

**liten**  
cea tech



## ELECTROLYSE DE LA VAPEUR D'EAU À HAUTE TEMPÉRATURE

**Julie MOUGIN, CEA/LITEN**

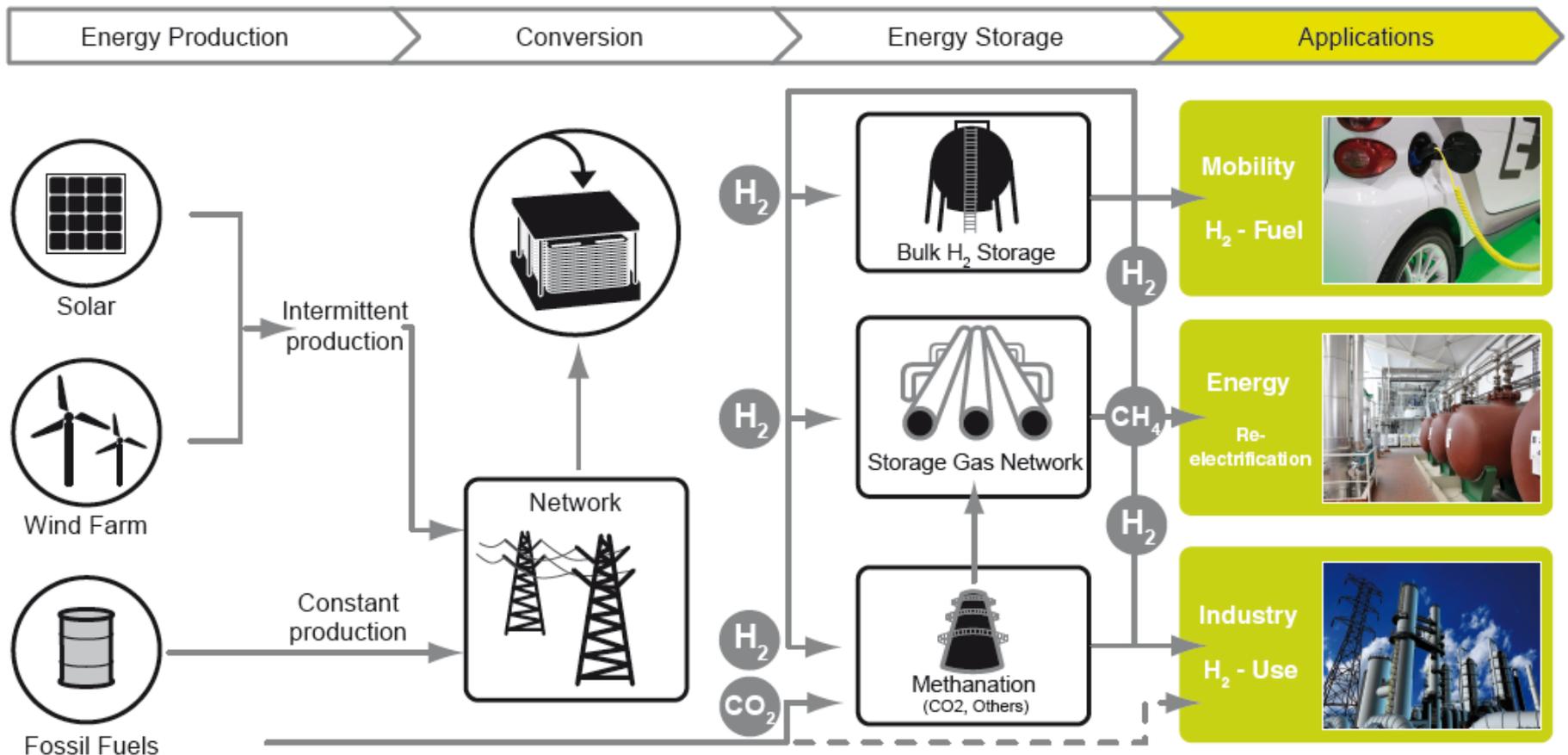
Colloque Hydrogène décarboné: Enjeux et solutions ?  
Paris, 13 juin 2019

- **Introduction**
- **Présentation de la technologie**
- **Performances**
- **Données technico-économiques**
- **Spécificités**
- **Statut de développement**
- **Conclusions**

# INTRODUCTION

- **Evolution du mix énergétique:**

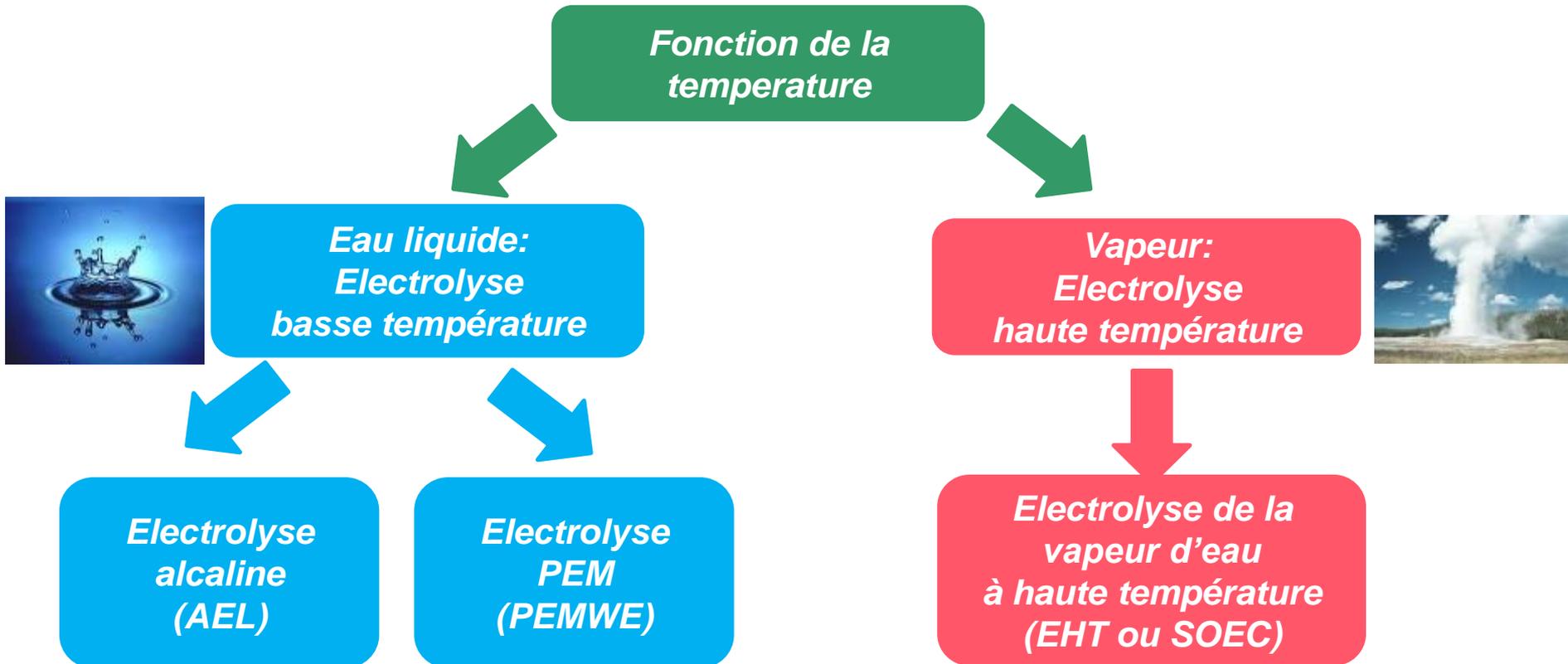
- Croissance de la part des énergies renouvelables et des productions locales
- Besoin de solutions de stockage d'électricité: H2 a un rôle à jouer



# INTRODUCTION

- **Rôle de l'H2**

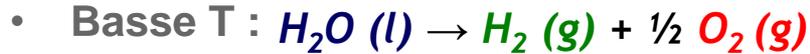
- H2 a un rôle à jouer ... s'il est produit de manière décarbonée: par électrolyse
- Les différentes technologies d'électrolyse:



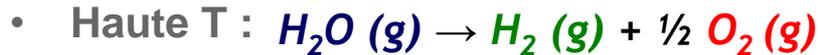
# INTRODUCTION

## Intérêt de la haute température

- Même réaction totale :



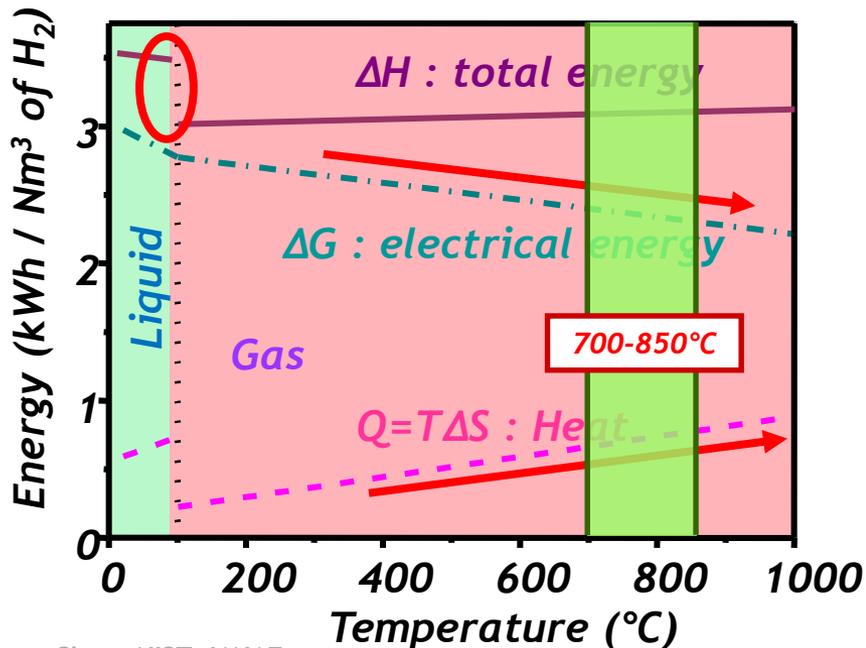
$$\Delta H^\circ = 285.84 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H^\circ = 250 \text{ kJ/mol}$$

- Différents besoins énergétiques :

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$



Gain énergétique en phase gazeuse (15%)

$\Delta H$  presque constant ~ 250 kJ/mol

$\Delta G$  diminue avec T

$T\Delta S$  augmente avec T

- Basse T: énergie = 85% électricité / 15% chaleur
- Haute T: énergie = 70% électricité, 30% chaleur

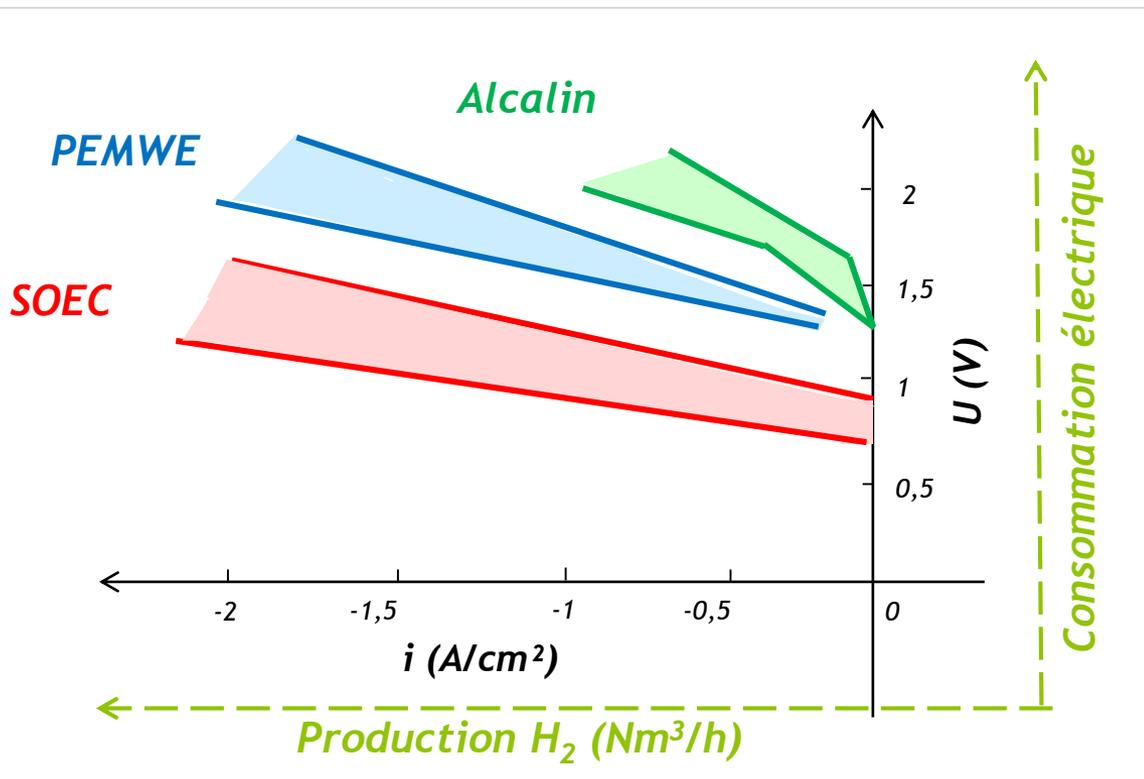
# INTRODUCTION

## Intérêt de la haute température

- Conséquence sur le rendement

$$\text{Rendement} = \frac{\text{PCI } H_2}{P_{elec} \text{ consommée } (U \times i)}$$

Pour l'hydrogène,  
**PCI= 242 kJ/mol soit 3.0 kWh/Nm<sup>3</sup>**

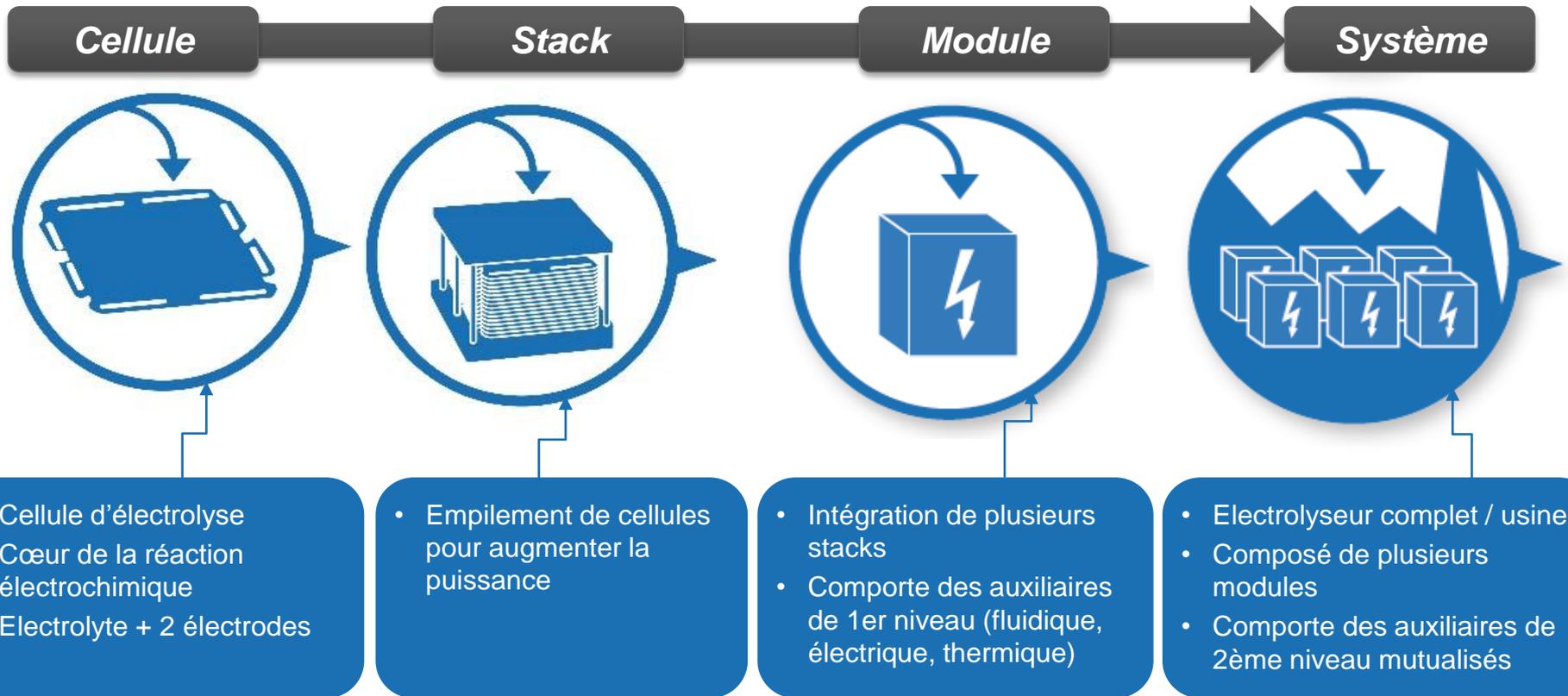


Production H<sub>2</sub> =  
proportionnelle à l'intensité  
du courant électrique

Rendement (kWh/Nm<sup>3</sup>) =  
inversement proportionnel à  
la tension

### SOEC:

- densités de courant élevées: moins de stacks pour produire la même quantité d'H<sub>2</sub> = CAPEX plus bas
- Tension plus faible = gain en rendement

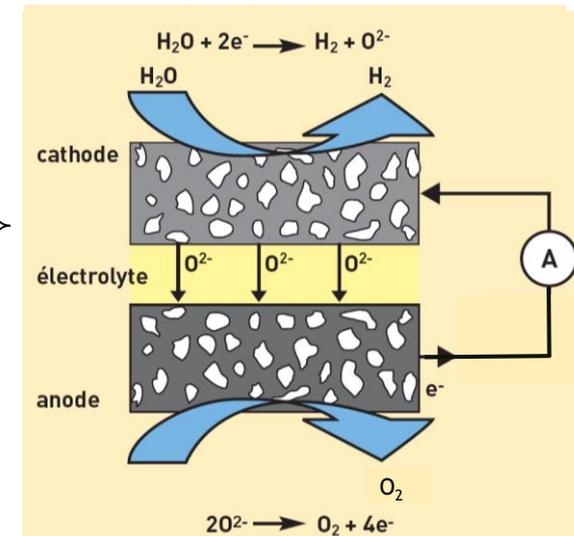
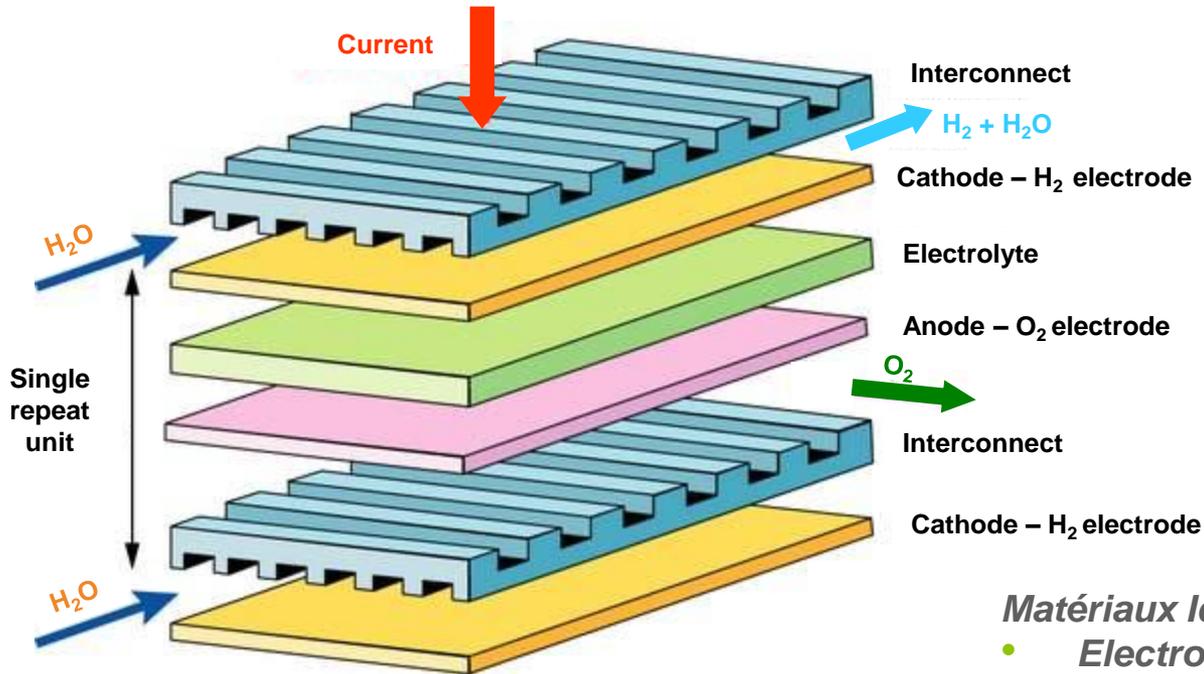


## Technologie modulaire:

- Un stack peut contenir un nombre variable de cellules en fonction de la puissance visée
- Les cellules peuvent avoir différentes tailles en fonction de la puissance visée
- Pour augmenter la puissance, la taille du stack peut être ajustée
- Possibilité d'avoir plusieurs stacks dans un module et plusieurs modules dans un système : flexibilité

# PRÉSENTATION DE LA TECHNOLOGIE

- Electrolyse Haute Température (EHT)
- Technologie Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC)



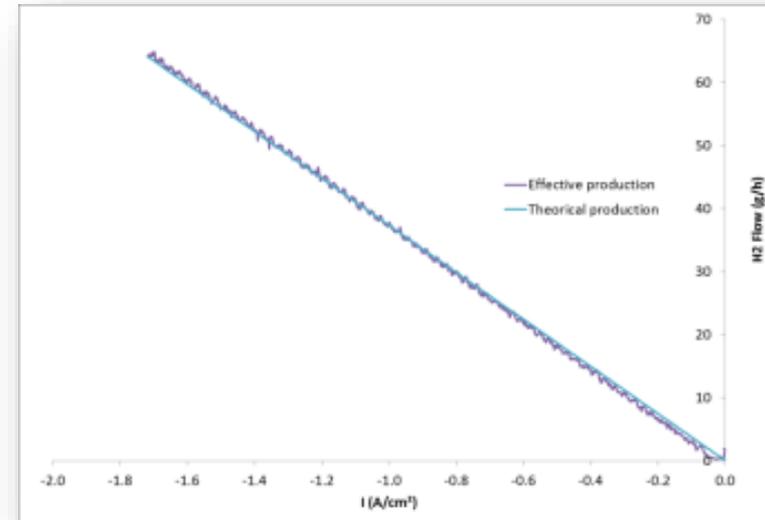
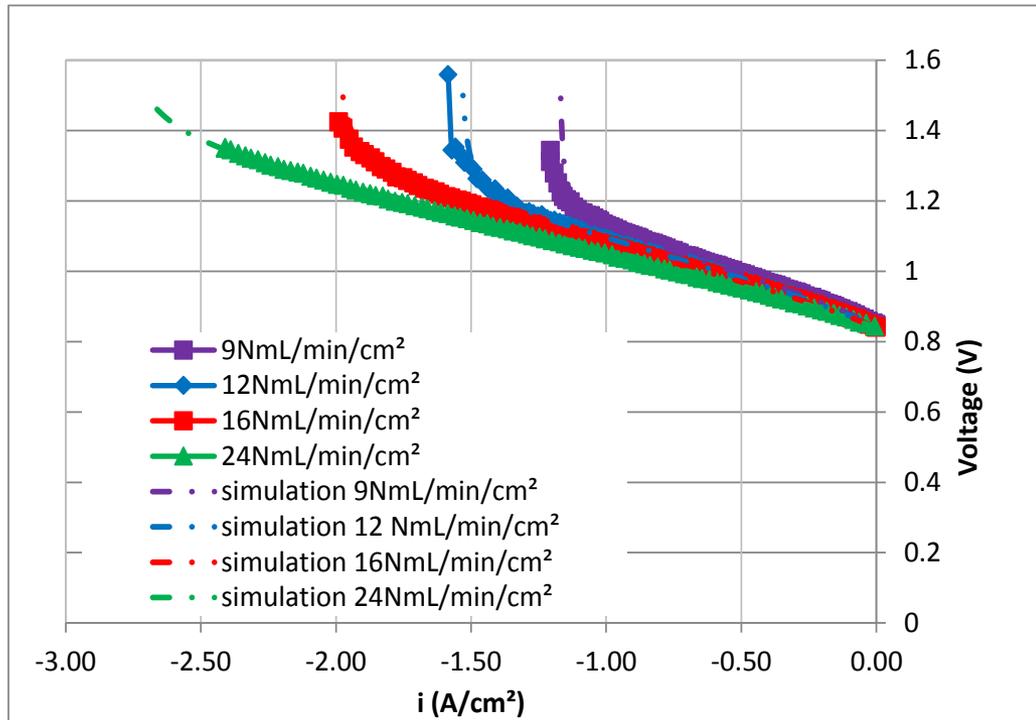
## Matériaux Identiques aux matériaux SOFC

- Electrolyte: Ytria-stabilised zirconia - YSZ
- Electrode  $H_2$  : cermet Ni-YSZ
- Electrode  $O_2$  : perovskite, notamment LSCF
- Interconnecteurs: aciers inox
- Joints: vitrocéramique, mica

Electrolyte: solide – céramique  
Porteur de charges :  $O^{2-}$

Température de fonctionnement: 700-850°C

Pression: atmosphérique – 30 bar en développement



**800° C, 90% $H_2O$ /10% $H_2$  coté  
électrode  $H_2$ , air coté électrode  $O_2$   
Pour différents débits  $H_2O/H_2$**

- **Bonnes performances:**
  - Pouvant dépasser  $-2 A/cm^2$  à 1.3V
  - 100% de taux de récupération de l' $H_2$  produit
  - Possibilité de fonctionner avec des taux de conversion élevés de la vapeur d'eau (~ 80%)
- 1.7 Nm<sup>3</sup>/h d' $H_2$  produit pour un stack de 25 cellules



Source: J. Mougin et al., ECS Transactions, 78 (1) (2017) 3065



## • Stratégie de pilotage

- Besoin d'une température à 700-850°C ?
- NON:
  - Besoin d'une source de chaleur uniquement pour vaporiser l'eau
  - Choix d'un point de fonctionnement légèrement exothermique
  - Utilisation d'échangeurs de chaleur performants
  - Récupération de la thermique des gaz de sortie pour surchauffer les gaz d'entrée de 150°C à 700°C par exemple, sans consommer des W électriques

### Bonne performance

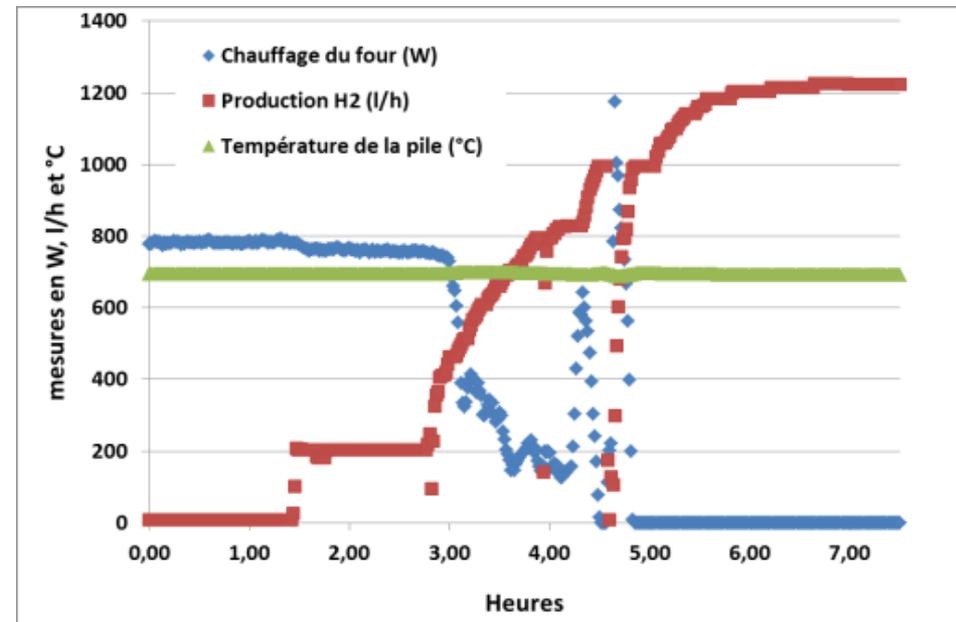
- 1.2 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub> produit à 700°C avec un stack 25-cell
- Bonne efficacité des échangeurs de chaleur pour préchauffer les gaz d'entrée
- Rendement : 99% (HHV) – 84% (LHV)

*Si pas de source de chaleur:*

Vaporisation par énergie électrique

Perte de 15% de rendement :

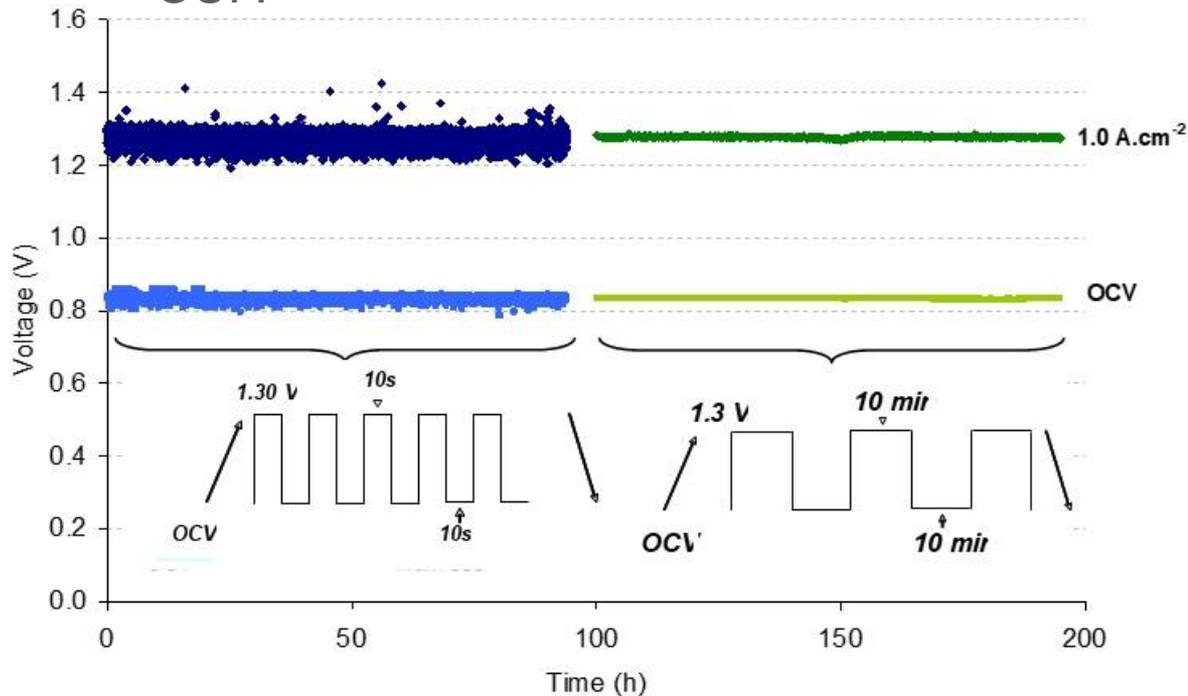
**84% HHV - 72% LHV**



Source: J. Mougin, et al., EFCF2016, A0605 (2016).

## • Stratégie de pilotage

- Fonctionnement intermittent ?
- OUI :



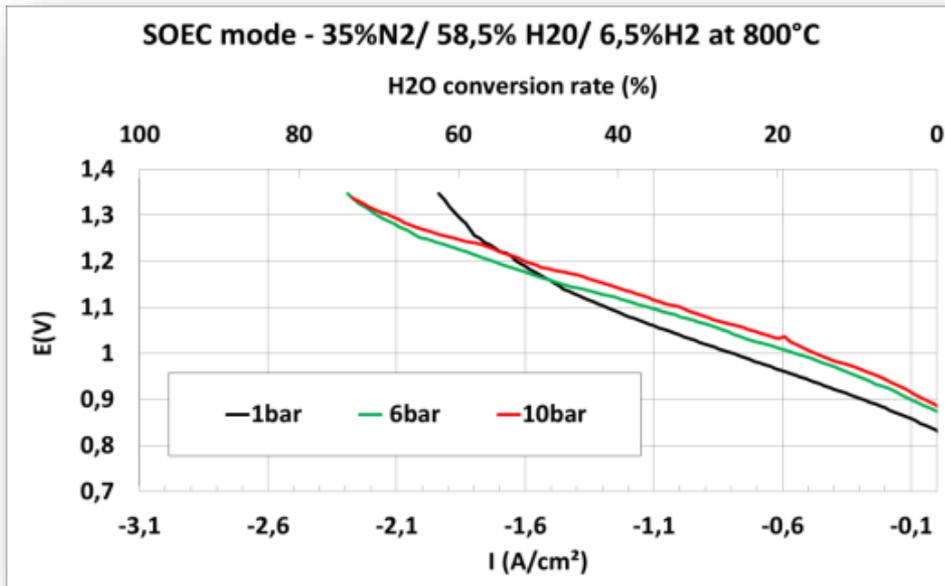
**800° C,  
90% $H_2O$ /10% $H_2$  on the  
hydrogen side,  
air on the oxygen side,  
SC=50% for  $i = -1.0$   
A/cm<sup>2</sup>**

Source: J. Mougin et al., *Energy Procedia* 29 (2012) 445 – 454

- Possibilité de suivre des transitoires de courant très rapides
- Pas de dégradation liée à ces transitoires
- → Couplage aux énergies renouvelables intermittentes possibles

- **Stratégie de pilotage**

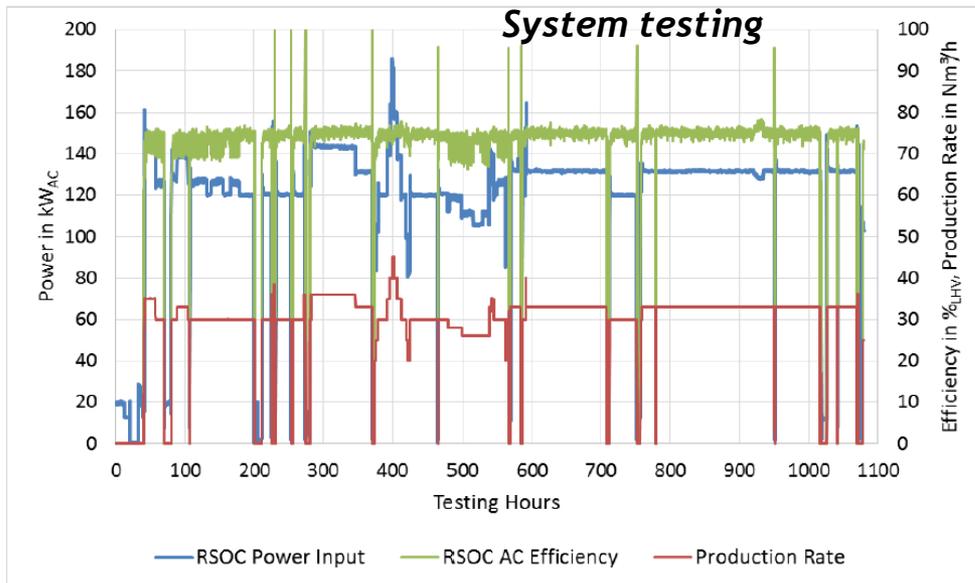
- Possibilité de fonctionner en pression?
- OUI :



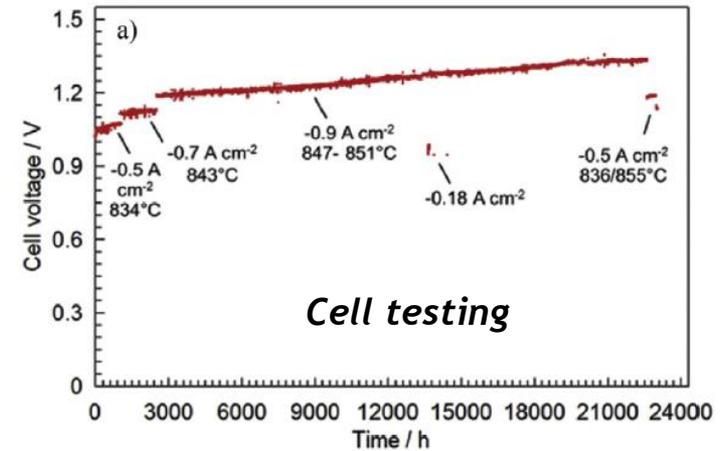
Source: L. Bernadet, et al., IJHE, 40 (2015) 12918

- *Possibilité de fonctionner en pression à 10-30 bar*
- *Double gain:*
  - *Échelle système: suppression d'un étage de compression*
  - *Échelle stack: courant limite repoussé = possibilité de fonctionner à des taux de conversion de la vapeur supérieurs*

- **Fonctionnement de longue durée**
  - Cellules et stacks: > 10000 h
  - Système: quelques milliers d'heures



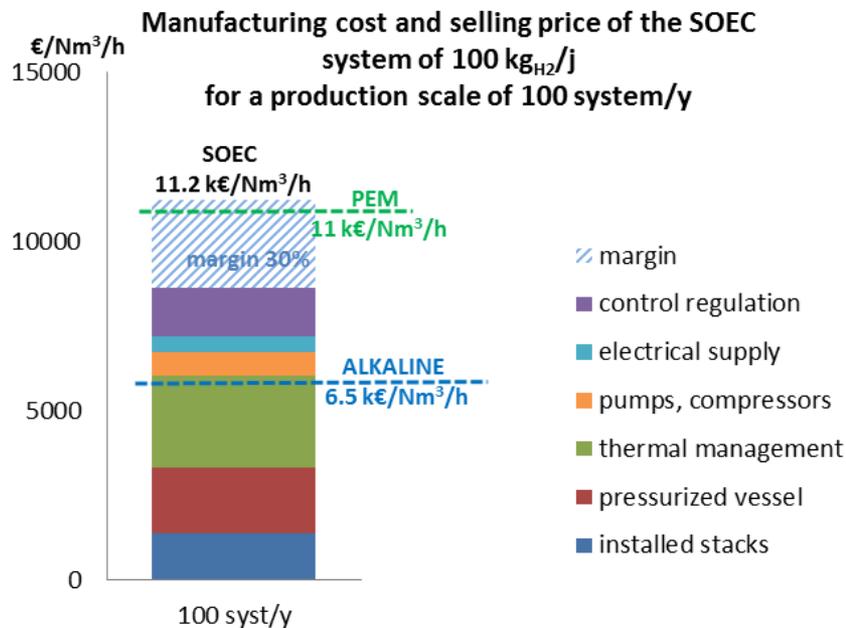
Source: K. Schwarze, EFCF2018, A0604



Source: O. Posdziech, IJHE 2018

- **Taux de dégradations observés:**
  - Quelques %/1000h avec tendance au ralentissement avec le temps
  - 0.6%/1000h à -0.9 A/cm<sup>2</sup>

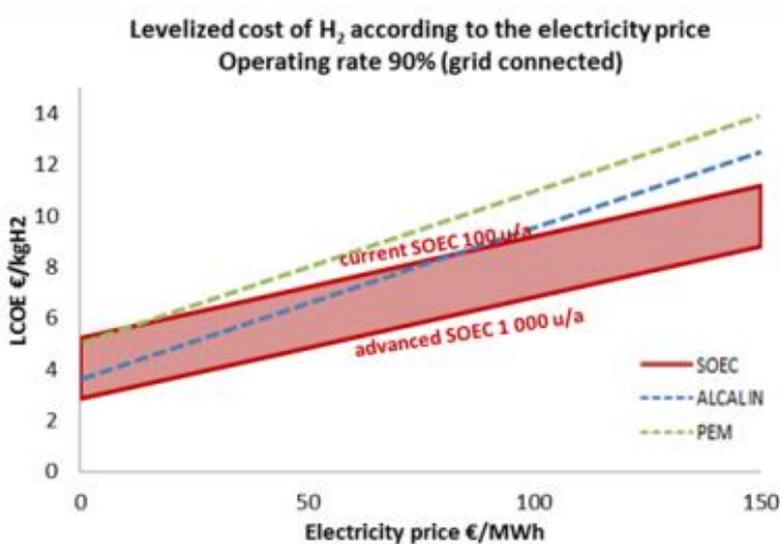
- **Petites unités décentralisées**
- **Hypothèses d'étude:**
  - Système SOEC couplé à une source de chaleur pour vaporiser l'eau
  - Capacité de production = 100 kgH<sub>2</sub>/jour (160 kW)
  - Pression de fonctionnement: 13 bars
- **Coût de fabrication du système déterminé par:**
  - Evaluation analytique du coût pour 100 systèmes par an, 30% de marge
  - Méthodologie Activity based costing



- **Prix de vente = 11.2 k€/Nm³/h**
- **Proche de la PEMWE**
- **Plus cher que l'alcalin en termes de CAPEX, mais...**

Source: M. Reytier, et al., IJHE 40 (2015) 11370–11377

- **Petites unités décentralisées**
- **Levelized cost of hydrogen (LCOH):** Attendu moins cher grâce au meilleur rendement électrique, qui est 20/30% meilleur que pour l'électrolyse basse T : < 3.5 kWh/Nm<sup>3</sup>
- **Hypothèses d'étude:**
  - Calculé avec un discount rate de 10% et une durée de fonctionnement de 20 ans
  - Avec remplacement tous les 3 ans des stacks + surfaces additionnelles pour compenser les pertes de performances au cours du temps
  - Comparaison avec PEMWE and alcalin:
    - Pas de surface additionnelle prise en compte
    - Fréquence de remplacement: 10 ans pour l'alcalin, 6 ans pour la PEMWE



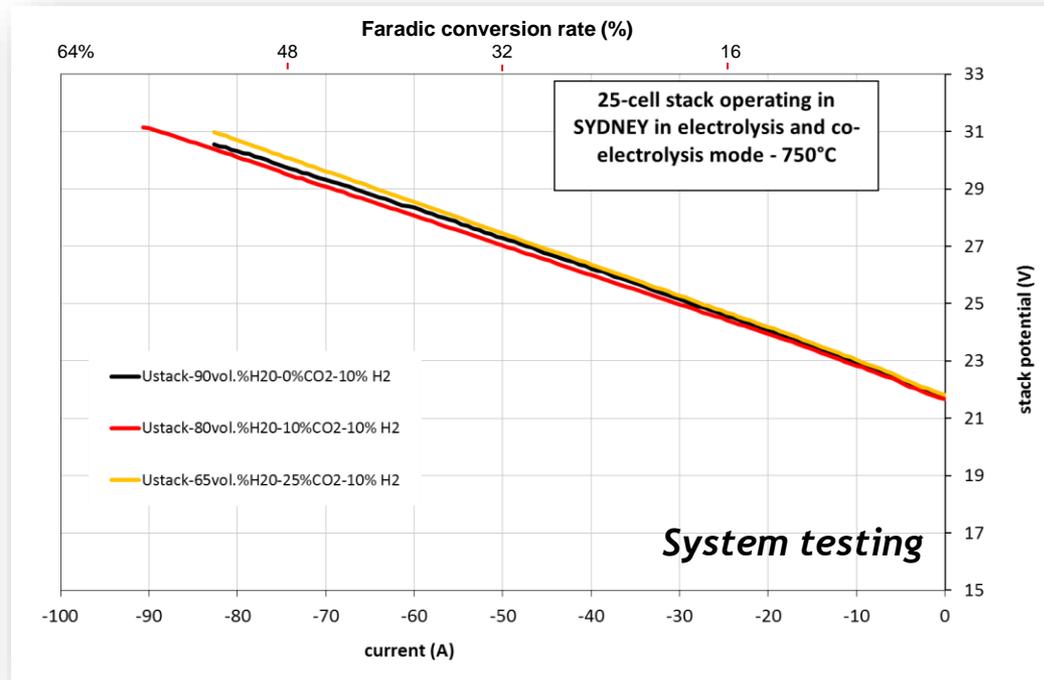
- LCOH avec SOEC toujours moins cher qu'avec PEMWE quel que soit le prix de l'électricité
- Devient similaire à l'alcalin pour un prix de l'électricité = 80 €/MWh, et meilleur au-delà (=prix français pour un industriel, moyenne EU = 100 €/MWh)
- Effet du volume marché/nombre d'unités produites: - 2 €/kgH<sub>2</sub>

Source: M. Reytier, et al., IJHE 40 (2015) 11370

- **Grandes unités centralisées**
- **Levelized cost of hydrogen (LCOH) à 2030 pour unités de puissance > 100 MW**
- **Hypothèses d'étude:**
  - Durée 20 ans
  - Taux actualisation 8%
  - Fonctionnement 8000 h/an
  - Coût Electricité 40€/MWh
- **LCOH:**
  - 2.03 €/kg
  - Leviers de baisse du LCOH additionnels:
    - Augmentation de la durée de vie des stacks à 10 ans: LCOH = 1.92 €/kg
    - Optimisation des pertes au niveau système: LCOH = 1.85 €/kg

**SOEC a le potentiel de devenir une technologie “game changer” pour la production d’hydrogène**

- Co-électrolyse H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> pour produire du syngas (H<sub>2</sub>+CO)



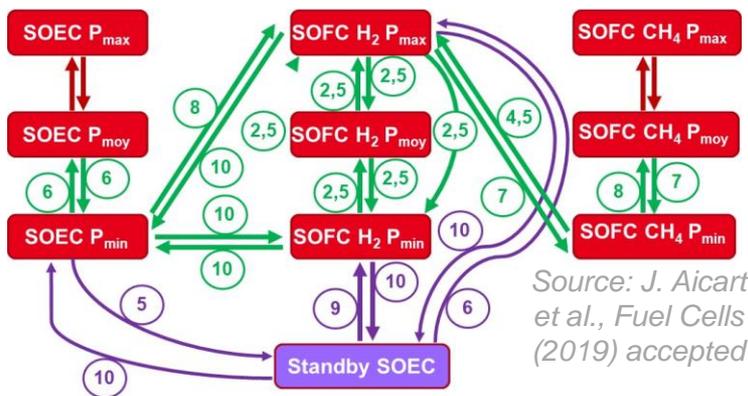
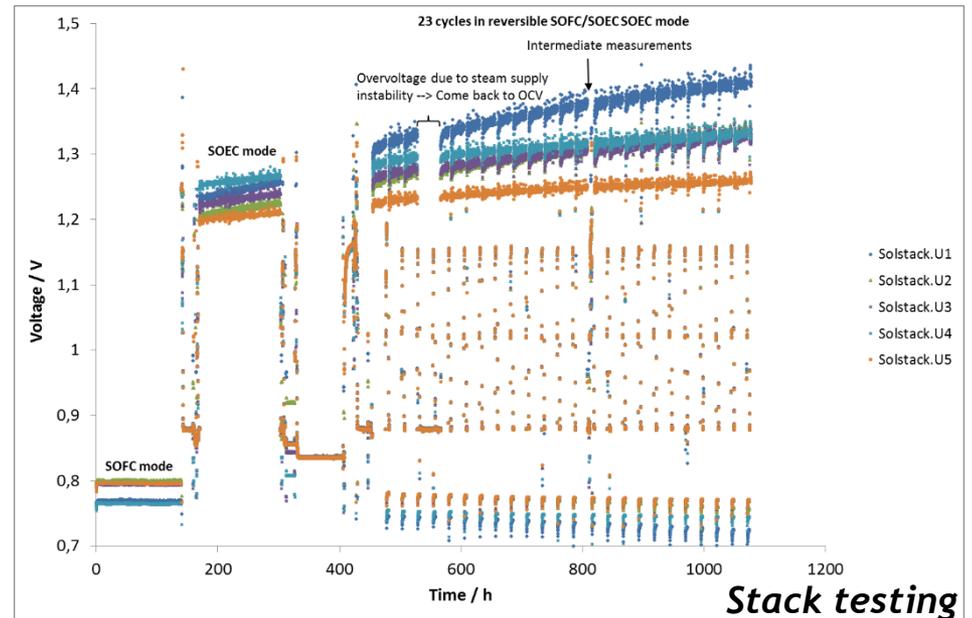
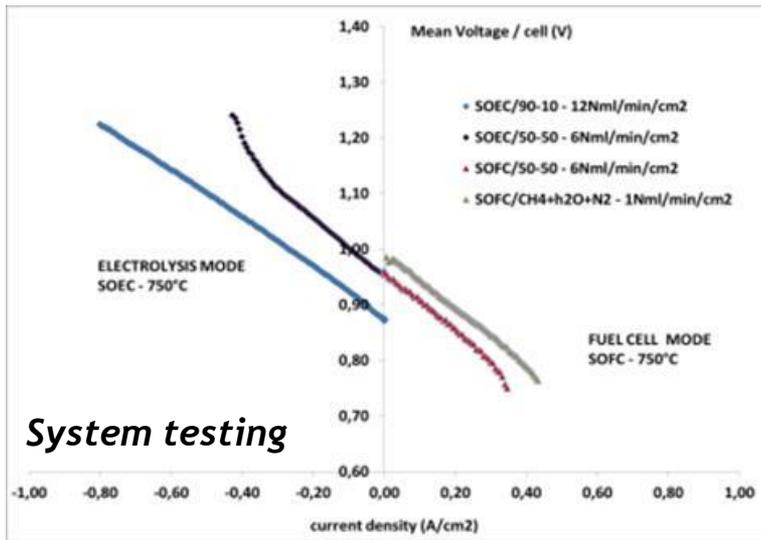
800° C,  
90%H<sub>2</sub>O/10%H<sub>2</sub> on the  
hydrogen side,  
air on the oxygen side,  
SC=50% for  $i = -1.0$   
A/cm<sup>2</sup>

- Performances en co-SOEC proches de celles en SOEC pure

Source: M. Reytier, et al., IJHE 40 (2015) 11370

## • Fonctionnement réversible SOEC/SOFC: rSOC

- Meilleur CAPEX: un seul système
- Meilleur Retour sur investissement: système fonctionnant 100% du temps



- *Fonctionnement similaire dans les deux modes*
- *Cyclage entre SOEC et SOFC possible, pas de dégradation additionnelle*
- *Transitions relativement rapides (<10 min)*

## Exemples de réalisation

- 2014: 1<sup>er</sup> système SOEC mis en service au CEA
  - 1 stack – 1 Nm<sup>3</sup>/h d'H<sub>2</sub> produit à 700°C
  - rendement 99%HHV
- 2017: système Sunfire Grinhy installé sur site sidérurgiste en Allemagne
  - 150 kW - 40 Nm<sup>3</sup>/h d'H<sub>2</sub> produit
- 2018: 1<sup>er</sup> système rSOC français livré à un client (Sylfen-CEA)
- 2019: démarrage projet Grinhy 2.0:
  - 720 kW - Aura produit 100t d'H<sub>2</sub> d'ici fin 2022
- 2019: call EU FCH-JU
  - SOEC de 2 MW
- 2020: système rSOC multimodules multistacks français livré en Italie
  - 16 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub> produit en mode SOEC
  - 15 kWe en mode pile



Table 1: RSOFC System Efficiencies

Operation	LHV <sub>AC</sub>	HHV <sub>AC</sub>
SOEC	60.5	71.1
SOEC (No Steam Generator)	72.0	84.4
SOEC (No Steam Gen or Compressor)	84.5	99.3

Source: J. Mermelstein et al., EFCF2016



## CONCLUSION

- **Electrolyse haute température SOEC:**
  - Technologie à haut rendement
  - Présentant un excellent niveau de performance: puissance surfacique
  - Des stratégies de pilotage permettant:
    - De ne pas avoir besoin d'une source de chaleur à haute T
    - De fonctionner en couplage aux énergies intermittentes
    - De fonctionner en pression (10-30 bar)
  - Qui a le potentiel d'être un «game changer» pour produire de l'H<sub>2</sub> à bas coût:
    - ~ 2 €/kg voire même moins pour les grosses unités ~ 100 MW
    - ~ 7 €/kg pour des petites unités décentralisées ~ 100 kW
- **Une maturité moindre que les technologies basse T, mais des démonstrateurs désormais sortis du laboratoire, et de puissance en croissance exponentielle**
  - Roadmap française:
    - 2022: 300 kW
    - 2024: 2 MW
    - 2027 et au-delà: ~ 100 MW
- **Des spécificités:** co-électrolyse, fonctionnement réversible
  - qui ouvrent des perspectives additionnelles à la pure production d'H<sub>2</sub>
  - stockage EnR, production de produits de synthèse à haute valeur ajoutée

## REMERCIEMENTS

- Divers soutiens financiers pour le développement de la technologie SOC
- Europe H2020 – FCH-JU (projets Sophia, Eco, REFLEX, Balance)  
- Institut Carnot Energie du Futur 
- Financement industriels

***Merci pour votre  
attention***