



Fédération Française de Sociétés Scientifiques
SEE · SFO · SFP · SFV



Les perspectives de sauts technologiques dans la filière hydrogène



Annie Le Gal La Salle

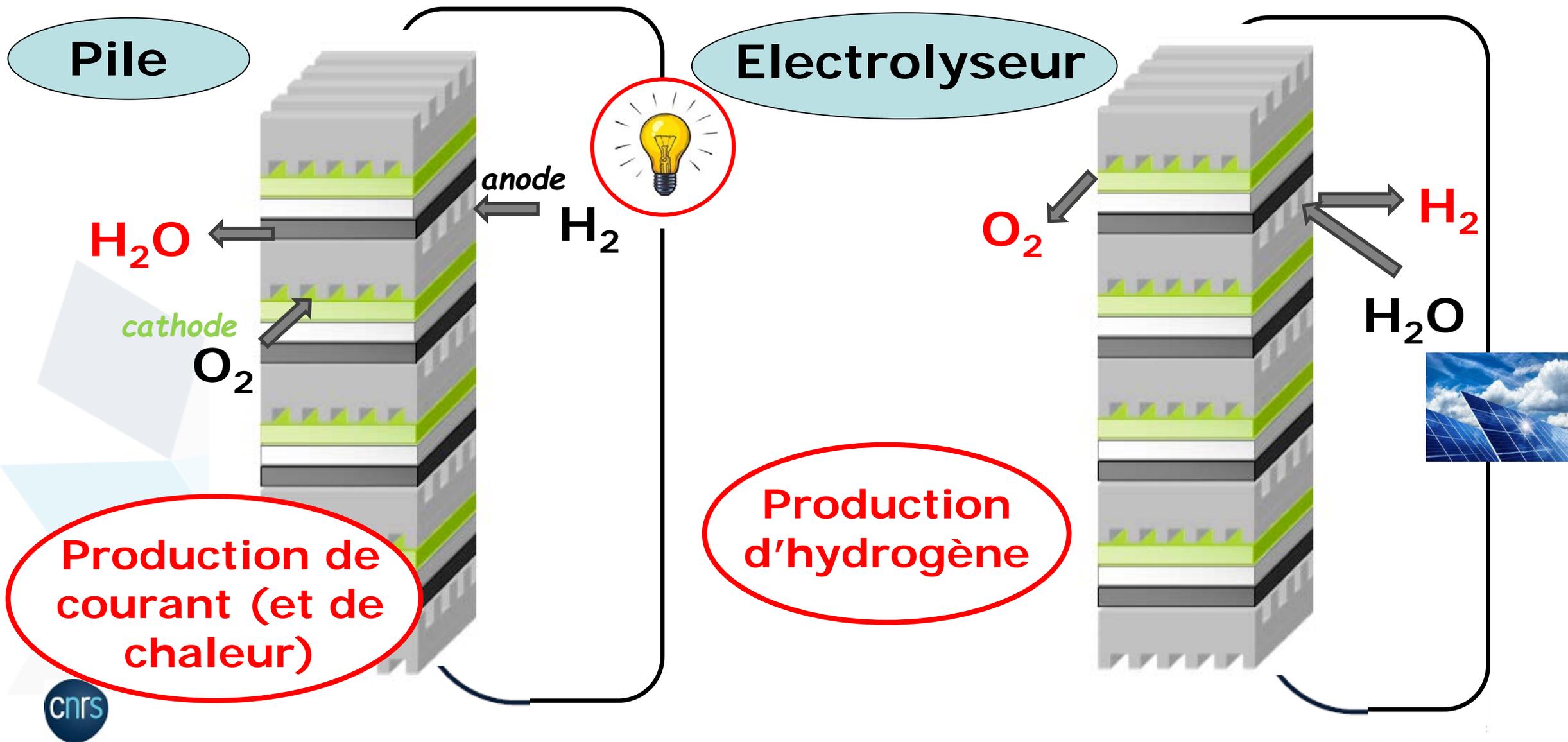
**Institut des Matériaux Jean Rouxel
Nantes – France
Equipe Stockage et Transformation
Electrochimiques de l'Energie:
Piles à combustibles &
Electrolyseurs**



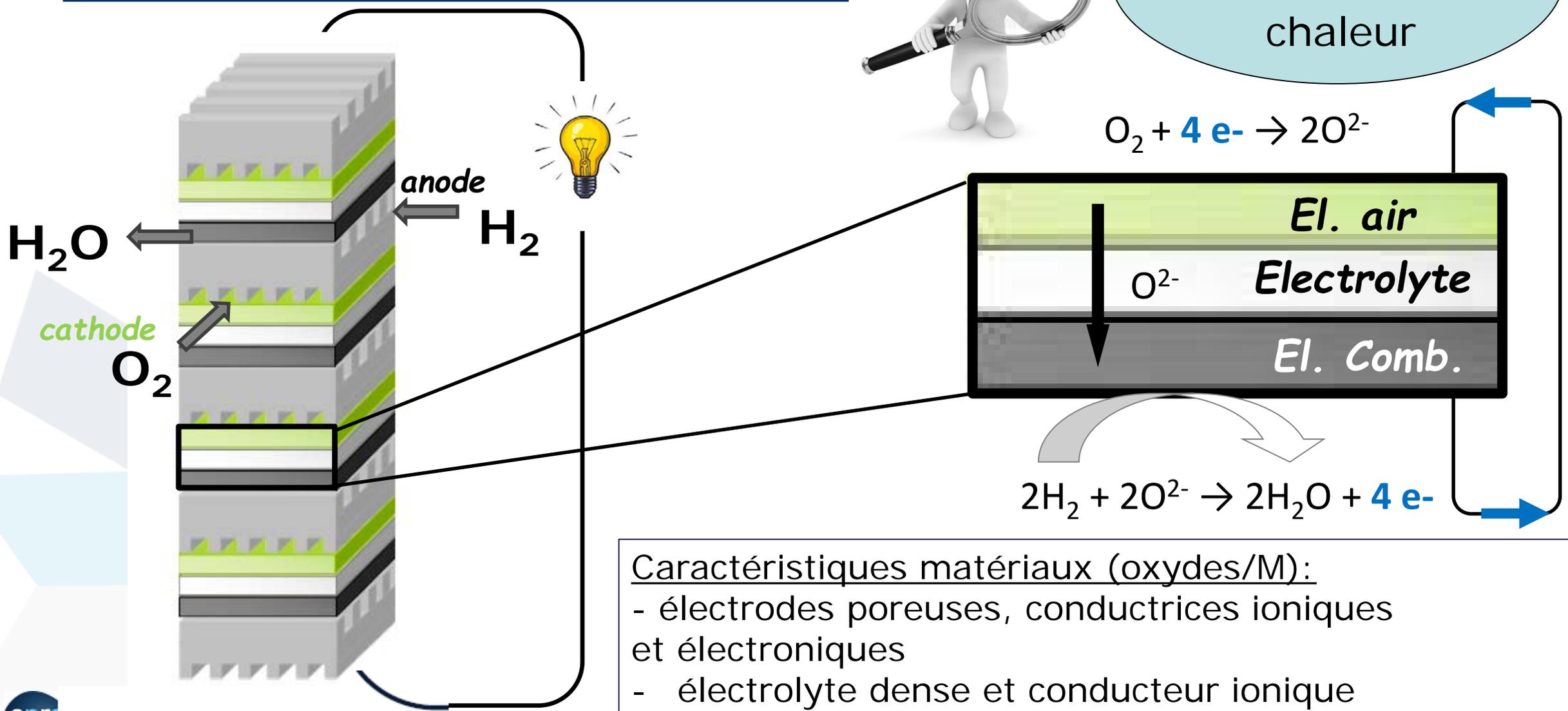
Le plan...

- ❖ Introduction : La filière hydrogène, pourquoi la développer?
- ❖ 1. La production
- ❖ 2. Le stockage
- ❖ 3. La conversion
- ❖ Conclusion

Qu'est-ce qu'une Pile à Combustible? Un électrolyseur?



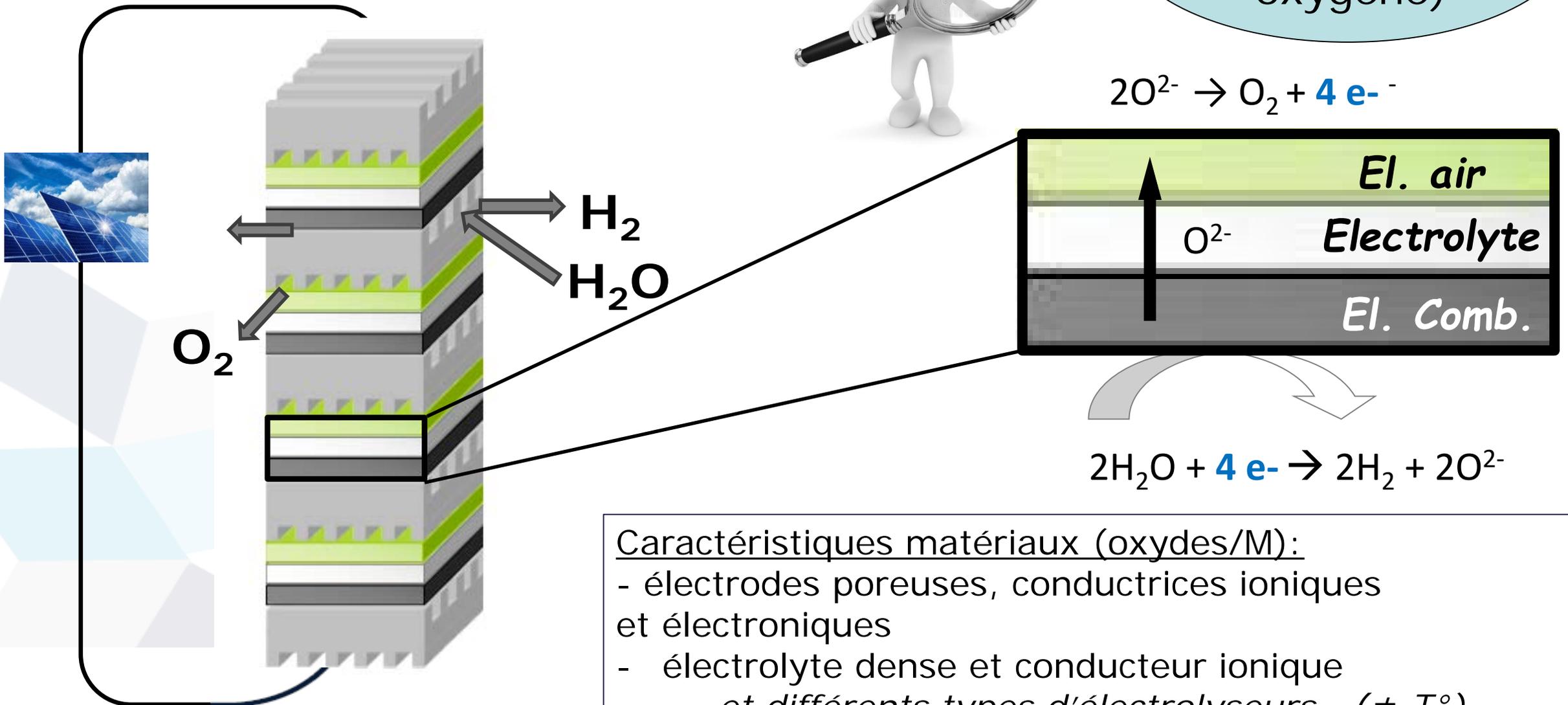
La cellule, de plus près...



Caractéristiques matériaux (oxydes/M):

- électrodes poreuses, conductrices ioniques et électroniques
 - électrolyte dense et conducteur ionique
- ... et différents types de piles... ($\neq T^\circ$)

Et l'électrolyseur ?



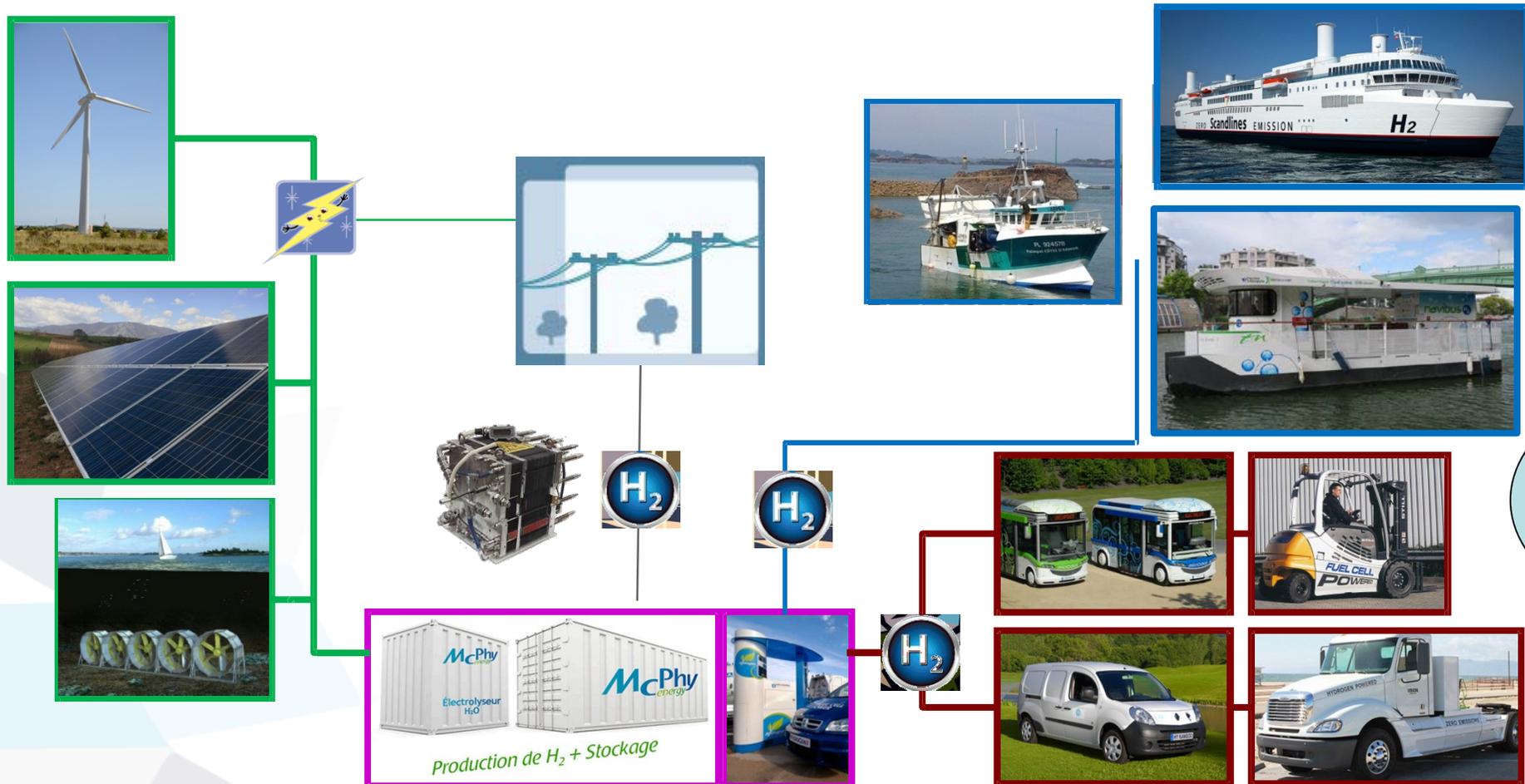
Production d'hydrogène (et oxygène)

Caractéristiques matériaux (oxydes/M):

- électrodes poreuses, conductrices ioniques et électroniques
- électrolyte dense et conducteur ionique

... et différents types d'électrolyseurs... ($\neq T^\circ$)

L'hydrogène: entre énergies renouvelables et transports

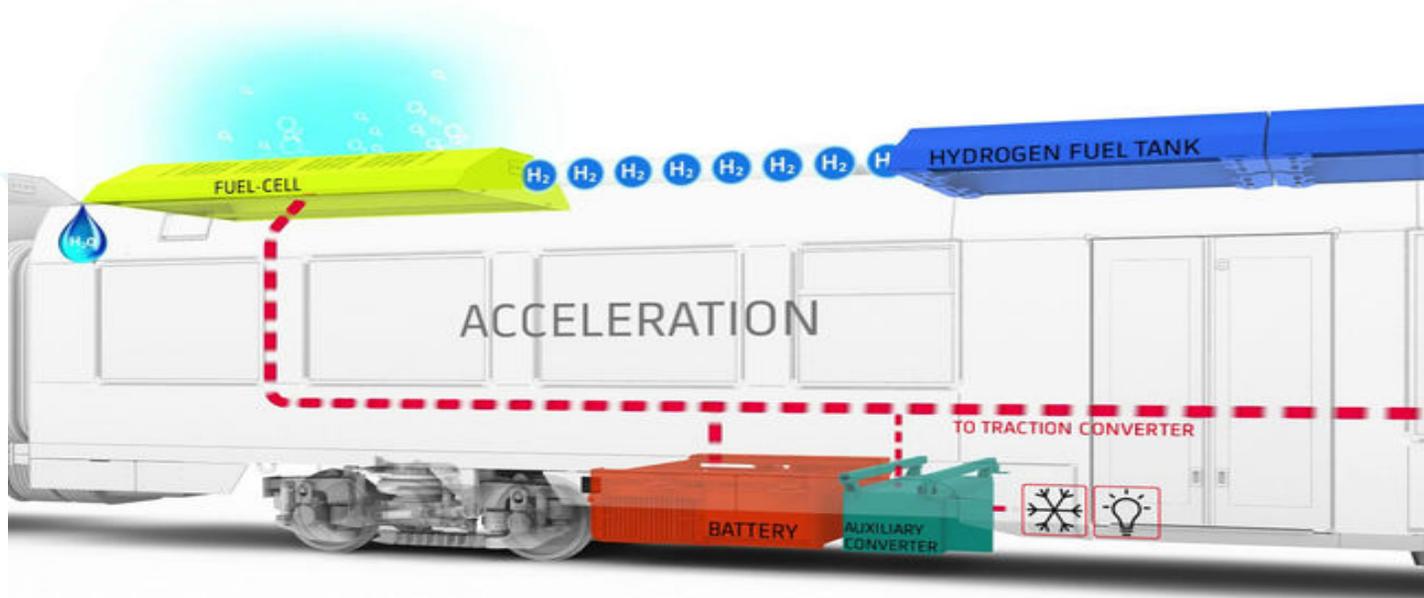


Applications pour la mobilité "lourde"

Applications stationnaires



La mobilité lourde...



ALSTOM CORADIA ILINT
(Allemagne)

La production d'électricité délocalisée

Col du Palet, alimenté par des panneaux solaires...
... avec production d'électricité
- inutilisée hors saison,
- insuffisante en saison...

*En 2015, électrolyseurs,
stockage H₂, PACs*

Autonomie totale,
avec meilleur
confort!



La production d'électricité délocalisée



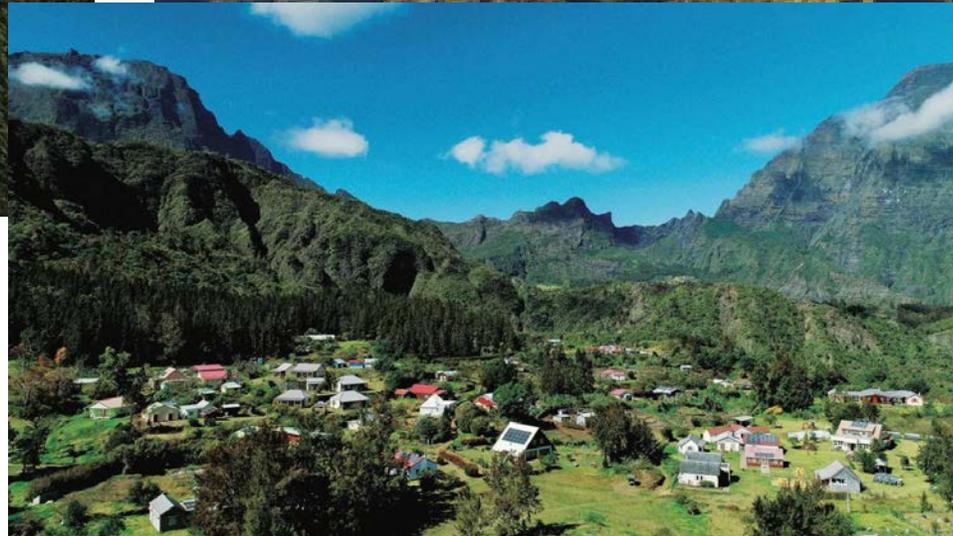
La Réunion:
300 maisons isolées...



*En 2016, électrolyseurs,
stockage H₂, PACs*



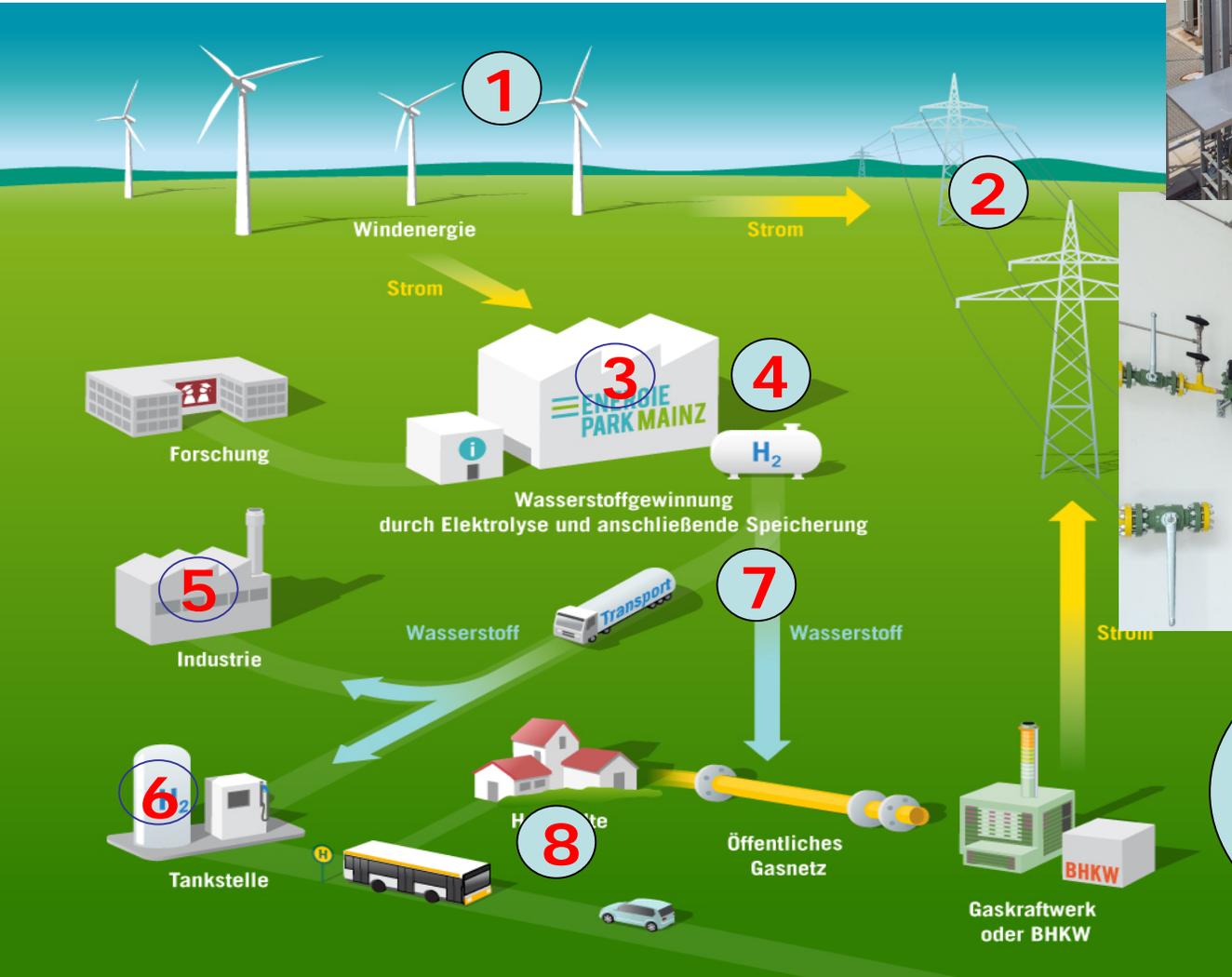
Nantes
Université



Autonomie totale de
certains bâtiments
(école, dispensaire,
ONF, ...)

L'autonomie d'un territoire...

L'Energie Park de Mayence



Gestion du réseau jusqu'au domicile



Plan de relance : stratégie de l'hydrogène décarboné



→ 8,3 milliards (2022) d'investissement, à hauteur du budget consacré par les premiers pays européens (Allemagne, Espagne..):
industrie, collectivités, recherche, ...

Pourquoi la recherche?

Pour développer la filière...



Production d'Hydrogène
(électrolyseurs)



Stockage de l'Hydrogène



Conversion de l'Hydrogène
(PAC)



Déploiement des systèmes Hydrogène

Sauts technologiques

législation,
règlement sécurité,
acceptabilité, ...

Le plan...

✦ Introduction : La filière hydrogène: quels enjeux?

✦ *1. La production*

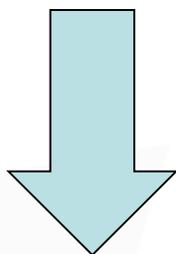
✦ 2. Le stockage

✦ 3. La conversion

✦ Conclusion

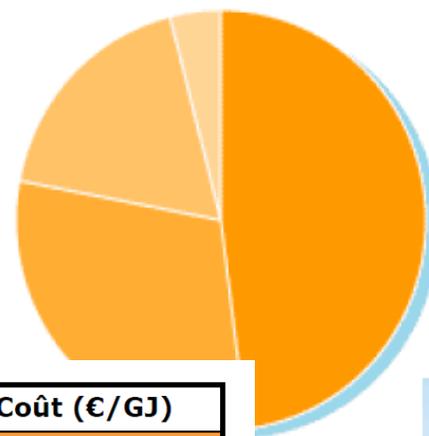
1. La production d'hydrogène...

Aujourd'hui, production d'hydrogène peu décarbonée...



Nécessité de développer la **production d'H₂ vert** à coût maîtrisé

■ Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde



- Gaz naturel : 48%
- Hydrocarbures liquides : 30%
- Charbon : 18%
- Electrolyse : 4%

Source	Nm ³ /an (milliards)	Part
Gaz Naturel	264	48%
Pétrole	165	30%
Charbon	99	18%
Electrolyse	22	4%
Total	550	100%

Hydrogène issu de:	Coût (€/GJ)
Vaporeformage (Gaz Nat., centralisé)	5-8
Vaporeformage (Gaz Nat., décentralisé)	7-12
Biomasse	17-22
Electrolyse	20-25
Essence (Référence 2003)	6



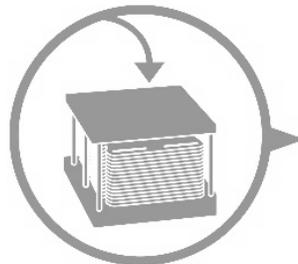
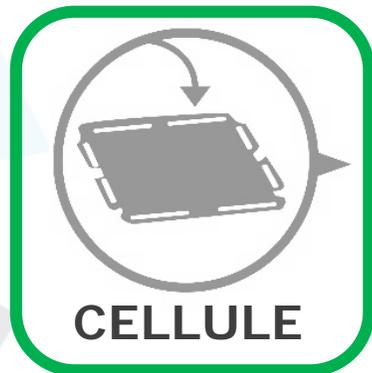
95% de la production est d'origine fossile

1. La production d'hydrogène...

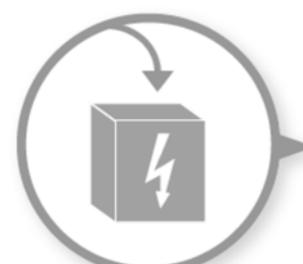
Aujourd'hui, différentes technologies d'électrolyse, certaines matures (basses températures) mais nécessitant certains matériaux rares et chers (platine) → *développement d'une filière sans catalyseur PGM, dont le rendement reste faible...*

→ Développement d'une **filière** d'électrolyse de la vapeur d'eau à **meilleur rendement** → **Haute Température (EHT)**.

*Saut
technologique
au niveau de
la cellule*



STACK

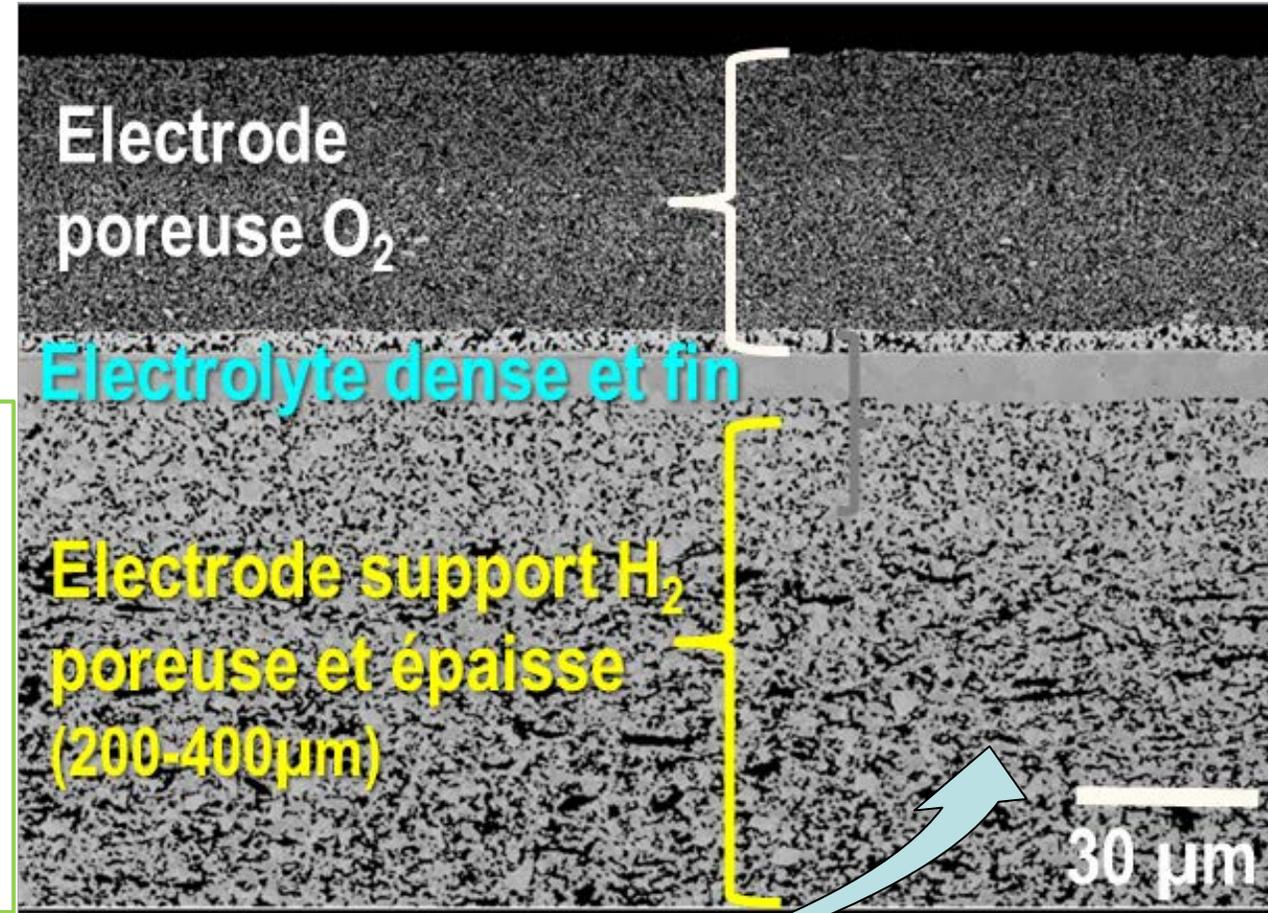
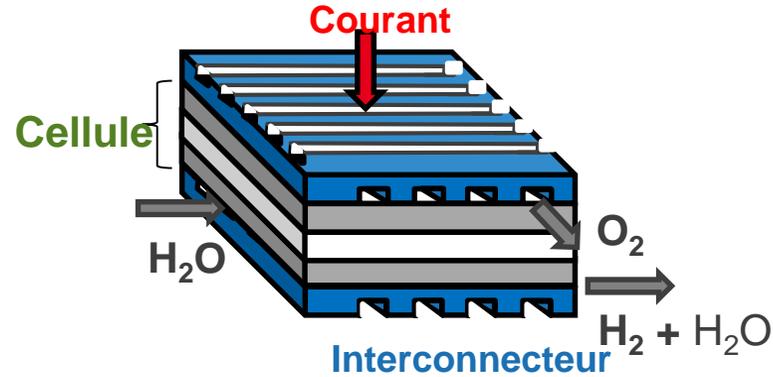


MODULE



SYSTÈME

1. La cellule EHT



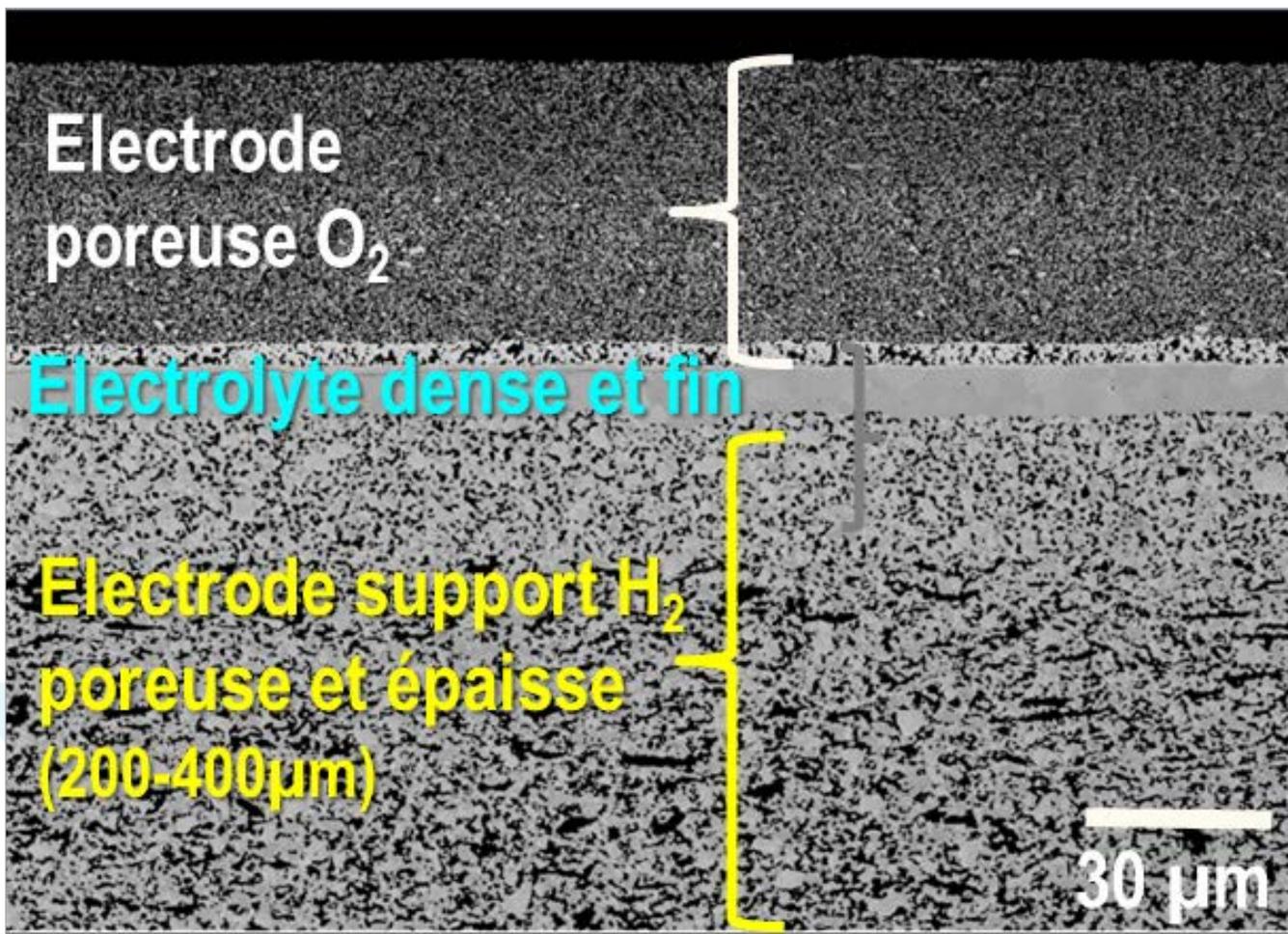
Aujourd'hui, cellules à électrodes support

- performances élevées $\geq 1 \text{ A/cm}^2$ à 1,3V
- durabilité insuffisante: dégradation de 2 à 5%/1000h à 1.3V et 0.5 à 0,6 A/cm^2

→ au niveau de la cellule

Réactions rédox
→ ségrégation (porosité), diffusion, délamination,...

1. Pour augmenter la durabilité de la cellule EHT...



1. Amélioration des matériaux actuels

Morphologie (nanomatériaux), Couches barrière, Mise en forme...

2024 :

Taux de dégradation des cellules:

- 1%/1000h à 1.3V et 0.85 A/cm²
- sur cellules de taille industrielle (200 cm²)

Robustesse des cellules :

- temps de démarrage à froid = 8h
- temps de démarrage à chaud = 300s

2. Nouveaux matériaux en rupture

Composition (modélisation, calculs...)...

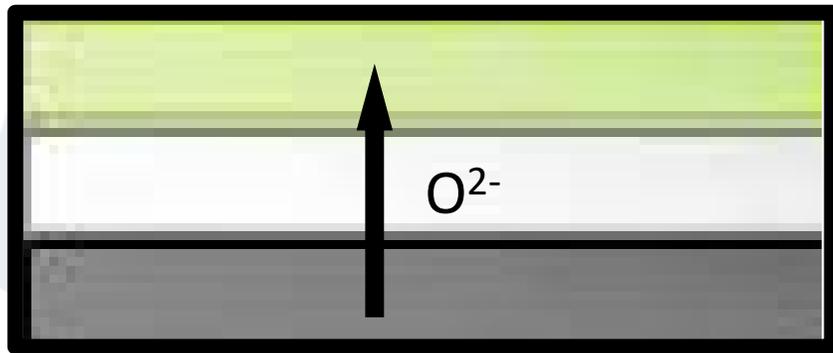
2026-2027 :

Taux de dégradation des cellules :

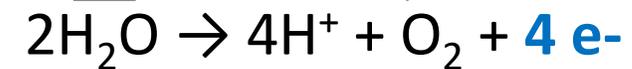
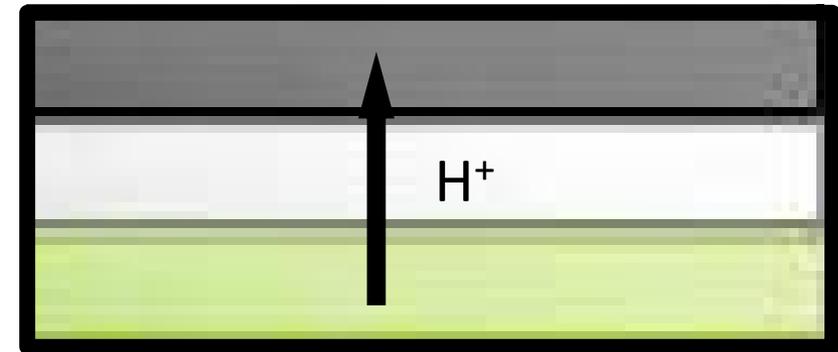
0,7%/1000h à 1,3V et 1 A/cm²

1. Autre voie: de nouvelles technologies de cellules EHT!

Cellules à base de céramiques à conduction anionique



Cellules à base de céramiques à conduction *protonique*

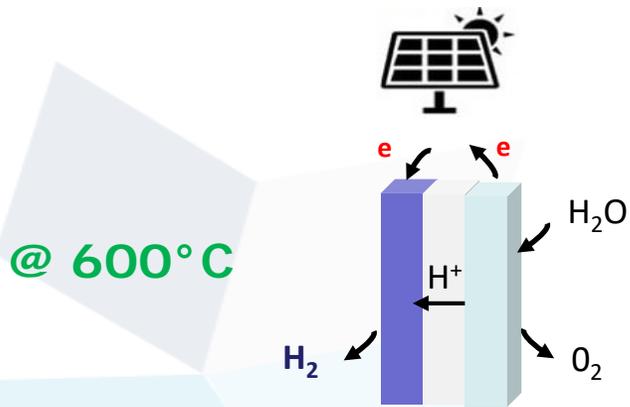


Production d'hydrogène non dilué

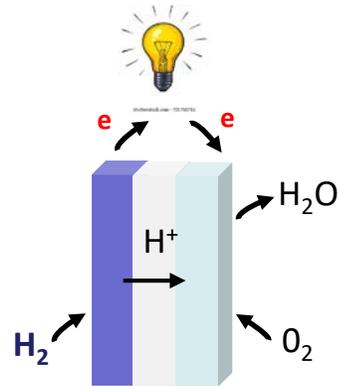
1. Avantages de la cellule EHT-CP

Cellules à base de céramiques à conduction protonique

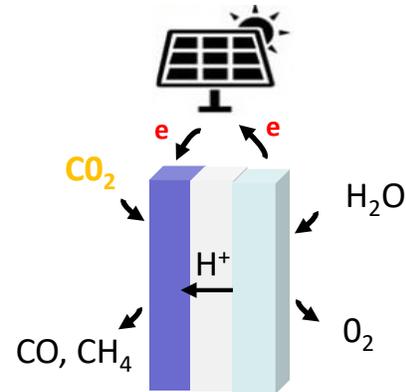
- *Fonctionnant dans une gamme de température intermédiaire*
- *Meilleure durabilité*
- **Réversibles et flexibles**



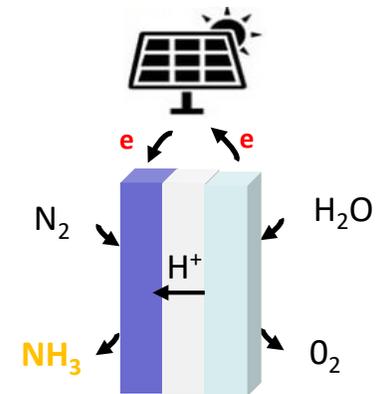
Electrolyse de H_2O



Pile



Electrolyse de CO_2

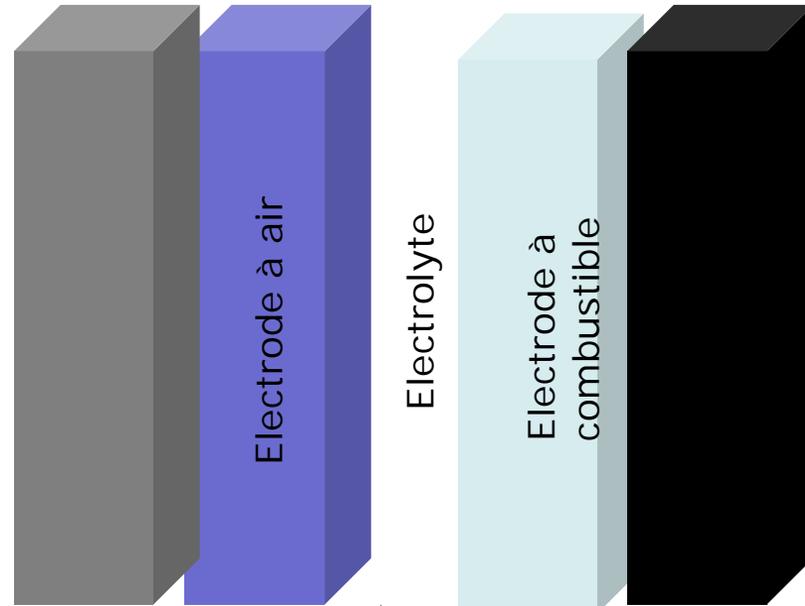


Synthèse de NH_3

1. Sauts technologiques pour la cellule EHT-CP // EHT

Activité électro-catalytique,
stabilité chimique
Architecturation

Stabilité chimique, optimisation de
la conductivité



**Optimisation des
matériaux, architectures,
interfaces**

Diffusion de Cr

Délamination

Compatibilité mécanique

Le plan...

✦ Introduction : La filière hydrogène: quels enjeux?

✦ 1. La production

✦ 2. *Le stockage*

✦ 3. La conversion

✦ Conclusion

2. Un autre challenge: le stockage!

H₂ : léger



Produit	Densité (kg/m ³)	MJ/kg
H ₂ gaz	0,09	142
H ₂ liquide	70	"
H ₂ 700 bars	62	"
Essence	750	42,7
Diesel	850	41,9
Gaz naturel	0,65	50,4
GPL	500	"

Tableau comparatif des pouvoirs énergétiques spécifiques.

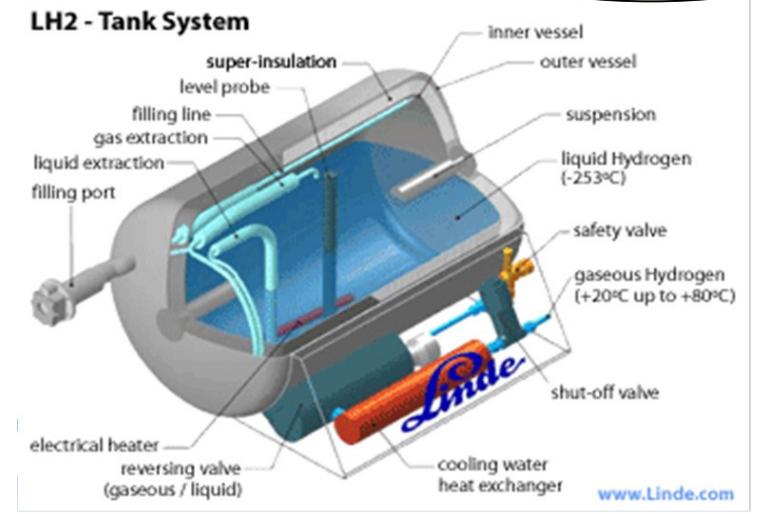
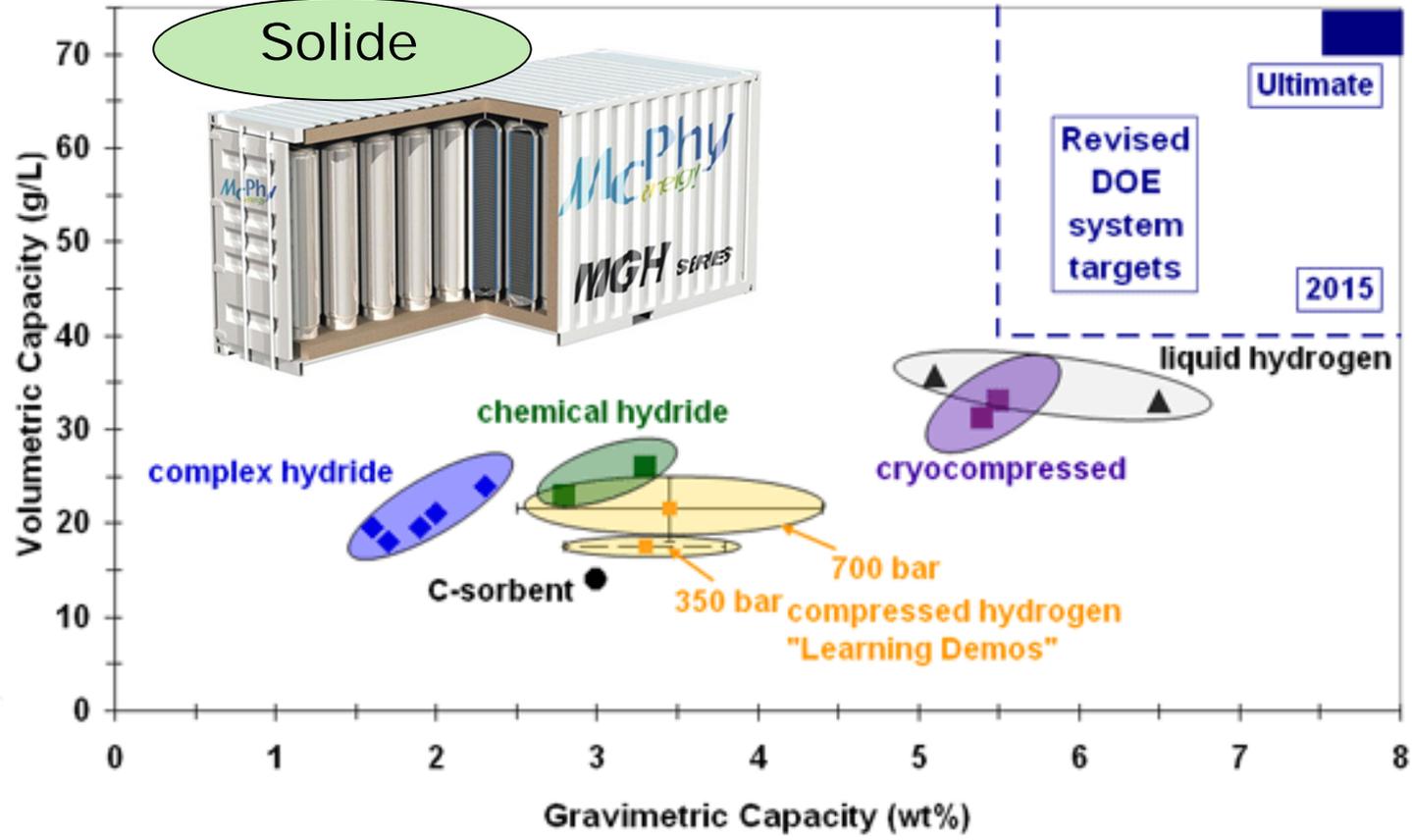
mais gazeux...

→ $3,5 \cdot 10^{-3}$ kWh/l

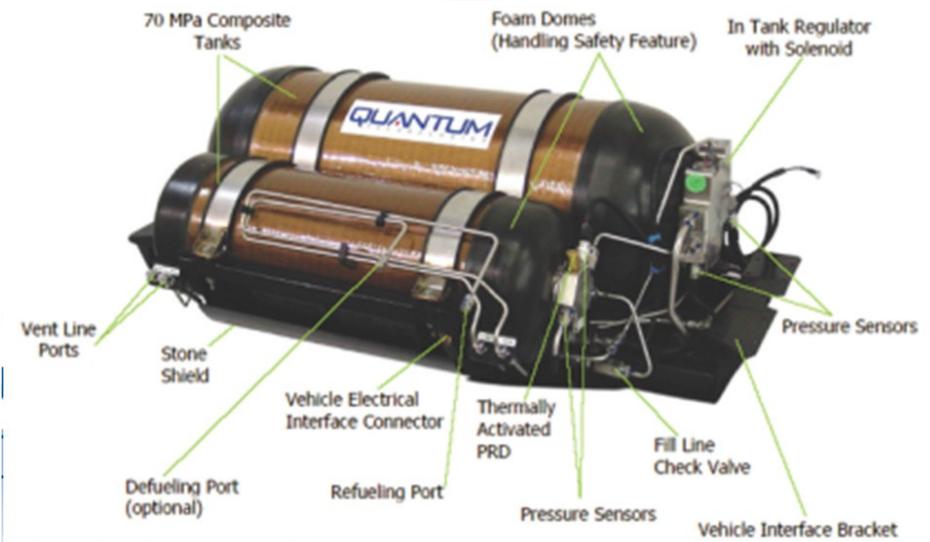


2. Le stockage : des solutions existantes ...

Liquide



Comprimé



Capacité gravimétrique (% de H₂/système total):
 200 bars, 70 kg (730 g de H₂) → 1%
 700 bars, 22 kg (1,2 kg de H₂) → 5 %

2. Le stockage solide : des enjeux restants...

- Fournir une solution du stockage de l'hydrogène **compacte et économe** en énergie
- Contribuer à son acceptabilité sociale: stockage sûr à **l'état solide, sans pression**

Familles des matériaux

Hydrures métalliques
(Mg_2FeH_6 , 150 kg H_2/m^3)

Difficultés de
désorption
→ Procédés de
régénération

Hydrures régénérables
(intermétalliques: AB_5 ($\text{LaNi}_5\dots$),
 AB_2 (ZrV_2), les A_2B (Mg_2Ni)...

Nouvelles compositions,
Nouveaux matériaux

Hydrures complexes et matériaux
d'adsorption
(LiBH_4 (18 %), mais 200000 atm!)

Procédés de synthèse
et de régénération
optimisés

2. Le stockage hyperbare : des enjeux restants

- ✓ Accroître le niveau de **sécurité** et de **confiance** des solutions **hyperbares** (stockage comprimé) → meilleure l'**acceptabilité** sociétale
- ✓ Diminuer l'**empreinte carbone** des réservoirs incluant l'analyse du cycle de vie

SAUTS TECHNOLOGIQUES:

Compréhension des interactions avec H₂ (fragilisation par l'hydrogène) des différents matériaux utilisés (métalliques ou non), et de leurs réponses aux sollicitations mécaniques

Sécurité,
Confiance
Acceptabilité

Impact carbone

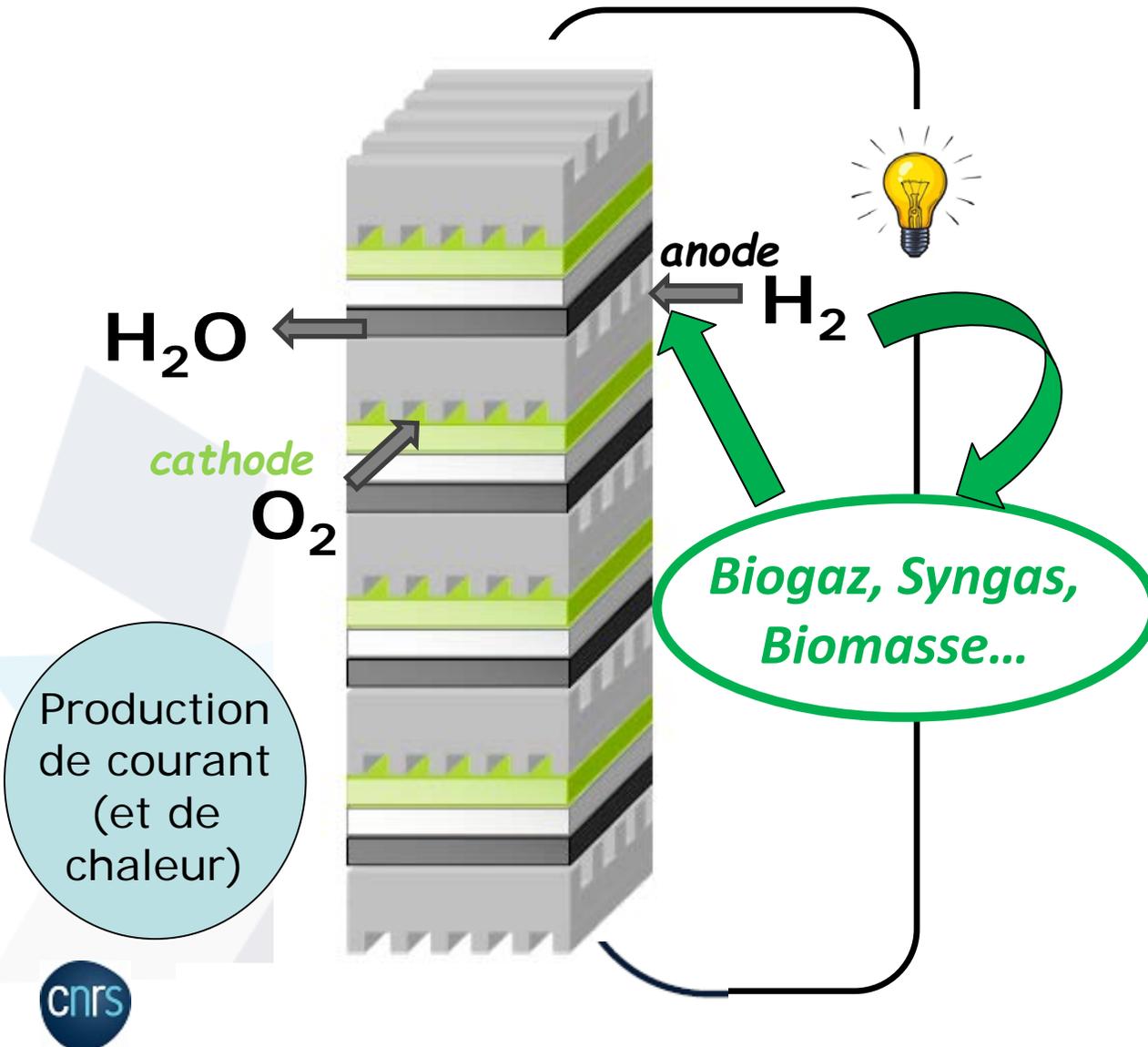
Le plan...

- ✦ Introduction : La filière hydrogène: quels enjeux?
- ✦ 1. La production
- ✦ 2. Le stockage
- ✦ 3. *La conversion*
- ✦ Conclusion

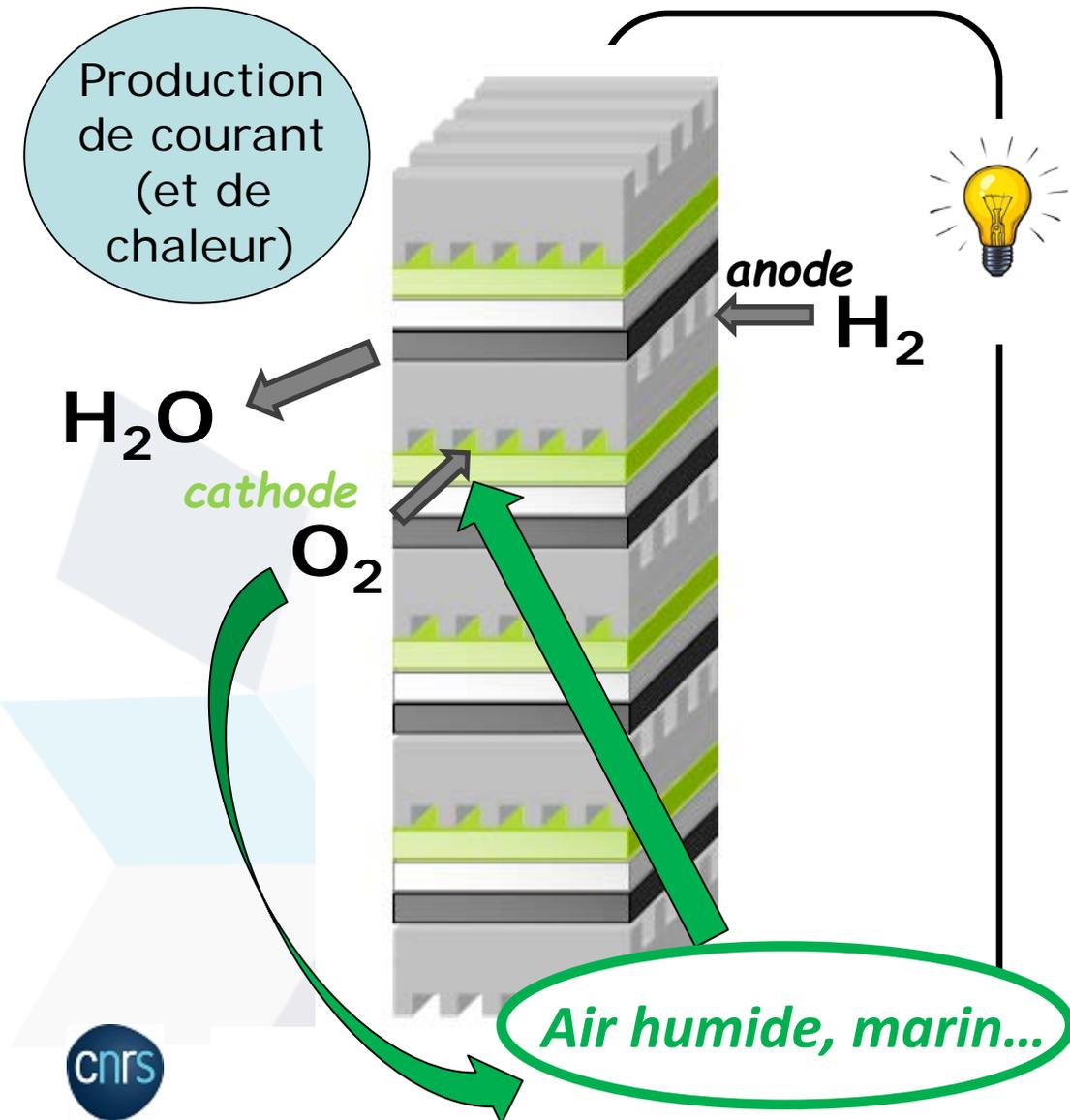
3. La conversion à haute température

Sauts technologiques similaires à l'EHT...
MAIS AUSSI:

- Alimentation des piles à oxydes solides avec des **combustibles autres que l'hydrogène**, comme les mélanges gazeux ou liquides variés, issus de gazéification de déchets...
- Rendre les piles à combustibles plus **robustes** vis-à-vis des **polluants** présents dans les différents combustibles



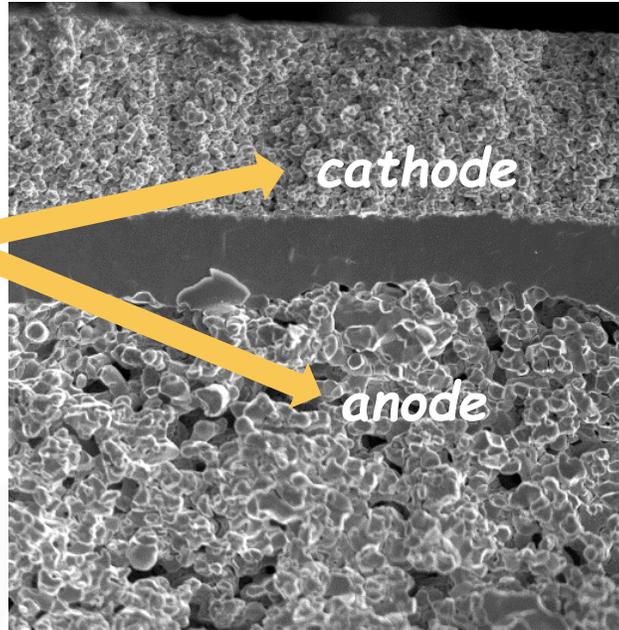
3. La conversion à haute température



- Avec la possibilité d'utiliser des combustibles autres que l'hydrogène, ...
- Alimentation des piles à combustibles avec de l'air humide, marin, pollué...
- Abaisser les températures de fonctionnement de ces systèmes « flexibles »

3. La conversion à haute température

Développement de matériaux d'électrodes **appropriés**



Mise en forme des matériaux et des cellules

Optimisation des cellules, Modélisations

Des objectifs précis côté combustible...

- ✓ Formation de carbone $< 0,5 \text{ mg}_{\text{carbone}} \text{ g}_{\text{cat}}^{-1} \text{ h}^{-1}$ à 600°C
- ✓ Tolérance à H_2S entre 3 et 5 ppm
- ✓ Puissance (sans reformage) de 1 W/cm^2 à 600°C

... Mais aussi côté air:

Augmentation de la tolérance aux impuretés

3. La conversion à basse température : des enjeux



Navibus nantais

PAC BT actuelles fonctionnent, mais:

- Catalyseurs
- Gestion de la température
- Gestion de l'eau ...

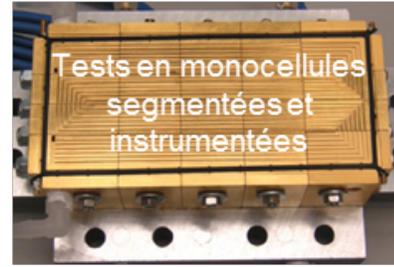
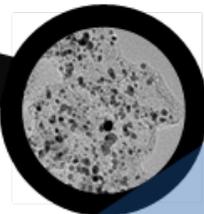


Taxi Hype parisien

3. La cellule de PAC BT ...

3. Conception de matériaux plus actifs/stables/tolérants*
→ Utilisation possible d'H₂ impur

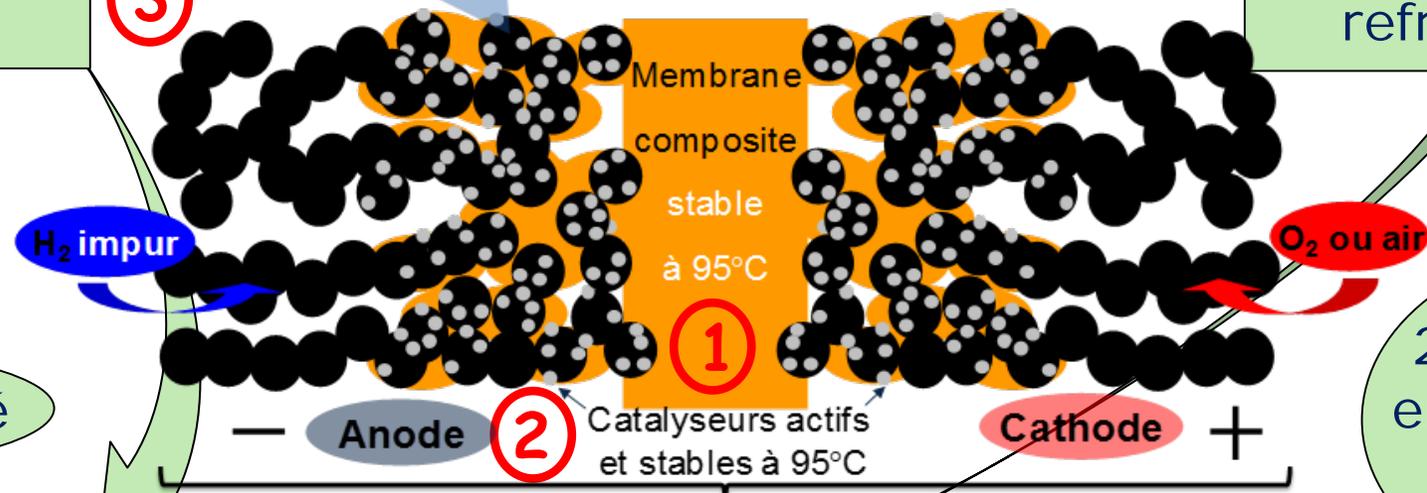
Mesures *in situ/operando*



Tests en monocellules segmentées et instrumentées



1. Régulation de la température de fonctionnement
→ Simplification du refroidissement



Assemblage membrane électrode optimisé pour fonctionnement durable à 95°C à grande densité de courant

Meilleure durabilité

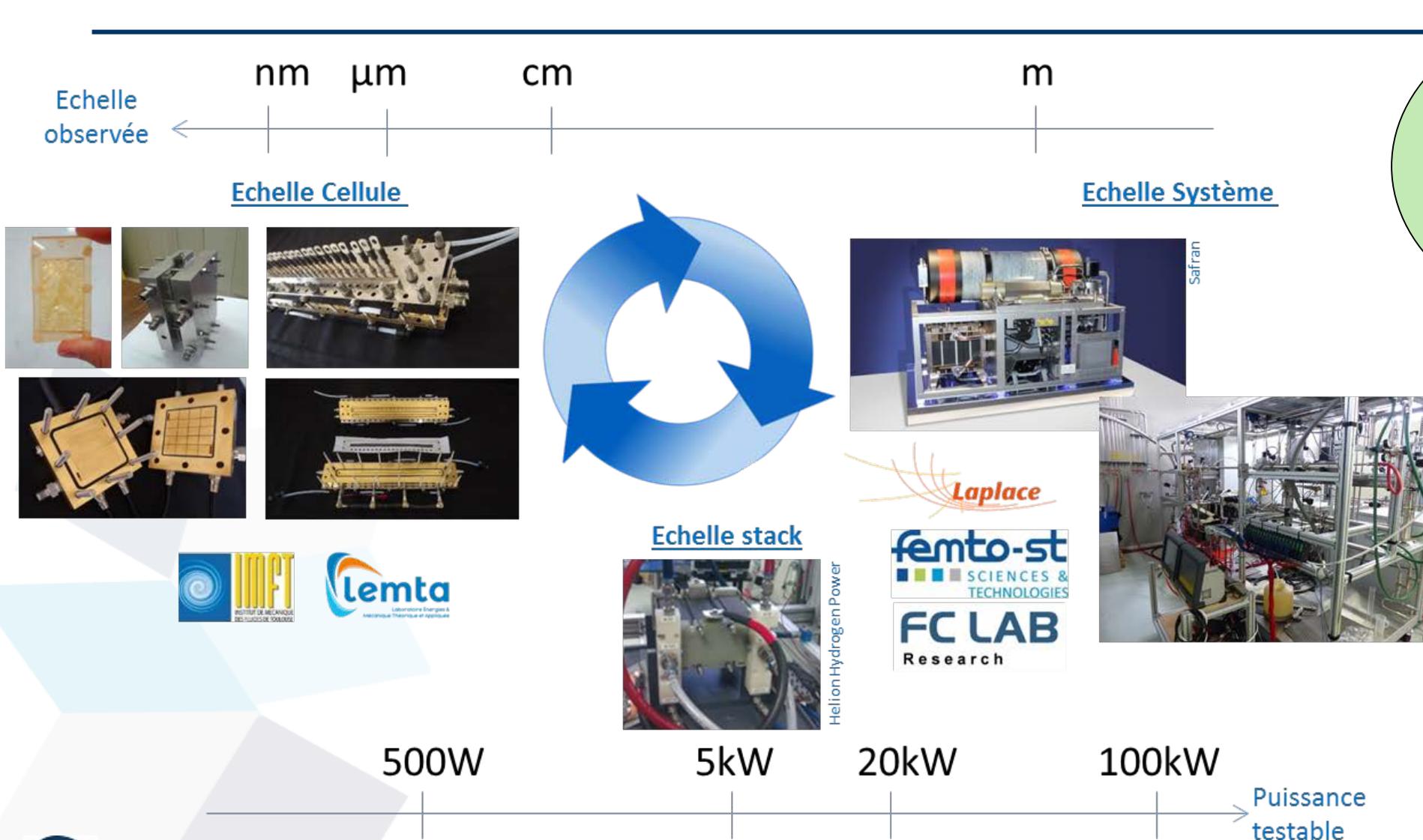
Réduction des coûts de fabrication

2. Chargement en catalyseur le plus faible possible

→ PAC BT compatible avec la mobilité lourde

* conditions fonctionnement: arrêt, marche,... (> 25000h)

Etude de ces systèmes



A différentes échelles (tailles et puissances) en conditions opératoires représentatives

Moyens existants

↓

*Sauts technologiques dans les moyens d'étude**

Nouveaux moyens

Le plan...

✦ Introduction : La filière hydrogène: quels enjeux?

✦ 1. La production

✦ 2. Le stockage

✦ 3. La conversion

✦ *Conclusion*

Conclusion : des verrous techniques...

Les piles à combustible sont des convertisseurs d'énergie à haut rendement qui ont leur place (avec les autres moyens de stockage!) dans le paysage énergétique actuel pour limiter les émissions de CO₂ et le réchauffement climatique

→ Limitations techniques des piles à combustible

- Coût à ↘
 - Diminuer la quantité de matériaux rares et chers (Pt)
- Durabilité à ↗
 - Objectif stationnaire 40 000 à 60 000h / transport 5 000h
- Fiabilité à ↗
 - Tolérance aux polluants à ↗ pour valoriser H₂ industriel ou issu de la biomasse
 - PEMFC : Domaine de fonctionnement T°, humidité
 - SOFC : fragilité à ↘ et tolérance aux cycles thermiques à ↗

Recherche matériaux,
catalyseurs, interfaces,
réactivité,...

Conclusion : des verrous... mais aussi...

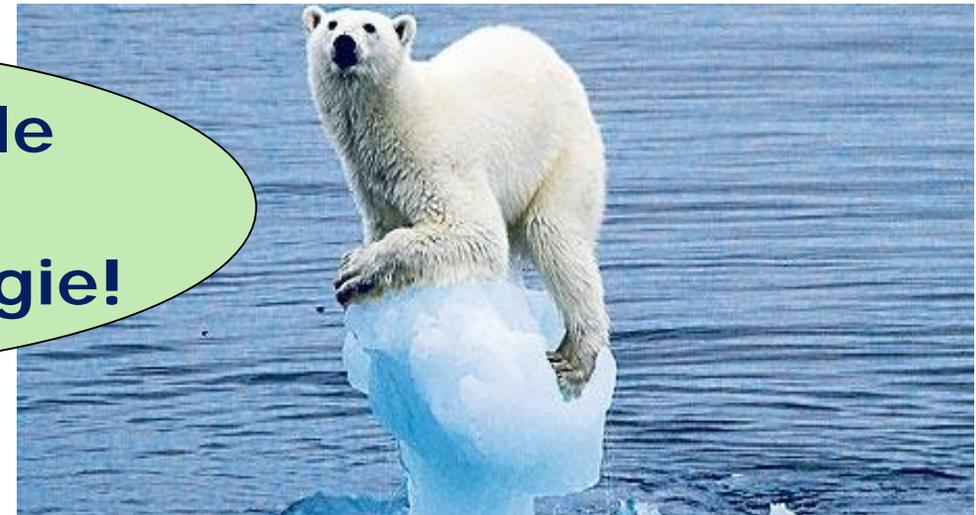
Les piles à combustibles et électrolyseurs ne se développeront qu'avec

- Le déploiement d'infrastructures H₂
- La création et l'harmonisation entre pays d'une réglementation de l'hydrogène

Mais... aucune solution technique n'empêchera notre terre d'être limitée...



**Une indispensable
vraie politique
d'économie d'énergie!**



Remerciements



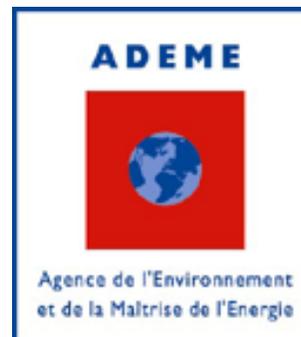
Fédération Française de Sociétés Scientifiques
SEE · SFO · SFP · SFV



ARCADE



OPHARM



FLEXISOC



CELCER-HT

DEBHAT

MODTESTER

PROTEC

Merci de votre attention!

