

Introduction

La transition énergétique impose de réduire fortement les émissions de CO₂ dans les secteurs industriels les plus polluants (Figure n°1). L'hydrogène apparaît comme un levier clé, mais sa production reste aujourd'hui majoritairement fossile (Figure n°1). L'**Électrolyse Haute Température** (EHT), basée sur les **Cellules Électrolyses à Oxyde Solide** (SOEC), offre une voie performante pour produire un hydrogène bas carbone, surtout lorsqu'elle valorise la chaleur et l'électricité d'un réacteur nucléaire. Cette combinaison promet un rendement élevé et une production continue, indépendante des conditions climatiques. Nous pouvons alors nous demander **comment les SOEC tirant parti de la chaleur et de l'électricité produites par un réacteur nucléaire optimisent-elles la production d'hydrogène, et quelles contraintes techniques freinent leur intégration ?**

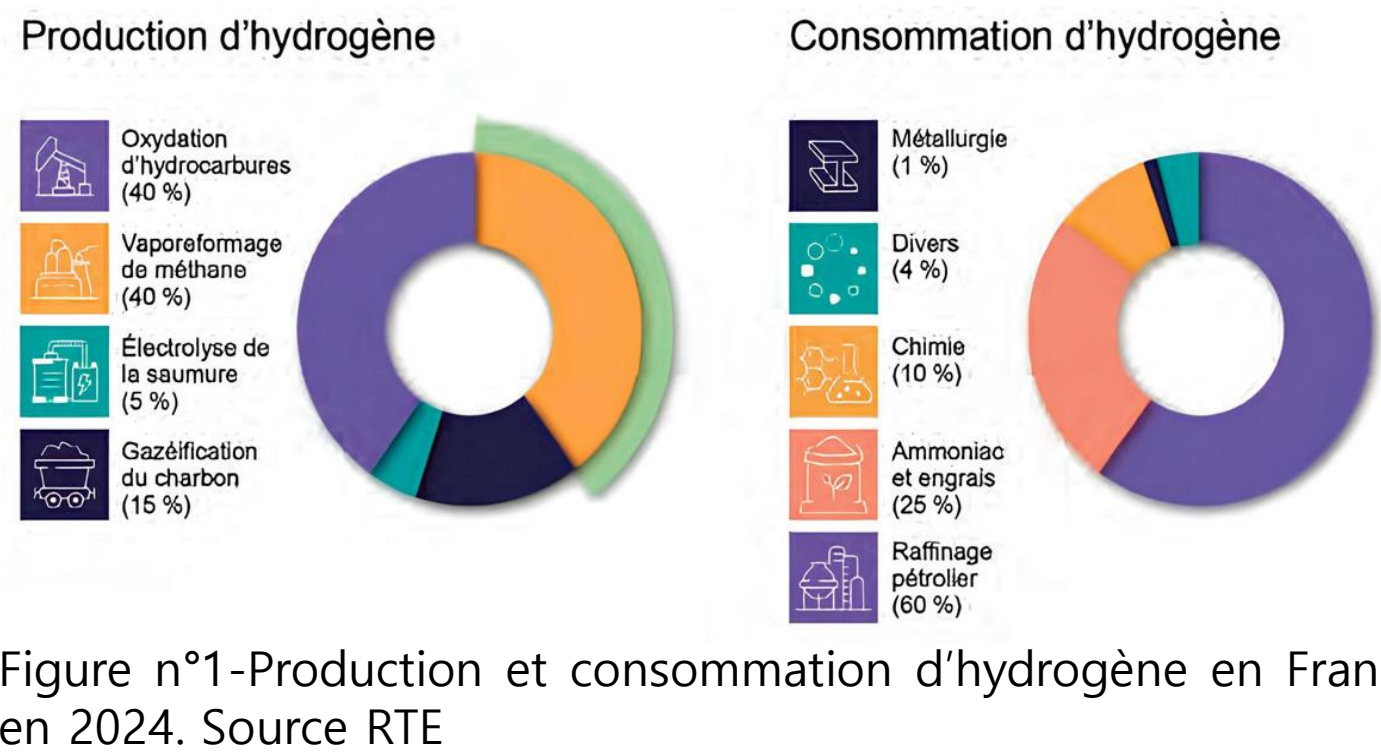


Figure n°1-Production et consommation d'hydrogène en France en 2024. Source RTE

I - Principe de l'EHT et le rôle des SOEC

L'EHT utilise la chaleur et l'électricité pour décomposer la vapeur d'eau : $\text{H}_2\text{O (g)} \rightarrow \text{H}_2 \text{ (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (g)}$ (Figure n°2) à haute température (700–900 °C).

Parmi les technologies d'EHT, les SOEC sont des “fours électrochimiques” en céramique (Tableau n°1) dont le haut rendement est directement lié à leur structure (Figure n°3). Ce système repose sur une **structure interne en trois couches** (cathode, électrolyte et anode) pour la séparation des gaz, maintenue au sein d'un empilement par des **plaques métalliques** (interconnecteurs) qui assurent l'acheminement de la vapeur et la conduction du courant nécessaire à la réaction.

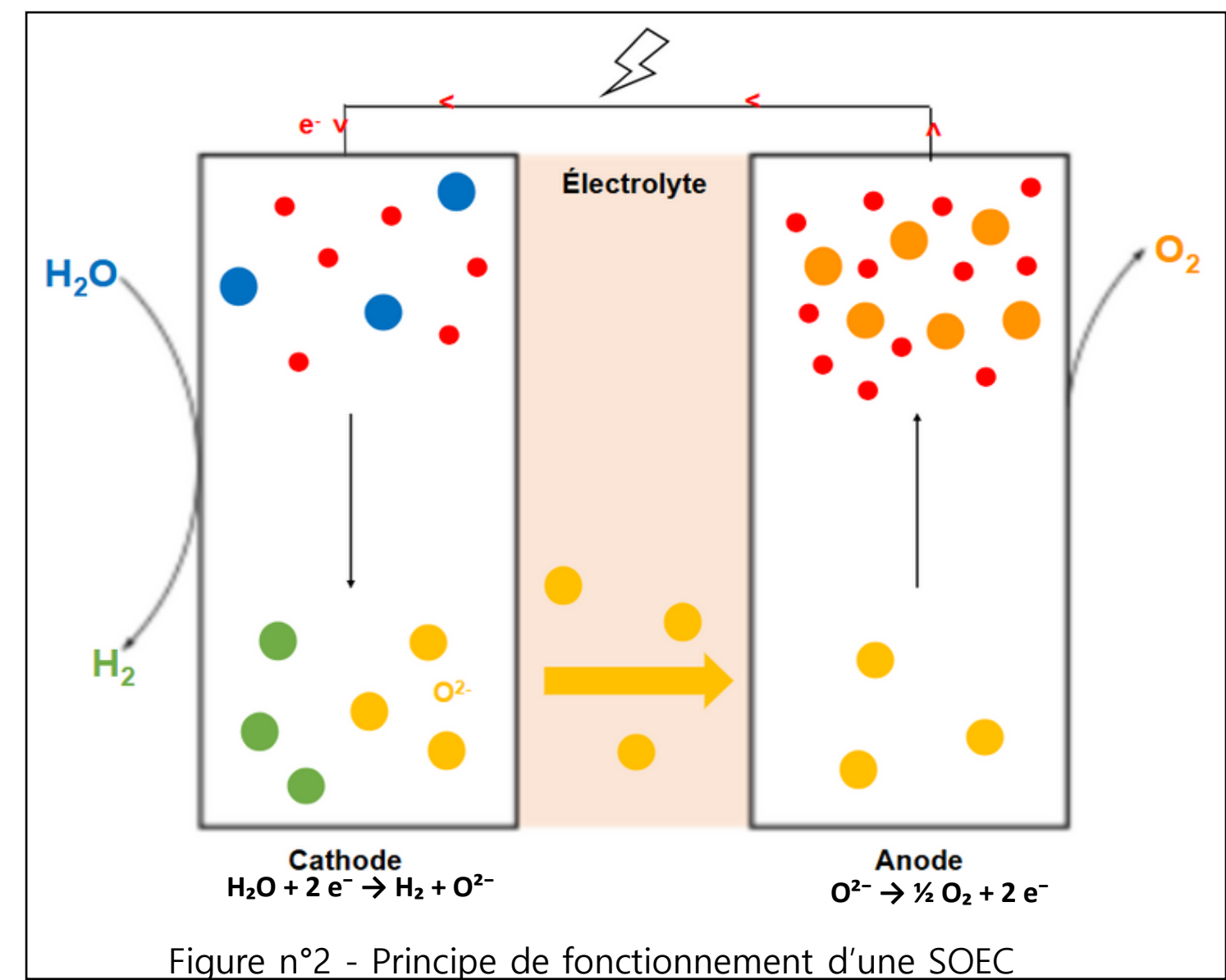


Figure n°2 - Principe de fonctionnement d'une SOEC

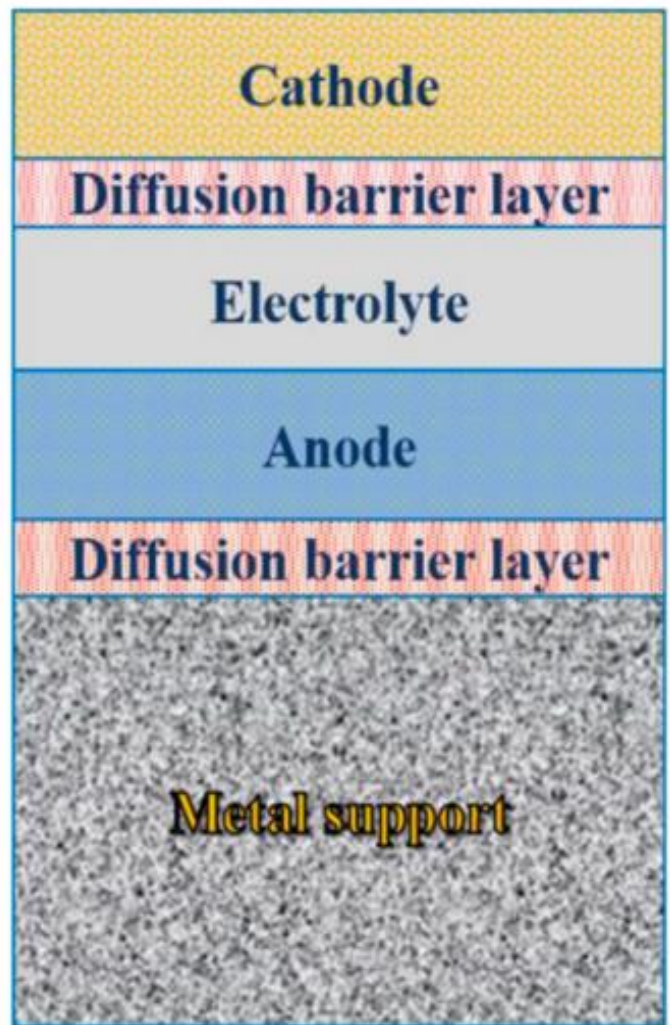


Figure n°3- Structure d'une SOEC. Source : F.Vostakola et al, 2023

Le choix des matériaux (Tableau n°1) dans une SOEC est crucial : ils assurent la conduction ionique et électronique, la catalyse des réactions et la stabilité à haute température, garantissant ainsi performance et durabilité de la production d'hydrogène.

Une SOEC élémentaire ne produisant que 0,1 à 0,5 kW, est insuffisante pour l'industrie. La production est donc augmentée par l'empilement de plusieurs cellules en **Stacks** (Figure n°4) pour atteindre 10 à 100 kW. Ces stacks peuvent opérer sous haute pression (jusqu'à 30 bar) pour optimiser la production et le stockage d'hydrogène à l'échelle du Mégawatt (MW) pour les applications industrielles.

Tableau n°1 - Composants et matériaux d'une SOEC

Composant	Matériaux	Caractéristiques
Cathode	nickel–zircone stabilisée à l'yttrium (Ni-YSZ)	Excellente conductivité ionique et électrique, stable à haute température
Anode	oxydes mixtes de type pérovskite associés à de la zircone stabilisée à l'yttrium (LSM-YSZ)	Bonne conduction ionique et électronique
Électrolyte	zircone stabilisée à l'yttrium	Stable chimiquement, bonne résistance mécanique, longue durée de vie

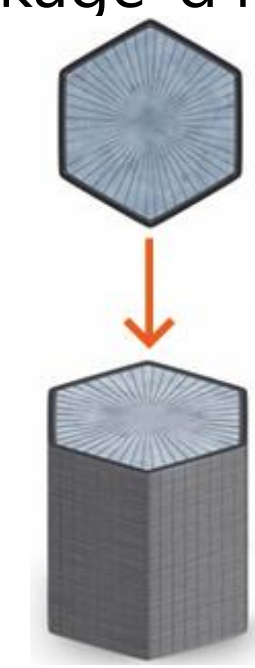


Figure n°4 - Exemple d'un Stack développé par la société TOPSOE

II - Couplage SOEC - nucléaire : intérêts et performance

L'EHT exploite la chaleur élevée : 700–900 °C, d'un réacteur pour activer la SOEC et produire de l'hydrogène à haut rendement. Seuls les réacteurs capables de fournir cette chaleur (Tableau n°2) permettent la migration rapide des ions à travers l'électrolyte et favorisent les réactions électrochimiques ; les réacteurs à température plus basse ne suffisent pas pour activer efficacement la SOEC.

Dans un couplage SOEC–nucléaire (Figure n°6), toute l'énergie nécessaire provient du réacteur : la chaleur du cœur préchauffe la cellule et l'électricité alimente l'électrolyse, permettant ainsi une production d'hydrogène efficace et totalement bas carbone.

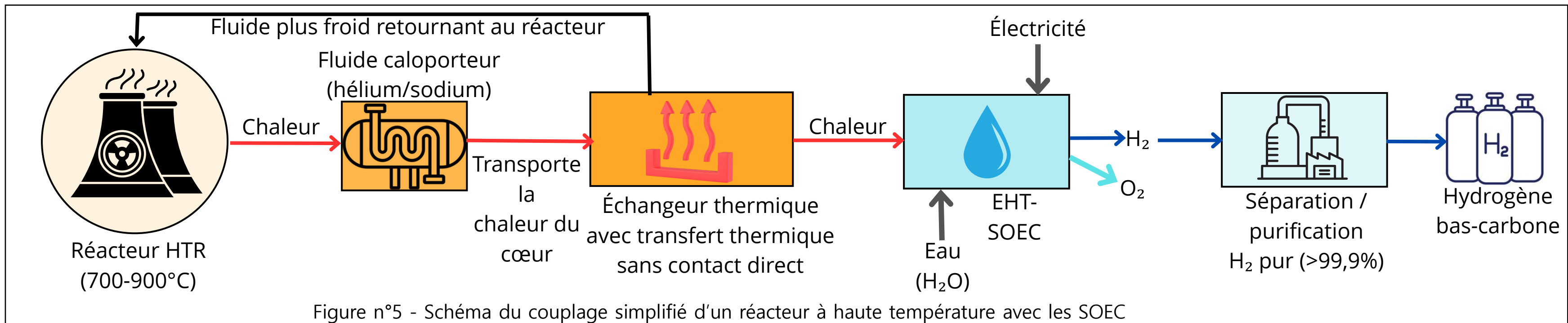


Figure n°5 - Schéma du couplage simplifié d'un réacteur à haute température avec les SOEC

Avantages du couplage :

- Rendement “électricité → hydrogène” : **80 – 90 %** PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) soit la fraction de l'énergie électrique effectivement convertie en énergie chimique dans l'hydrogène,
- moins de gaspillage thermique,
- produit selon la demande ou le coût de l'électricité.

En France, les REP ont une température de sortie bien trop faible pour alimenter une SOEC (Tableau n°2) qui nécessite 700 – 900 °C. Un couplage direct serait donc inefficace, nécessitant des réacteurs capables de fournir une chaleur plus élevée, comme ceux de génération IV.

Une SOEC fonctionne normalement à 1,1 – 1,4 V, mais la chaleur fournie par le réacteur permet de réduire légèrement ce voltage à **0.9 - 1.1 V**, ce qui améliore le rendement de production d'hydrogène.

Le courant détermine la quantité d'hydrogène produite : **plus le courant est élevé, plus la production augmente.**

La chaleur du réacteur réduit la tension nécessaire, et l'électricité fournit le courant : ensemble, ils optimisent la production d'hydrogène.

Tableau n°2 - Comparaison des réacteurs nucléaires pour un possible couplage avec l'EHT-SOEC

Type de réacteur	Génération	Spectre neutronique	Caloporteur	Température
HTGR (High-Temperature Gas-Reactors)	Gen IV (concept)	Thermique	Hélium	750-950 °C
VHTR (Very High Temperature Reactors)	Gen IV (concept)	Thermique	Hélium	900-1000 °C
SFR (Sodium-Cooled Fast Reactors)	Gen IV	Rapide	Sodium	500-550 °C
GFR (Gas-cooled Fast Reactors)	Gen IV	Rapide	Hélium	850 °C
RHE (Réacteur à eau lourde)	Gen II	Thermique	Eau lourde	300 °C
REP (Réacteur à eau pressurisée)	Gen II-III	Thermique	Eau légère	320-340 °C

III - Défis d'intégration et risque

Malgré le potentiel énergétique et l'efficacité des SOEC, leur déploiement à grande échelle est freiné par plusieurs **défis techniques et économiques** majeurs (Tableau n°3).

Tableau n°3 - Limites et défis majeurs de la technologie des SOEC

Catégorie	Limites / Défis
Technologie et performance	Maturité limitée, rendement réduit <700°C, durabilité limitée
Matériaux et composants	Dégradation des électrodes, contraintes thermiques, fragilisation
Opération et fonctionnement	Conditions complexes (vapeur, surtension, oxygène), besoin de tests accélérés, expérience limitée à grande échelle
Économie	Coût élevé, marché limité
Sécurité et sûreté	Risque incendie/explosion H ₂

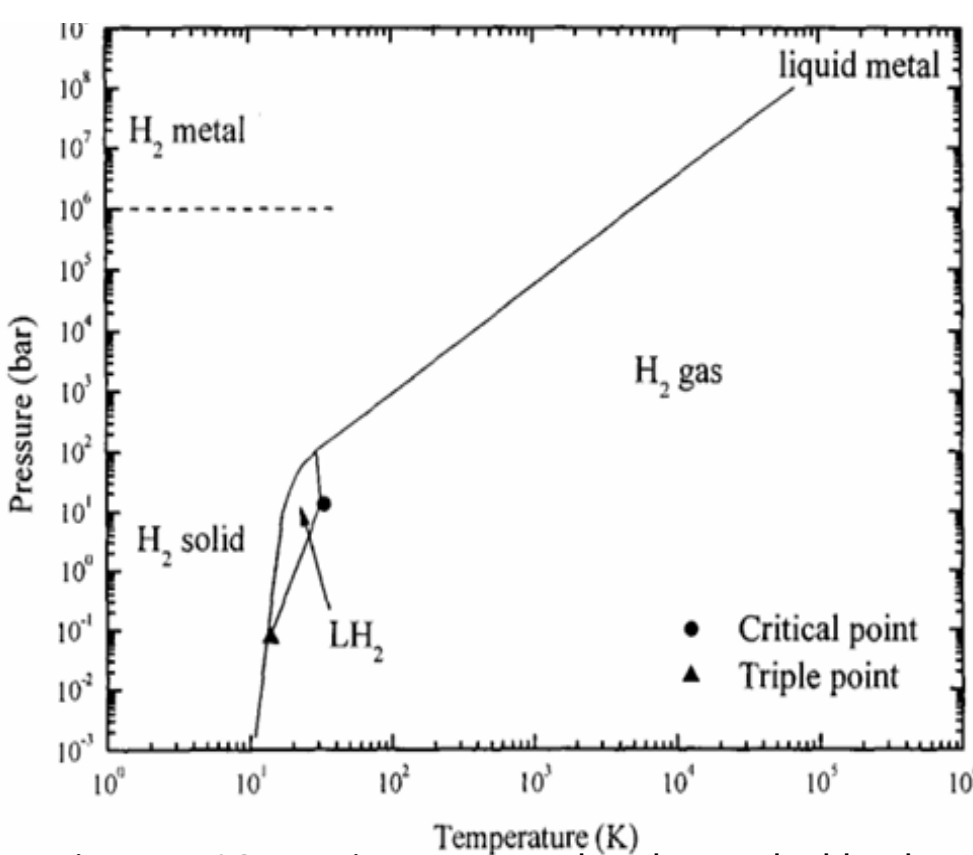


Figure n°6 - Diagramme de phase de l'hydrogène. Source : M.Latroche et al., 2018.

Dans une SOEC couplée à un réacteur, l'hydrogène est produit à $1 \times 10^3 \text{ K}$ ($\approx 800 \text{ °C}$) et à faible pression, jusqu'à $1 \times 10^1 \text{ bar}$ ($\approx 30 \text{ bar}$). À ces conditions, l'hydrogène gazeux reste stable (Figure n°6) : le seul risque potentiel d'**explosion** apparaît en cas de mélange H₂/O₂, non pas dans la cellule mais dans le **circuit d'évacuation du H₂** en cas de fuite. Ce risque est donc faible, localisé et sans lien direct avec le réacteur nucléaire en raison de l'isolation totale des circuits.

IV - Pistes de réflexion

Pour surmonter ces défis de durabilité et de coût, les pistes de réflexion se concentrent sur trois axes majeurs : l'amélioration des matériaux, les stratégies d'atténuation de la dégradation et la maîtrise de l'industrialisation (Tableau n°4).

Tableau n°4 - Solutions et pistes de recherche possibles

Catégorie / Axe	Objectif / Problème ciblé	Solutions / Pistes de recherche
Matériaux d'électrodes et électrolyte	Dégradation des électrodes, perte de performance, coût des métaux nobles	Développer de nouveaux oxydes à conductivité mixte stables à haute T, cathodes avec “vacancies d'oxygène”, éviter les métaux nobles
Stratégies de mitigation de dégradation	Ralentir ou régénérer la performance à long terme	Ajustements opérationnels, ingénierie des interfaces électrode/électrolyte, tests accélérés, protocoles de maintenance
Intégration énergétique et industrialisation	Réduire coût, augmenter rendement global, passer du laboratoire à l'échelle industrielle	Couplage avec chaleur industrielle ou nucléaire, utilisation de sources renouvelables, modularité et maintenance simplifiée

Conclusion

L'EHT-SOEC couplée au nucléaire est la voie la plus prometteuse pour un hydrogène à haut rendement dépourvu d'émission de CO₂. Si les défis de durabilité et d'industrialisation sont en cours de résolution, l'optimisation énergétique finale dépendra du déploiement des réacteurs de Génération IV (HTGR ou GFR). Leur haute température de sortie (750°C et plus) est la clé pour exploiter le plein potentiel des SOEC et assurer la décarbonation industrielle à grande échelle.

Bibliographie

- Ayers, K. E., & Marina, O. A. (2024). State of the art in low-temperature and high-temperature electrolysis. MRS Bulletin, 49, 1226–1234. <https://doi.org/10.1557/s43577-024-00806-6>
- CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). (2023). L'EHT, un procédé de production de l'hydrogène très prometteur. Clefs CEA, 59.
- Fallah Vostakola, M., Ozcan, H., El-Emam, R. S., & Amini Horri, B. (2023). Recent advances in high-temperature steam electrolysis with solid oxide electrolyzers for green hydrogen production. Energies, 16(8), 3327. <https://doi.org/10.3390/en16083327>
- ISPT (Institute for Sustainable Process Technology). (2023). Next Level Solid Oxide Electrolysis. Rapport public.

- Jinming, Z. (2024). Surface chemistry study on the SOEC electrodes during high-temperature H₂O electrolysis (Thèse de doctorat). Université de Strasbourg. (NNT : 2024STRAF049).
- Kucepki, J., Hercog, J., Motyliński, K., Malesa, J., Muszyński, D., Skrzypek, E., Skrzypek, M., Boettcher, A., & Tchorek, G. (2024). Advancing production of hydrogen using nuclear cycles: Integration of high temperature gas-cooled reactors (HTGR) with solid oxide electrolyzers (SOE). International Journal of Hydrogen Energy, 53, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.017>
- Latroche, M., Joubert, J.-M., Cuevas, F., Paul-Boncour, V., & Percheron-Guégan, A. (2018). L'hydrogène dans tous ses états : du solide au gaz en passant par le liquide. CMTR–ICMPE–UMR 7182. URL : <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/21156693693>
- Roy, S., & Ethakota, M. (2022). Solid oxide electrolysis cell (SOEC): Potential technology for low-cost green H₂. H2Tech. URL : <https://www.h2-tech.com/articles/2022/q4-2022/special-focus-future-of-hydrogen-energy/solid-oxide-electrolysis-cell-soec-potential-technology-for-low-cost-green-h-sub-2-sub/>
- Sénat français. (2021). Les modes de production de l'hydrogène. Rapport d'information n° 536.