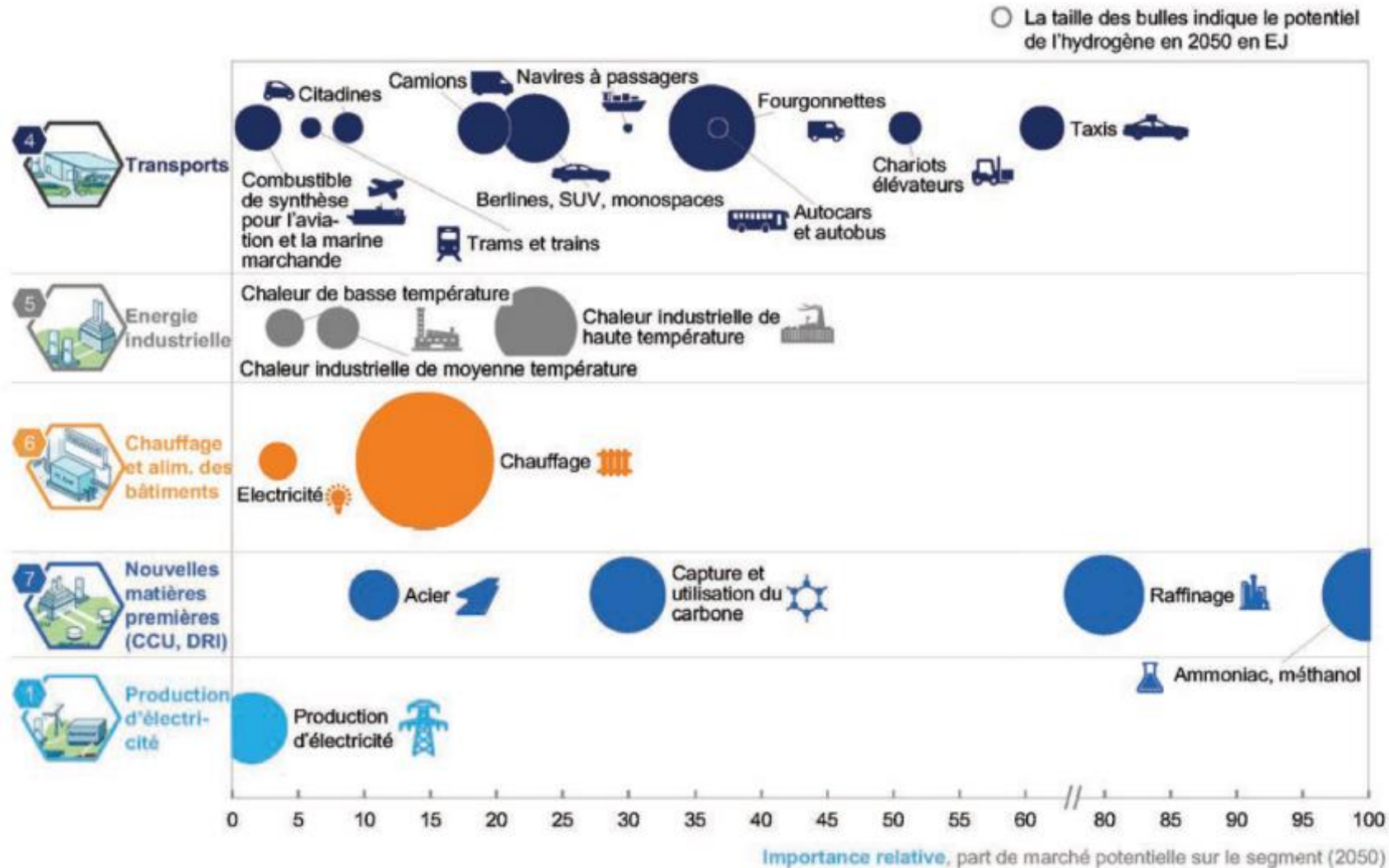
Compresseur mécanique H₂: Grand CAPEX,
 OPEX: Consommation électrique de 2 à 5 kWh/kg H₂ (5 à 15 % énergie totale)
 Besoin élevé en maintenance

Il existe des compresseurs par ad ou absorption en développement

A small, dark, oval-shaped icon with a purple and blue gradient, representing a hydrogen molecule.

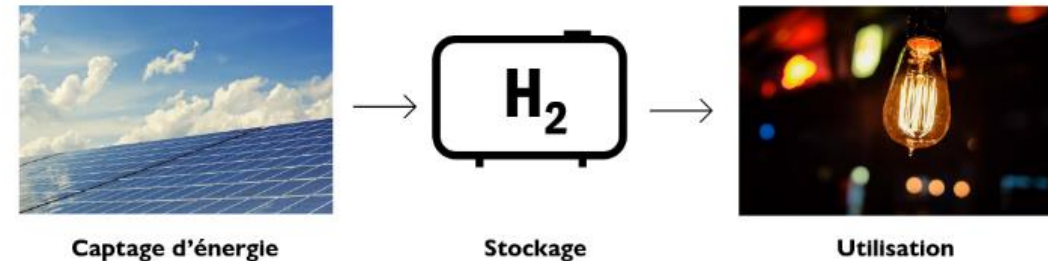
Nouveau usages de l'hydrogène

Décarboner l'industrie, l'énergie et les transports: 58 %



Usage de l'hydrogène: décarboner l'industrie

- Hydrogène comme matière première
- Hydrogène comme source de chaleur industrielle
- Production de brique de l'industrie chimique (Ammoniac, méthanol)
- Production de gaz de synthèse (méthane)
- Stockage des énergies renouvelables





Le transport: moteur à combustion interne



2003: Mazda RX-8 Hydrogen RE, moteur à pistons rotatifs

Bi carburation hydrogène/ essence

200 chevaux essence/ 100 chevaux H2

En 2008: Moteur rotatif moins performant et rendement inférieur que PAC mais plus compact.

Emet des Nox, Fragilisation H2



2006: BMW série 7 H2, Bi carburation hydrogène/ essence

- Poids : 2 460 kg
- Motorisation : V12 6 L à essence et hydrogène 260 ch
- Réservoir d'hydrogène : stockage liquide 170 L soit 8 kg
- Conso : 13,9 L/100 (essence) et 3,4 kg/100 (hydrogène)

Arrêt 2009





La réélectrification: La pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif chimique (empilement de cellule) dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène, méthanol, gaz naturel) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène ou l'air.

L'effet pile à combustible est découvert par l'Allemand Christian Schönbein en 1839.

Premier prototype de 1 kW en 1953, puis de 5 kW en 1959
-> missions spatiales Apollo.



Pile Symbio

La réélectrification: Les piles à combustible

Different types of fuel cells

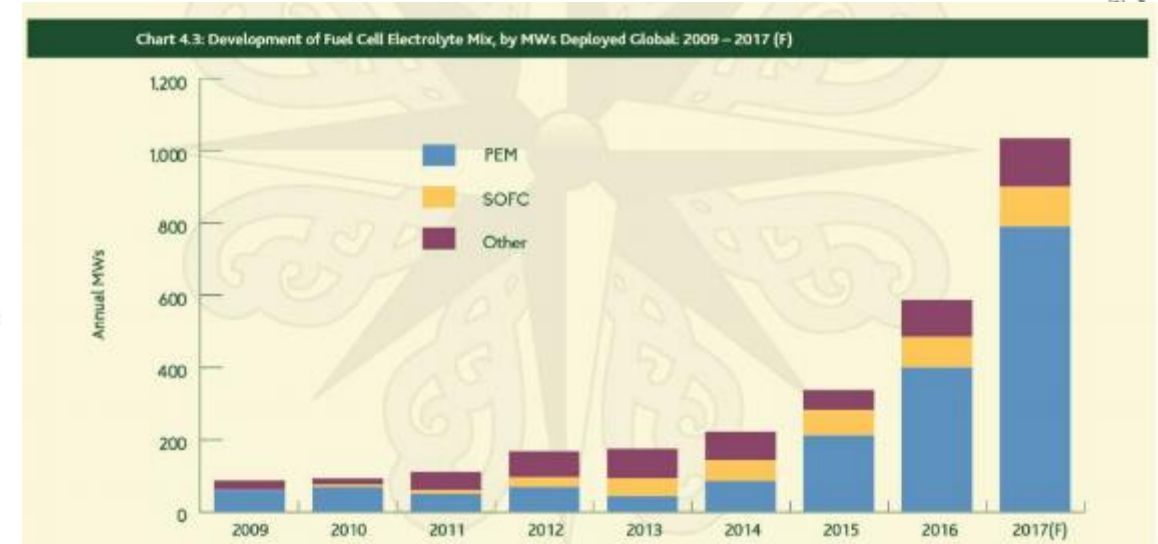
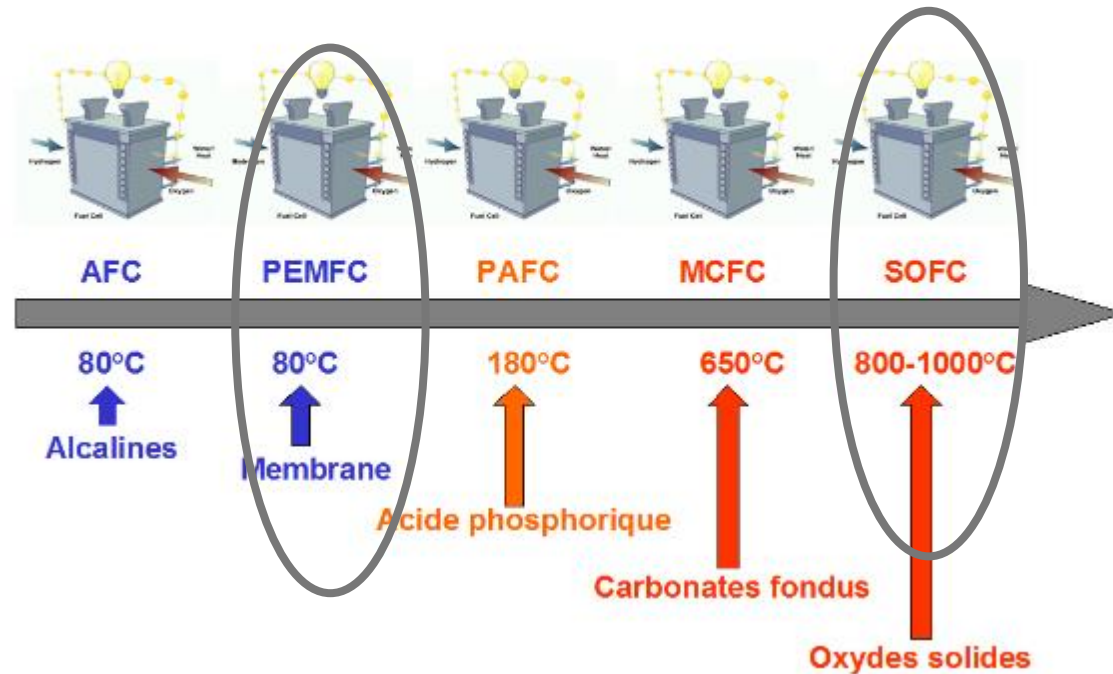
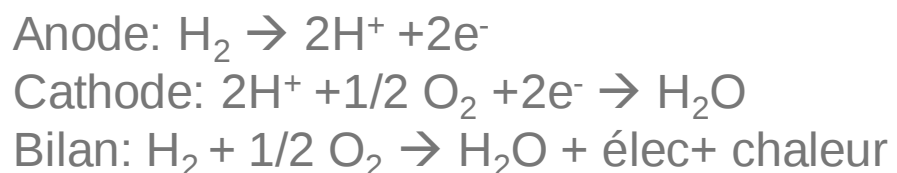
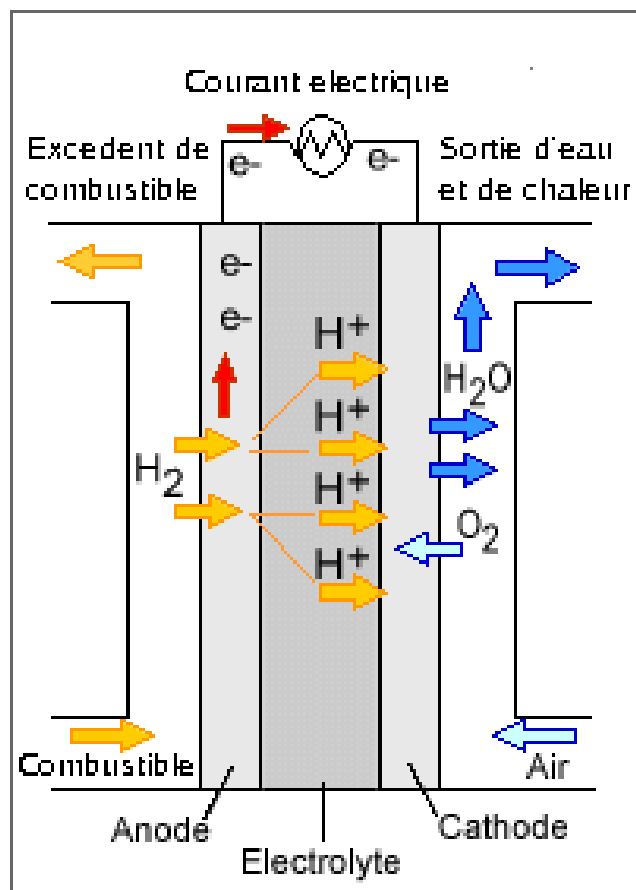


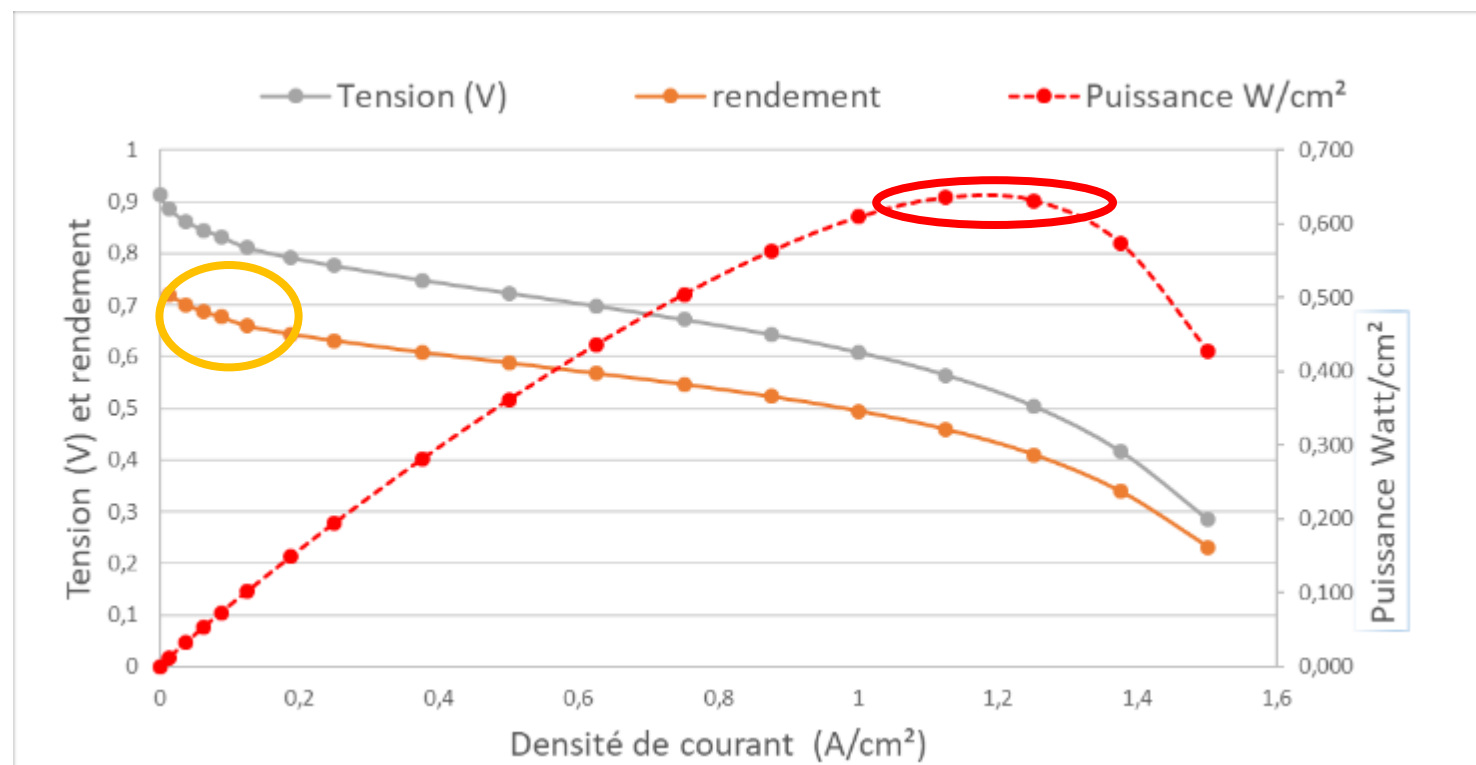
Figure 7 - Evolution des ventes en terme de puissance par type de pile

Type ³	Electrolyte	Espèce ionique	Catalyseur anode	Catalyseur cathode	T (°C)	Domaine d'utilisation
AFC	potasse (liquide)	OH ⁻	Pt	Pt-Ag	80	Espace, transports, stationnaire Gamme : 1 - 100 kW
PEMFC et DMFC	polymère (solide)	H ⁺	Pt (DMFC:Pt/Ru)	Pt	25 - 90	Portable, transports, stationnaire Gamme : 10 mW – 1 MW
PAFC	acide phosphorique (liquide)	H ⁺	Pt	Pt	180-200	Stationnaire, transports Gamme : 100 kW - 10 MW
MCFC	sels fondus (liquide)	CO ₃ ²⁻	Ni	Ni - LiO	650	Stationnaire Gamme : 100 kW - 10 MW
PCFC	céramique (solide)	H ⁺	Perovskite	Pr ₂ NiO ₄ +	400 à 600	Stationnaire, transports Gamme : 100 W - 10 kW
SOFC	céramique (solide)	O ²⁻	Ni-YSZ	La _x Sr _{1-x} MnO ₃	600 à 1000	Stationnaire, transports Gamme : 100 W - 10 MW

La pile à combustible PEM: une cellule

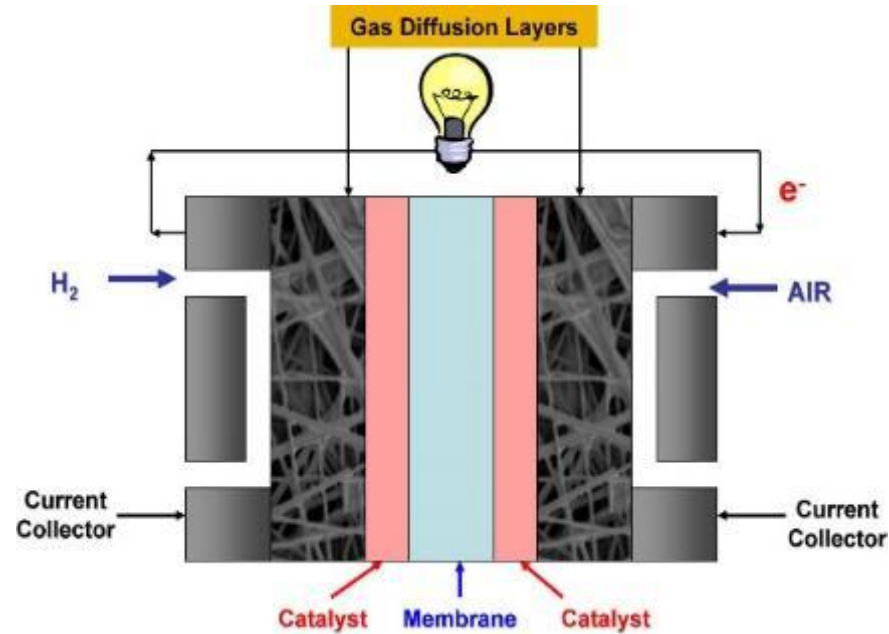


Courbe NQ 70° C, cellule 80 cm²

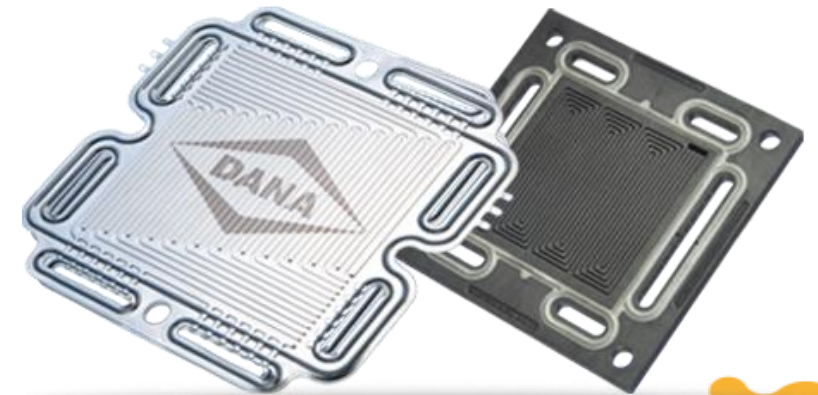
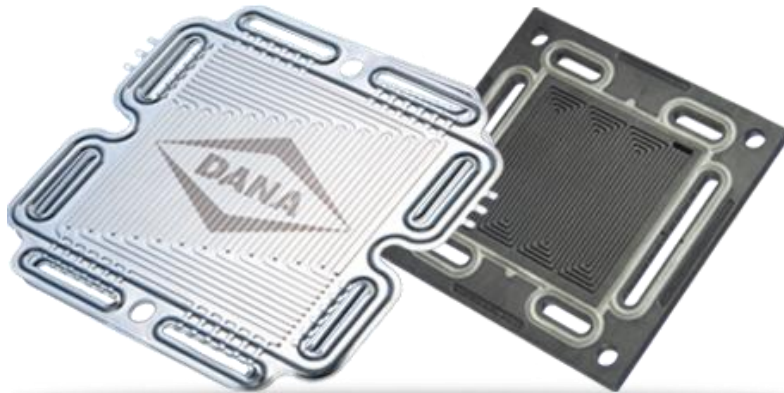
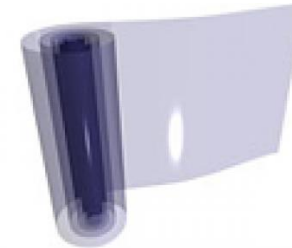
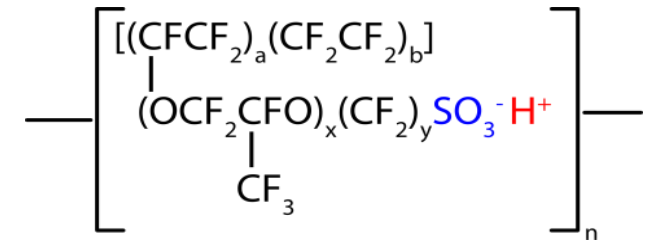


Optimum rendement au début de la courbe
 Optimum de densité de puissance vers la fin

Constituant d'une cellule



Le Nafion



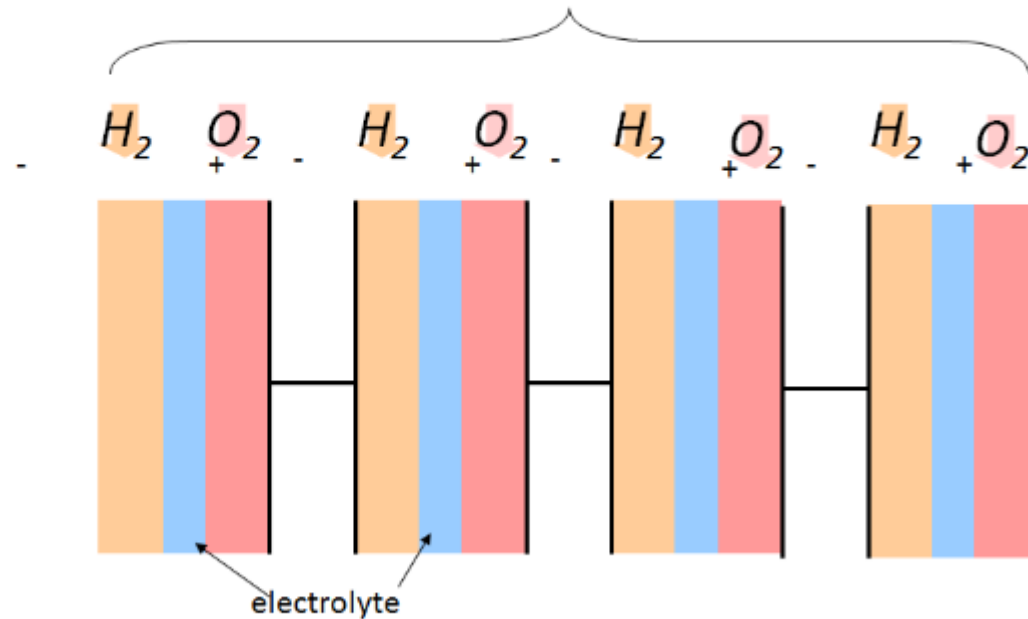
GDL/Anode/membrane nafion/Cathode/GDL

La réélectrification: Le stack PEM

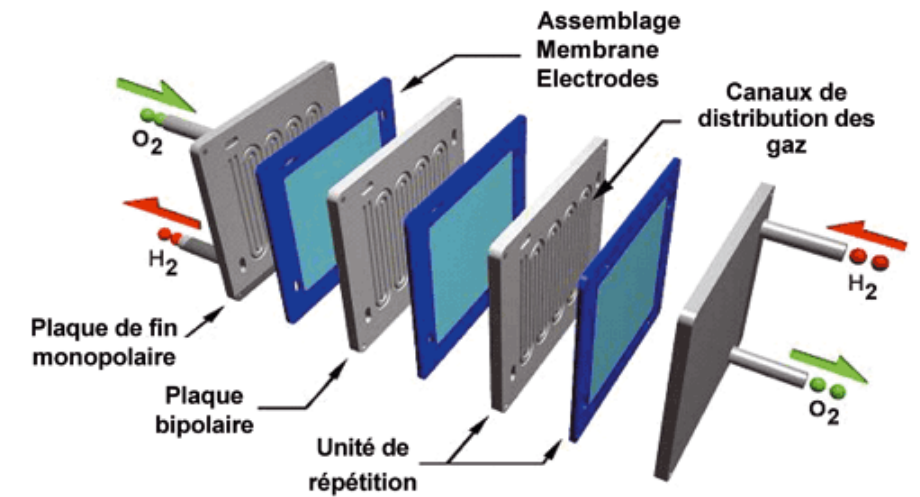
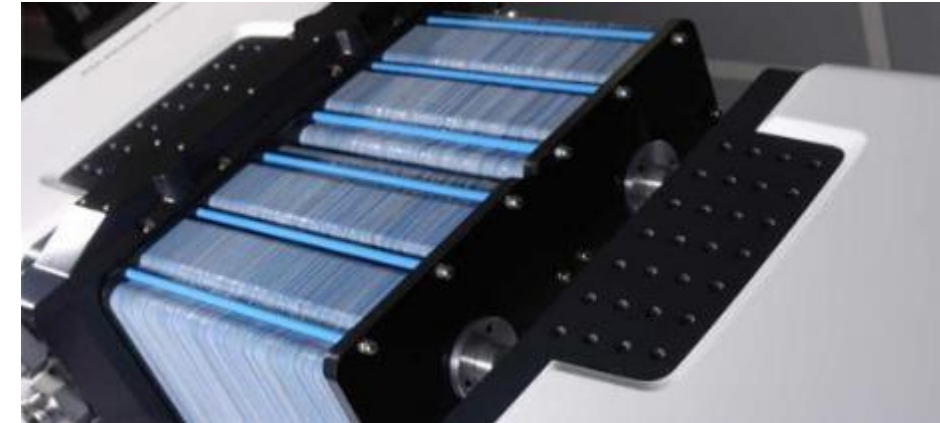
A Stack is obtained



N elementary cells in series

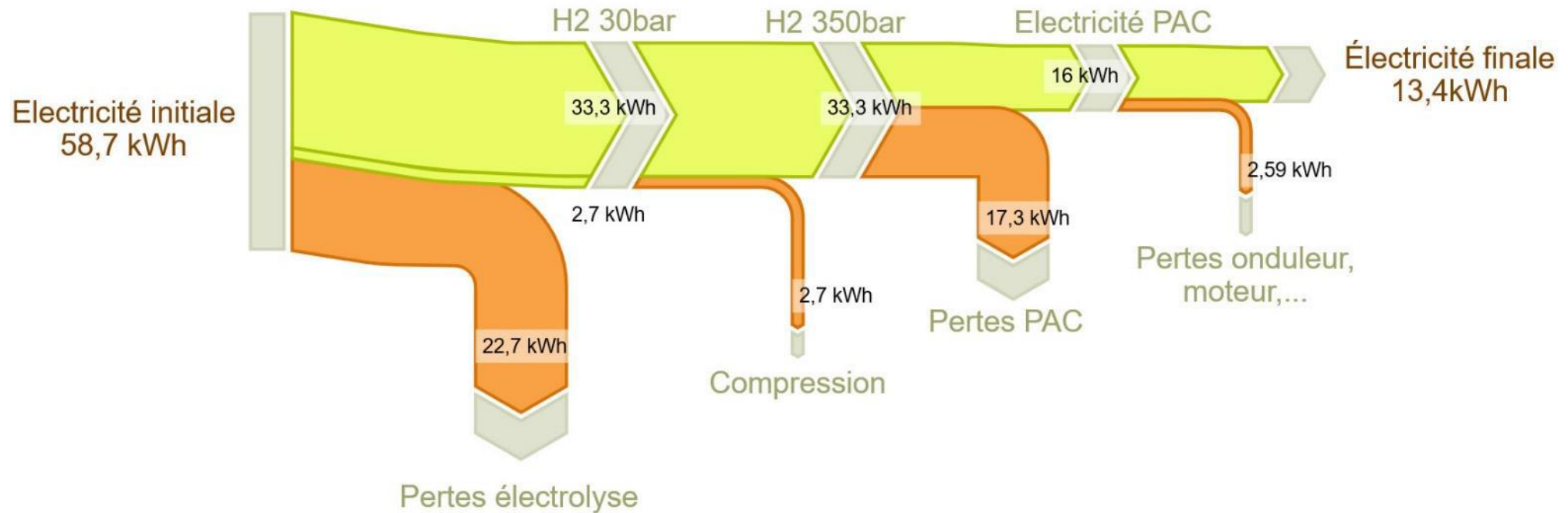


Stack voltage = $N \times$ cell voltage Stack current = cell current



Rendement de la chaîne hydrogène

Rendement Electrolyse: 60%, compression:95%, Pile à combustible: 50%, Onduleur



Rendement global de la chaîne Hydrogène: entre 22 et 25%

Chaîne batterie : 70%, moteur thermique seul: 20-25%



Ordre du jour



- 🔗 Présentation PVF
- 🔗 Remplacer l'H₂ dans le système énergétique
- 🔗 Production, stockage et ré-électrification
- 🔗 Les applications autour de l'hydrogène (mobilité et autres)
- 🔗 La chaîne de valeur et briques technologiques



Solution dans le bâtiment – chauffage - autonomie



VIESSMANN



Chaudière à micro-cogénération avec chaudière d'appoint et ballon d'eau chaude sanitaire

- Pile PEM (Panasonic)
- Développement de la techno SOC
- Alimentation du système méthane
- Reformeur : $\text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2$
- 0,75 kW_{el}, de 0,9 à 30,8 kW_{th}

Bâtiment DELTA GREEN à Nantes (autonome grâce à sa conception économe et du stockage d'hydrogène)



Une famille britannique construit la première maison autonome à hydrogène d'Europe dans le Devon

Groupe électrogène hydrogène



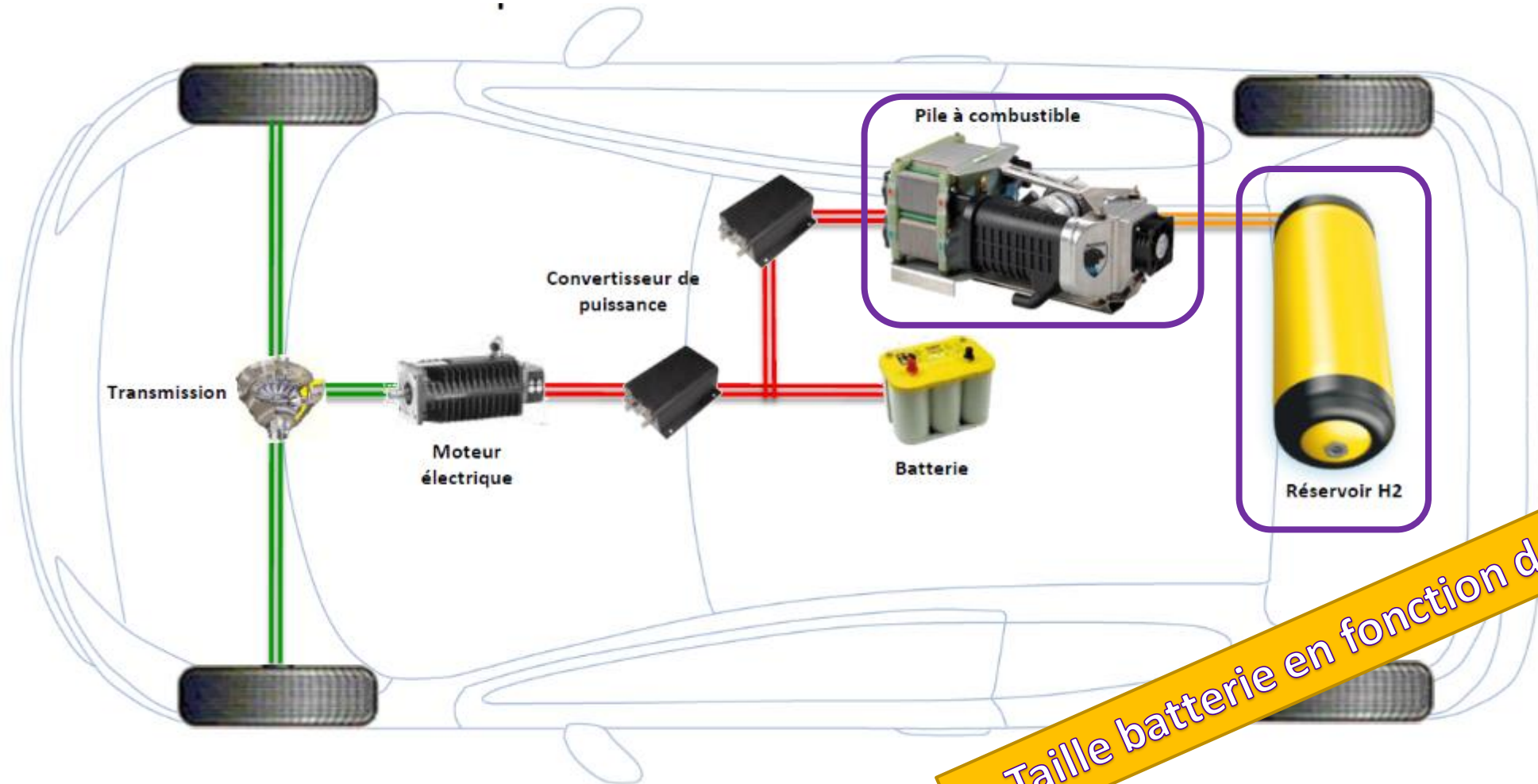
Groupe électro-hydrogène - <https://www.h2sys.fr/wp-content/uploads/2021/06/FTV01.1062021.pdf>



Groupe électrogène «www.sonoba.fr»



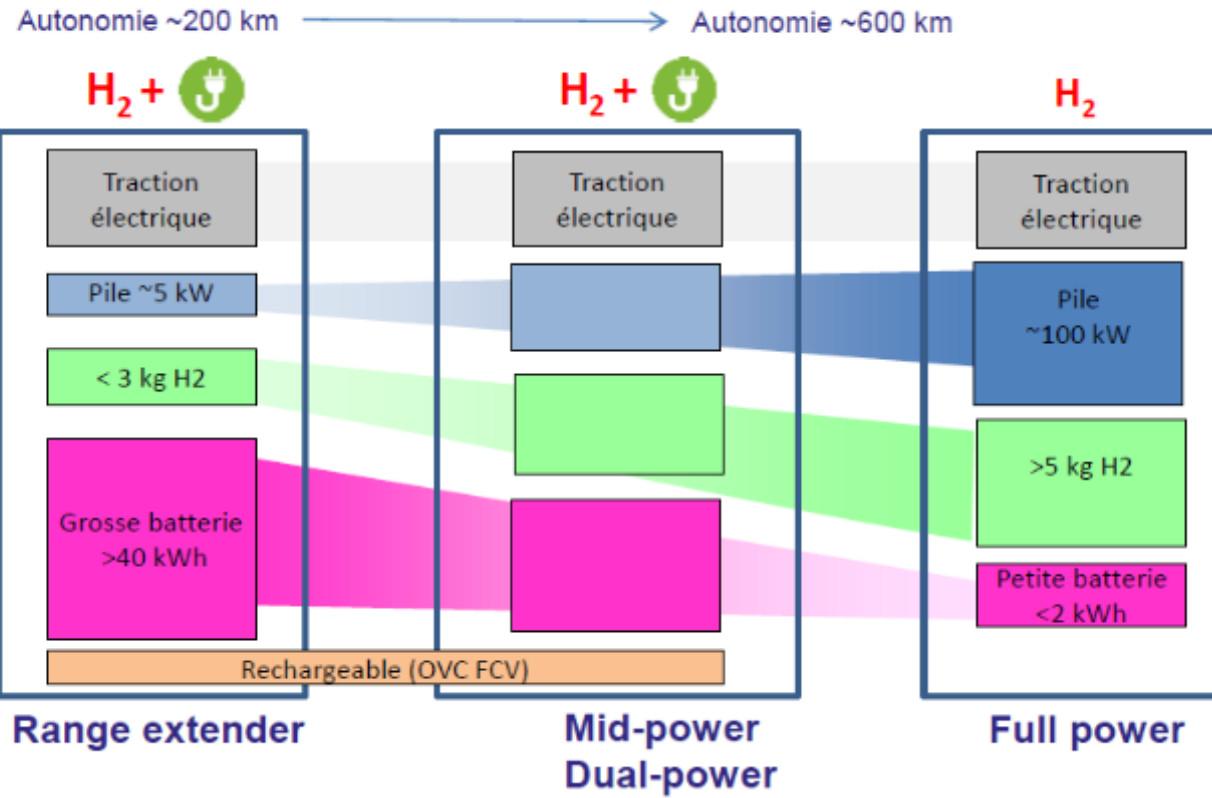
La mobilité: Structure d'un véhicule à pile à combustible



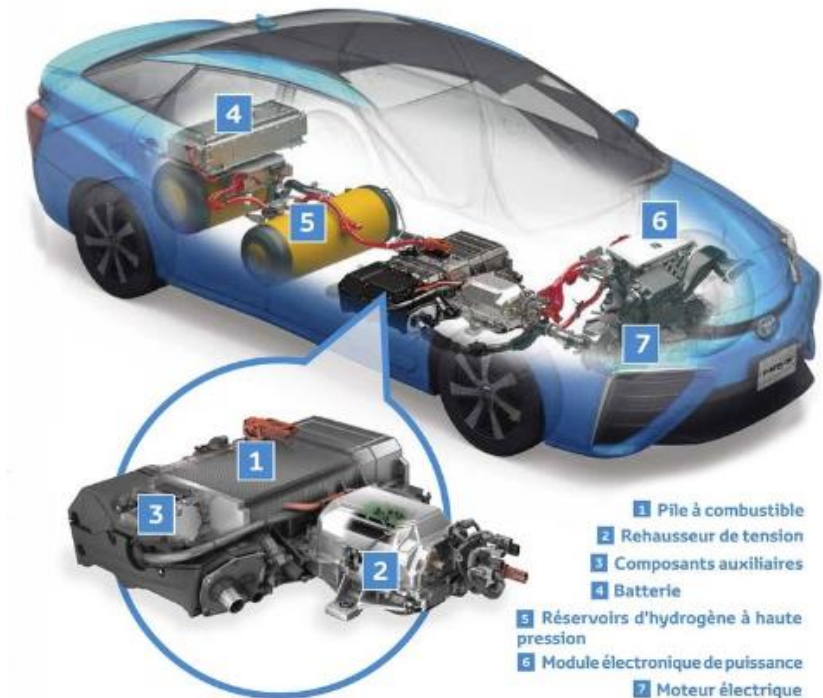
Taille batterie en fonction de l'usage



Les différentes architectures possibles



Toyota Mirai 1



Intérieur d'un Kangoo Hydrogène





Système hydrogène pour l'automobile



Toyota Mirai

Une voiture à PAC est une voiture électrique qui utilise l'hydrogène gazeux pour stocker l'électricité.

Avantage principaux par rapport à voiture électrique:
Le temps de recharge (5 min et l'autonomie 600-700 km)

Inconvénients: rendement énergétique (30 % vs 75%)

Prix du voiture à pile à combustible: entre 70 et 80 k€

Solution mobilité



Toyota Mirai – Remplissage 3 à 5min – env. 500km



Busnova Safra – Remplissage 7 à 10min – env. 400km



Pragma – Remplissage <2min – 150km



Navibus (hydrogène et batterie)



Nikola (2023) – Remplissage 15-20min - env. 500 à 1200km



Toyota – Remplissage 3 min - 1 plein/poste





RETROFIT

POUR DES VEHICULES A DUREE D'UTILISATION LONGUE ET/OU EVOLUTIVE



l'Innovation de procédé sur une
technologie disruptive

Kit de conversion



ENEO
CONCEPTEUR VE



ENEO
Production



Prototypage



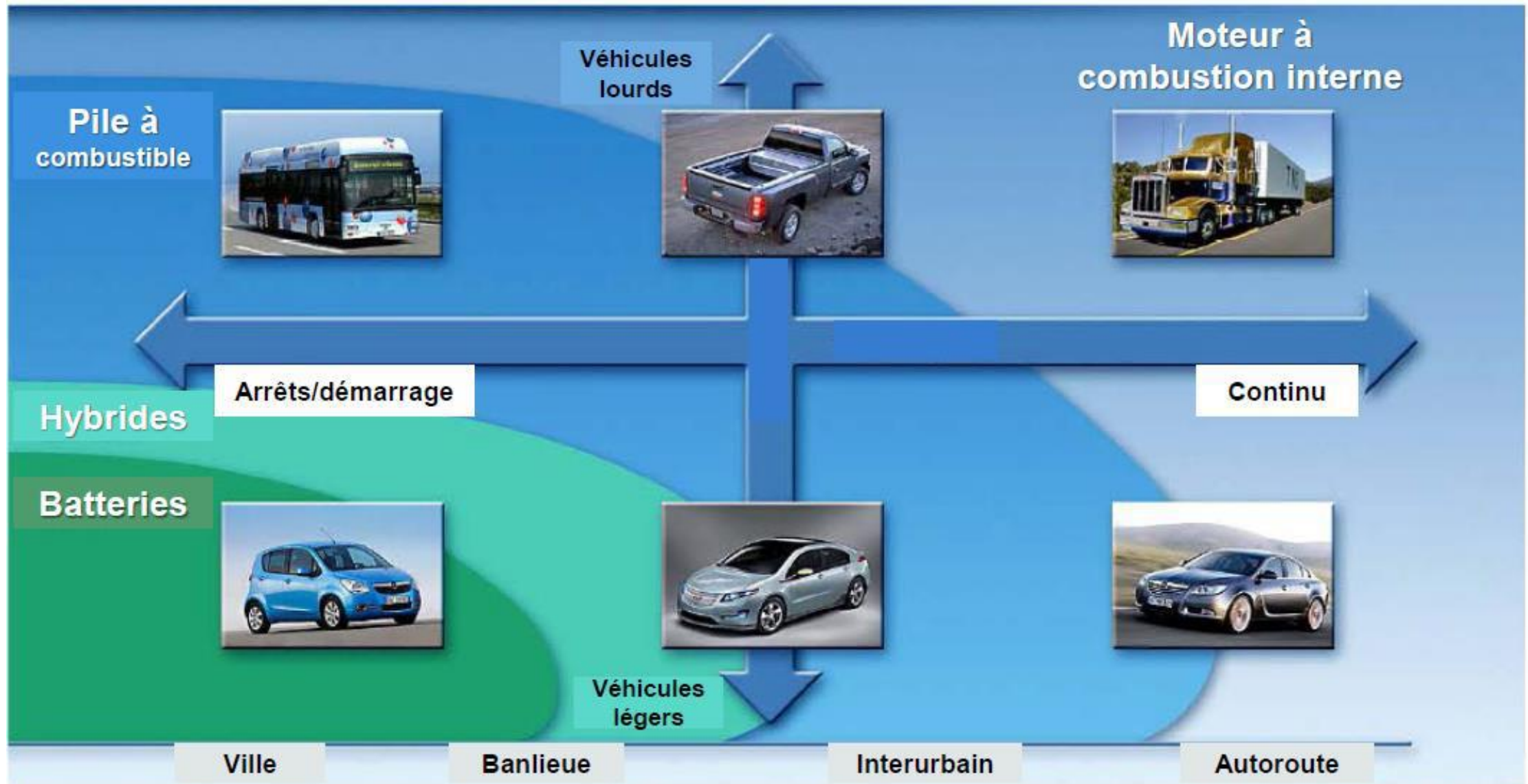
Garage partenaire



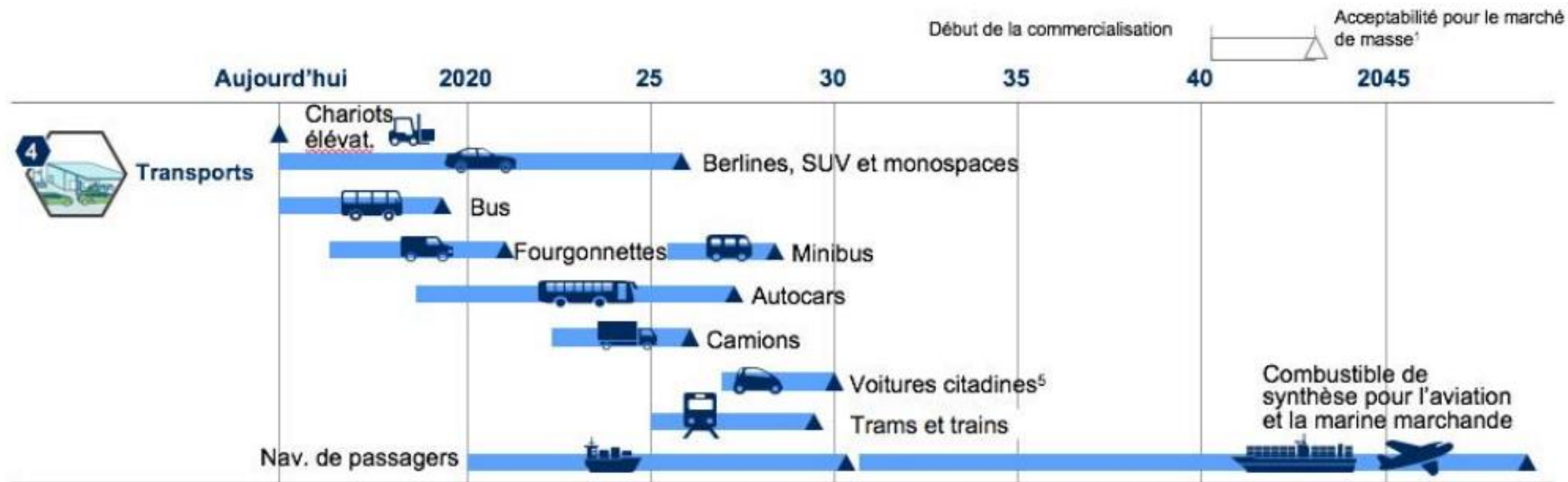
Ligne de Production



Un choix en fonction de l'usage



Déploiement des technologies hydrogène selon France Hydrogène



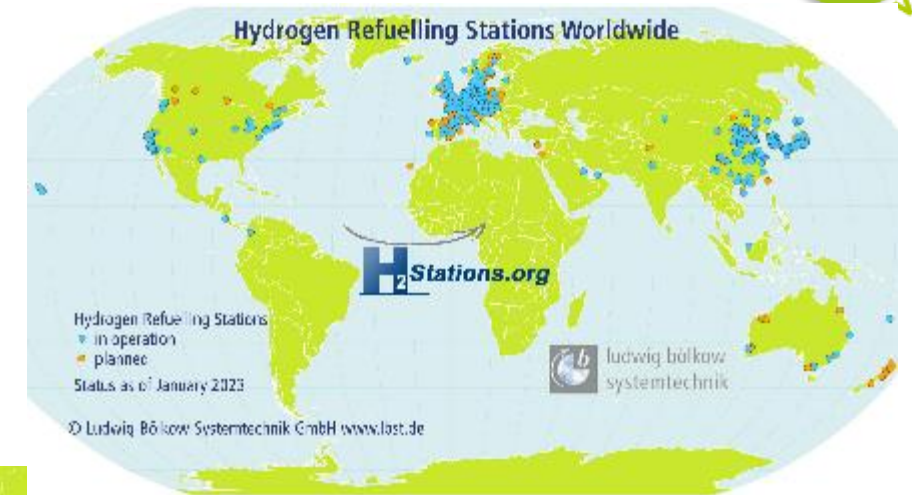
Source: McKinsey- France Hydrogène



Projets en Europe et dans le Monde



- Monde :
 - Japon
 - Corée
 - Chine
 - Californie



- Europe, tous les pays avec une avance pour :

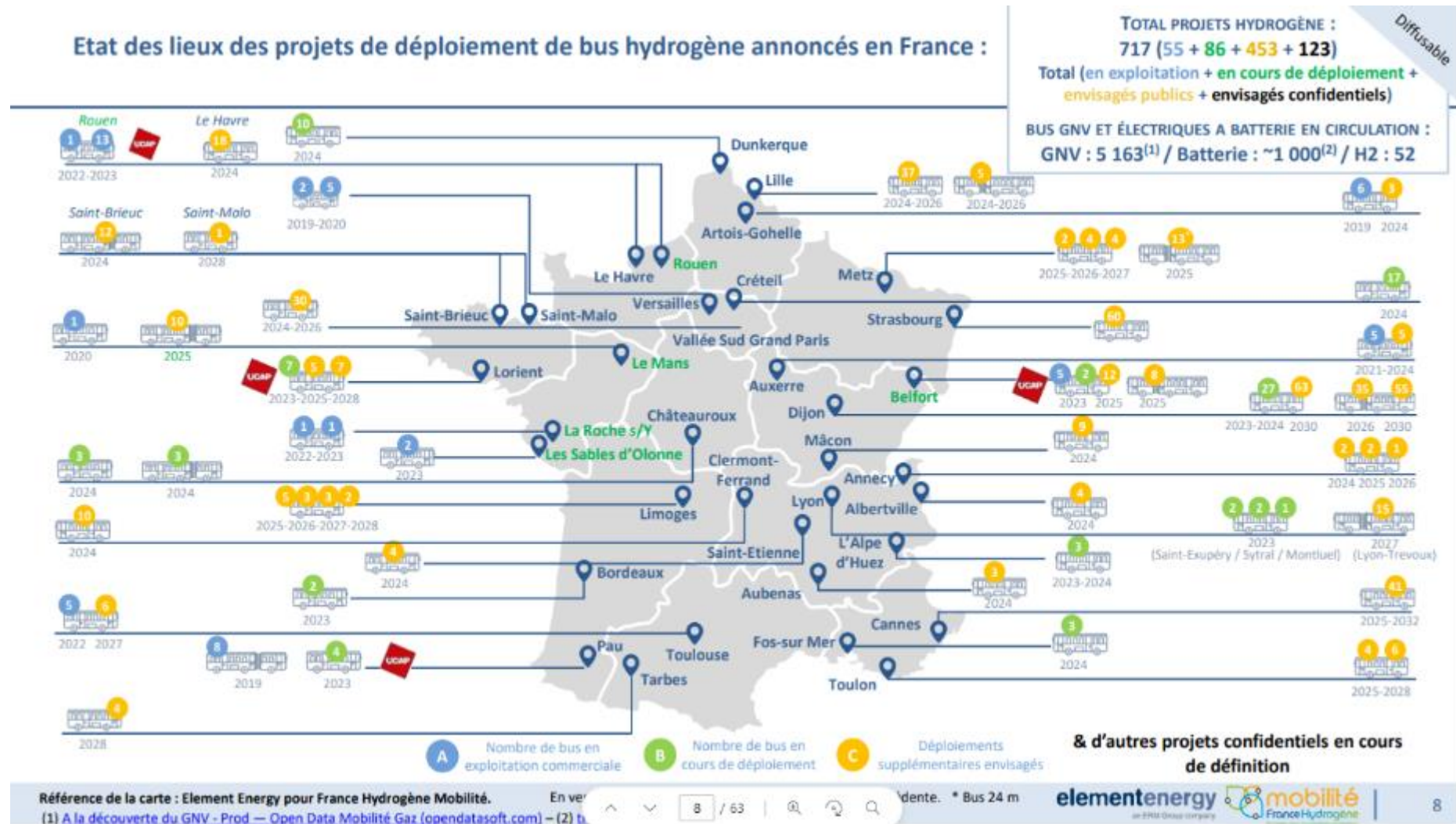
- Allemagne
- Pays Bas
- France
- Royaume-Unis
- Espagne



Exemple : les stations dans le monde

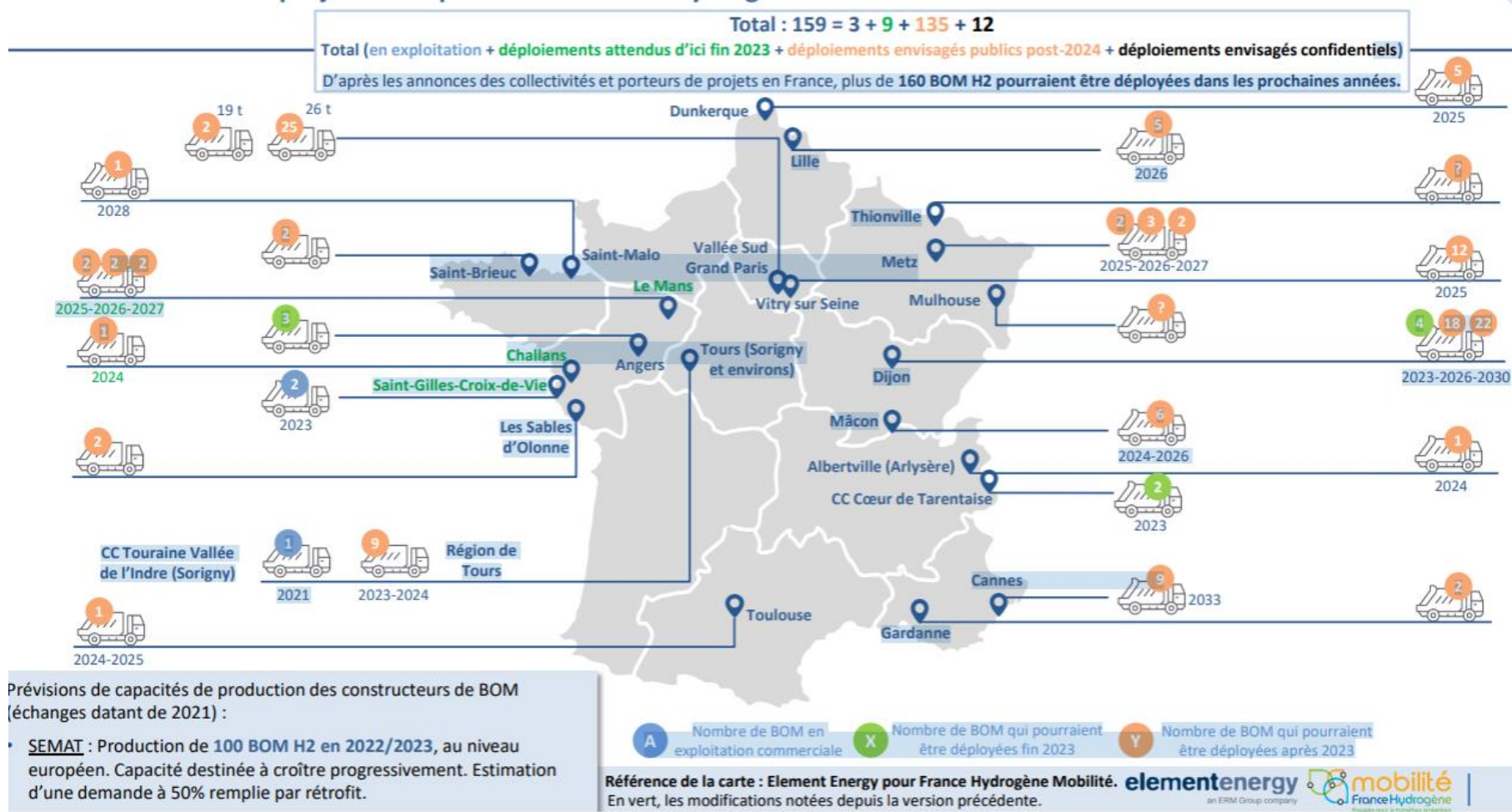


Les camions de transport de marchandise

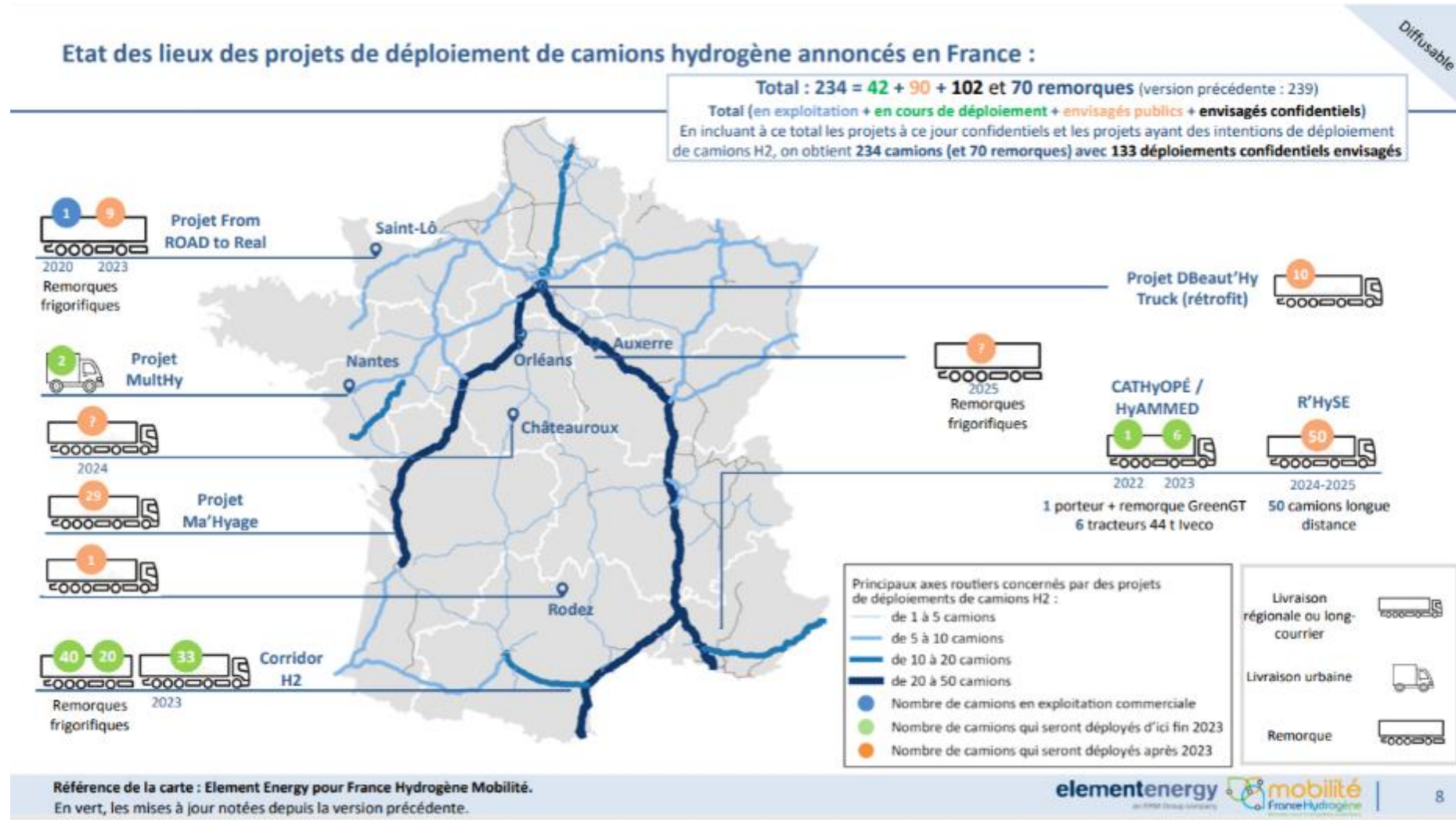


Les camions Benne à Ordures Ménagères

Etat des lieux des projets de déploiement de BOM hydrogène annoncés en France :



Les camions de transport de marchandise



Bus et BOM H2 en Bourgogne-Franche-Comté

Dijon (DSME Nord)
BOM à partir de 2023/24



Auxerre
5 bus depuis 2021



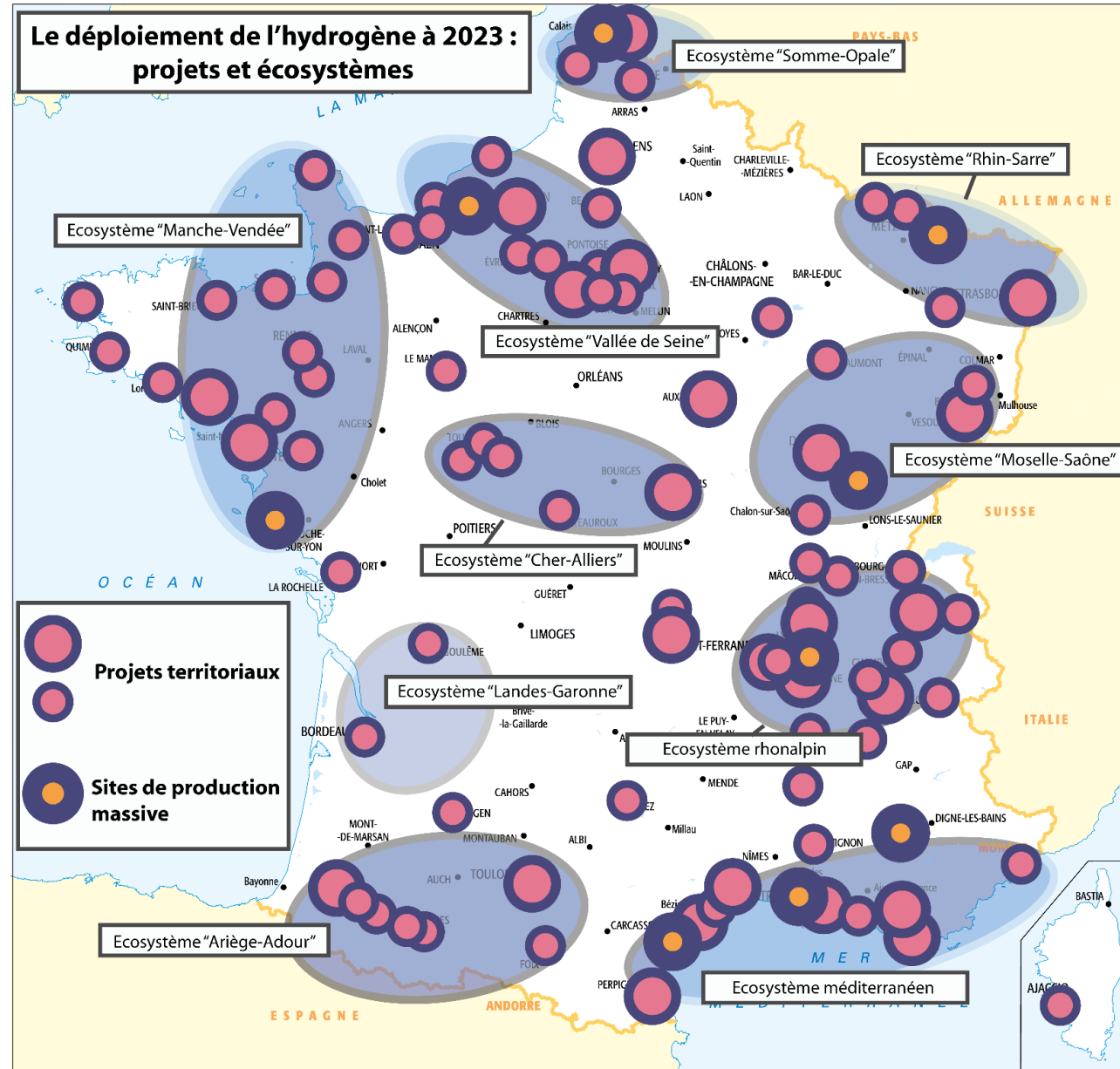
Belfort
5 bus depuis 06/2023



Dijon (DSME Sud)
27 bus à partir de 2024

Macon
2 bus à partir de 2024

Les projets identifiés en France

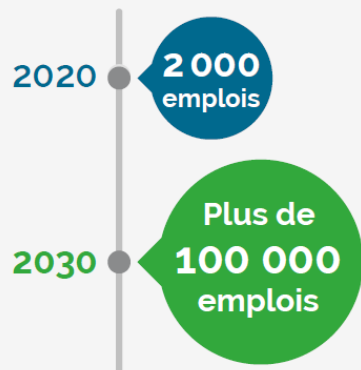


Source France Hydrogène

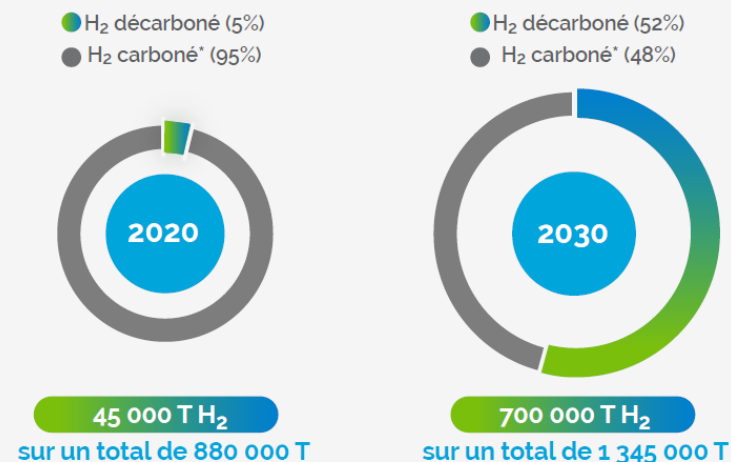
Le plan Hydrogène de l'Etat – quelques chiffres



Créations d'emplois dans la filière hydrogène



Développement de la production d'hydrogène pour l'industrie et les nouveaux usages



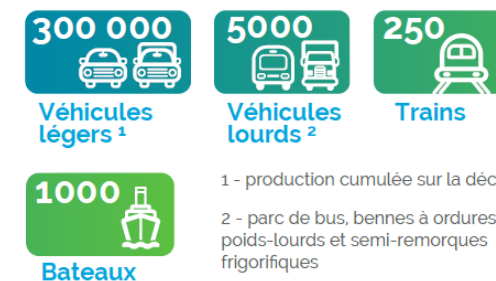
* hydrogène issu de sources fossiles

Mobilité

En circulation en 2020



Objectifs de la filière en 2030, 342 000 T d'H₂ décarboné pour :



1 - production cumulée sur la décennie

2 - parc de bus, bennes à ordures ménagères, poids-lourds et semi-remorques frigorifiques

Objectifs à 2028 de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie

- 20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers
- 800 à 2000 véhicules lourds

Stations de recharge H₂



Rappel des objectifs de la PPE 2028 : 400 à 1000 stations

Une stratégie de 7,2 milliards d'euros sur 10 ans, 3 priorités:

- Décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse
- Développer une mobilité lourde à l'hydrogène décarboné
- Soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences afin de favoriser les usages de demain