Électrolyse Haute température de l'eau

François Poncelet **Mars 2023**

1 Table des matières

2 Introduction 1

3 Principe de fonctionnement de l'électrolyse haute température 1

4 Applications potentielles 3

5 CEA et GENVIA 3

6 Conclusion 4

2 Introduction

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est un des piliers de la transition énergétique. Mais encore faut-il produire cet hydrogène sans émission de CO_2. Rappelons que la France s'est fixée un objectif de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau de 700 000 t/an (soit une capacité d'électrolyseurs de 6,5 GW) pour 2030. Elle ambitionne que cet hydrogène soit produit sur son sol, par une industrie nationale, en s'appuyant sur sa production d'électricité bas carbone, nucléaire, hydraulique et renouvelable. Sur les différents moyens de production et l'usage de l'hydrogène nous pouvons nous reporter à l'article de François Drain « L'hydrogène, mirage ou (vecteur d') énergie du futur » écrit en mai 2020 et disponible sur le site de l'ARA. Récemment nous avons pu lire dans la presse des communiqués sur des avancées significatives dans le domaine de l'électrolyse haute température de l'eau pour la production d'hydrogène. Le CEA LITEN (partie du CEA dédiée à la transition énergétique) est à l'origine de ces innovations et cet article essaye de faire le point sur ce sujet.

3 Principe de fonctionnement de l'électrolyse haute température

L'électrolyse sous haute température semble s'avérer plus efficace que l'électrolyse de l'eau à température ambiante parce qu'une partie de l'énergie nécessaire à la réaction peut être apportée par la chaleur et que l'activation de la réaction est plus efficace à haute température. De plus les systèmes d'électrolyse présentent des échauffements par effet joule, ceux-ci ne sont plus des pertes car ils contribuent à l'échauffement nécessaire au fonctionnement à haute température. En fait à 2500°C plus aucun apport d'énergie supplémentaire ne serait nécessaire pour dissocier l'eau en hydrogène et oxygène. Cependant de telles températures ne sont pas pratiques et les systèmes d'électrolyse haute température fonctionnent généralement autour de 700 °C.

Les deux figures montrent les réactions électrochimiques mises en jeu dans cette électrolyse.

A noter que si on ajoute du méthane (CH_4) du côté anode on pourra produire également de l'hydrogène de ce côté à la place de l'oxygène mais il y aura production de CO_2, ce qui n'est pas recherché.

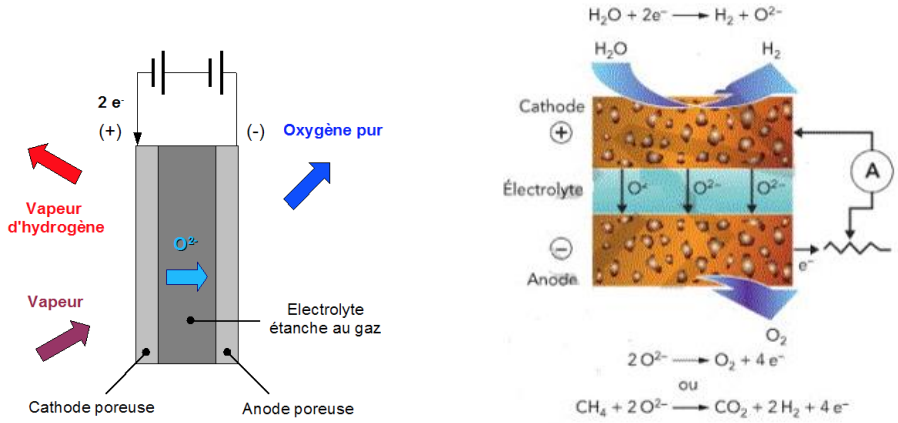

Figure 1 Principe de fonctionnement électrolyse haute température de l'eau

Plusieurs contraintes inhérentes à l'électrolyse haute température dictent la conception du système et le CEA LITEN les a résolus de la manière suivante.

Chaque cellule de l'électrolyseur est constituée de trois composants principaux : l'électrolyte et deux électrodes. L'électrolyte est une membrane solide, dense et étanche au gaz car sinon hydrogène et oxygène se recombineraient localement. Celle développée par le CEA est à base de céramique (de l'oxyde de zirconium stabilisé à l'oxyde d'yttrium : la zircone yttriée). De part et d'autre de cette membrane se trouvent les deux électrodes : la première est dite « à l'hydrogène » (un cermet (composé mixte céramique-métal) de nickel et de zircone yttriée, la seconde est « à l'oxygène » (un matériau céramique de type pérovskite).

Le principe est le suivant : on fait entrer de la vapeur d'eau par l'électrode à hydrogène, vapeur qui va se dissocier sous le double effet du courant électrique et de la haute température (700 - 800 °C) Une partie de la vapeur d'eau ressort du côté « hydrogène » sous forme de H_2, l'autre partie se transforme en ions O^{2-} qui vont traverser l'électrolyte conducteur de ces ions pour ressortir du côté « oxygène » après s'être recombinés pour former O_2.

L'électrolyseur est constitué de modules composés de « stacks » ou empilement de nombreuses cellules.

Par exemple le premier démonstrateur de système intégré autonome construit en 2014, de la taille d'un meuble de cuisine, était constitué de 25 cellules de 100 cm^2 formant un seul stack.

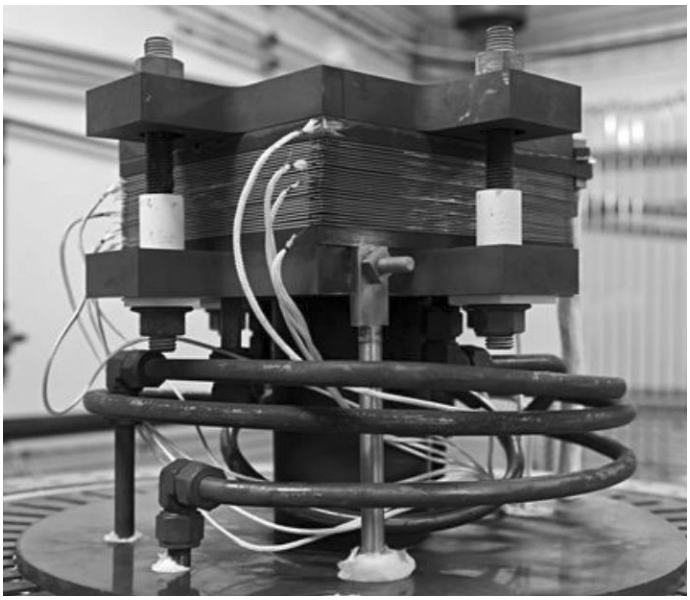

Figure 2 Premier démonstrateur CEA LITEN

L'innovation concerne également la manière de gérer les puissances thermiques du système. Sans cette gestion particulière le rendement serait mauvais du fait de la nécessité de chauffer la vapeur à 800 °C. L'idéal est de faire entrer de la vapeur à 150 °C seulement et l'astuce pour monter de 150°C à 800 °C sans consommer d'électricité vient de la conception du système qui permet de récupérer la chaleur des produits sortants et de récupérer la chaleur des réactions électriques d'effet joule. Le CEA a conçu son système pour fonctionner légèrement au-dessus du point « thermo neutre » qui vaut 1,3 V pour la cellule (au-dessus de ce point la cellule devient exothermique). De cette manière et en récupérant la chaleur des gaz en sortie on peut surchauffer la vapeur sans consommer de watts électriques supplémentaires.

En bilan global le rendement mesuré sur le démonstrateur a pu atteindre 99% d'après les expérimentateurs ! Ce rendement ne concerne que l'étape de fabrication de l'hydrogène.

L'étape suivante d'utilisation de l'hydrogène ne peut généralement pas profiter du même effet de récupération de l'effet joule et présente des rendements beaucoup moins attractifs comme par exemple dans une pile à combustible dont le rendement est de l'ordre de 50% (on se reportera à l'article de F.Drain). Par contre si l'hydrogène est utilisé en tant que réactif chimique comme pour la sidérurgie, les notions de rendements se présentent différemment.

4 Applications potentielles

Les applications potentielles de cette technologie ne sont pas uniquement réservées à la production d'hydrogène bien que cette production soit, bien évidemment, l'application phare puisqu'un rendement de 99% dépasse le rendement des procédés concurrents comme les technologies alcalines et PEM (Proton Exchange Membrane) dont le rendement est de l'ordre de 72 à 80%

La puissance des stacks conçus par le CEA va augmenter progressivement. De 300 kW actuellement on vise des unités de plusieurs centaines de MW à l'horizon 2030. A cet horizon le CEA espère produire de l'hydrogène à moins de 2 €/Kg. Pour mémoire le coût de production à partir du méthane est du même ordre de grandeur.

Pour accompagner ce développement le CEA s'est doté d'une plateforme appelée Multistack pour tester des modules de rSOC (modules électrolyseurs/pile à combustible à oxyde solide réversibles pour évaluer ses propres modules ou ceux d'autres sociétés comme le LSM (Large Stack Module) de SOLIDpower

D'autres applications sont liées à la réversibilité de ce système : il est possible de générer de l'électricité et de la chaleur à partir d'un combustible par exemple l'hydrogène mais aussi le gaz naturel, le biogaz, le méthanol, l'ammoniac : l'électrolyseur peut devenir une pile à combustible.

Autre spécificité de cette technologie : on peut électrolyser du CO_2 en mélange dans la vapeur d'eau. Cela produit un mélange H_2/CO : gaz de synthèse qui pourra ensuite être transformé en différentes molécules d'intérêt, liquides ou gazeuses comme le méthane, le méthanol, le diesel, le kérosène ce qui permet de se positionner à la fois sur la capture du CO_2 (cimenteries par exemple et la production de combustible renouvelable. Cette co-électrolyse est plus efficace sous pression (typiquement 3 - 4 Bars) ce qui va dans le bon sens puisque l'utilisation du gaz de synthèse se fait également sous pression

5 CEA et GENVIA

Fort de ses résultats de développement technologique le CEA LITEN a décidé de passer au développement industriel avec des partenaires.

A travers un modèle unique de partenariat public - privé la création de Genvia une société conjointe de technologie pour la production d'hydrogène décarboné a été faite avec l'approbation de la Commission Européenne. Genvia alliera le savoir-faire et expertises de Schlumberger et du CEA avec VINCI construction, Vicat et de l'Agence Régionale Energie Climat (AREC) de la Région Occitanie.

Genvia a été créé pour construire et exploiter une usine de fabrication d'électrolyseurs haute température suivant la technologie mise au point par le CEA. La fabrication de ces électrolyseurs à oxyde solide se

fera dans la Gigafactory de Genvia implantée à Béziers en Région Occitanie où Schlumberger possède déjà une usine dédiée à l'industrie gazière (usine Cameron). La Gigafactory devrait être opérationnelle en 2025 d'après les déclarations optimistes des Projets.

6 Conclusion

Le CEA a passé la vitesse supérieure sur la technologie des électrolyseurs/pile à combustible réversible à oxyde solide passant de la R&D à l'industrialisation.

Cet article a fait un focus sur la production d'hydrogène et la création d'une société Genvia qui va construire une usine (Gigafactory) de fabrication d'électrolyseurs à Béziers.

Les applications piles à combustible de forte puissance sont également dans le même créneau technologique et industriel.

Le rendement exceptionnel de cette technologie est son atout principal mais son challenge est le coût de fabrication. Espérons que le succès sera bien au rendez-vous !

Figure 3 stack CEA LITEN