

# Le futur de l'Hydrogène

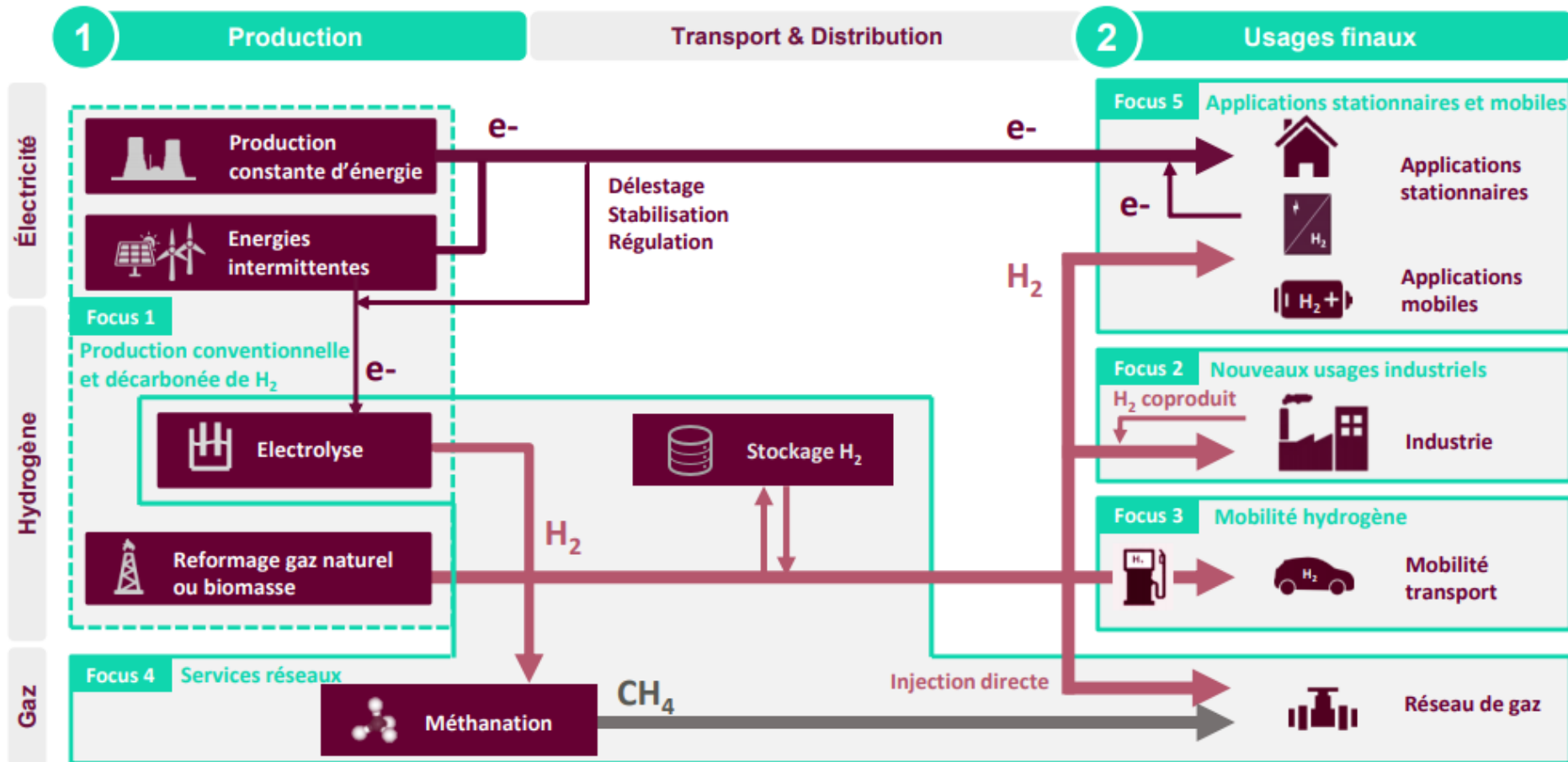
Les utilisations présentes et futures

# Panorama général des applications

# Applications de l'hydrogène décarboné (« vert », « jaune » et « bleu »)

- Pour l'industrie (présente et future)
  - *Substitution pure et simple à l'hydrogène carboné déjà utilisé dans les processus industriels*
  - *Très hautes températures ?*
- Pour les bâtiments
  - *Chauffage*
  - *Electricité (si autonome, hors réseau)*
- Pour les mobilités
  - *Tous transports par route, air, rail, mer, espace...*
- Pour le stockage de l'électricité
  - *D'origine intermittente ++*

# Chaine de valeur Hydrogène



# Les applications industrielles

***Substitution de l'hydrogène carboné par de l'hydrogène décarboné (vert ou jaune)***

**- aucune adaptation n'est nécessaire -**



Association française  
pour l'hydrogène et  
les piles à combustible

| Utilisation                        | <b><u>Données<br/>actuelles, France</u></b> | Quantité consommée<br>(milliers de tonnes /an) | %   |
|------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|-----|
| Raffinage pétrolier                |                                             | 544                                            | 59  |
| Ammoniac et engrais                |                                             | 240                                            | 26  |
| Industrie chimique (dont méthanol) |                                             | 92                                             | 10  |
| Métallurgie                        |                                             | 9,2                                            | 1   |
| Divers                             |                                             | 36,8                                           | 4   |
| Total                              |                                             | 922                                            | 100 |

# Hydrogène décarboné pour l'industrie

## Les objectifs du gouvernement

- Objectif de **substitution** d'hydrogène décarboné dans les usages de **l'hydrogène industriel** :
  - 10 % en 2023 (soit ≈ 92.000 tonnes)
  - 20 à 40 % en 2028 (soit ≈ 180.000 à 360.000 tonnes)
- Mise en place dès 2020 d'un système de **traçabilité** sur l'origine de l'hydrogène (?)

Source : Ministère de la Transition écologique et solidaire

# Techniques d'exploitation de l'hydrogène-énergie

L'énergie de l'hydrogène peut être exploitée selon **trois axes principaux** (applications Mobiles ou Fixes)

- **Combustion directe**
  - Turbines à gaz enrichi à l'hydrogène (M+F)
    - Projets de turbines **100 % hydrogène** pour 2030 (*Mitsubishi, Siemens, General Electric...*) (M+F)
  - Enrichissement du gaz naturel (*méthane*) (F)
- **Production d'électricité**
  - Piles à combustible (*PàC – voir plus loin*) (M+F)
- **Transformations chimiques**
  - Transformation en carburants de synthèse renouvelables (*e-carburants – voir plus loin*) (M)

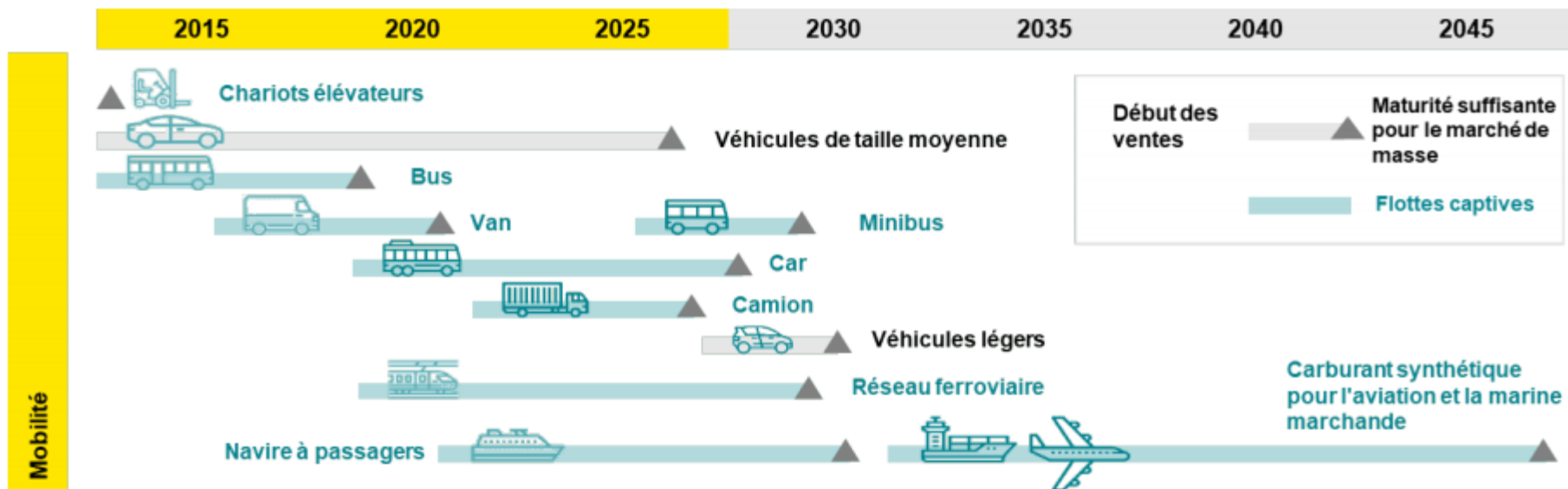
# L'hydrogène pour les bâtiments

- Pour l'électricité et le chauffage électrique
  - Si le bâtiment ou un groupe de bâtiments sont **autonomes** (*ou partiellement autonomes*), ils peuvent eux-mêmes **produire** leur énergie électrique
    - Renouvelable local (*sans les taxes liées au réseau électrique*)
    - Hydrogène avec réservoir et pile à combustible à haute énergie (*Piles MW*)
  - Dans les autres cas c'est le réseau qui fournit l'électricité
- Pour les chauffages à hydrocarbures
  - **Enrichissement** du gaz naturel par de l'hydrogène (*sous limites réglementaires*)
  - **Mazout** de synthèse (*voir « carburants de synthèse »*)

# L'hydrogène décarboné pour les mobilités

*Route, rail, mer, air, espace...*

# Hydrogène décarboné pour les mobilités



*Horizon de déploiement commercial de l'hydrogène pour différentes applications de mobilité*

Source : AFHYPAC



*Un tracteur Toyota*

## Trains et bateaux nécessitent moins de points de distribution...

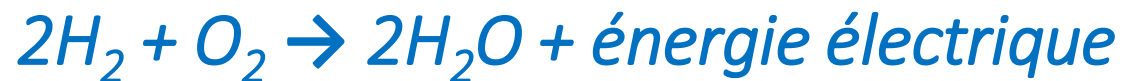


*Rame Alstom à pile à combustible - Exploitation SNCF*



*Ferry norvégien – Financement Union européenne – Mise en service 2021*

# Piles à combustible H<sub>2</sub>

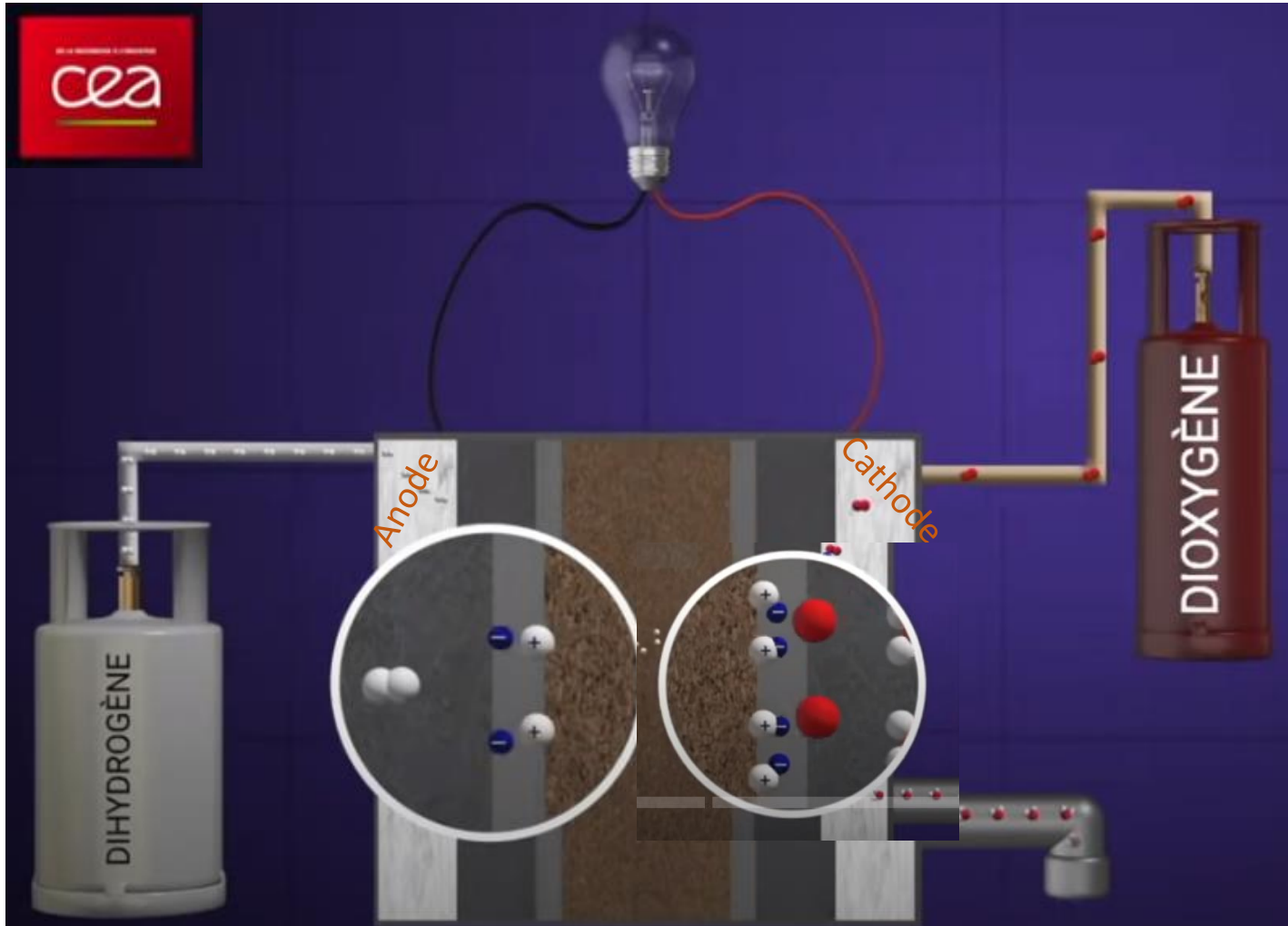


*Types, tailles, puissances, poids, coûts, rendements...*

# PEMFC

*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*

*Pile à combustible à membrane échangeuse de protons*



*20° à 100°C – Max 500 kW – Applis portables et transports*

# PEMFC – Les matériaux

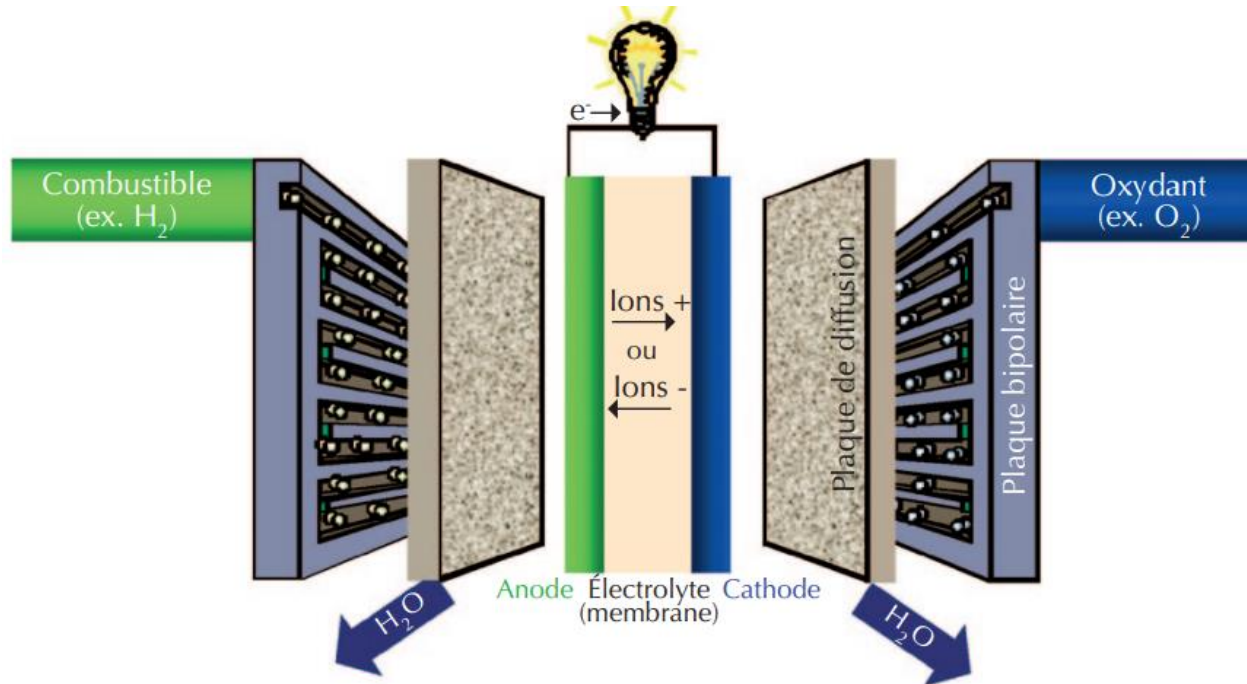
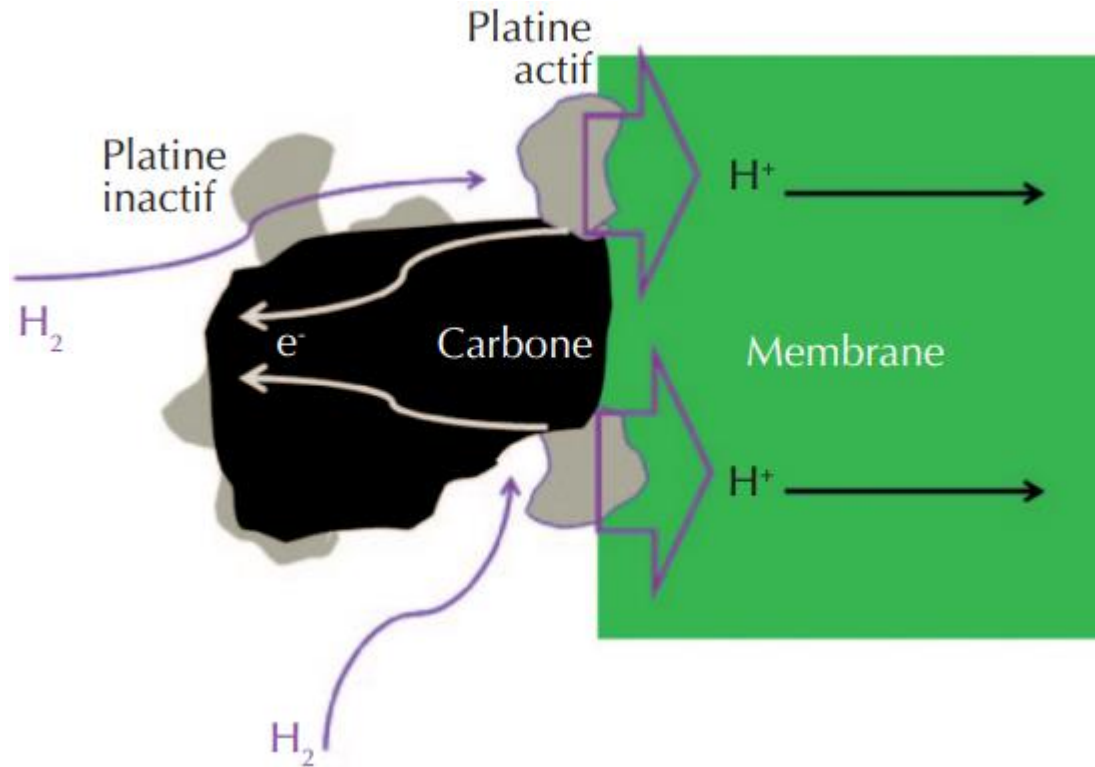


Schéma d'une PEMFC  $H_2/O_2$ . Les principaux éléments sont :

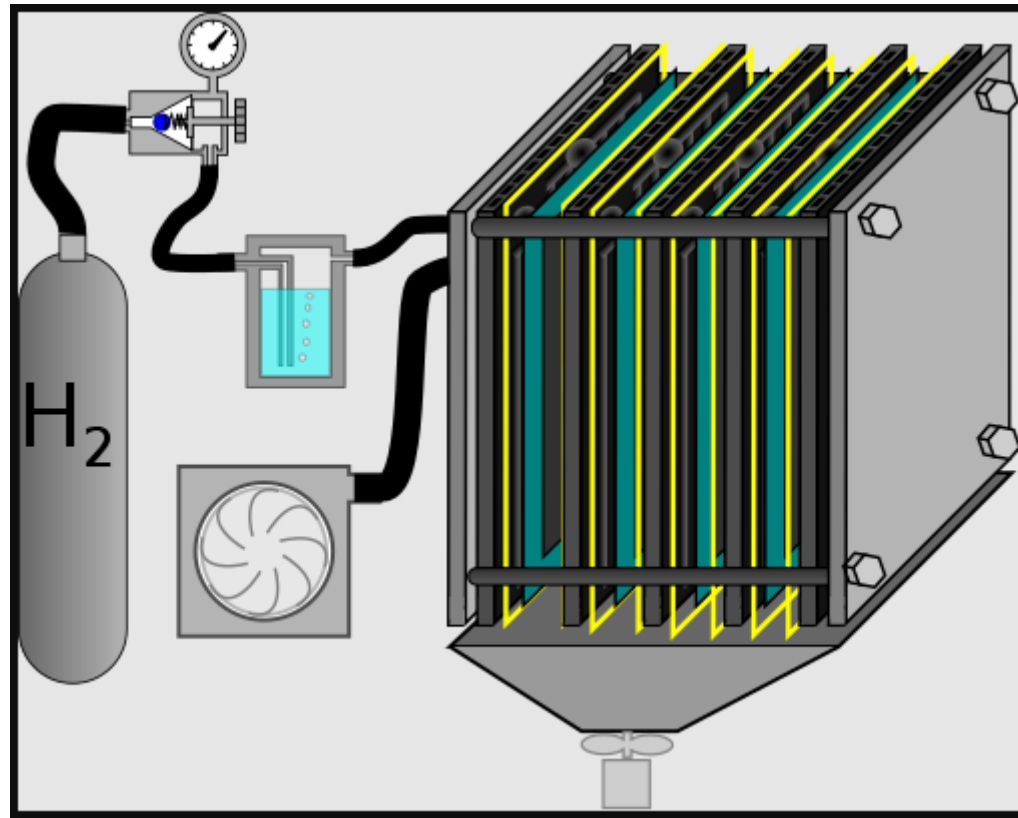
- **L'électrolyte**, en général une fine membrane polymère solide (**Nafion®**), qui doit conduire les protons, mais pas les électrons, et être imperméable aux gaz
- **Les électrodes (anode et cathode)**, constituées d'un métal catalyseur (**Platine**) déposé sur une couche poreuse de **carbone conducteur**
- **Les plaques de diffusion**
- **Les plaques bipolaires**, parcourues de microcanaux qui permettent d'assurer la distribution des gaz et l'évacuation de l'eau.

# PEMFC – Anode Platine/Carbone



*Localisation des points triples à l'interface entre la couche catalytique et la membrane d'une PEMFC*

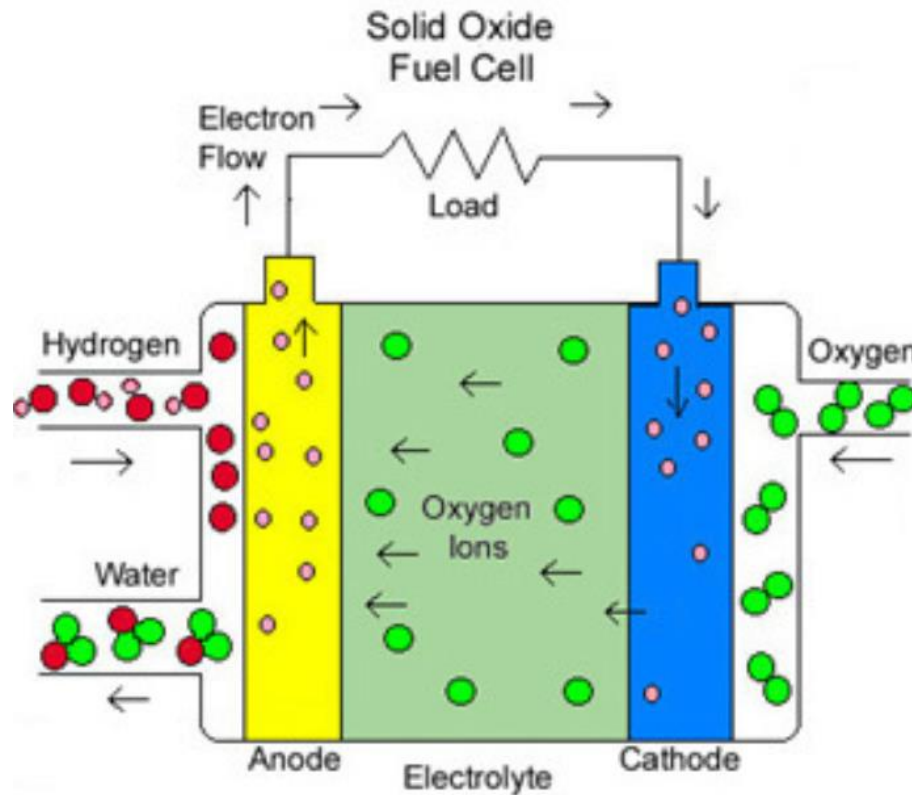
« **STACK** » : empilement de  $n$  cellules à 0,8 V



*Le montage complet d'un stack =  $n$  cells*

*Puissance = 0,1 à 500 kW*

# SOFC : Solid Oxide Fuel Cell



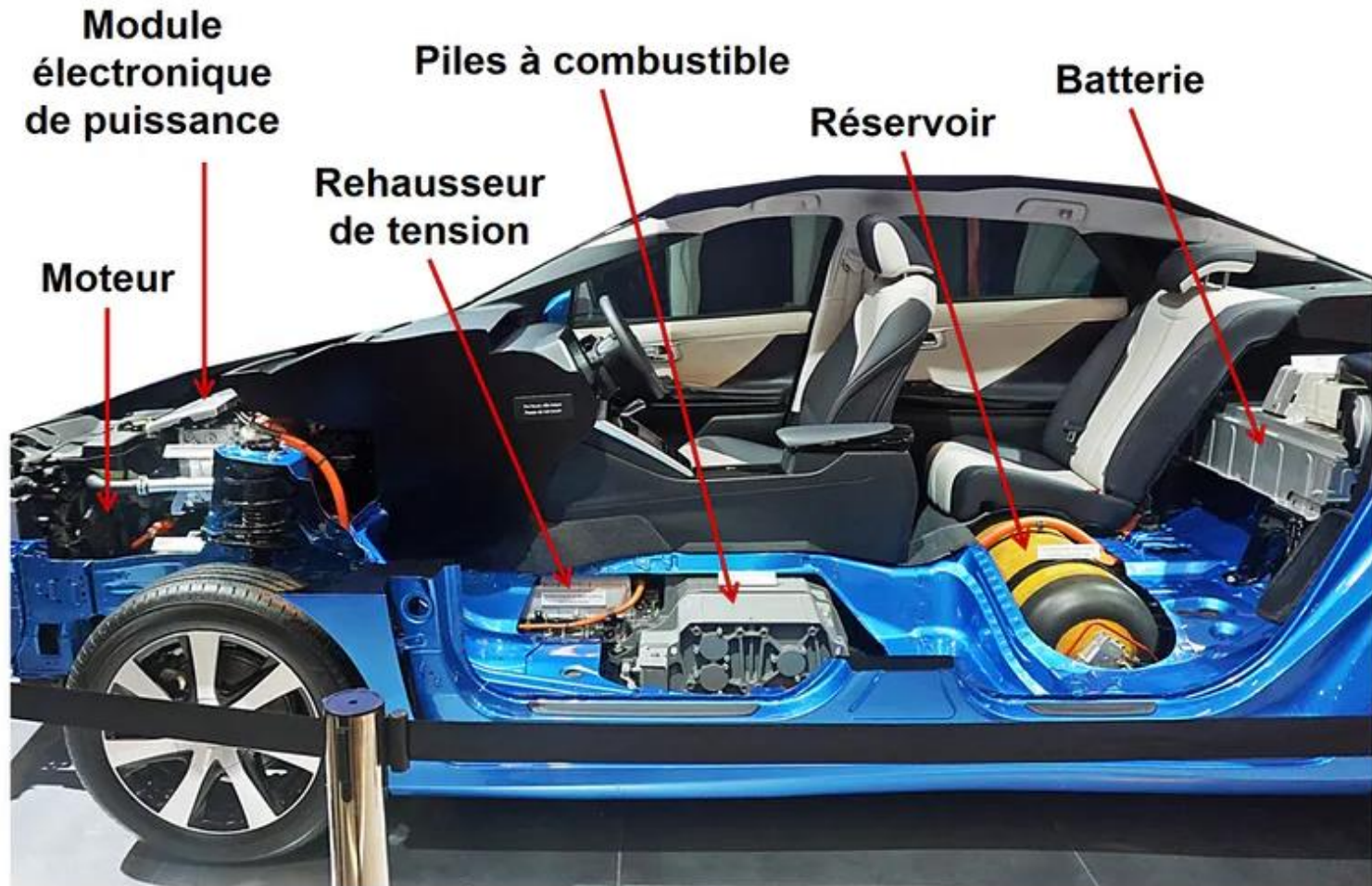
## *Prometteur :*

- Forte puissance pour **stations fixes (100 MW)**
- Fonctionne à **haute température** (800° à 1000°C)
- Electrolyte : Zirconium dopé à l'Yttrium – nombreuses recherches sur matériaux
- **Tolère des impuretés** dans l'hydrogène entrant
- Accepte d'autres carburants (gaz, charbon, essence...)

# *Véhicules à hydrogène*

Plus précisément : véhicules *électriques*  
à pile à combustible hydrogène

# Éléments d'une voiture à Hydrogène



*L'intérieur d'une Toyota Mirai, présenté en 2016 à São Paulo, Brazil*

# Éléments d'un véhicule à Hydrogène

- Dans certains modèles, l'électricité produite par la pile à combustible **alimente directement un moteur électrique**, comme la *Toyota Mirai*
- Pour d'autres véhicules, la pile à combustible sert exclusivement à **recharger la batterie qui alimente le moteur électrique** – c'est le cas du *Renault Kangoo*
- Un véhicule à hydrogène comporte toujours une batterie tampon qui se comporte comme une « **réserve de puissance** » : la puissance est fournie à la demande (*fortes accélérations...*), puis la batterie est rechargée par la pile à combustible
- Il est possible de **recupérer l'énergie de freinage** pour **recharger la batterie** afin de la réutiliser lors du prochain démarrage
- On retrouve ces mêmes éléments pour tous les autres **véhicules terrestres** de toutes tailles

# Un exemple : la Toyota Mirai



- Prix d'achat (modèle 2020) : **68000 €**
- Capacité pour un « plein » : **5,6 kg H<sub>2</sub>** à 700 bars
  - Répartis sur **3 réservoirs**
- Autonomie : **650 km**
- Durée de remplissage : « en quelques minutes »
  - Contre **plusieurs heures** pour des batteries !
- Coût : **≥ 10 € par kg H<sub>2</sub>**, soit **56 € pour 650 km**
  - Pour environ **80 €** avec essence (taxée...)
- Vitesse max : **178 km/h**
- Accélération : 0 à 100 km/h en **9,6 secondes**

# Un verrou : la distribution de l'hydrogène

- Le développement des mobilités hydrogène requiert la distribution du carburant aux utilisateurs
- Les mobilités individuelles demandent un réseau très maillé : il y a en France environ 11000 points de distribution de carburants. Même en acceptant un maillage réduit à 20 x 20 km, il faudrait 2 500 points de distribution
- Ces stations de distribution nécessitent des investissements > 1 M€, et doivent être alimentés soit :
  - Par camions actuellement
  - Eventuellement par gazoduc à terme
  - Ou produire sur place leur hydrogène par électrolyse (elles sont alors plus chères d'environ 80 %)
- Le développement d'un réseau, préalable à la vente des véhicules, ne peut guère se concevoir sans soutien public

# Stations-service Hydrogène en 2020



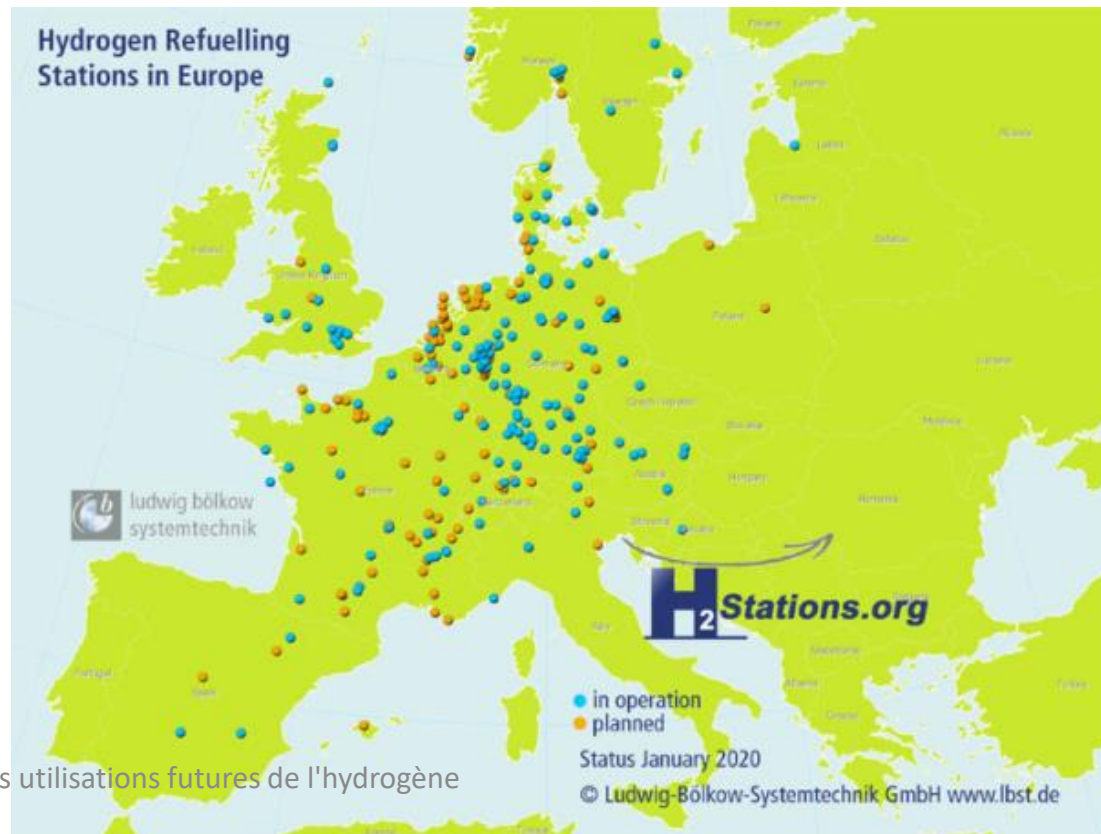
Nombre de  
stations en 2020 :

Monde : 600

Allemagne : 87

France : 26

**+ Nombreux  
nouveaux projets  
en cours**



# Avantages et Inconvénients d'une voiture à Hydrogène

## Avantages

- **Aucun rejet** de polluants : oxydes d'azote, CO<sub>2</sub>, particules fines...
- **Autonomie importante** et **recharges rapides**
- Moteurs silencieux, linéaires

## Inconvénients

- **Prix d'achat, durée de vie, poids** et **volumes** réservoir(s)..
  - *Poids de réservoirs : 100 kg pour 5 kg d'hydrogène...*
- **Faible rendement énergétique** (« *Well-to-wheel* »)
- **Problèmes d'environnement** (*à la fabrication*)
  - *Extraction de métaux rares, épuisement des ressources en minerai, difficultés de recyclage...*

# Problème du prix d'achat

- Le coût d'une PàC **renchérit considérablement** le coût des véhicules équipés (*aujourd'hui ≈ le double d'un véhicule à essence de même catégorie...*)
- Aujourd'hui ≈ 50% de ce coût est dû au **platine** nécessaire
- Des recherches sont en cours pour **diminuer la quantité de Pt** nécessaire, ou développer **d'autres technologies** de piles
- Dans le futur, des **économies d'échelle** sont attendues

# Durée de vie des véhicules à PàC

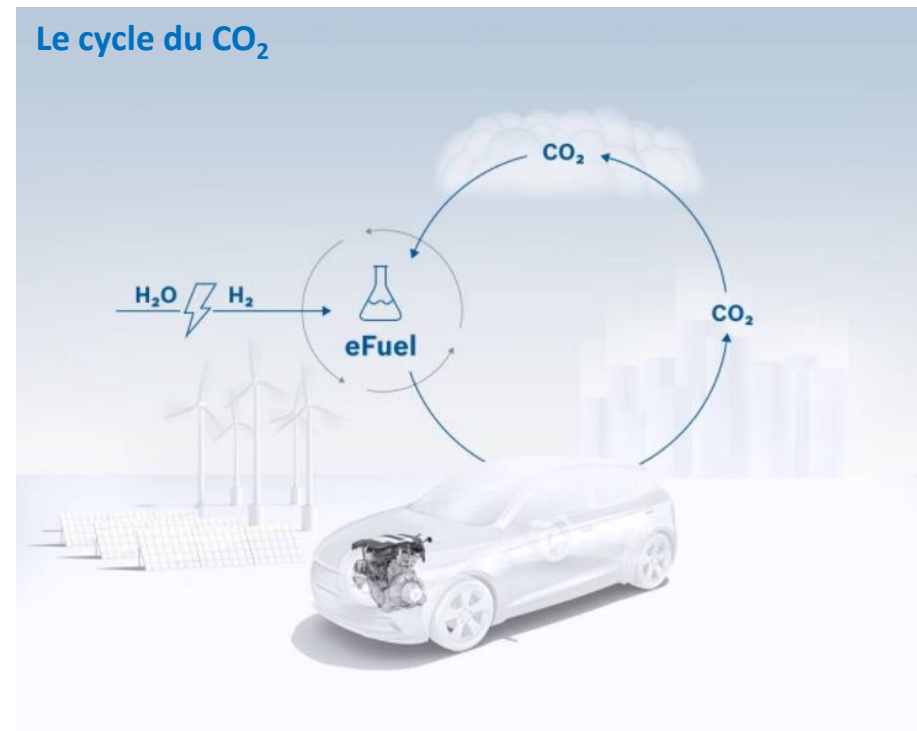
- Les constituants d'une PàC **se dégradent** rapidement, lors de pics de puissance par exemple (*démarrages, accélérations...*)
- Des **recherches** sont en cours pour analyser et améliorer ces dégradations
- L'utilisation de **batteries de réserve** absorbe les gros écarts de puissance, mais il faut aussi les inclure... Ces véhicules sont donc énergétiquement **hybrides**
- **Objectif** : durée de vie comparable à celle d'un moteur à essence (*environ 5000 heures*)

# Les carburants de synthèse

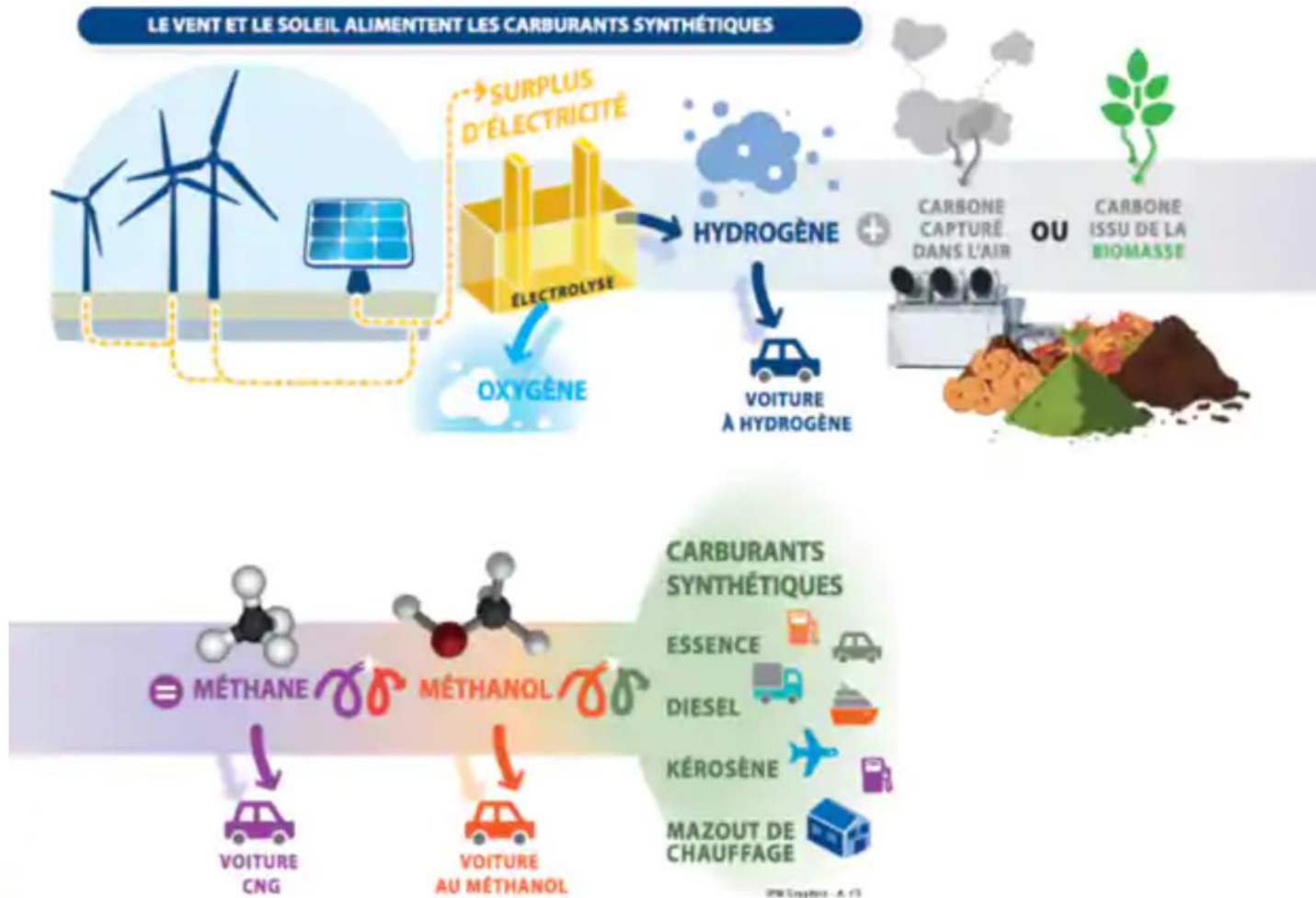
*(ou e-carburants)*

# Principes des carburants de synthèse

- Carburants fabriqués à partir d'**Hydrogène décarboné** et de **CO<sub>2</sub> extrait de l'atmosphère**
- Un processus type :  $2\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{e-essence, e-diésel, e-kérosène...}$
- Le CO<sub>2</sub> peut être extrait à partir de **l'air ambiant** (*voir slide Climeworks*)
- Le CO<sub>2</sub> rejeté lors de la **combustion** des e-carburants peut être **recyclé** en matière première pour les e-carburants 
- **Objection ?** Ce processus **déplace** le CO<sub>2</sub> mais ne l'annule pas **localement**
- **Réponse** : le réchauffement est un phénomène **global** !



# Carburants de synthèse



# Bilan carbone e-méthane

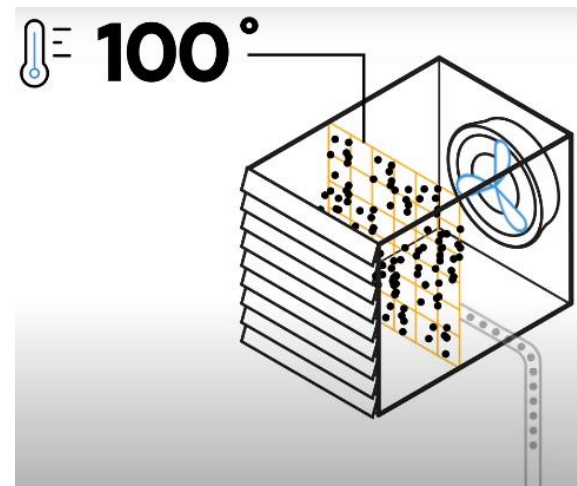
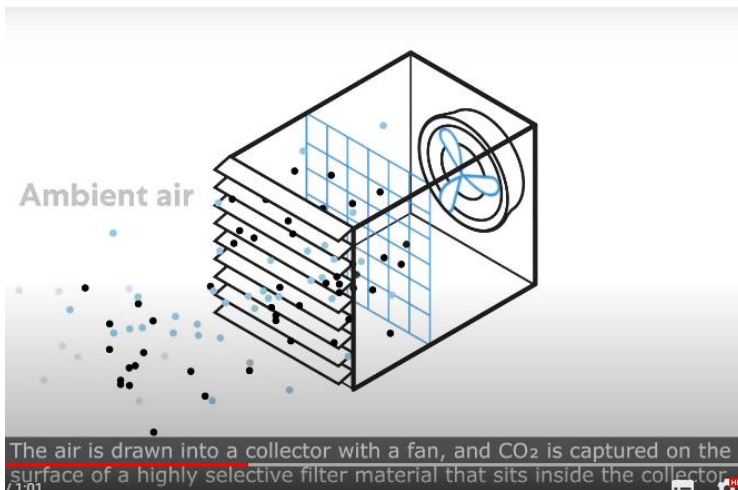
- $2\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CH}_4 = \text{e-méthane} (\rightarrow \text{e-carburant})$
- Combustion :  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{énergie}$
- ✓ La quantité de  $\text{CO}_2$  rejetée dans l'atmosphère est égale à celle qui en a été prélevée
- ✓ Bilan  $\text{CO}_2$  de cette combustion = 0 (*en théorie*)
- Rejets : pas de particules fines, moins de  $\text{NO}_x$
- ✓ Les e-carburants n'exigent aucune transformation des moteurs thermiques existants, mais les fait fonctionner indirectement « à l'hydrogène », sans aucun carburant fossile
- N.B. Ne pas confondre avec les bio-carburants

# Intérêt des carburants de synthèse

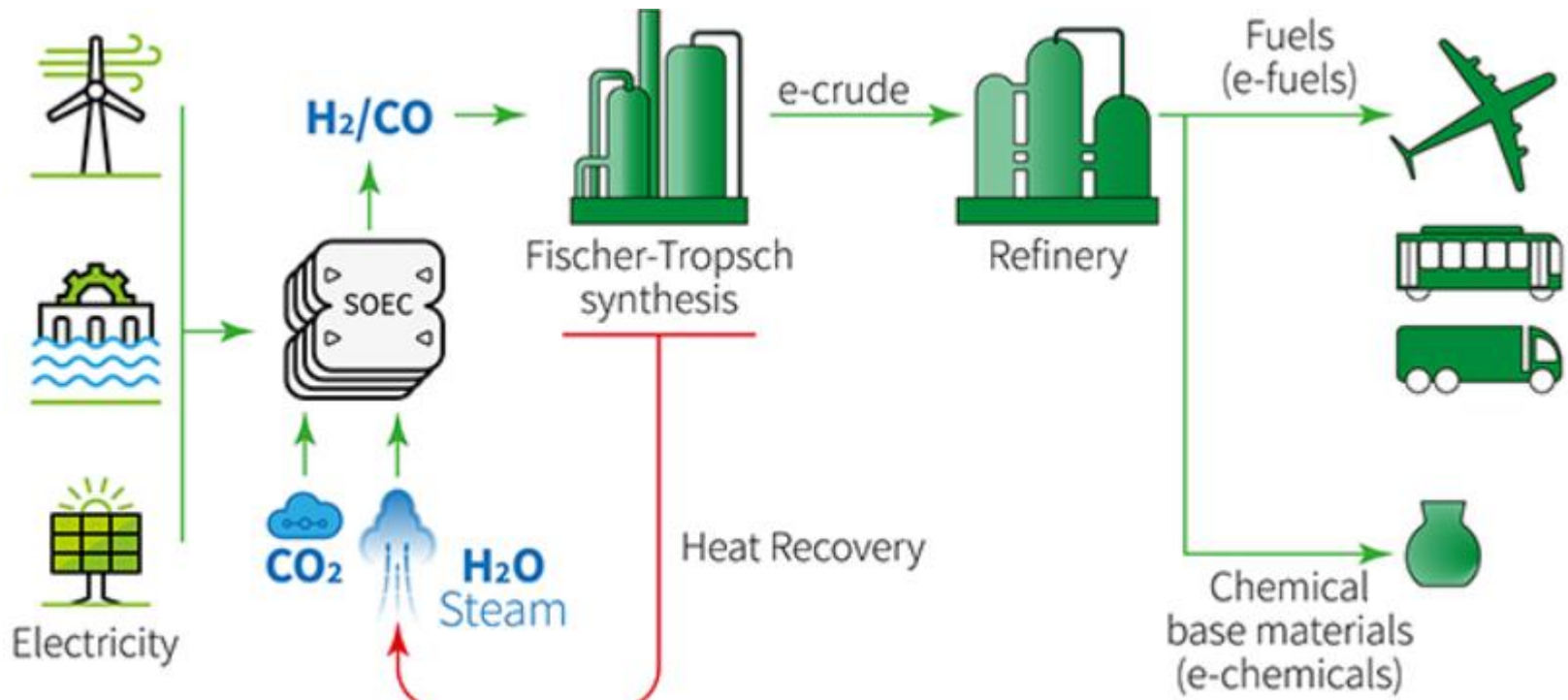
- Avantage : L'empreinte **carbone** des véhicules à carburants de synthèse est **très favorable**
- Avantage : les véhicules à combustion actuels peuvent les utiliser **directement**
- Avantage : Applicable **mieux que les PàC** aux **transports lourds** (*avions, bateaux...*) (*voir plus loin*)
- Inconvénient (temporaire ?) : **Le coût ?** (*Rôle des taxes ?*)

# Procédés industriels

# Climeworks : Extraction de CO<sub>2</sub>



# Paul Wurth (SMS GmbH) : Power-to-X

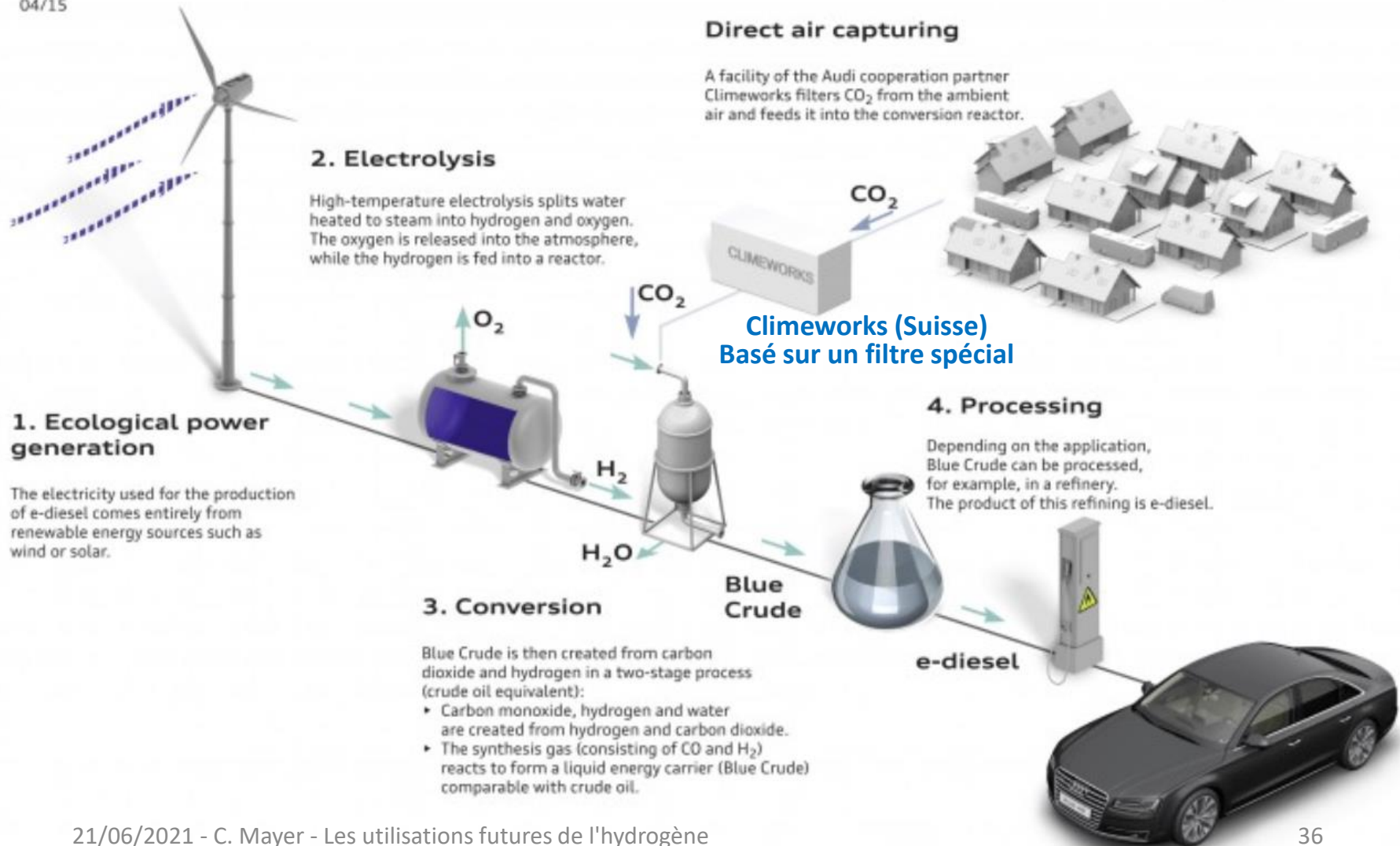


# Audi : production de e-diésel



## Audi e-diesel

04/15



# Production expérimentale e-gazoline pour Audi

- Produit par la start-up française **Global Bioenergies** en partenariat avec **Audi**
- Formulation chimique des deux étapes principales :
  1.  $4\text{H}_2 + 4\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_4\text{H}_8$  (**isobutène** gazeux) +  $4\text{O}_2$
  2.  $2\text{C}_4\text{H}_8 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_8\text{H}_{18}$  (**octane** → e-gazoline)
- Combustion **sans produire les polluants** de l'essence fossile (*rejets  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}_2$  recyclé*)
- **Bilan carbone** du processus global (*production, combustion et recyclage*) : comparable aux **véhicules électriques** à batterie

# L'opinion de Porsche (et autres...)

Le Dr. Frank Walliser, patron de la division Motorsport et GT de Porsche, estime que les moteurs thermiques carburant à l'**e-Fuel** se montreront aussi propres, si ce n'est plus, que les **alternatives électriques** :

- ✓ « Le carburant synthétique est **plus propre** que l'essence traditionnelle
- ✓ Nous nous attendons à une **réduction de CO<sub>2</sub> de 85 %** !
- ✓ D'un point de vue "du puits à la roue", [...] il s'agira du **même niveau de CO<sub>2</sub>** produit dans la fabrication et l'utilisation d'un **véhicule électrique**
- ✓ Cela n'a aucun impact sur les performances, il y a même **quelques chevaux en plus**, mais les émissions sont bien meilleures, nous voyons **moins de particules, moins de NOx** »

# Quel avenir pour les e-carburants ? / 1

- Ces carburants **concurrentent directement** les solutions hydrogène « électrique » (*PàC*) ou les turbines à hydrogène
  - *Exemples : véhicules terrestres, avions*
- Ils sont à la fois **renouvelables** et ont un cycle **sans empreinte carbone**
- Ils permettent de **réutiliser tels quels** les véhicules à carburants fossiles (*route, mer, air*), permettant :
  - De valoriser les investissements déjà faits et de sauver **l'énorme richesse** des gammes existantes
  - De profiter de leurs **avantages** (*autonomie, réseaux de distribution, savoir-faire...*) sans l'essentiel de leurs **inconvénients** (*empreinte carbone, rejets de polluants*)

# Quel avenir pour les e-carburants ? / 2

- Un problème à suivre est le **coût de production**, car ces projets sont en phase de prototypes ; le rôle des **taxes** à la pompe sera également déterminant (*Une taxe carbone sera-t-elle appliquée ?*)
- **L'Allemagne** et les pays d'**Europe du Nord** sont très actifs et en pointe sur tous ces projets. Prenons garde à ne pas nous laisser dépasser !
- En revanche une **interdiction totale** de **tous les véhicules à combustion** pourrait tout arrêter...
  - *Qu'elle soit rationnelle ou non...*

# Quel avenir pour les e-carburants ? / 3

- Selon une **nouvelle étude publiée par Bosch**, l'utilisation de carburants de synthèse produits à partir d'énergies renouvelables pourrait permettre d'économiser jusqu'à **2.8 gigatonnes de CO<sub>2</sub>** entre 2025 et 2050
- L'étude se base sur une montée en puissance progressive des carburants de synthèse qui, en complément de l'électrification des véhicules, viendraient se positionner comme **alternative au pétrole**
- Selon les auteurs de l'étude, ils pourraient représenter 1 % des combustibles fossiles en 2025, 10 % en 2030 et 40 % en 2040 avant de **totalemment les remplacer à l'horizon 2050**

# Comparatifs Véhicules

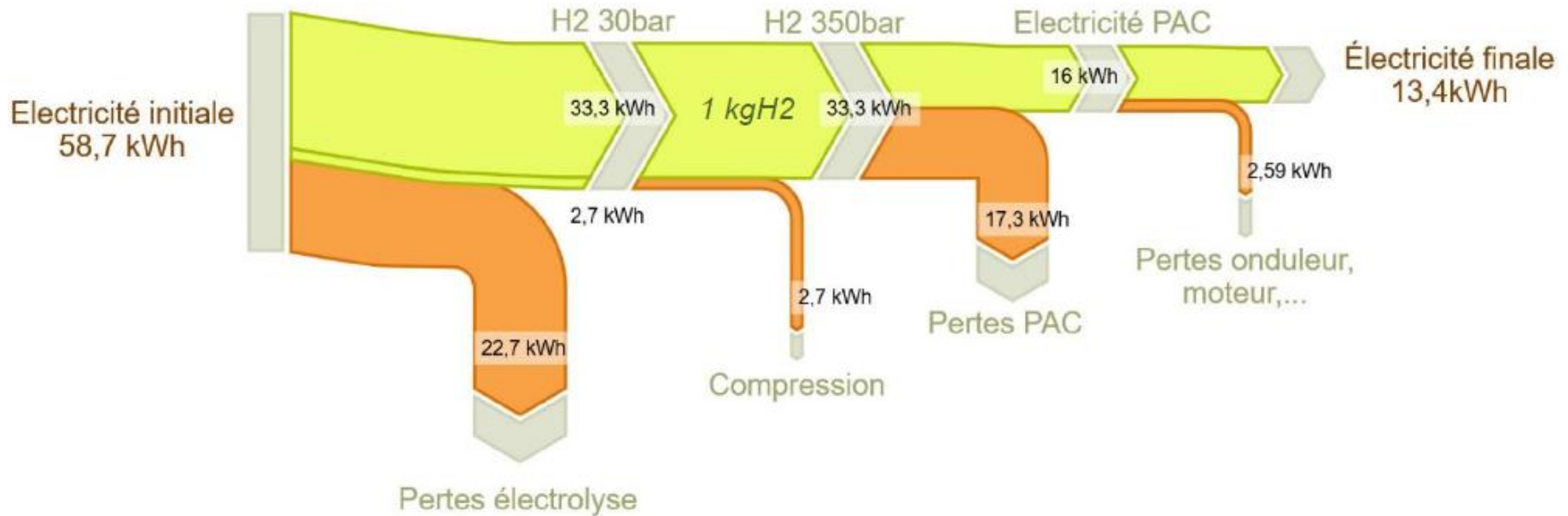
- *Thermiques (carburants fossiles)*
- *Thermiques (e-carburants)*
- *Electriques à batteries*
- *Electriques à pile à hydrogène*



# Comparatifs difficiles à établir

- *Données publiées incomplètes, hétérogènes ou dépassées*
- *Points de vue différents mais interdépendants (complexité)*
  - Gouvernements (*financements, fiscalité, normes*)
  - Industriels (*constructeurs, énergéticiens, équipementiers*)
  - Utilisateurs (*coûts, performances, autonomie, « pleins »...*)
  - Climatique (*empreintes carbone cycle de vie*)
  - Economique
  - Energétique
  - Matériaux (*coût, disponibilité, empreintes carbone*)
- *Futur en partie imprévisible (2030, 2050...)*
  - Infrastructures (*livraisons, stations-service...*)
  - Technologies (*rendements, coûts, matériaux, procédés, échelle...*)
  - Evolution des politiques (*nationale, européenne...*)
  - Concurrence internationale (*y compris nouveaux acteurs*)

# Rendement énergétique de la chaîne globale hydrogène électrique $\approx 23 \%$

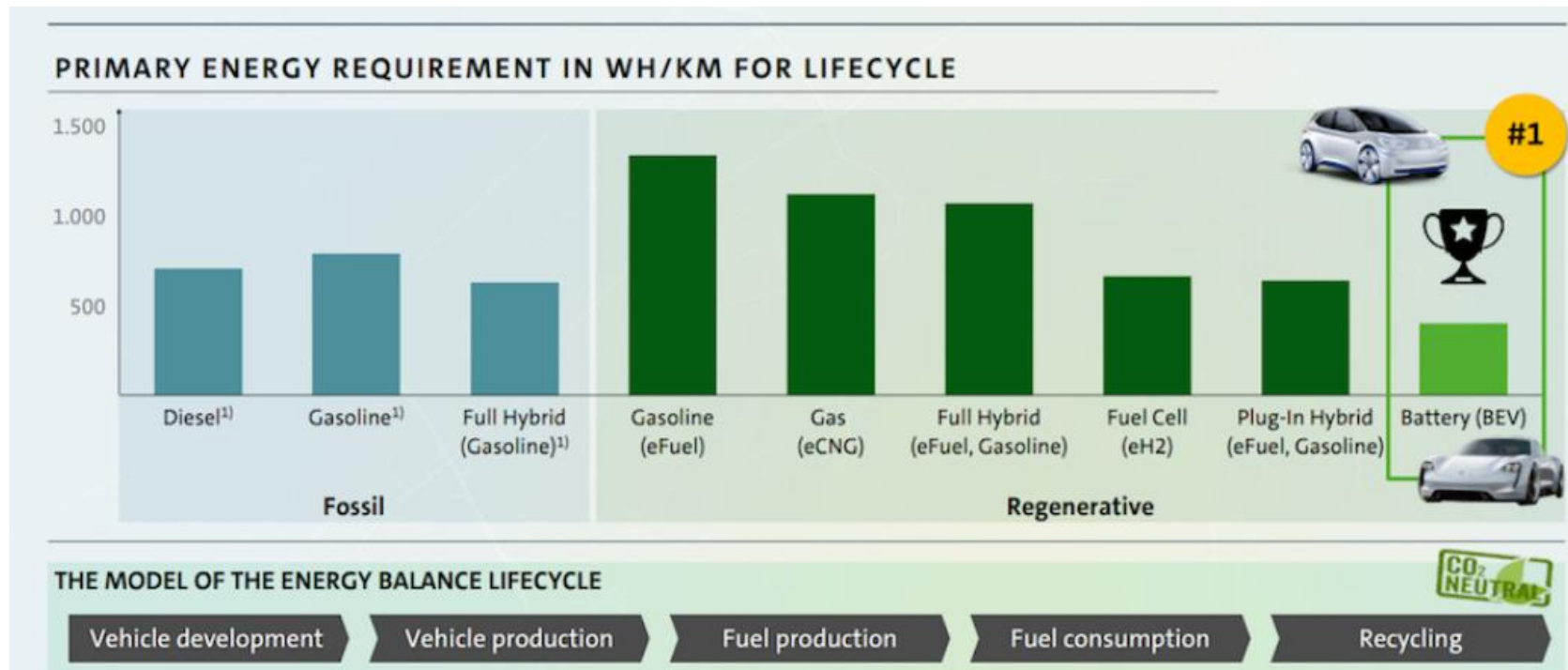


*Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire pour produire un kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique résultante*

- A comparer avec le rendement pour une **alimentation par batteries  $\approx 70 \%$**
- **NB** : ce rendement est **amélioré** si l'électricité initiale est un **surplus** ou si elle est produite sur place pour un usage exclusif (*bateaux à hydrogène + vent + solaire*)

# La décision de Volkswagen

- Le 12 mars 2019, le PDG de VW, Herbert Diess, annonce qu'il **renonce au véhicule à hydrogène** en faveur du véhicule électrique, en se basant sur un meilleur **bilan carbone global (?)** sur un **cycle de vie de 200 000 km**, fabrication comprise
- Il se base sur un comparatif des **consommations d'énergie** nécessaire à ce cycle de vie, pour différents types de véhicules, qu'il a synthétisé dans la tableau suivant :



# Déclaration du PDG de TOTAL

- « *Quand on fait les calculs économiques et que l'on regarde la filière hydrogène, on a du mal à se convaincre qu'elle a un horizon à dix ans. Cela coûte encore très cher. La batterie électrique a aujourd'hui un temps d'avance. Toyota, qui était complètement allé sur l'hydrogène, est d'ailleurs revenu sur l'électrique* »
- Selon lui, la France n'a pas les moyens de financer deux réseaux de charge, électrique et hydrogène.

# Ces arguments sont-ils convaincants ?

- Certains sont basés sur un meilleur **bilan énergétique** des véhicules à batterie : le rendement « **well to wheel** », **70 % contre 23 % !** → en faveur de l'électrique
- Exact, mais le bilan **énergétique** n'est pas le bilan **carbone** ! La fabrication des batteries émet **plus de CO2** que celle des piles à combustible... (*graphique plus loin*) → en faveur de l'hydrogène
- Il existe des **arguments moyen-terme** qui ne peuvent être ignoré du fait de l' « **urgence climatique** » : l'avance technologique pour les batteries, la **durée de mise en place** de la solution hydrogène, les investissements déjà réalisés sur les batteries et les **coûts supplémentaires** nécessaires → en faveur de l'électrique

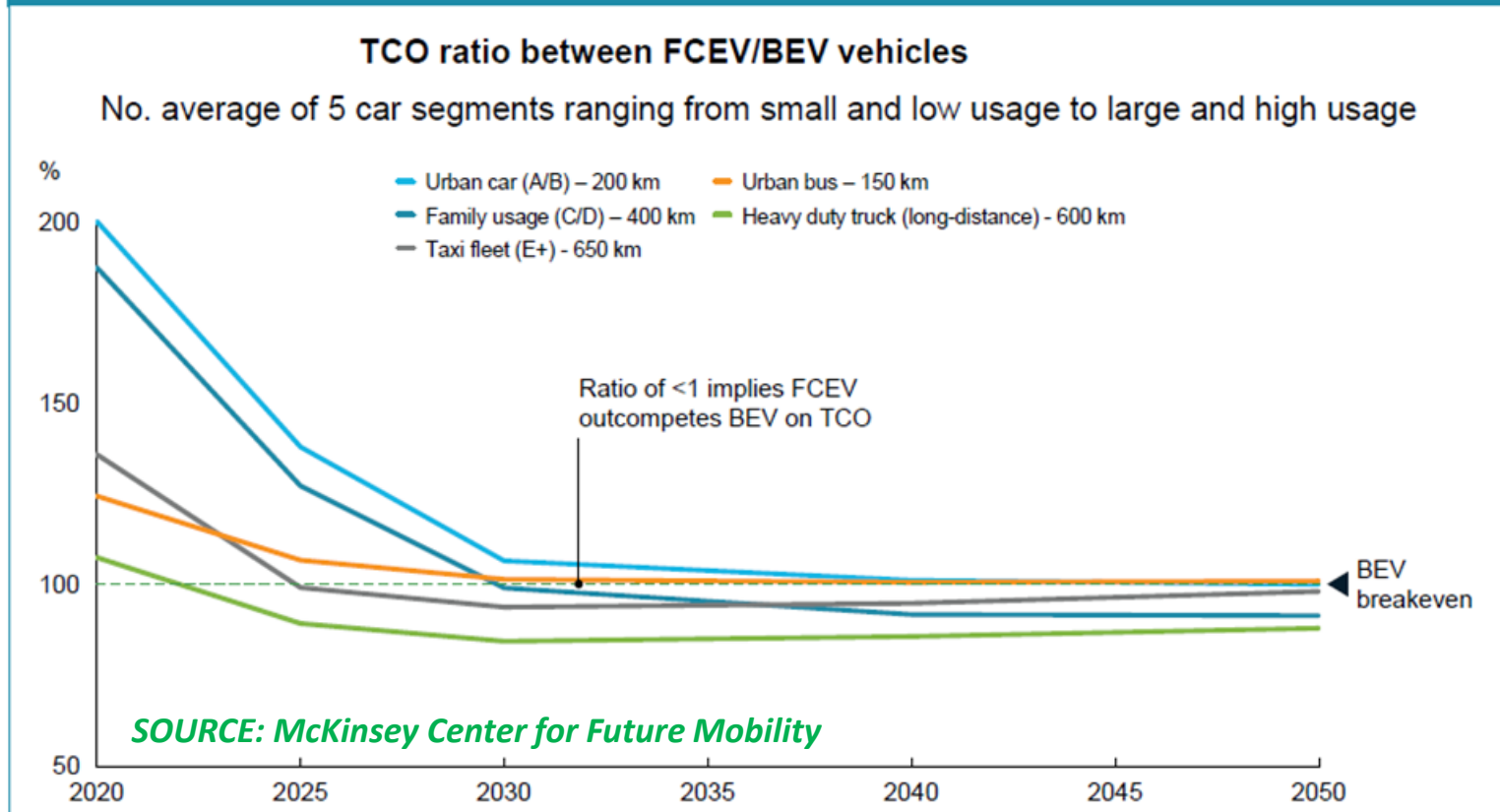
# Un inconvénient majeur des véhicules à batteries : le temps de recharge

- Typiquement : une à plusieurs heures...
- Une alternative : l'échange standard de batteries ?
- Cette solution séduisante (*< 5 mn*) a été abandonnée
  1. Refus d'échanger une batterie *neuve* contre une *usagée*
  2. Besoin de *standardisation* trop difficile à mettre en place
  3. Le *coût* d'une station d'échange automatisée ( $\approx 1\text{M€}$ )
- Ces inconvénients tombent pour des *flottes de véhicules* de même type (*ex : taxis...*)
- Pour les véhicules particuliers, il ne reste que la solution de stations de recharges « rapides », mais en fait... *lentes* !
- *Mais qu'en sera-t-il demain ?... (v. NIO en Chine)*

# Total Cost of Ownership (TCO)

## *FCEV (PàC) vs. BEV (batteries)*

Exhibit 17 | TCO of road transport applications



**NOTES :** Les FCEV sont généralement meilleurs que les BEV dans les cas d'utilisation qui requièrent une longue autonomie en raison de :

- un coût inférieur du véhicule en raison d'une batterie plus petite.
- des temps de ravitaillement courts rendus possibles par l'hydrogène.

Un temps de recharge plus long peut impliquer que les flottes doivent acheter un plus grand nombre de véhicules pour fournir le même service. Pour les flottes qui développent une infrastructure, la FC offre des économies d'échelle supplémentaires par rapport aux BEV, dont l'échelle est plus linéaire.

# Comparaison des empreintes carbone des diverses technologies de transports

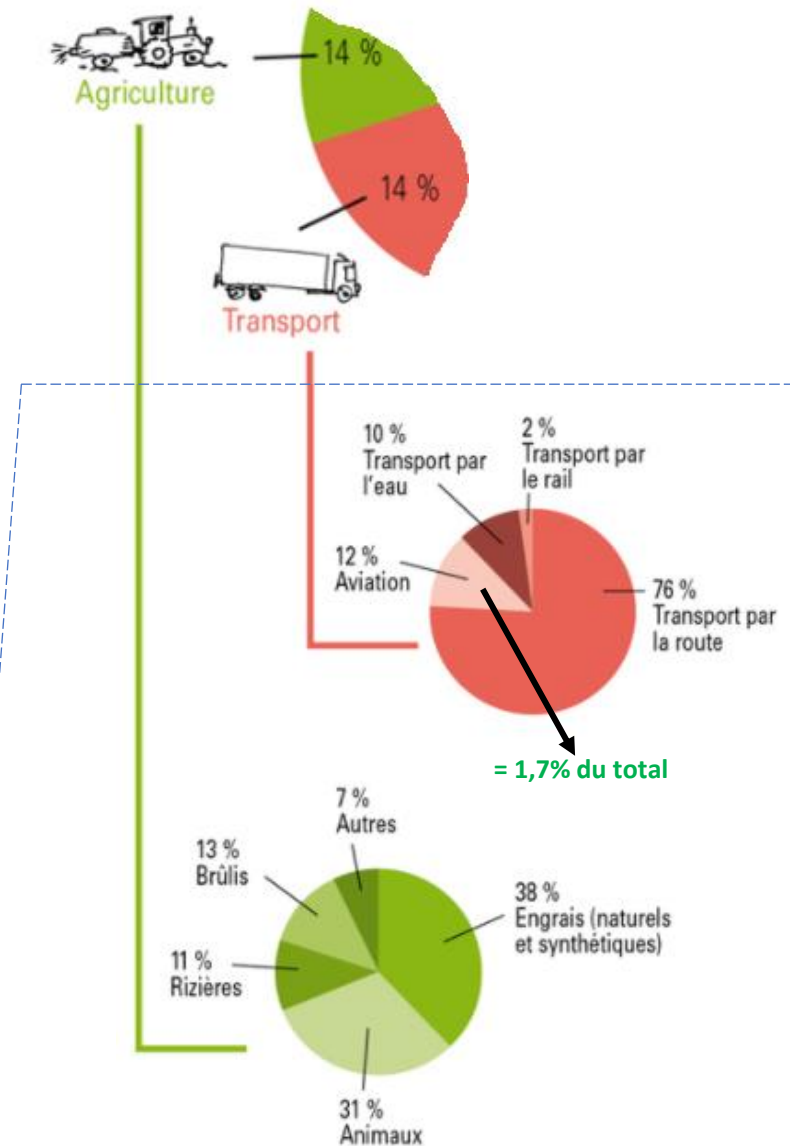
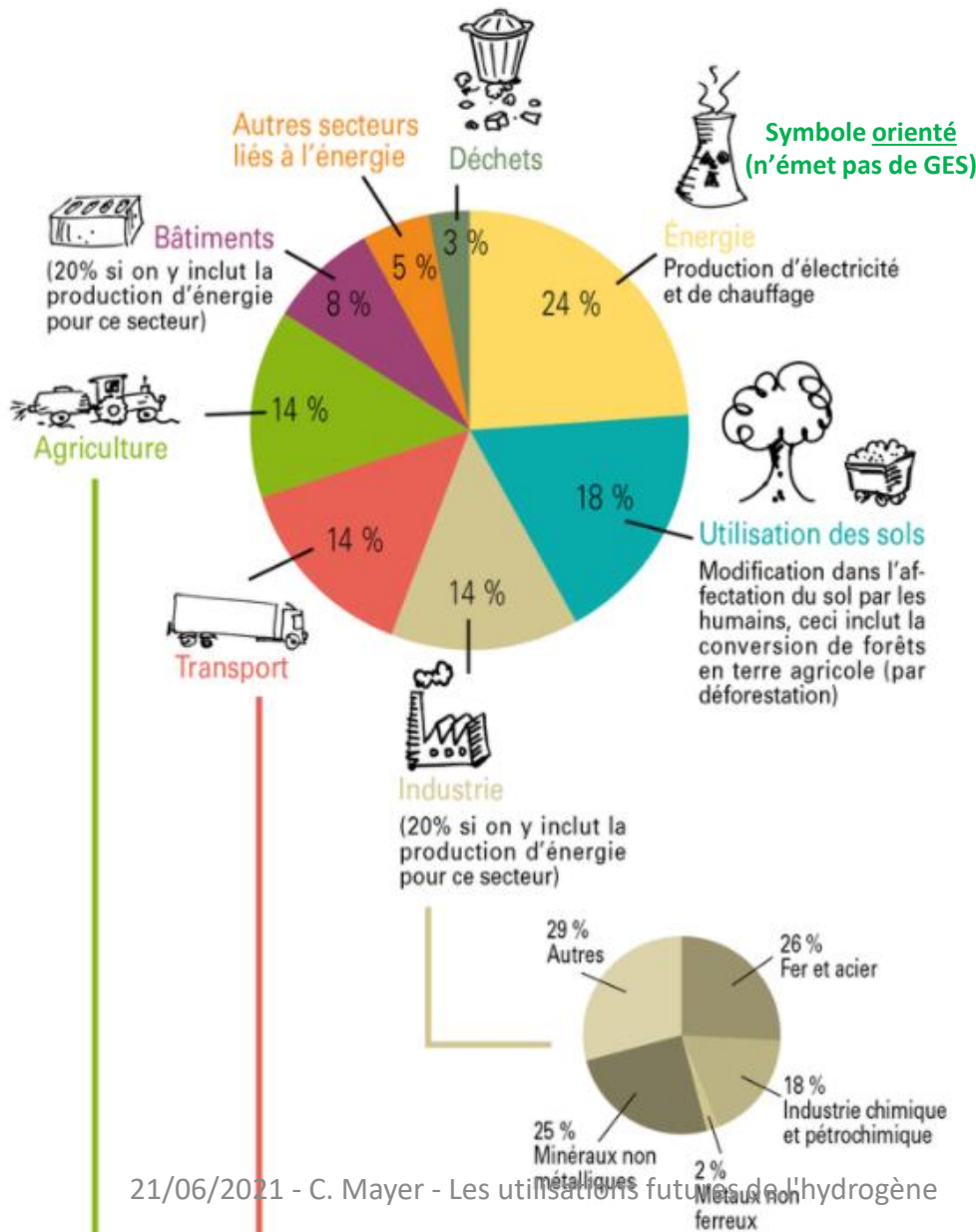
*Combustion fossile, combustion bio-carburants, combustion carburants de synthèse, véhicule électriques à batteries, véhicules électriques à hydrogène*

**WTW = Well-to-wheel = cycle de vie intégral**

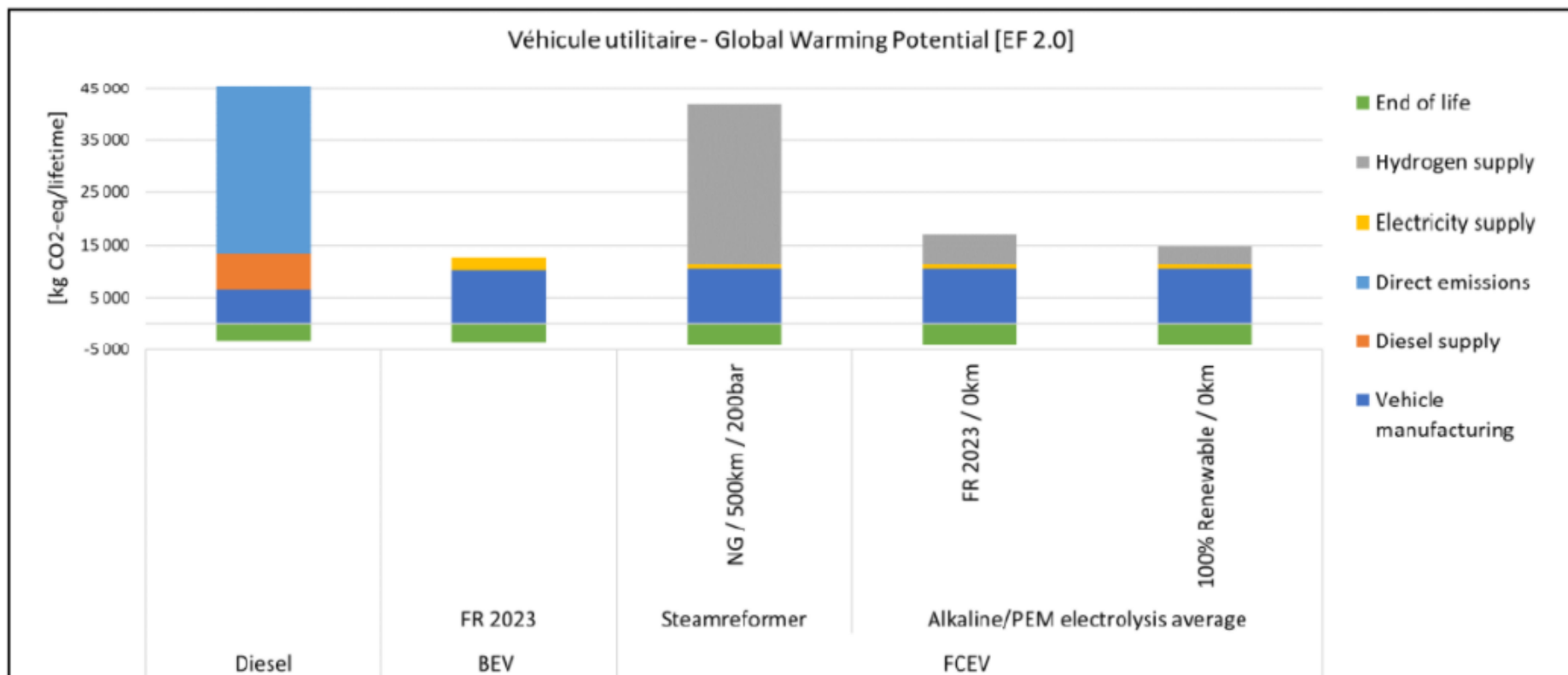
# Une confusion fréquente

- Dans nombre d'études d'empreintes carbone, on exige que l'hydrogène soit fabriqué à **zéro carbone**, « **donc (??)** » avec des **énergies renouvelables** (*ex : ADEME*)
- Or c'est exclure implicitement **l'énergie nucléaire**, pourtant décarbonée, mais non renouvelable : on ne la mentionne même pas...
- Le caractère implicite de cette exclusion fait qu'elle **n'attire pas l'attention**, mais pourtant...
- Cela **fausse ces études**, d'autant plus que toutes les projections montrent que l'apport de l'électricité nucléaire sera **incontournable** pour une production **suffisante** d'hydrogène décarboné (*voir calculs à la fin*)
- Une hypothèse de cette importance devrait être **explicitée**, et ses conséquences **prises en compte et calculées**

# Emissions de GES en 2000 par source



# Equivalent carbone de cycles de vie (véhicules diésel, batteries, reformage, pile à combustible)



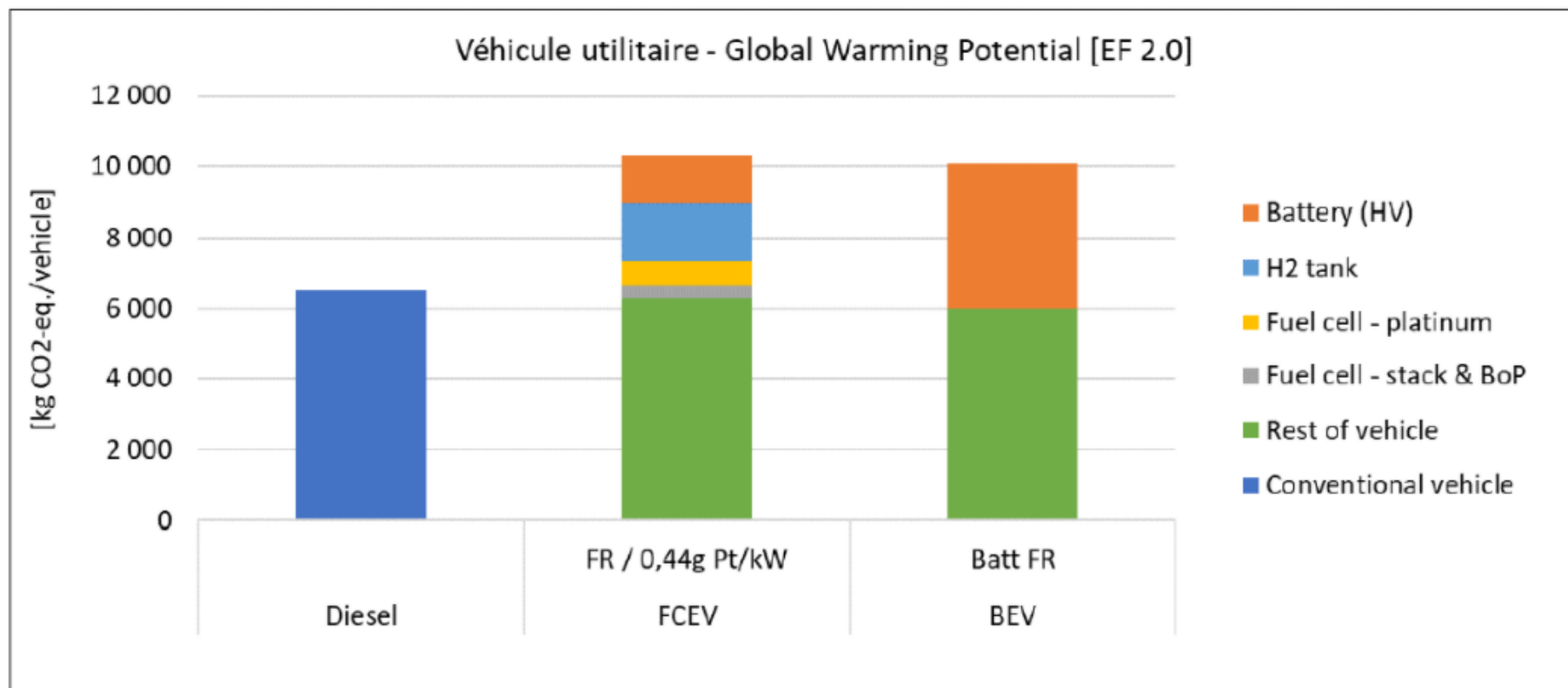
BEV (FR2023) : Battery Electric Vehicle, ou véhicule électrique à batterie alimenté en électricité du mix français 2023.

FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle, ou véhicule électrique hydrogène.

Steamreformer : vaporeformage, avec 100% de gaz naturel

# Fabrication des véhicules utilitaires

## *Empreintes GES*



# Véhicules terrestres décarbonés

## *Tableau de synthèse*

| Critères<br>Types de véhicules  | Electrique<br>Hydrogène | Electrique<br>Batteries | Combustion<br>e-carburants |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Coût achat                      | Std + 100 % ?           | Std + 25 à 35 %         | Standard (déf)             |
| Coût d'un « plein » /100 km     | ≈ 8 €                   | ≈ 2 € (tarif nuit)      | ?? (fossile:12 €)          |
| Surtaxes sur un plein           | Aucune                  | Aucune                  | TIPP ?                     |
| Poids                           | Lourd ++                | Lourd                   | Standard (déf)             |
| Réseau de stations-service      | A créer                 | A développer            | A maturité                 |
| Autonomie /1 plein              | Bonne                   | Faible                  | Bonne                      |
| Durée d'un plein                | Rapide                  | En heures !!!           | Rapide                     |
| Récup investissements passés    | Non                     | Partiellement           | Oui                        |
| Rejet particules fines          | Non                     | Non                     | Non                        |
| Rejets azotés NOx               | Non                     | Non                     | Mineurs                    |
| Pb Appro matières premières ?   | Platine...              | Lithium...              | RAS                        |
| Empreinte carbone / fabrication | Std + 62 %              | Std + 60 %              | Standard (déf)             |

# Les transports lourds

*Trains, bateaux, avions...*

# L'avion à hydrogène

# Les 3 prototypes d'Airbus (→ 2050 ?)



# Les 3 prototypes d'Airbus

## Introducing Airbus ZEROe

### Turboprop



**<100**  
Passengers



Hydrogen  
Hybrid Turboprop  
Engines (x 2)

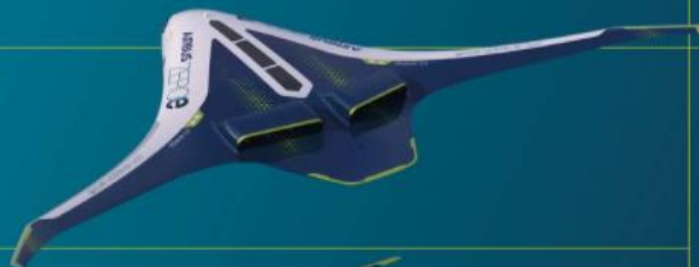


**1,000+nm**  
Range



Liquid Hydrogen  
Storage & Distribution  
System

### Blended-Wing Body



**<200**  
Passengers



Hydrogen  
Hybrid Turbofan  
Engines (x 2)



**2,000+nm**  
Range



Liquid Hydrogen  
Storage & Distribution  
System

### Turbofan



# Tribune des patrons d'Airbus, ADP et Air France

- « Désormais, nous sommes convaincus de pouvoir atteindre la **neutralité carbone** pour les vols intra-européens au milieu du siècle
- Cet objectif appelle une action coordonnée de **l'ensemble des acteurs** pour un transport aérien dynamique
  - Décarboné
  - Créateur d'emplois
  - Avec le soutien des pouvoirs publics
- Basé sur les **trois piliers essentiels** de notre feuille de route zéro carbone :
  - Le renouvellement des flottes
  - Les carburants alternatifs durables
  - Les ruptures technologiques comme celle de **l'avion propulsé par hydrogène**, qui requiert d'importants travaux d'innovation
- **L'avion à hydrogène est une formidable opportunité pour les économies française et européenne »**

# Avion à turbines hydrogène *de nombreux défis technologiques à relever*

## **Le pari d'Airbus est ambitieux**

- L'avionneur **mise gros** sur l'hydrogène pour ses nouveaux concepts d'avion « propre »
- Technologie, sécurité, acceptation sociale, contraintes opérationnelles, efficacité sur le plan environnemental... **Le chemin est encore long**

## **Technologies retenues**

- **Turbines à gaz** (à hydrogène) pour la propulsion
- **Piles à combustible** pour la consommation à bord

# Une alternative

-----

## *L'avion à e-kérosène*

# Le vol KLM avec du e-kérosène « vert »



- Effectué en janvier **2021** sur un Boeing 737-800
- Vol Amsterdam – Madrid, avec passagers, une **première mondiale**
- Basé sur du **e-kérosène** mélangé avec d'autres carburants décarbonés (*production de e-kérosène pur encore insuffisante en 2021...*)
- Carburant produit par une usine **Shell** à **Amsterdam**
- Considéré par KLM et le **gouvernement néerlandais** comme un **axe stratégique** pour **l'avion décarboné du futur**

# L'approche KEROGREEN

- Kerogreen est un projet européen de R&D à horizon 2022 pour définir un processus de production de kérosène « vert »
  - Partenaires : Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Norvège
- Plutôt que faire fonctionner un avion directement par des turbines à hydrogène (*Airbus*), le faire fonctionner par un kérosène de synthèse
- Comme les autres e-carburants, ce kérosène sera fabriqué à partir d'hydrogène vert (ou jaune !) et de CO<sub>2</sub> extrait de l'atmosphère
- Il sera utilisable tel quel par les avions actuels tout en présentant une empreinte carbone théorique de fonctionnement nulle (*cycle du CO<sub>2</sub>*)
- Inutile de stocker des réservoirs d'hydrogène à bord, ce qui améliore considérablement l'autonomie attendue

# Norsk e-Fuel

## *Un consortium norvégien pour produire des e-carburants pour l'aviation (2020)*

- Partenaires : *Sunfire, Climeworks, Paul Wurth SA, Valinor (Norsk Vind)*
- *Norsk e-Fuel* utilisera les technologies de *Sunfire* et *Climeworks* pour construire des usines qui produiront du **gaz de synthèse** à partir de l'électricité renouvelable, de l'eau et du **CO<sub>2</sub> capturé dans l'air ambiant**
- Ce gaz de synthèse sera utilisé pour la production de **carburants renouvelables** par un traitement et un **raffinage ultérieurs**
- La première installation de ce type devrait être construite dans le **parc industriel Heroya** à Porsgrunn (Norvège), pour une mise en service prévue en **2023**
- Elle aura la capacité de produire **10 millions de litres** de carburant renouvelable par an. Il est prévu de l'étendre à **100 millions de litres** par an d'ici **2026**

# Comparatif aérien décarboné

- 2 solutions H<sub>2</sub> sont envisageables
  - Turbines à Hydrogène (*Airbus*)
  - e-kérosène (*KLM, sur avion classique*)
- La première solution, exigeant de **lourds et volumineux** réservoirs H<sub>2</sub> embarqués, semble a priori plus limitative et **restreint la capacité et le rayon d'action** des avions
- Elle exige aussi la **très coûteuse** construction **d'avions spécifiques**
- La solution d'Airbus semble donc **techniquement plus limitée** (*mais elle doit bien correspondre à ses intérêts...?*)
- En revanche, KLM se dirige vers la solution e-kérosène, **disponible à court terme**, avec l'appui « **stratégique** » du gouvernement

# Le navire à hydrogène

# Pollution des navires actuels

- Les navires à moteurs thermiques consomment du **fuel lourd**
- Ce carburant émet du **CO<sub>2</sub>**, mais sa pollution la plus significative est due au **soufre** et aux **oxydes nitrés NOx**
- Les porte-conteneurs et supertankers géants émettent 10% de le l'émission atmosphérique mondiale de soufre et 30 % pour les NOx (*nanoparticules*)
- Les normes **les plus urgentes** concernent donc ces polluants (*basse teneur en soufre...*)
- Concernant ces polluants **et le CO<sub>2</sub>**, trois solutions sont envisagées pour le futur des navires **lourds** (*prototypes en cours*)
  - Le **bateau à hydrogène** (*avec éventuelle production à bord*)
  - Les **e-carburants** spécialisés
  - Le **bateau à voile** (*plus limité – nécessite un moteur d'appoint*)
- Ces objectifs exigent de **longs et coûteux développements**

# Voiles et hydrogène du futur...



« Energy Observer » : Solaire + Eolien + Aile-T + PàC



« Silenseas » (STX France 2018)



Ferry Oslo-Copenhagen  
Norvège / Danemark

→ 2027 - 1800 passagers - 380 voitures - PàC : 23 MW

# Le cas des navires géants

## *Porte-conteneurs, supertankers, croisières...*



Premier porte-conteneurs reconverti au gaz naturel liquéfié, le « Wes Amelie » sera aussi le **premier navire** à utiliser du gaz naturel synthétique produit à partir de **CO2 et d'hydrogène** (Constr. 2011, reconverti en 2017)

# Les solutions techniques applicables

- Pour les navires géants, les piles à combustibles ne suffisent pas (*actuellement*) pour la **propulsion**
- Il reste 2 solutions « vertes »
  - Les **turbines à gaz** à hydrogène « vert »
  - Les **carburants synthétiques** à base d'hydrogène « vert »
- Cependant la première solution, à base d'hydrogène embarqué, **alourdit le navire** (*le poids des réservoirs d'hydrogène*) et augmente sa **trainée** (*mais de combien ?*)
  - NB : On l'a vu, cet inconvénient « pèse » encore plus pour les **avions**
- Les PàC peuvent être utilisées pour la production d'électricité à bord

# Le train à hydrogène



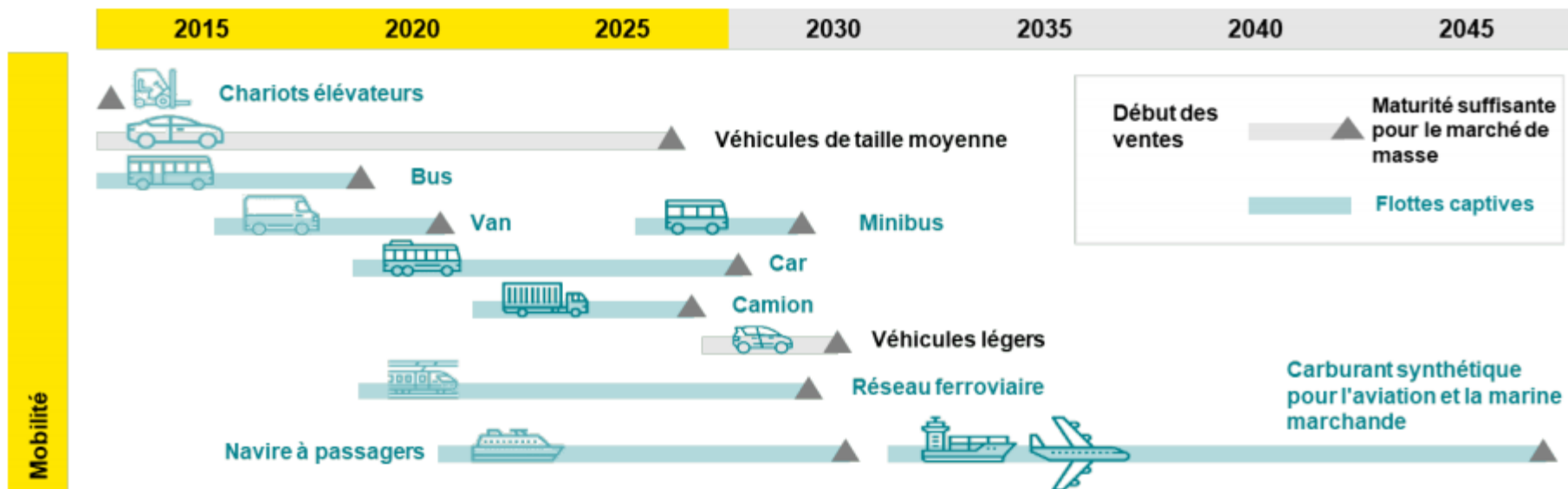
**ALSTOM**  
• mobility by nature •

- L'avenir du remplacement des Diesel sur réseaux non électrifiés par des trains électriques à PàC
- Alstom Coradia iLint : premiers au monde
- Possibilité d'alimentation hybride (*caténaires, batteries*)

# Alstom Coradia iLint

- Les **Alstom Coradia iLint** sont des **trains régionaux** ayant pour ambition de remplacer les **trains Diesel** (*25 % du parc ferroviaire européen*)
- Deux réservoirs d'hydrogène situés sur le toit + PàC + caténaires
- **Caractéristiques** équivalentes à un train régional standard :
  - Autonomie : 1 000 km
  - 300 passagers
  - Vitesse max : 140 km/h
- « **Totalement silencieux** » (?)
- Ils ne rejettent que de la vapeur d'eau et sont donc « **100% écologiques** » (?)
- Opérationnels en Allemagne, commandés par SNCF pour 2022

# Rappel : Time-Line pour les mobilités



*Horizon de déploiement commercial de l'hydrogène pour différentes applications de mobilité*

Source : AFHYPAC

# Comment produire tout cet hydrogène décarboné ?

Fossile + CCUS ?

Production électrique fixe ou intermittente ?

Nécessité de développer le nucléaire ?

# Europe : besoins futurs en Hydrogène

- Besoins en hydrogène estimés à :

- 30 Mt H<sub>2</sub> en 2030 et 100 Mt H<sub>2</sub> en 2050
- Source : Etude de l'IFP « Hydrogen4EU »
- Toutes applications confondues (*dont 50% : mobilités*)

## 1. Production à partir d'énergie fossile avec capture CCUS

- Voir exposé précédent (*GL*)
- Solution actuellement **non rentable** due au surcoût **non compensé** de la capture carbone
- Devra être encouragée par les pouvoirs publics, selon leur stratégie

## 2. Production à partir d'électricité non carbonée

2.1. Electricité **intermittente non utilisée ?** (*slide suivante*)

2.2. Electricité **fixe décarbonée : nucléaire ?**

# Europe : Besoins en électricité pour produire l'hydrogène décarboné nécessaire

- Rappel besoins en hydrogène
  - 30 Mt H<sub>2</sub> en 2030 et 100 Mt H<sub>2</sub> en 2050
- Besoin correspondants en puissance électrique :
  - En moyenne 55 kWh pour produire 1 kg H<sub>2</sub>
  - Total 2030 :  $55 \times 30 \cdot 10^9 = 1650 \cdot 10^9$  kWh = 1650 TWh
  - Total 2050 :  $55 \times 10^{11} = 55 \cdot 10^{11}$  kWh = 5500 TWh
- Production électrique intermittente Europe 2020 :
  - Production totale Europe 2020 = 1050 TWh (*≈ 210 réacteurs N*)
  - Certes, cette production va augmenter...
  - Mais seule une petite fraction sera *inutilisée*, hors réseau, et donc *disponible* pour produire localement de l'hydrogène vert...
- Cette production intermittente est donc *loin* d'avoir le *potentiel suffisant* pour produire l'hydrogène nécessaire

# L'énergie intermittente « en surplus » ?

## Elle a bon dos !

- On l'invoque à chaque fois qu'on parle de produire de l'hydrogène vert, pour chaque application, comme si c'était une ressource inépuisable... (slides précédentes)
- Mais lorsqu'on ajoute toutes les applications qui projettent d'y avoir recours...
- LE COMPTE N'Y EST PAS !!! (et de loin...)
- Eoliennes et solaire n'ont pas le potentiel suffisant
- Alors il faut choisir...



- Soit on RENONCE aux applications hydrogène décarboné
- Soit on DEVELOPPE LE NUCLEAIRE !

# Perspectives d'innovations techniques

- ✓ Fourniture d'hydrogène « solide »
- ✓ Amélioration des piles à combustible
  - Matériaux, poids, coût, puissance, durée de vie
- ✓ Perfectionnement des réservoirs mobiles
  - Sécurité, poids, volume
- ✓ Développement des carburants synthétiques
  - Coût de fabrication, autorisations, taxes...
- ✓ Turbines à gaz 100% hydrogène