

# L'ÉLECTROLYSE À HAUTE TEMPÉRATURE

## TECHNOLOGIE INNOVANTE AU CŒUR DES SYSTÈMES POWER-TO-X

Les nouveaux électrolyseurs à haute température se combinent idéalement avec les systèmes Power-to-X. La chaleur résiduelle de ceux-ci devient un bon moyen d'améliorer l'efficacité des premiers, menant à des rendements records pour la production de vecteurs d'énergie chimiques.

Markus Friedl; Boris Kunz, OST - Ostschweizer Fachhochschule, IET Institut für Energietechnik

Zacharie Wuillemin, SolydEra SA

Jan Van Herle, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Groupe de matériaux pour l'énergie (GEM)

### ZUSAMMENFASSUNG

#### DAS HERZSTÜCK DER POWER-TO-X-TECHNOLOGIE: DIE HOCHTEMPERATURELEKTROLYSE

Im Winter 2022/23 drohte der Schweiz und Europa eine Stromknappheit. In Zukunft und ohne weitere Massnahmen wird sich diese Situation weiter verschlechtern, da das Energiesystem zunehmend auf erneuerbaren, jedoch nur unregelmässig produzierten Energien basieren wird. *Power-to-X*-Systeme könnten dieses Problem teilweise entschärfen, indem sie mit dem im Sommer überschüssigen Strom Wasserstoff oder andere Energieträger erzeugen.

Durch die Kombination von *Power-to-X*-Anlagen mit Hochtemperatur-elektrolyseuren kann eine deutliche Effizienzsteigerung erzielt werden, da letztere einen höheren Wirkungsgrad als herkömmliche Elektrolyseure aufweisen, denn ihnen wird Wärme zugeführt, die ansonsten verloren ginge. Diese Wärme kann beispielsweise aus einer Kehrlichtverbrennungsanlage (oder einem ähnlichen Prozess) oder direkt aus dem Reaktor der *Power-to-X*-Anlage stammen. Denn die Synthesereaktionen der verschiedenen chemischen Energieträger (Methan, Methanol, Ammoniak usw.) sind exotherm und können somit einen Teil der Wärme liefern, die für die Hochtemperatur-elektrolyse benötigt wird. Eine solche Anlage mit einem Elektrolyseur von SolydEra SA wurde in Rapperswil gebaut und ist dort in Betrieb. Der Nachweis der technischen Machbarkeit des Systems ist daher erbracht.

### LA TECHNOLOGIE POWER-TO-X DANS LE FUTUR SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE SUISSE

Dans un futur relativement proche, l'approvisionnement énergétique de la Suisse sera principalement renouvelable [1]. Et étant donné que le pays a décidé de ne pas construire de nouvelles centrales nucléaires et de fermer les centrales existantes à la fin de leur durée de vie [2], que la mobilité individuelle sera en grande partie électrifiée et que les pompes à chaleur seront de plus en plus utilisées pour le chauffage, la production d'électricité renouvelable devra être fortement et rapidement accrue. Cela se fera partiellement avec de l'énergie hydraulique supplémentaire et surtout grâce à une combinaison d'énergie photovoltaïque et éolienne. Le déploiement de cette dernière dépendant cependant beaucoup de l'acceptation de la population, il est difficile d'en attendre une capacité significative à court terme. En conséquence, plusieurs scénarios anticipent un surplus d'électricité renouvelable dû au photovoltaïque en été alors qu'un déficit est observé en hiver (par exemple les quatre scénarios des perspectives énergétiques 2050+ de la Confédération Suisse [3]).

#### PROCÉDÉS POWER-TO-X

Il existe des solutions pour gérer ces écarts de production [4], l'une des plus prometteuses étant la technologie *Power-to-X*. Les systèmes *Power-to-X* utilisent de l'électricité (*power*) renouvelable

Contact: markus.friedl@ost.ch

| Réactifs                          | Réaction  | Produits   | Efficacité théorique      |
|-----------------------------------|---|--|---------------------------|
| H <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub> | Méthanation au CO <sub>2</sub> ,<br>réaction de Sabatier        | Méthane CH <sub>4</sub>                                  | 78%                       |
| H <sub>2</sub><br>CO              | Méthanation au CO   |  | 78%                       |
| H <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub> | Synthèse de méthanol<br>(méthanolisation)                       | Méthanol CH <sub>3</sub> OH                              | 85%                       |
| H <sub>2</sub><br>CO              | Synthèse de méthanol  |  | 85%                       |
| H <sub>2</sub><br>CO              | Procédé Fischer-Tropsch   | Chaines<br>d'hydrocarbures C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> | Dépend du processus exact |
| H <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub>  | Synthèse d'ammoniac,<br>procédé Haber-Bosch et ses<br>variantes | Ammoniac NH <sub>3</sub>                                 | 91%                       |

Tab. 1 Résumé des principaux procédés permettant de produire d'autres vecteurs d'énergie chimique à partir d'hydrogène. Efficacité: pouvoir calorifique supérieur des produits divisé par le pouvoir calorifique supérieur des réactifs en supposant une conversion complète (réactifs et produits à 25 °C, l'eau H<sub>2</sub>O condensée).

pour produire des vecteurs d'énergie sous forme chimique (X), donc sous forme de molécules également utilisables comme matière première.<sup>1</sup> La première étape du procédé comporte un électrolyseur qui sépare les molécules d'eau H<sub>2</sub>O en oxygène O<sub>2</sub> et hydrogène H<sub>2</sub>. Une installation qui se limite à cette étape est nommée *Power-to-Hydrogen* et fournit uniquement de l'hydrogène comme vecteur d'énergie. Si on y ajoute des étapes de transformation supplémentaires et une source de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> ou d'azote N<sub>2</sub>, l'hydrogène H<sub>2</sub> peut alors aussi être transformé en différents vecteurs d'énergie tel que du méthane CH<sub>4</sub>, du méthanol CH<sub>3</sub>OH, des chaînes d'hydrocarbures C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> (par exemple carburant d'aviation) ou de l'ammoniac NH<sub>3</sub> (voir tab. 1). Les vecteurs d'énergie ainsi produits sont dénommés «carburants synthétiques» ou «E-Fuels».

### CARBURANTS SYNTHÉTIQUES

En comparaison avec l'hydrogène, les carburants synthétiques ont l'avantage de pouvoir être plus facilement stockés et transportés, ce qui leur permet d'être employés dans des domaines difficilement électrifiables, tels que l'aviation par exemple, où l'hydrogène n'offre pas une densité énergétique suffisante. En revanche, l'étape supplémentaire nécessaire à la production de ces carburants synthétiques présente l'inconvénient de

<sup>1</sup> Parfois, «X» peut aussi désigner de la chaleur, permettant aux pompes à chaleur d'être également considérées comme installations *Power-to-X*. Dans cet article, la définition la plus courante de *Power-to-X* est toutefois utilisée, celle dans laquelle le X représente un vecteur d'énergie chimique ou une matière première.

nécessiter des équipements additionnels et de compliquer le procédé. Ceci engendre des pertes d'énergie supplémentaires qui réduisent au final le rendement du processus.

En Suisse, les centrales de réserve prévues pour produire de l'électricité en cas d'urgence (voir premier appel de la confédération: [5]) pourront par exemple être opérées avec des carburants synthétiques.

Le méthane, grâce au réseau de gaz existant, ainsi que le méthanol, les hydrocarbures plus complexes et l'ammoniac, sont relativement facilement manipulables et transportables. Ainsi, il devient intéressant de produire ces vecteurs d'énergie là où l'électricité renouvelable est disponible en grande quantité et à faible coût, ce coût étant quasiment toujours dominant dans le coût total de production. Le rapport «Perspectives énergétiques 2050+» [3] de la Confédération prédit d'ailleurs que seule une partie de l'hydrogène sera produite dans le pays, le reste étant importé de l'étranger. Les carburants synthé-

tiques, qui prennent une place plus ou moins importante dans les scénarios examinés, peuvent également être produits localement ou importés. La technologie *Power-to-X* n'est donc pas uniquement importante du point de vue de l'approvisionnement énergétique pour la Suisse, mais elle représente également une technologie et un savoir-faire pouvant être exportés.

### ÉLECTROLYSE

Comme mentionné ci-dessus, la première étape de n'importe quel processus *Power-to-X* est effectuée par un électrolyseur. Il en existe plusieurs types (voir tab. 2), les plus connus étant les électrolyseurs alcalins, ceux à membrane polymère (*proton exchange membrane*, PEM) et ceux à membrane d'échange d'anions (*anion exchange membrane*, AEM) qui fonctionnent tous à basse température et qui permettent de dissocier de l'eau liquide déminéralisée en hydrogène et oxygène à l'aide d'énergie électrique. Il existe une autre classe d'électrolyseurs, qui, eux, fonctionnent à haute température et permettent de dissocier directement de la vapeur H<sub>2</sub>O en hydrogène H<sub>2</sub> et oxygène O<sub>2</sub>.

### ÉLECTROLYSEURS À BASSE TEMPÉRATURE

#### Electrolyseurs alcalins

La technologie alcaline a déjà une longue histoire industrielle, notamment en Suisse avec l'entreprise IHT sise à Monthey qui a été récemment reprise par l'allemand *Sunfire*. Cette technologie séduit aujourd'hui par sa robustesse et sa disponibilité, mais est plus limitée en ce qui concerne le rendement, la dynamique et la densité de puissance, restreignant son application à des endroits où l'élec-

| Electrolyse         | Technologie | Avantage                          | Rendement des systèmes électrolyseurs complet de l'ordre du MW |            |                               |
|---------------------|-------------|-----------------------------------|--|------------|-------------------------------|
|                     |             |                                   | Basé sur la valeur calorifique                                 |            | Consommation d'énergie        |
|                     |             |                                   | supérieure   | inférieure |                               |
| à basse température | Alcaline    | Robustesse, disponibilité, coût   | 57 à 72%   | 48 à 61%   | 55 à 69 kWh/kg H <sub>2</sub> |
|                     | PEM         | Dynamique, densité de puissance   | 66 à 79%   | 56 à 67%   | 50 à 60 kWh/kg H <sub>2</sub> |
|                     | AEM         | Combine les 2 précédents          | 66 à 79%   | 56 à 67%   | 50 à 60 kWh/kg H <sub>2</sub> |
| à haute température | SOE         | Rendement, utilisation de chaleur | 88 à 107%  | 74 à 90%   | 37 à 45 kWh/kg H <sub>2</sub> |

Tab. 2 Aperçu des différentes technologies d'électrolyseurs.

tricité renouvelable est peu chère et si possible relativement constante. Dans les très grands projets actuels d'électrolyse, notamment au Moyen Orient, aux USA et en Amérique du Sud, c'est la technologie qui semble la plus demandée.

#### Electrolyseurs à membrane polymère

La technologie «Proton Exchange Membrane» (PEM) connaît elle-aussi un fort succès, particulièrement dans son application comme pile à combustible (générateur électrique fonctionnant à l'hydrogène  $H_2$ ) pour l'industrie automobile. Son pendant en électrolyse fait intervenir d'autres acteurs plus orientés vers les solutions industrielles, dû en grande partie au fait que la technologie, la taille et les matériaux ne sont pas les mêmes pour l'application en mode «pile» et en mode «électrolyse». Dans les deux cas, ce sont des métaux nobles qui sont utilisés comme catalyseurs (platine en mode pile, et iridium en mode électrolyse). Cette technologie arrive à maturité et des installations de plusieurs dizaines de MW sont en opération à l'heure actuelle. Si les rendements électriques et la dynamique des électrolyseurs PEM sont meilleurs que les alcalins et la densité volumétrique de puissance nettement plus importante, le déploiement à large échelle sera en partie tributaire de la disponibilité – et donc du prix – de l'iridium ou de la capacité de réduire les quantités requises par unité de puissance.



Fig. 3 Pile composée de cellules à oxyde solide, développée et fabriquée par l'entreprise SolydEra.



Fig. 2 Ligne de production automatisée de piles à oxyde solide. (Photo: SolydEra SA)

Electrolyseurs à membrane d'échange d'anions Une troisième technologie appelée «Anion Exchange Membranes» (AEM), beaucoup plus récente, combine les avantages des technologies alcaline et PEM. Elle se trouve à un stade de développement moins avancé que les deux autres et n'est donc pas présentée en détail dans le présent article.

#### ÉLECTROLYSE À HAUTE TEMPÉRATURE

Il existe une quatrième technologie qui opère dans des conditions totalement différentes. Il s'agit des piles et électrolyseurs à oxyde solide, plus communément connues sous leur acronyme anglais SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) ou SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell). Cette technologie est basée sur un électrolyte solide en céramique intégré dans des cellules qui sont empilées les unes sur les autres et qui forment une pile (fig. 1). Les piles à oxyde solide opèrent à une température supérieure à 600 °C et sont donc souvent aussi nommées pile ou électrolyseurs à haute température.

Les piles peuvent être opérées de manière bidirectionnelle (opération réversible): en tant qu'électrolyseur pour générer de l'hydrogène à partir d'électricité, ou en tant que pile à combustible pour produire de l'électricité à partir d'hydrogène ou même à partir d'autres carburants. Dans ce deuxième cas, des carburants carbonés comme le gaz naturel permettent une production d'électricité avec un très haut rendement<sup>2</sup> (> 60%).

À la température de fonctionnement, l'eau se trouve sous forme de vapeur et c'est donc celle-ci qui est directement décomposée en oxygène et en hydrogène lors de la réaction d'électrolyse. De par la ther-

modynamique, cette réaction consomme nettement moins d'électricité que l'électrolyse de l'eau sous forme liquide, et c'est ce qui constitue l'atout majeur de l'électrolyse à oxyde solide (SOE) lorsqu'elle peut être combinée à un processus industriel ayant de la chaleur fatale ou de la vapeur à disposition. En effet, la part d'énergie utilisée pour vaporiser l'eau est pour ainsi dire gratuite puisqu'elle serait autrement perdue. De plus, l'électrolyse à haute température est plus efficace que l'électrolyse à basse température. Au final, moins d'électricité doit donc être fournie au système pour produire la même quantité d'hydrogène et le processus est plus efficace qu'avec un électrolyseur à basse température. Au niveau du système, on s'attend à une consommation de 37 à 45 kWh/kg $H_2$  lorsque la vapeur est disponible, soit environ 20% d'électricité en moins que pour les électrolyseurs à basse température.

La technologie SOE offre également un autre mode d'utilisation dans lequel un mélange de vapeur  $H_2O$  et de dioxyde de carbone  $CO_2$  peut être co-électrolysé, permettant l'obtention d'un gaz de synthèse ( $H_2$  et  $CO$ ) en sortie de pile.

En Suisse, ces piles ont été développées à partir des années 2000 notamment par une équipe de chercheurs à l'EPFL puis transférée au spin-off HTceramix SA à Yverdon-les-Bains, ou encore par l'équipe de Sulzer Hexis à Winterthur. Elles ont subi plusieurs évolutions qui leur ont finalement permis d'atteindre une maturité suffisante pour être déployées sur

<sup>2</sup> Le rendement est défini comme le pouvoir électrique produit divisé par le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

le marché domestique dans des applications de micro-cogénération. C'est ainsi que l'entreprise *HTceramix SA*, acquise entre-temps par un groupe italien et devenue *SolydEra SA*, a déployé plus de 3000 systèmes de micro-cogénération *Bluegen* fonctionnant au gaz naturel, accumulants au passage plus de 75 millions d'heures d'opération et amenant la technologie de pile, initialement développée à Yverdon-les-Bains, a été transférée en Italie où a été érigée la plus grande ligne automatisée de production de piles à oxyde solide en Europe (fig. 2).

### POWER-TO-X COMBINÉ À LA TECHNOLOGIE SOE

Afin d'augmenter son efficacité, la technologie Power-to-X peut donc être idéalement combinée à un électrolyseur à haute température qui permet de valoriser la chaleur résiduelle de la source interne au procédé, complétée le cas échéant par des sources externes. En effet, comme montré dans le tableau 1, les réactions de synthèse de carburants synthétiques sont exothermiques (efficacité inférieure à 100%) et à des niveaux de températures suffisants pour être efficacement couplés à des systèmes de génération de vapeur. Ceci est d'autant plus avantageux que la chaleur résiduelle de réaction est disponible au moment précis où la production de vapeur est nécessaire pour le processus d'électrolyse à haute température. La problématique de stockage intermédiaire est ainsi éliminée et le besoin éventuel d'apports externes diminué.

Si la chaleur résiduelle du procédé seul ne suffit pas à la génération de vapeur, la technologie peut bénéficier d'une intégration avec des sources externes, comme un couplage avec une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) par exemple. Cette synergie est particulièrement intéressante en été quand le surplus d'énergie renouvelable peut être transformé en vecteur d'énergie chimique et quand ces usines ont du mal à trouver preneur pour leur chaleur résiduelle. Le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> nécessaire (avec l'hydrogène) à la production du méthane, méthanol ou des chaînes d'hydrocarbures (voir tab. 1) peut également être récupéré sur place et en toute saison. En mars 2022, les exploitants d'installations de traitement des déchets se sont justement engagés à ins-

taller des systèmes de captage de CO<sub>2</sub> dans toutes les UIOM suisses d'ici à 2030. La figure 3 illustre la différence entre un système *Power-to-Methane* conventionnel équipé d'un électrolyseur à basse température conventionnel avec un rendement de 0,55 MW/1,1 MW = 50% (basé sur la valeur calorifique supérieure) et un système *Power-to-Methane* utilisant un électrolyseur à haute température avec un rendement de 0,55 MW/0,79 MW = 70%.

L'idée de combiner l'électrolyse à haute température avec des processus de synthèse en utilisant leur chaleur résiduelle a déjà été poursuivie dans le cadre de différents projets de recherche.<sup>3</sup> Mais cette idée n'a été démontrée expérimentalement que récemment à la *Haute école*

<sup>3</sup> *Projet EUDP de la compagnie Haldor Topsøe (Danemark) [7]; Projet UE HELMETH de KIT et Sunfire (Allemagne) [8].*

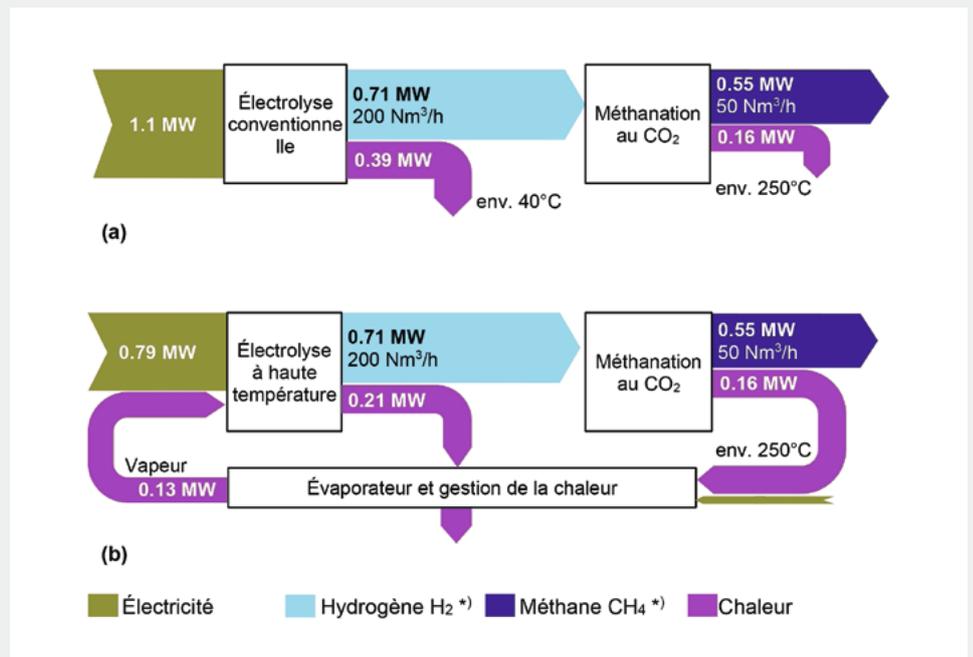


Fig. 3 Flux d'énergie approximatifs dans des installations de l'ordre du mégawatt (a) d'une installation *Power-to-Methane* classique et (b) combinée à une électrolyse à haute température [1].  
\*) Valeur calorifique supérieure.

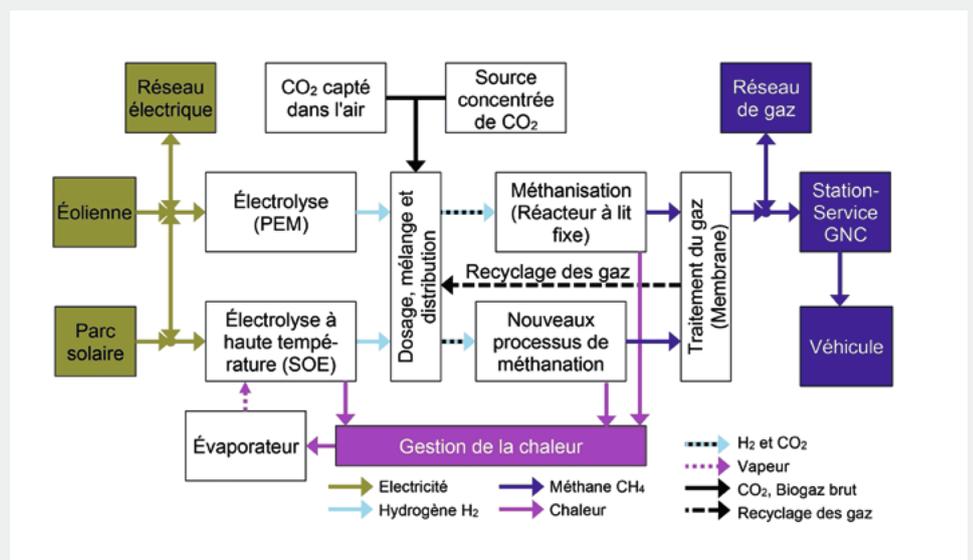


Fig. 4 Schéma simplifié de la plateforme de recherche *Power-to-Gas* à Rapperswil [1]. La plateforme a été construite dans le cadre de plusieurs projets financés par l'Union Européenne, le Fonds de recherche, de développement et de promotion de l'industrie gazière suisse (FOGA), l'Office Fédérale de l'Énergie (OFEN), l'Office Fédérale de l'Environnement (OFEV), le Swiss Competence Center for Energy Research Heat and Electricity Storage (SCCER HaE) et des partenaires industriels.

spécialisée de la Suisse orientale (OST) de Rapperswil SG, où une telle installation a été construite et mise en service par l'Institut für Energietechnik (IET) et le Groupe des Matériaux pour l'Énergie (GEM) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Cette installation a permis de démontrer la faisabilité du système complet, de la production d'électricité renouvelable jusqu'à la génération de méthane de synthèse et son utilisation finale dans un véhicule au gaz naturel comprimé (GNC), le tout complété par la capture du dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Deux électrolyseurs y sont installés: une PEM conventionnelle ( $10\text{ kW}_{\text{el}}$ ) et un électrolyseur à haute température ( $5\text{ kW}_{\text{el}}$ ). La figure 4 montre un schéma simplifié de l'installation en question avec son système de gestion de chaleur spécifiquement développé. Celui-ci emploie de l'huile thermique pour absorber la chaleur résiduelle de la méthanation et l'utiliser pour la génération de vapeur qui est ensuite fournie à l'électrolyseur à haute température. L'installation a permis de démontrer expérimentalement, pour la première fois, que l'efficacité d'un processus *Power-to-Methane* peut être augmentée de 20 points de pourcentage en y installant un électrolyseur à haute température plutôt qu'un électrolyseur conventionnel [9].

## PERSPECTIVES POUR LA SUISSE

La technologie *Power-to-X* combinée à l'électrolyse à haute température offre donc une possibilité pour la Suisse d'utiliser non seulement l'électricité en excès mais aussi la chaleur résiduelle en excès et de produire avec une grande efficacité des vecteurs d'énergie chimiques pour les applications difficiles à électrifier. La transportabilité et le stockage de cette forme d'énergie permet également un transport et une importation sur de grandes distances, y compris à l'échelle mondiale. De plus, les technologies *Power-to-X* et électrolyse à haute température peuvent être exportées en tant que savoir-faire, créant de la valeur économique en Suisse.

La stratégie de *SolydEra SA* est de poursuivre et accélérer le développement dans le domaine des applications industrielles et notamment de l'électrolyse. Récemment, elle a abouti – grâce au soutien initial du Canton de Vaud, de la Confédération et des Projets Européens CH2P et

SWITCH – au développement d'une pile et d'un système industriel de nouvelle génération dépassant les 100 kW en électrolyse. Celui-ci est totalement réversible et peut fonctionner aussi bien comme électrolyseur que comme générateur électrique multi-fuel. Il est en cours de test, avant un premier déploiement industriel prévu courant 2024. Ces systèmes suscitent un grand intérêt auprès d'entreprises actives dans le domaine du *Green Hydrogen*, celui des applications *Power-to-X* en général, ou encore dans le secteur maritime. Le nouveau modèle de pile à combustible, quant à lui, est en cours d'industrialisation et est proposé en pré-série à des intégrateurs éventuels. La technologie développée à Rapperswil, elle, est sur le point d'être amenée à l'échelle supérieure dans le projet de recherche Européen «24/7 ZEN»<sup>4</sup>. Un consortium composé de partenaires espagnols, italiens, grecs, belges et suisses conçoit et développe un système *Power-to-X* réversible environ 20 fois plus important que la plateforme à Rapperswil (mode électrolyseur  $100\text{ kW}_{\text{el}}$ , mode pile à combustible  $33\text{ kW}_{\text{el}}$ ). Les partenaires suisses sont la Haute école spécialisée de la Suisse orientale (OST), *SolydEra SA* et la Haute école de Lucerne (HSLU). Ces mêmes partenaires suisses, en plus du Groupe des Matériaux pour l'Énergie (GEM, EPFL) déjà responsable du système d'électrolyse à haute température à Rapperswil, ainsi que d'autres partenaires industriels, ont entamé une coopération pour une démonstration sur une installation industrielle en Suisse. Plus de détails sur le sujet seront communiqués ultérieurement, début 2024. Le GEM, en parallèle à sa collaboration établie avec OST, coopère avec la HES-SO Sion et *SolydEra SA* pour installer à Sion un système réversible à taille réduite ( $10\text{ kW}_{\text{el}}$  SOFC/ $30\text{ kW}_{\text{el}}$  SOE) qui servira de plateforme de test. Ce développement [11–13] est cofinancé par le Canton du Valais, le distributeur local d'énergie *Oiken* et, dans le futur, par *Innosuisse*. Le GEM a également développé son propre méthanateur [14] dont la chaleur est directement transformée en vapeur pour alimenter un électrolyseur SOE. Ce travail a été fortement soutenu par l'entreprise *Gaznat*. Actuellement testé à l'échelle de 5 kW, il est prévu de l'agran-

dir à l'échelle suivante dans un nouveau projet soutenu par l'EPFL.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] La Confédération Suisse: Loi sur l'énergie (LEne), entrée en vigueur 1 janvier 2018. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/fr>
- [2] La Confédération Suisse: Loi sur l'énergie nucléaire (LENu), entrée en vigueur 1 janvier 2005. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2004/723/fr>
- [3] Kemmler, A. et al. (2022): *Energieperspektiven 2050+, Technischer Bericht, Gesamtdokumentation der Arbeiten*. Office fédéral de l'énergie, décembre 2021, actualisé avril 2022. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/perspectives-energetiques-2050-plus.html/>
- [4] Friedl, M. et al. (2018): *Saisonale Flexibilisierung einer nachhaltigen Energieversorgung der Schweiz, Fokusstudie*. Forum Energiespeicher Schweiz (FESS), Aeesuisse, novembre 2018. [https://speicher.aeesuisse.ch/wp-content/uploads/sites/15/2021/09/FESS\\_Fokusstudie\\_Saisonale\\_Flexibilisierung.pdf](https://speicher.aeesuisse.ch/wp-content/uploads/sites/15/2021/09/FESS_Fokusstudie_Saisonale_Flexibilisierung.pdf)
- [5] Communiqués de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) du 28 juillet 2023 sur le premier appel d'offres pour des centrales de réserve après 2026.
- [6] Office fédéral de l'environnement (OFEV): *Convention avec les exploitants d'usines d'incinération des ordures ménagères*, 15 mars 2022
- [7] Ebbesen, S.; Hansen, J.; Mogensen, M. (2013): *Biogas upgrading using SOEC with a Ni-ScYSZ electrode*. *ECS Transactions* 57: 3217
- [8] KIT Karlsruhe Institute of Technology: *Power-to-Gas with High Efficiency*. Communiqué de presse, février 2018
- [9] OST – Haute école spécialisée de la Suisse orientale: *Wirkungsgrad von Power-to-Gas auf 70% erhöht*. Communiqué de presse, janvier 2023
- [10] Friedl, M. et al. (2022): *Forschungsplattform für Power-to-Gas*. *Aqua & Gas* 3/2022: 28-34. [https://www.aquaetgas.ch/de/energie/gas/20220225\\_ag3\\_forschungsplattform-f%C3%BCr-power-to-x/](https://www.aquaetgas.ch/de/energie/gas/20220225_ag3_forschungsplattform-f%C3%BCr-power-to-x/)
- [11] Ligang, W. et al. (2019): *Power-to-fuels via solid-oxide electrolyzer: Operating window and techno-economics*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110: 174–187
- [12] Ligang, W. et al. (2018): *Optimal design of solid-oxide electrolyzer based power-to-methane systems: A comprehensive comparison between steam electrolysis and co-electrolysis*. *Applied Energy* 211: 1060–1079
- [13] Sun, Y. et al. (2020): *Enhancing the operational flexibility of thermal power plants by coupling high-temperature power-to-gas*. *Applied Energy* 263: 114608
- [14] Aubin, P. et al. (2022): *Evaporating water-cooled methanation reactor for solid-oxide stack-based power-to-methane systems: Design, experiment and modeling*. *Chemical Engineering Journal* 456: 140256

<sup>4</sup> Nom complet du projet: «Reversible SOEC/SOFC System for a Zero Emissions Network Energy System»; Site internet: <https://24-7zenproject.eu/>