

Électrolyseurs et Piles SOFC

Comment anticiper la prochaine génération de piles à combustible et des électrolyseurs ?

Mona Bahout

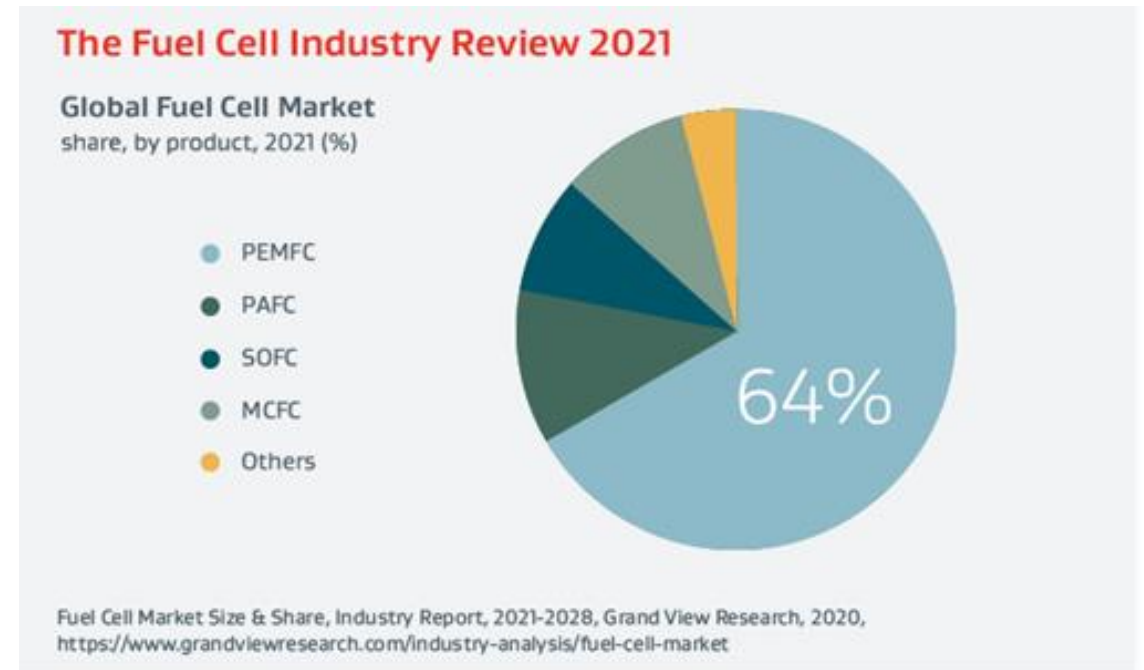
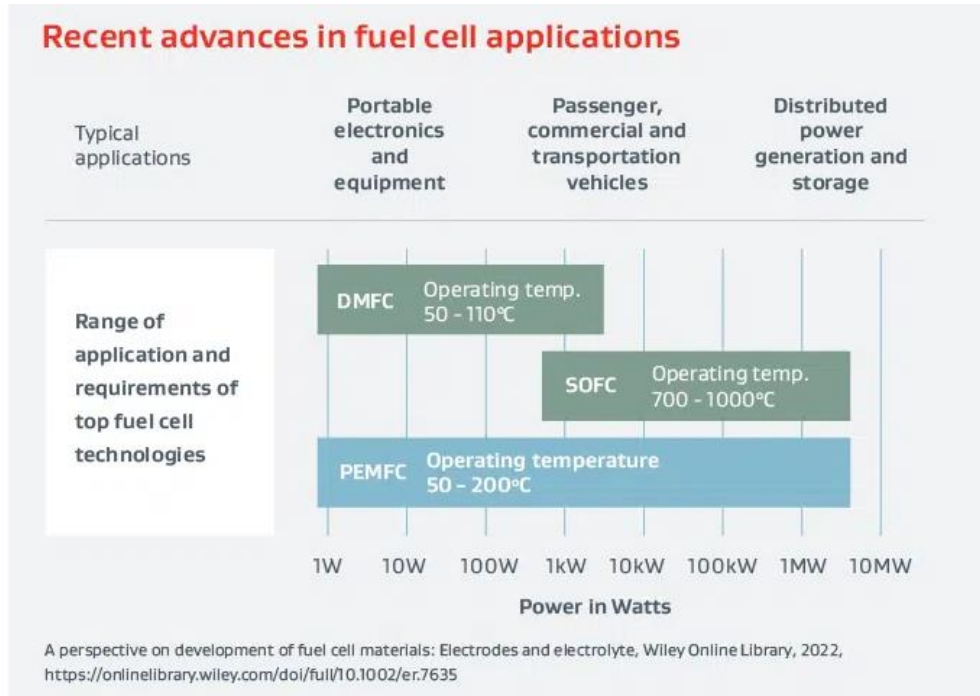
Université de Rennes
Campus de Beaulieu.



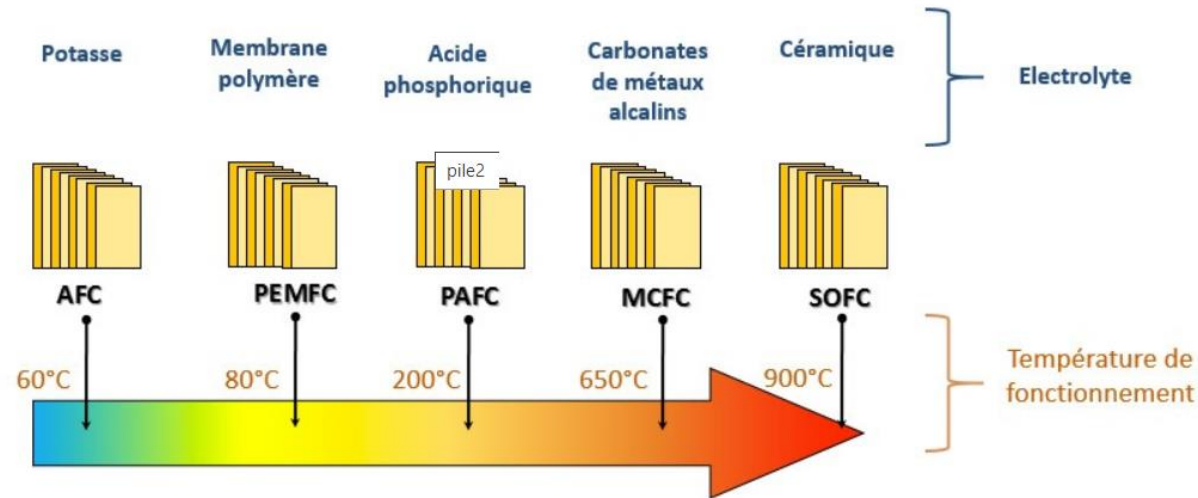
Journée Bretonne Hydrogène

29 mai 2024, St-Malo

Avancées récentes et répartition du marché des piles à combustible



La pile SOFC *versus* les autres piles à combustible

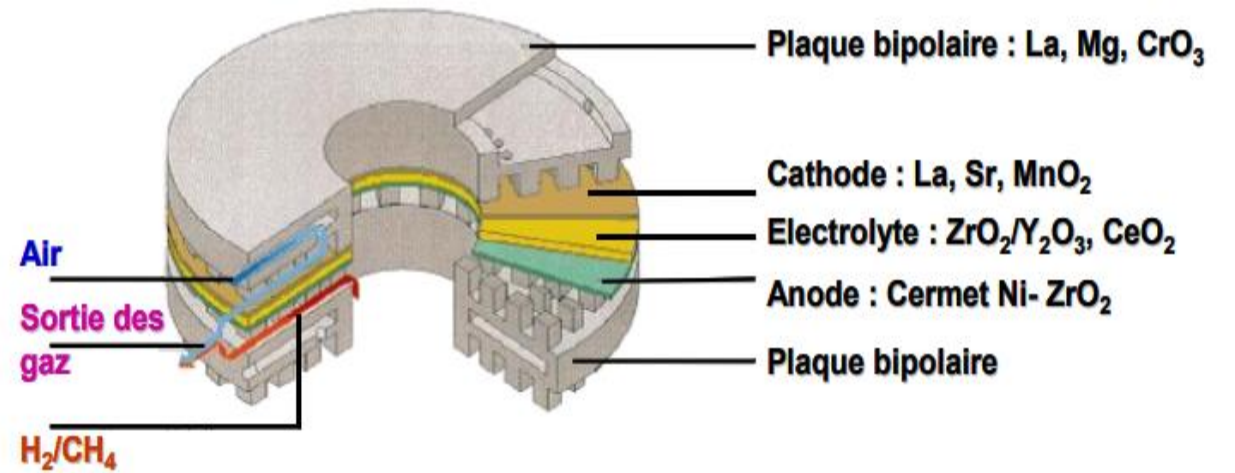
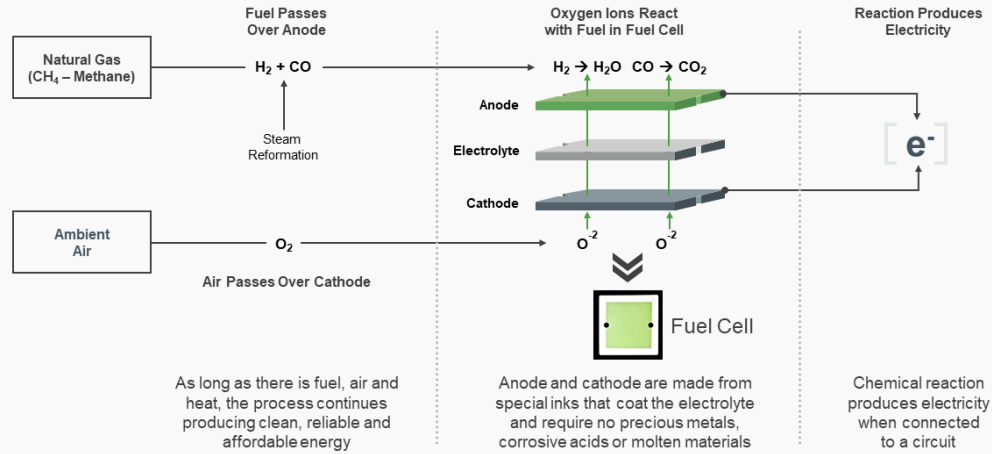


La pile SOFC

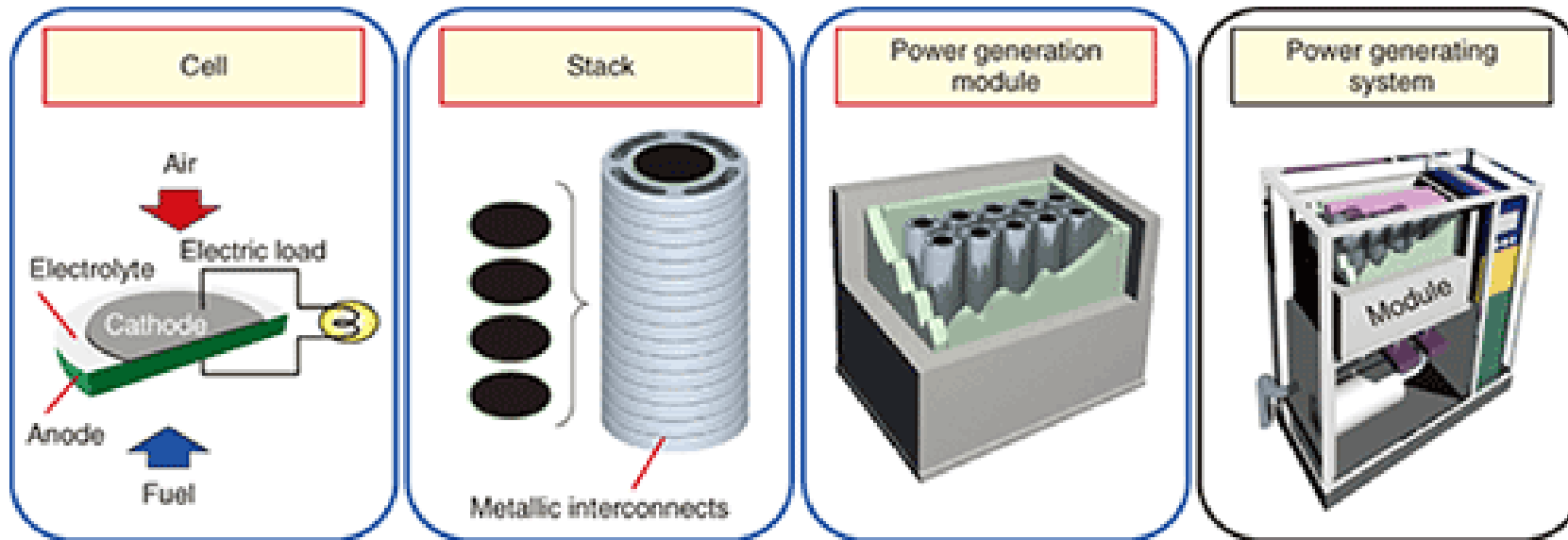
- Électrolyte céramique
- Hautes températures de fonctionnement ~ 700-1000 °C

La pile SOFC

SOLID OXIDE FUEL CELL: HOW IT WORKS



Technologie semi-plane; Source <http://www.hexis.com>



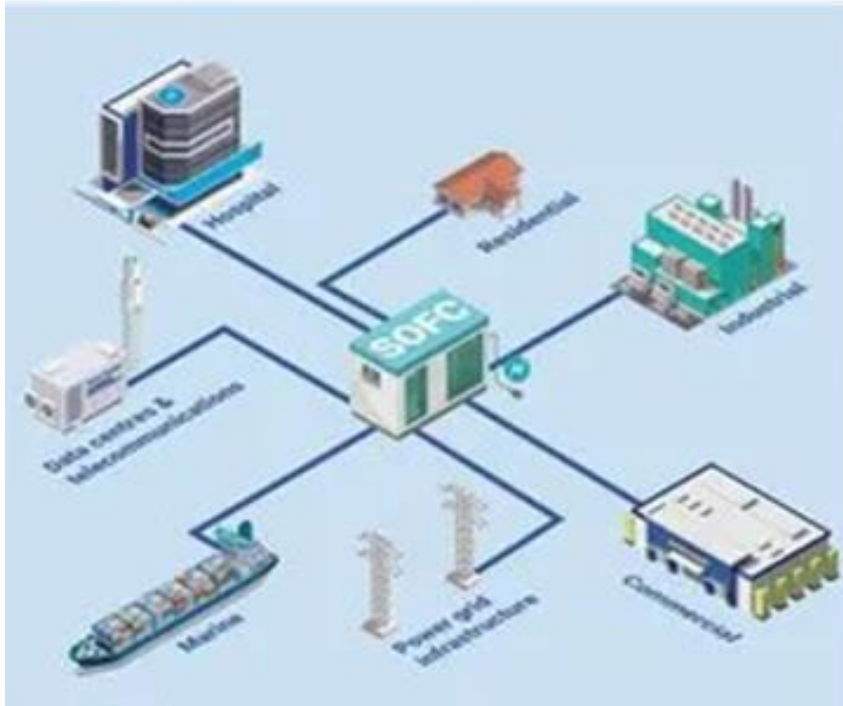
SOFC versus PEMFC

Défis et Limitations

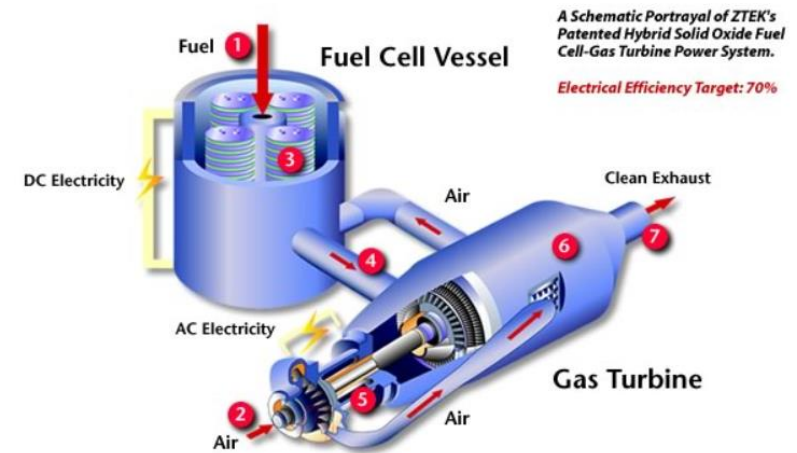
Critère	SOFC	PEMFC
Température de fonctionnement	Haute (550-1000°C)	Basse (environ 80°C)
Type de combustible	Divers combustibles (hydrogène, gaz naturel, biogaz)	Principalement hydrogène pur
Efficacité électrique	50-60%	Environ 40-50%
Cogénération (chaleur et électricité)	Oui, efficacité accrue par récupération de chaleur	Moins efficace, chaleur à basse température
Durabilité	Généralement bonne mais dégradation à cause de la haute température	Bonne, dépend de la gestion de l'humidité et des impuretés dans l'hydrogène
Coût	Plus élevé dû aux matériaux résistants à la chaleur	Moins élevé, matériaux moins exigeants en température
Flexibilité du combustible	Très flexible avec possibilité de reformage interne	Nécessite hydrogène pur, sensibilité aux impuretés
Délai de démarrage	Plus long en raison des températures élevées	Rapide, adapté aux applications nécessitant des démarrages fréquents
Applications typiques	Génération de puissance stationnaire, cogénération	Véhicules électriques, alimentation de secours, petites applications portables

Principales Applications des SOFC

1. Production décentralisée d'électricité pour réseau électrique et utilisations industrielles ou commerciales



2. Systèmes de cogénération (CHP)



Fournisseurs de composants, de cellules, de modules ou de systèmes

Principaux acteurs du marché SOFC



- Bloom Energy
 - Aisin
 - Mitsubishi
- 86.67% du chiffre d'affaires

Quelques exemples d'installations ou d'utilisation de SOFC

Google, Coca-Cola et eBay : premiers clients de Bloom Energy



Bloom chez Google



Bloom chez AT&T



Mitsubishi : MEGAMIE, système 250 kW, Allemagne en 2022.

Peut fournir l'électricité à 300 maisons.

Carburant (gaz naturel, biogaz, propane, hydrogène)

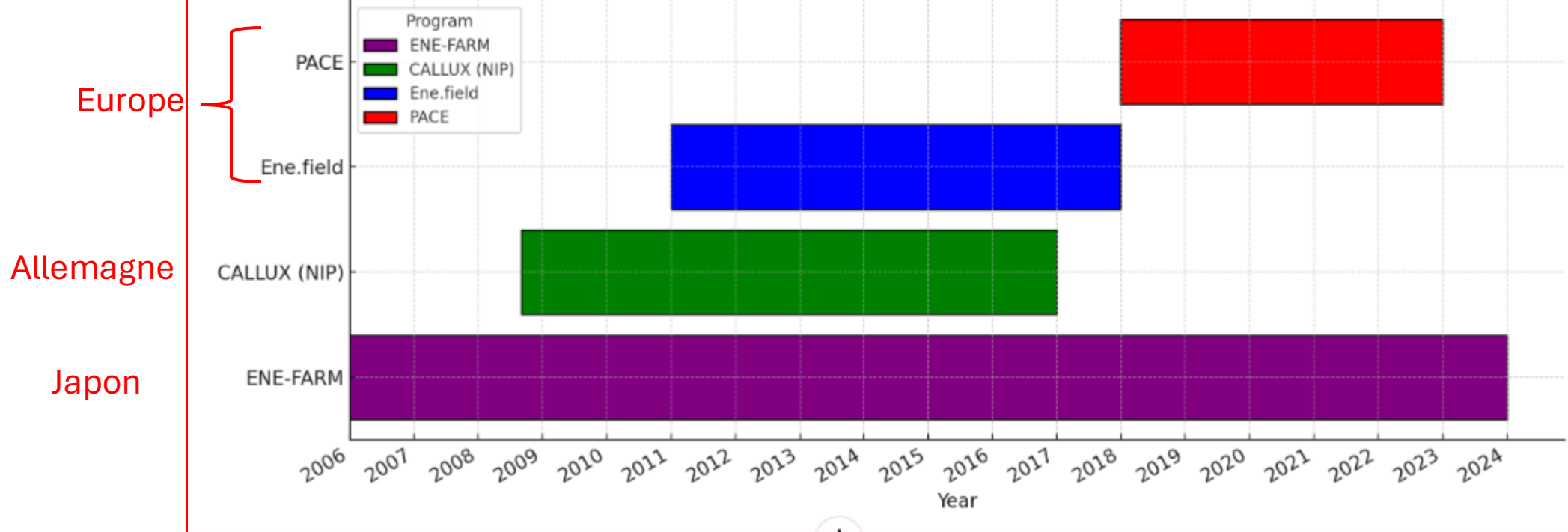


Premier drone au monde équipé de SOFC, en 2020.

Programmes de déploiement de piles à combustible pour le logement individuel



Timeline of Fuel Cell Deployment Programs



Comparaison des technologies PEM et SOFC




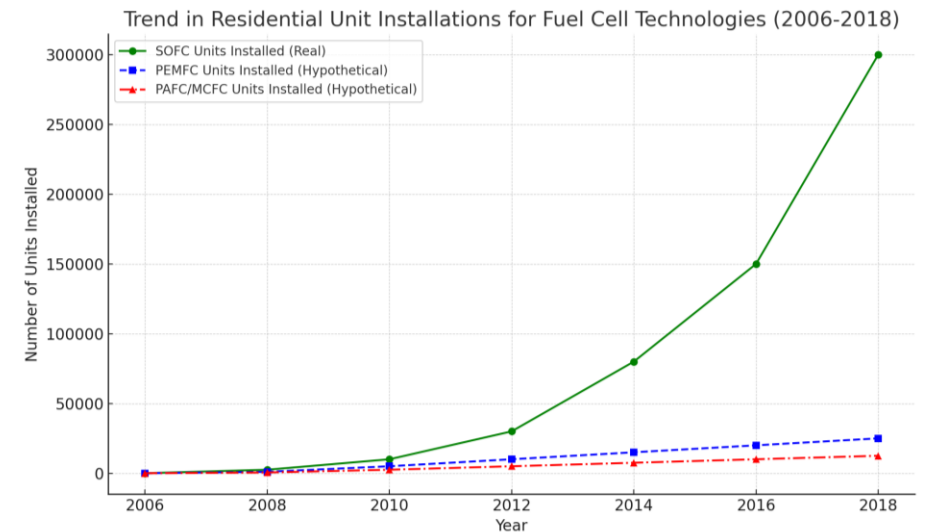
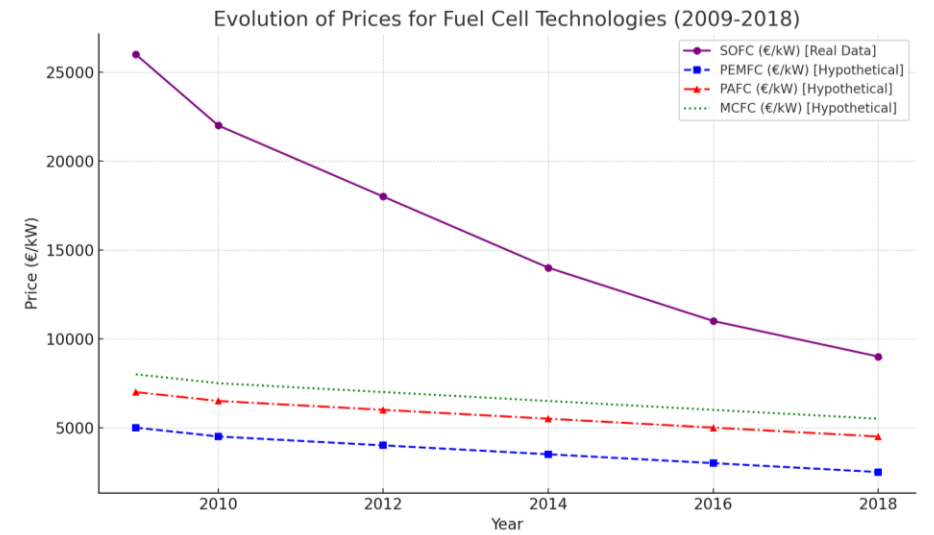
	Toshiba	Panasonic	Aisin Seiki
Model			
Output	700 W (PEM)	700 W (PEM)	700 W (SOFC)
Size (mm)	W780 x D300 x H1000	H1750 x W400 x D400	W780 x D330x H1195
Weight	86 kg	88 kg	100 kg
Electrical Efficiency	39 %	39 %	52 % @700W
Hot water tank Capacity	200L	140L	28 Litters
Retail Price (list price) (excl. tax (8%))	10 200 € (excl. installation)	10 000 € (excl. installation)	11 156 € (excl. installation)

Tableau 1 - Les trois types de micro CHP commercialisés dans le cadre de ENE-FARM (source Tokyo Gas et Osaka Gas - octobre 2016)

PEM : alimentée en hydrogène issu d'un reformeur à gaz

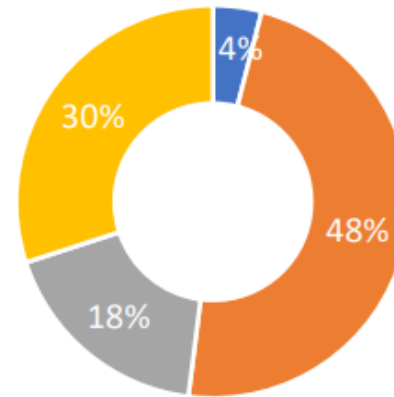
SOFC: **alimentée directement en gaz naturel**, la transformation en hydrogène se faisant à l'anode (reformage interne).
La pile fonctionne à une température de 700-750°C

Programme ENE-FARM



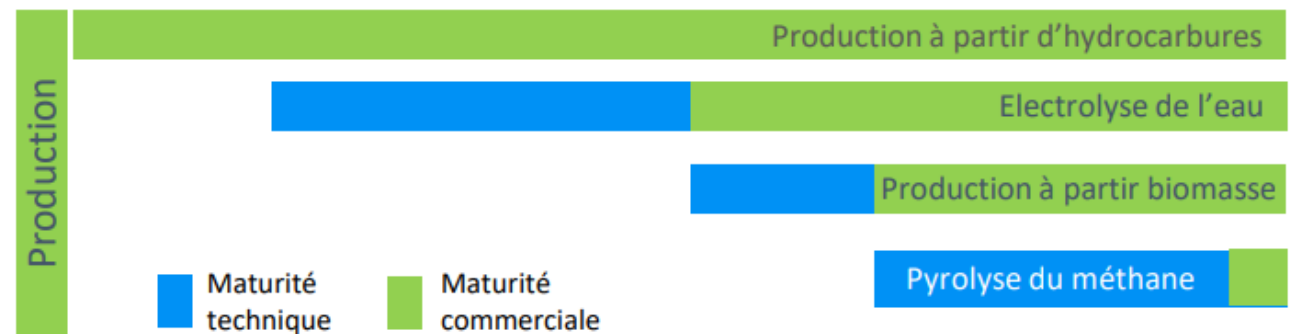
Électrolyse de l'eau

Répartition des modes de production hydrogène



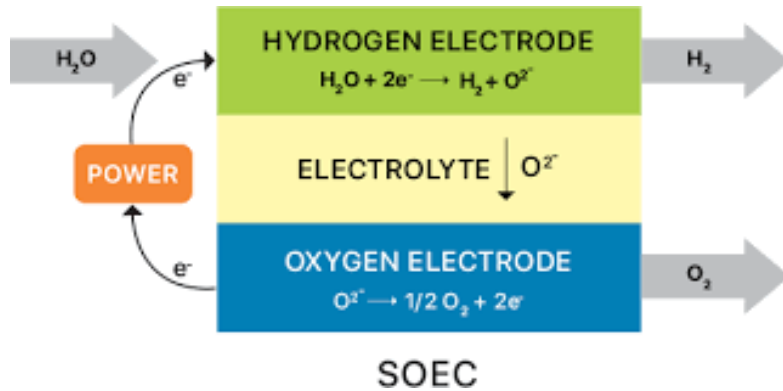
- Electrolyse de l'eau
- Vaporeformage du méthane
- Gazéification du charbon
- Oxydation partielle du pétrole

Avant 2000 2010 2020 2023 Après 2025



Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC)

Électrolyte: oxyde solide conducteur d'ions O^{2-} fonctionnent à haute température (600-1000°C)

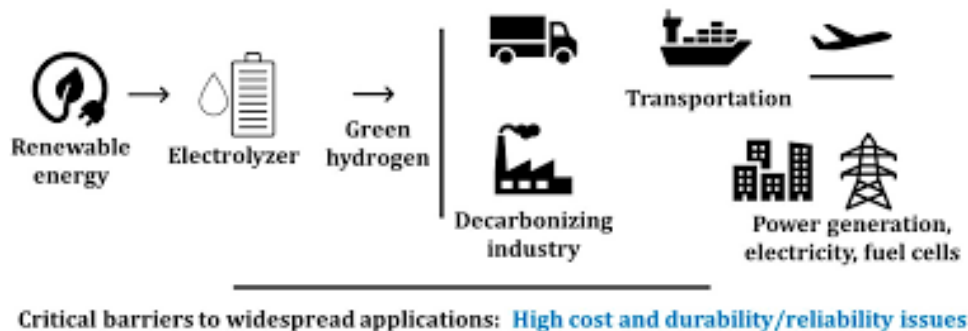


Électrolyseur à Oxyde Solide, SOEC

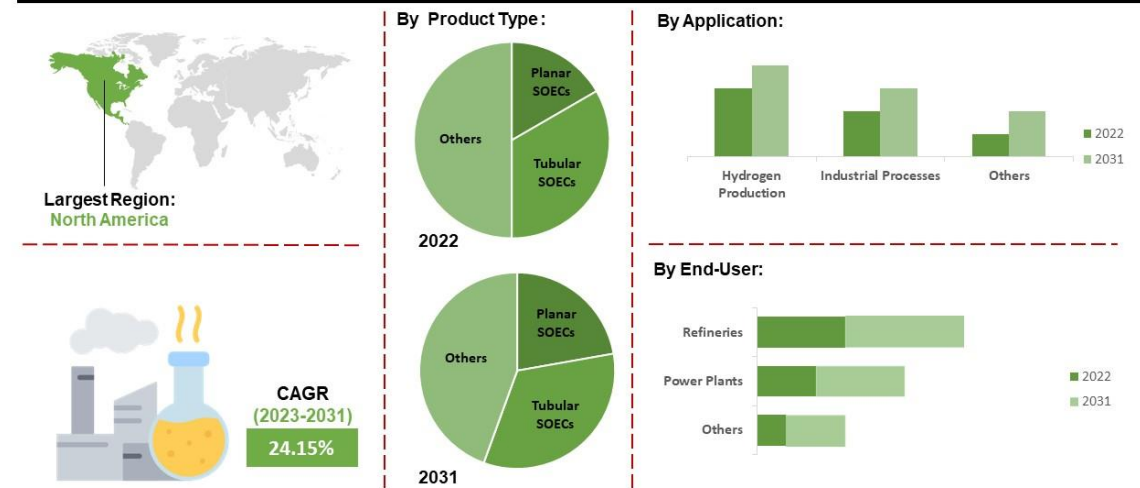
- Inverse d'une SOFC
- Utilise l'électricité pour produire de l'hydrogène.

Analyse de Marché

Couplage à sources d'énergie renouvelable



Global Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC) Market Research Report



Key Players: sunfire

ITM POWER
Energy Storage | Clean Fuel

CeresPower

KYOCERA

SIEMENS energy

US: +1 551 226 6109

Email: info@insightanalytic.com

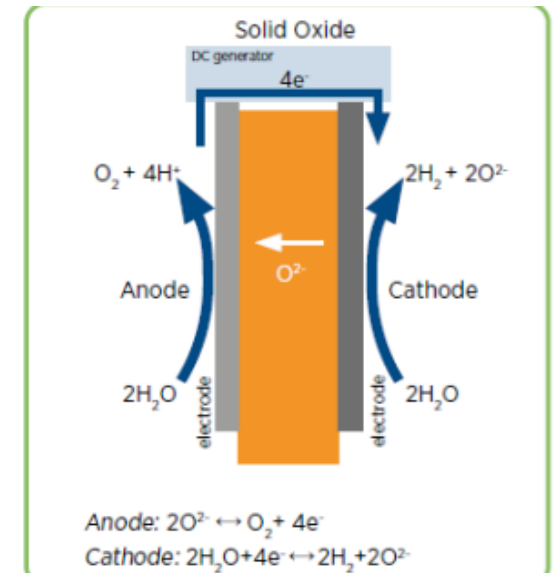
INSIGHT ACE ANALYTIC

Types de projets en fonction des capacité de production en jeu



Données en 2020	Technologies	Efficacité stack KWh/KgH ₂	Durée de vie du stack (heures)	Durée de vie du système
	Alcalin	50-56	75 000	0,11 – 0,23 %/1000h
	PEM	52-59	65 000	0,16 – 0,30 %/1000h
	SOEC – Haute température	39-41	10 000	0,5 – 4 %/1000h
	AEM	51.5-66	>5k	NC

SOEC



Acteurs de la filière SOEC

Sylfen



Production d'énergie hors réseau

Présenté dans le segment Usages de ce catalogue :
- 1.2 Nm³/h produit à 700°C pour 25 cellules stack

Efficacité : 99% (HHV) – 84% (LHV)



Source : Sylfen

GENVIA



Electrolyseur SOE

Stack : 1.7 Nm³/h pour 25 cellules stack



Source : Genvia

sunfire®



Principes d'électrolyse à haute température
Fonctionnement à 850°C

Puissance max stack : 2 680 kW

Production hydrogène :
750 Nm³/h soit 67 kg/h

Démonstrateur à échelle industrielle en 2022



Source : Sunfire

Le 1er démonstrateur Sylfen à Grenoble: technologie d'électrolyse réversible à haute température



Vue 3D extérieure du Smarthytes, et photographie de l'intérieur

- **Validation en 2018** : En collaboration avec le CEA, Sylfen a conçu, assemblé, et testé avec succès à Grenoble le Smart Energy Hub.
 - **Smart Energy Hub** : Solution hybride destinée aux bâtiments et écoquartiers utilisant des sources d'énergie locales et renouvelables.
- Intègre :

- **Autoconsommation d'énergie renouvelable** : Produit et stocke l'énergie sous forme de H₂ et de batteries Li-ion.
- **Technologie de Rupture** : Comprend un électrolyseur réversible et une pile à hydrogène, associés à un cogénérateur à gaz.
- **Système Intégré et Automatisé** : Gère son propre hydrogène et bascule automatiquement entre les modes de fonctionnement grâce à une supervision logicielle avancée.

En 2019 : Livraison du démonstrateur à un grand partenaire industriel, prêt pour la montée en puissance vers des applications ciblées.

Projets Phares des Technologies SOEC en Europe



Sunfire, Allemagne en 2022.
Production H₂ : 67kg/h.

Topsoe, Danemark : : Usine de SOEC financée par 94 M€ de l'UE, opérationnelle en 2023 pour aider à décarboner les industries de l'acier, des mines et du transport longue distance. Capacité : 5 GW/an.



Projet MultiPLHY, Pays-Bas

Installation du premier SOEC de plusieurs mégawatts au monde (2,6 MW fonctionnant à 850 °C), soutenu par l'UE via le partenariat Clean Hydrogen.



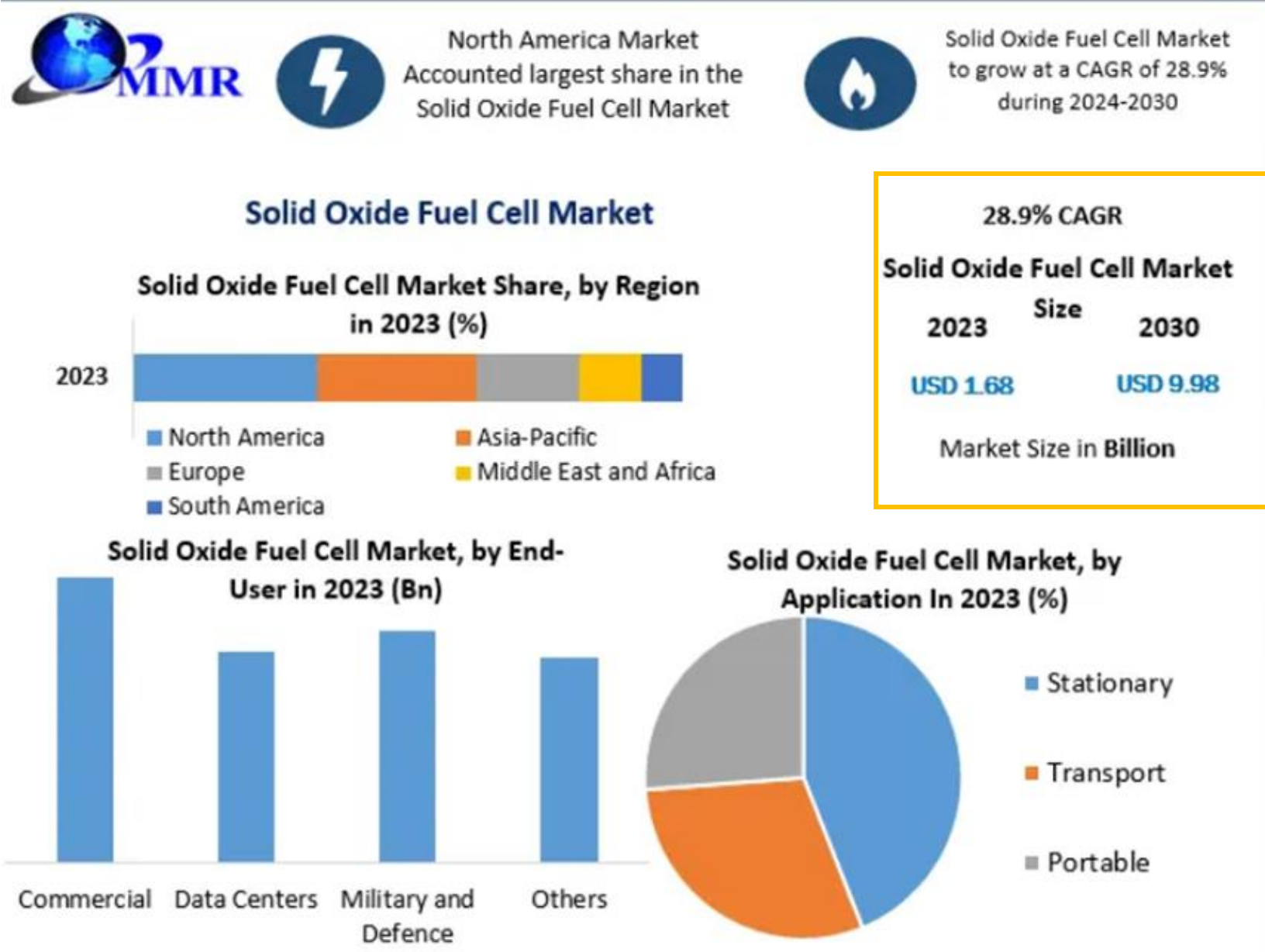
“MultiPLHY”, World’s largest High-Temperature Electrolyzer



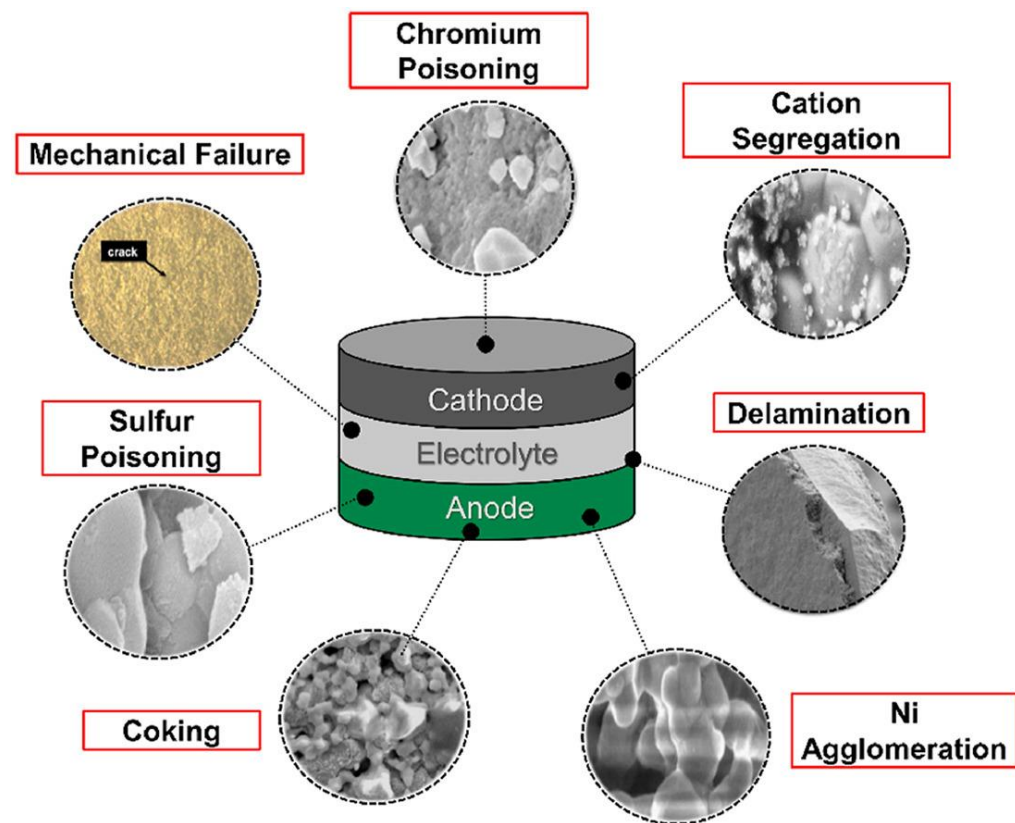
MultiPLHY Consortium

Comment anticiper la future génération des SOFC et SOEC?

Analyse du Marché Global en 2023 avec projection jusqu'en 2030



Dégradations affectant la durabilité des cellules



Toutes les causes de dégradations sont dues aux températures de fonctionnement élevées!

Axes de Recherche, Coûts, Production, Rentabilité et durées de vie des systèmes SOFC

Axes de Recherche	
Durabilité et Gestion Thermique	Réduire les températures de fonctionnement pour prolonger la durée de vie et réduire les coûts
Efficacité et Innovation	Améliorer les taux de conversion d'énergie avec de meilleurs catalyseurs
Coûts des Systèmes SOFC	
Coût de Production	Actuel : 4000 €/kWe, Prévis pour 2030 : < 800 €/kWe
CAPEX Système (petits < 5 kWe)	Actuel : 10 000 €/kWe, prévis pour 2030 : 2000 €/kWe
CAPEX Système (grands 51-500 kWe)	Actuel : 10 000 €/kWe; prévis pour 2030 : 3500 €/kWe
Production Annuelle de Systèmes et Coût par kW	
2020	Production : 210 systèmes, Coût par kW : 2400 USD/kW
2035	Production : 4000 systèmes, Coût par kW : 1909 USD/kW
2050	Production : 10 000 systèmes Coût par kW : 841 USD/kW
Rentabilité Systèmes SOFC	
Durée de Vie	10 à 20 ans
Taux de Dégradation	Inférieur à 1% par an
Efficacité Énergétique	Plus de 60% électrique, cogénération 85% ou plus
Coûts Opérationnels	Compétitifs par rapport aux alternatives
Incitations Financières	Subventions et crédits d'impôt pour technologies propres
Durées de Vie Annoncées	
Bloom Energy	20 ans
Mitsubishi (MEGAMIE)	25 000 heures (3 ans)
Sunfire	30 000 heures (3 à 5 ans)
Ceres Power	Plus de 30 000 heures (3 à 5 ans)

Programme et Équipements Prioritaires de Recherche sur l'Hydrogène décarboné (PEPR H2)

Budget : 80 M€

Pilotage : CNRS & CEA

Soutenir des activités de recherche amont pour accélérer
l'innovation dans le domaine de l'hydrogène décarboné

PEPR-H2

7 Projets ciblés



Production d'hydrogène



CELCER-EHT : Cellules Céramiques EHT durables, performantes et bas coûts

PROTEC : Développement de cellules d'électrolyse à base de céramiques à conduction protonique

Stockage de l'hydrogène



SOLHyd : Stockage solide de l'hydrogène: nouvelles stratégies, nouveaux matériaux

HYPERTSTOCK: Stockage hyperbare de l'hydrogène: référentiel et méthodologies matériaux

Conversion de l'hydrogène



FLEXISOC: Flexibilité des cellules SOC vis-à-vis du combustible

PEMFC95: Développement d'une cellule de PEMFC capable de fonctionner durablement à 95°C

DURASYS-PAC: Durabilité et Résilience des Systèmes Piles à Combustible

ISCR, Rennes



PEPR H2

et un Appel à Projets → 30 projets retenus



PEPR Hydrogène Décarboné – Appel à projets - 2021

La stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné, programmée sur la décennie 2020-2030, s'articule autour de trois priorités :

- > Décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse avec 6.5 GW d'électrolyseurs installés en 2030 ;
- > 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.



Le Programme et Équipement prioritaire de recherche (PEPR) hydrogène décarboné a pour vocation de soutenir des activités de R&D amont (TRL entre 1 et 4) au plus haut niveau mondial, en support aux industriels de la filière et répondant aux priorités définies dans le cadre de la stratégie nationale. Des projets ciblés ont déjà été identifiés et construits dans ce cadre et sont en cours de lancement.

Publié le 30/11/2021

Investissements d'Avenir

Programme et Équipement Prioritaire de Recherche

« Hydrogène décarboné »

Appel à projets

« AAP H2 vague 1 »

Date de clôture de l'appel à projets
31/01/2022 à 11h00 (heure de Paris)

Adresse de consultation de l'appel à projets
<http://anr.fr/PEPR-H2-AAP>





Projet Ciblé FLEXISOC

aide demandée : 2 250 000 €

PROJET FLEXISOC	FLEXibilité des cellules SOC vis-à-vis du combustible
Coordonné par	CNRS – Univ Nantes (Annie LE GAL LA SALLE)
	Durée 5 ans

Moyens prévus

Permanents : 29 h.an
7 doctorants et 6 postdoc
11 laboratoires académiques

Impacts attendus

Scientifiques

- Compréhension des phénomènes de catalyse
- Amélioration des rendements sous mélanges gazeux variés

Industriels

Valorisation des hydrocarbures et sous-produits industriels

Environnementaux

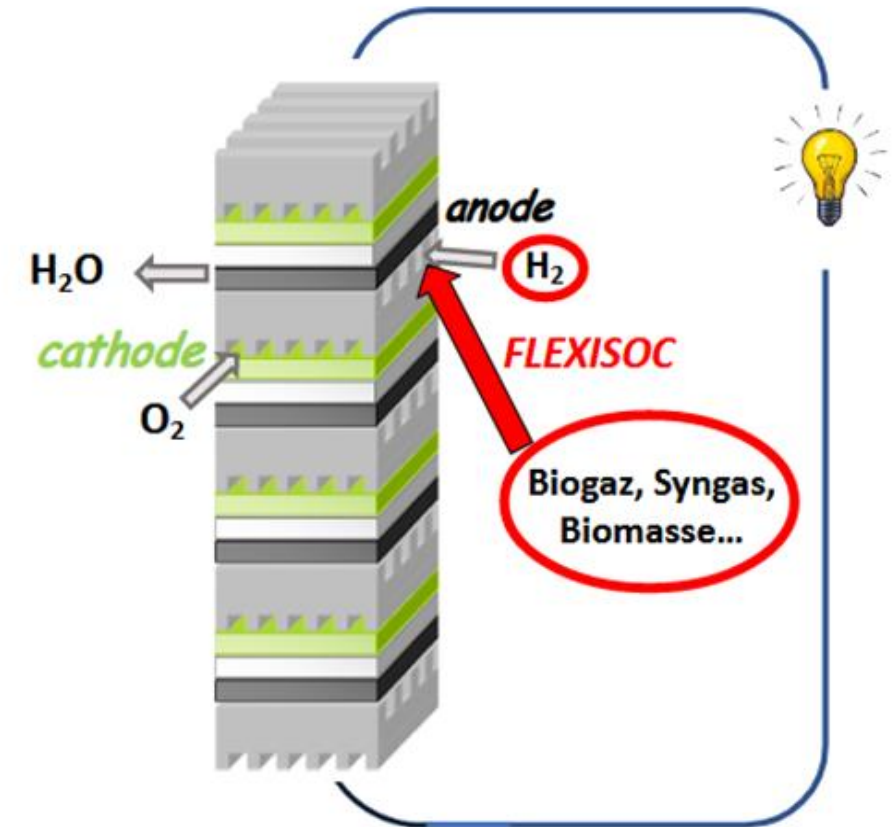
Diminution des émissions de gaz à effet de serre dans la cogénération et la mobilité lourde



Mettre au point une cellule à membrane céramique SOC (Solid Oxide Cell) complète robuste et flexible vis-à-vis du combustible, fonctionnant à relativement basse température (600°C)

Enjeux

- Permettre l'alimentation des piles à oxydes solides avec des **combustibles autres que l'hydrogène**, comme les mélanges gazeux ou liquides variés
- Rendre les piles à combustibles plus **robustes** vis-à-vis des **polluants** présents dans les différents combustibles
- **Abaisser les températures** de fonctionnement de ces systèmes « flexibles »



Contributions du CEA dans l'Avancement des Technologies SOFC et SOEC

Catégorie	Détails
Technologies SOFC	Développement pour la cogénération d'énergie et de chaleur Amélioration de l'efficacité énergétique et la durabilité des systèmes.
Technologies SOEC	Production d'hydrogène plus efficace et économique.
Collaborations Nationales	<i>via</i> le PEPR H2, projets ANR,
Collaborations Européennes	<ul style="list-style-type: none">- Projet SOFC-Life- Projet REFLEX- Projet MultiPLHY
Influence Politique	Contribution significative à la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) et au Green Deal européen.
Normes et Régulations	Engagement dans l'élaboration de normes techniques européennes et internationales pour une intégration sûre et efficace des technologies SOFC et SOEC.

Conclusion : Comment Anticiper?

**Initiatives
& Politiques
Gouvernementales**

Incitations financières

Cadre réglementaire

Subventions



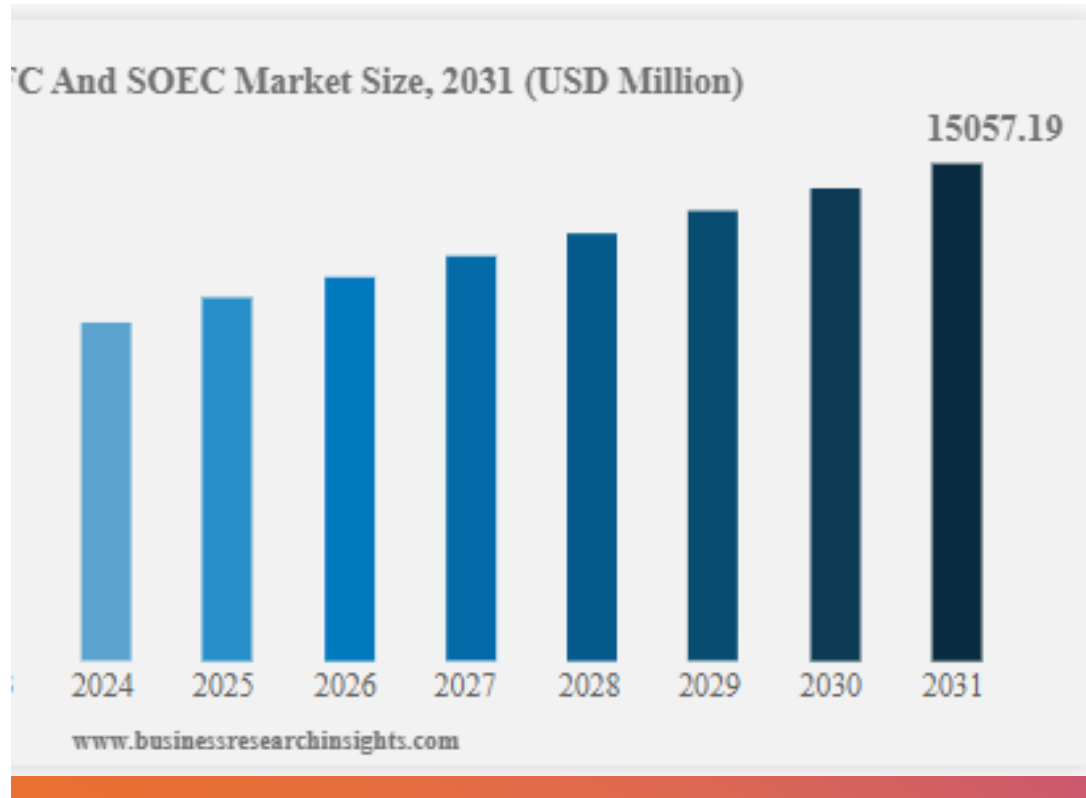
**Défis
&
Opportunités**

**Recherche
&
Développement**

**Réduction des coûts
de production**

**Amélioration les
performances**

Vers une Transition Énergétique et un Avenir Durable



Marché des SOFC et SOEC en Expansion

La croissance projetée montre une forte hausse, atteignant 15 milliards USD en 2031