

Technologie de production pour une industrialisation rentable de l'hydrogène

11 juin 2021, 02:00

Bart Verlinden

Les technologies de production avancées sont à la base d'une industrialisation rentable de l'hydrogène vers la production de masse ou d'innovations qui augmentent ses performances. Sirris analyse les besoins des entreprises belges, ainsi que les possibilités offertes par les technologies de production et les capacités d'essai récentes, afin de déterminer dans quels domaines les services peuvent soutenir ce secteur de croissance.

On observe un intérêt croissant pour l'hydrogène produit de manière durable, avec une faible empreinte carbone et renouvelable, ainsi que pour son utilisation en tant que clé pour atteindre les objectifs environnementaux et climatiques. En tant que région, la Flandre détient tous les atouts pour occuper une position de leader en Europe dans le déploiement de l'économie de l'hydrogène. La chaîne de valeur comprend différents acteurs impliqués dans la production d'énergie verte, la production, le transport et le stockage de l'hydrogène, les acteurs actifs dans la technologie et les applications de l'hydrogène jusqu'aux utilisateurs finals.

De nombreux développements sont encore en phase de démonstration. Leur industrialisation est non seulement importante pour obtenir une capacité suffisante afin d'atteindre les objectifs climatiques, mais aussi pour réduire le prix de revient et les coûts d'investissement. La stratégie flamande pour l'hydrogène 2025-2030 donne une vue d'ensemble des défis à relever pour passer de l'hydrogène fossile (aujourd'hui ~ 95%) à l'hydrogène à faible empreinte carbone d'ici 2030 (avec des solutions stables et commercialement viables).

Cet article expose, d'une part, la nécessité de disposer de technologies de production pour l'industrialisation de l'hydrogène et quelques exemples, et, d'autre part, récapitule les recherches récentes en matière de technologie de production visant à accroître les performances. La recherche universitaire tend à se concentrer sur les faibles niveaux de préparation technologique (TDL 1-4) et n'est guère orientée vers l'industrie.

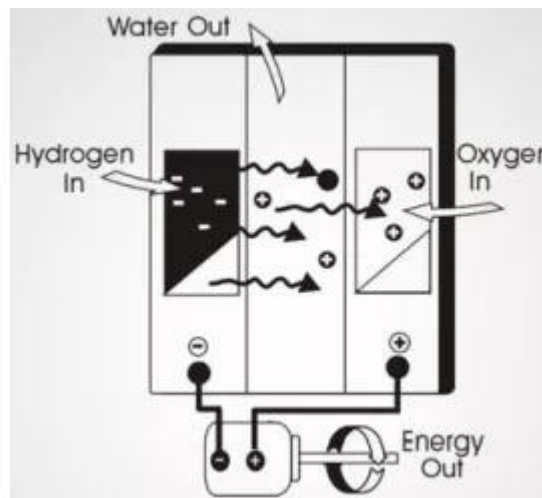
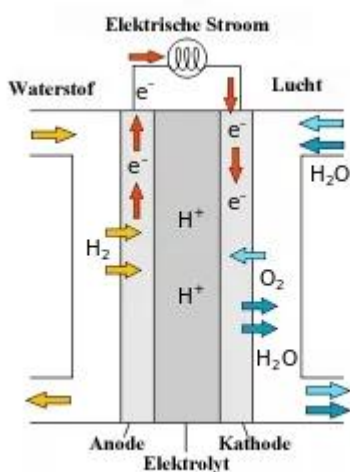


La chaîne de valeur H_2
(Source : Waterstofnet)

Industrialisation rentable des composants clés pour la production de masse

La conception du système et l'équilibre optimal de l'installation d'une pile à combustible englobent tous les sous-systèmes et composants requis. Elle tient compte de leur fonction, de leur disponibilité, de leur coût et de leur durabilité pendant toute la durée de vie de la pile (p. ex. la pile, l'alimentation en air et en hydrogène, le refroidissement, l'électronique de puissance et la commande du système). Chaque fabricant de piles à combustible développe son propre système pour différentes applications ; il n'existe pas encore de normalisation. Ainsi, la société flamande Solenco développe la Solar Energy Conversion Powerbox™, une pile à combustible à hydrogène efficace comme système de stockage d'énergie pour les maisons et les bâtiments, destinée à la production d'électricité et de chaleur. La Powerbox a fait l'objet d'une validation et d'une démonstration dans un environnement pertinent et est en phase d'industrialisation en vue d'une production rentable.

Il n'existe pas encore de production de masse de piles à combustible. Pour une voiture moyenne de 100 kW, le coût est d'environ 10.000 €. Une réduction des coûts est indispensable pour permettre une percée ultérieure.

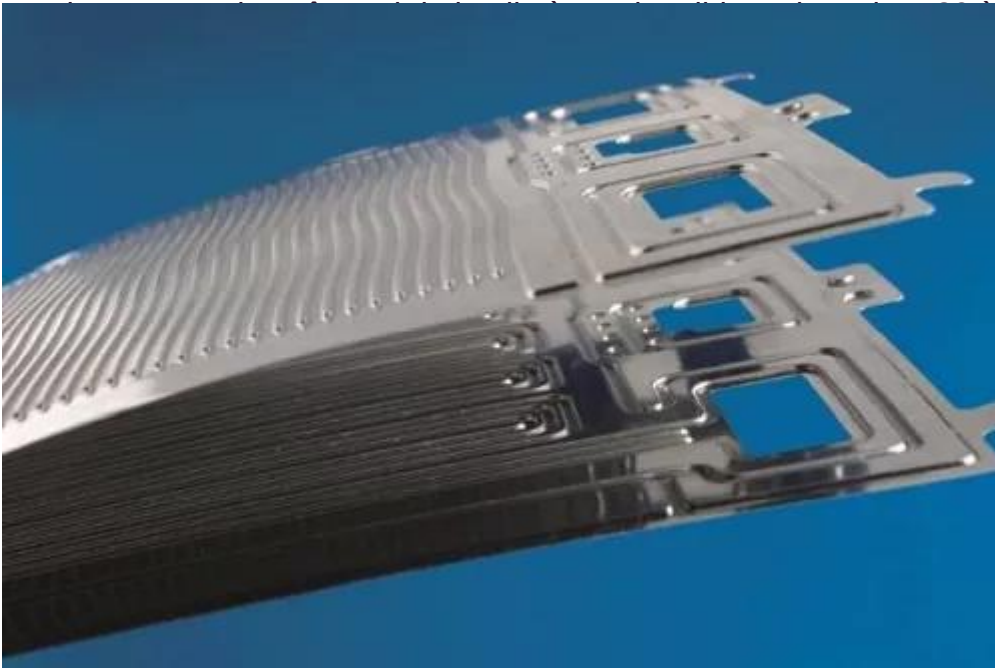


(À droite, source : OCAS)

Technologie pour la production en masse de plaques bipolaires

Une pile à combustible se compose d'un empilement de plusieurs centaines de plaques bipolaires. L'hydrogène (gaz) est fourni à l'anode et l'eau produite par la réaction chimique avec l'oxygène dans l'empilement est évacuée à la cathode. Une pile de 100 kW pour une voiture électrique comprend environ 400 plaques. L'approvisionnement d'une usine automobile qui produit 200.000 véhicules exige environ 80 millions de plaques par an. La production de ces plaques fines et structurées avec des tolérances dimensionnelles très serrées pour des séries de plus en plus

grandes est une opération complexe. Elles ressemblent davantage à un film qu'à une plaque et doivent être produites avec grand soin et en plusieurs étapes (p. ex. hydroformage, découpe au laser et soudage, revêtement et d'étanchéité ou de test de fuite). La production des plaques bipolaires (éléments conducteurs, distributeurs de gaz et séparateurs) représente actuellement une 30%.



(Source : Fraunhofer ILT)

Technologie laser

Des méthodes laser efficaces, avec une excellente flexibilité et un haut degré d'automatisation, sont nécessaires pour couper et souder les composants des piles à combustible à chaque étape de la chaîne de production. L'automatisation avancée, la saisie des données et l'optimisation de la production sont indispensables pour un processus de production rentable et stable (p. ex. augmenter de manière significative le taux d'utilisation du temps de soudage en le portant de 10 à 95% ou réduire la contrainte résiduelle). Les joints doivent être étanches à l'hydrogène, ce qui peut entraîner des longueurs de joints de plus de 200 mètres pour chaque pile à combustible. Le soudage laser est encore trop lent pour assurer cette opération. Plasmo Industrietechnik se concentre sur l'assurance qualité des processus de soudage laser automatisés.



Concept de ligne de production pour plaques bipolaires intégrant l'hydroformage avec la découpe et le soudage laser

(Source : Gräbener Maschinentechnik)

Ligne de production en continu de plaques métalliques bipolaires

Dans le cadre du projet CoBiP, Fraunhofer IPT élabore une ligne de production continue de plaques bipolaires avec microstructuration rouleau à rouleau de feuilles métalliques, puis soudage et découpe laser combinés, et enfin revêtement. La ligne vise à atteindre des cycles d'à peine quelques secondes. Un lien entre les paramètres de processus pertinents de la chaîne de production et les propriétés spécifiques de la conception de la plaque bipolaire limite les risques de conception et le délai de développement de nouveaux produits.

Fraunhofer UMSICHT a mis au point des plaques bipolaires en polymère souples et soudables de 3,2 m² pour piles à combustible LT-PEM (piles à combustible à membrane électrolyte polymère). La production continue rouleau à rouleau permet la production en masse de plaques de graphite minces avec structures complexes intégrées. Les plaques bipolaires simplifient également le montage.

Technologie des matériaux

- **Éviter les métaux précieux rares et chers.** Les électrodes des piles à combustible ont plusieurs fonctions : conductivité électrique pour l'alimentation et l'évacuation du courant, paroi de séparation qui est quand même perméable pour l'hydrogène et l'oxygène respectivement, et catalyseur pour accélérer les réactions chimiques. Elles exigent toujours des métaux précieux coûteux, par exemple un mince revêtement de platine pour la protection contre la corrosion. Une limitation du recours au platine ne résout pas le problème pour la production de masse. Des revêtements alternatifs (p. ex. des revêtements catalytiques organiques) et des technologies de revêtement peu coûteuses, évolutives et respectueuses de l'environnement sont essentiels pour le passage à la production de masse.

Dans le cadre du projet Precoil, Precors a étudié les possibilités d'emploi de feuilles métalliques prélaquées comme produits semi-finis pour la production de plaques bipolaires, de manière à réduire le coût de ces dernières (par rapport aux procédés de revêtement à base de PVD). Le matériau de revêtement à base de carbone assure une protection efficace contre la corrosion et une densité de puissance élevée des piles à combustible. Le processus de revêtement permet un revêtement automatisé et continu de films métalliques à l'échelle.

- **Des matériaux qui résistent à la fragilisation par l'hydrogène.** La fragilisation par l'hydrogène se produit lorsque les métaux deviennent fragiles à la suite de l'introduction et de la diffusion d'hydrogène dans le matériau (le talon d'Achille des aciers (ultra) haute résistance). La recherche permet de mieux comprendre les mécanismes de fragilisation par l'hydrogène et ses interactions avec la microstructure. Elle sous-tend la conception d'aciers qui peuvent être utilisés en toute sécurité pour produire, stocker ou transporter l'hydrogène. Toutefois, pour mettre au point de nouveaux matériaux présentant la résistance nécessaire à l'hydrogène, il est essentiel de comprendre les mécanismes de fragilisation par l'hydrogène et les interactions avec la microstructure. OCAS dispose ainsi d'un laboratoire d'hydrogène spécial pour étudier les mécanismes fondamentaux liés à la fragilisation par l'hydrogène.
- **Corrosion.** L'eau très pure à la sortie réagit avec l'atmosphère(CO₂) pour former un acide corrosif. Chaque fabricant de piles à combustible étudie donc des revêtements exclusifs ou des plaques prérevêtues.

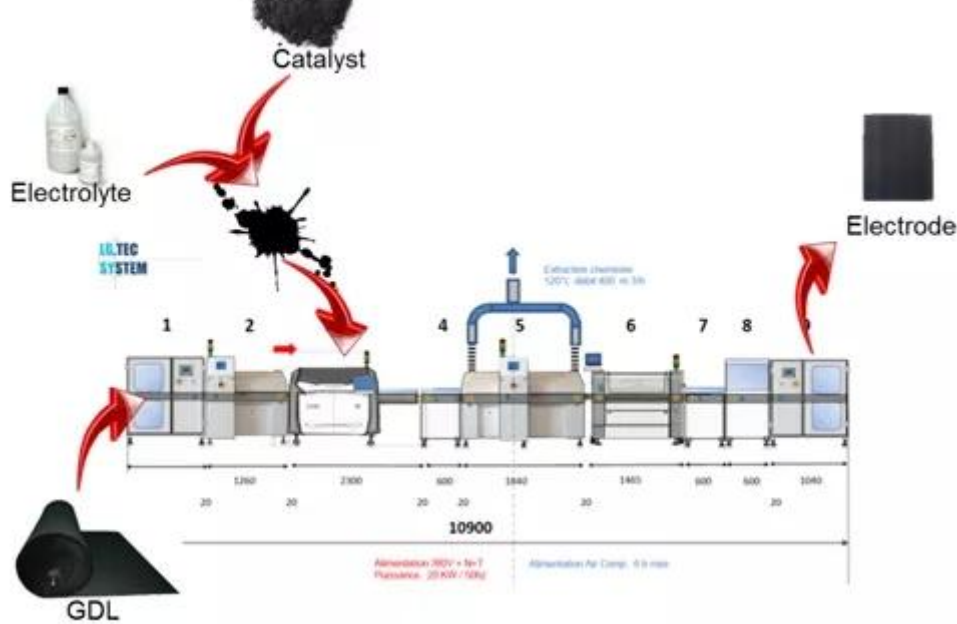
Augmentation des performances

Quelques facteurs clés de performance dépendent de la technologie de production (tels que la rugosité de surface, la porosité ou la géométrie). La technologie laser et l'impression 3D offrent de nouvelles possibilités aux échelles méso (produit), micro ou nano.

Texturation de surfaces

Les électrodes texturées (non homogènes) augmentent la surface active et empêchent les phénomènes de dégradation dus au remplissage ou au dessèchement de l'électrode. Il est toujours malaisé d'assurer une production rentable et automatisée d'électrodes texturées.

- Le projet Matisse (Materials' Innovations for a Safe and Sustainable nuclear in Europe) a étudié un procédé de sérigraphie en continu pour la production de couches de catalyseur (cellule de 25 cm²) et l'automatisation de l'étape d'assemblage membrane-électrode pour trois conceptions de pile (pour les systèmes PEMFC stationnaires). Matisse était destiné à améliorer la robustesse, la durée de vie, les performances et le coût des piles. À cette fin, des solutions matérielles avancées ont été validées comme démonstration de faisabilité pour la fabricabilité des cellules et des piles.

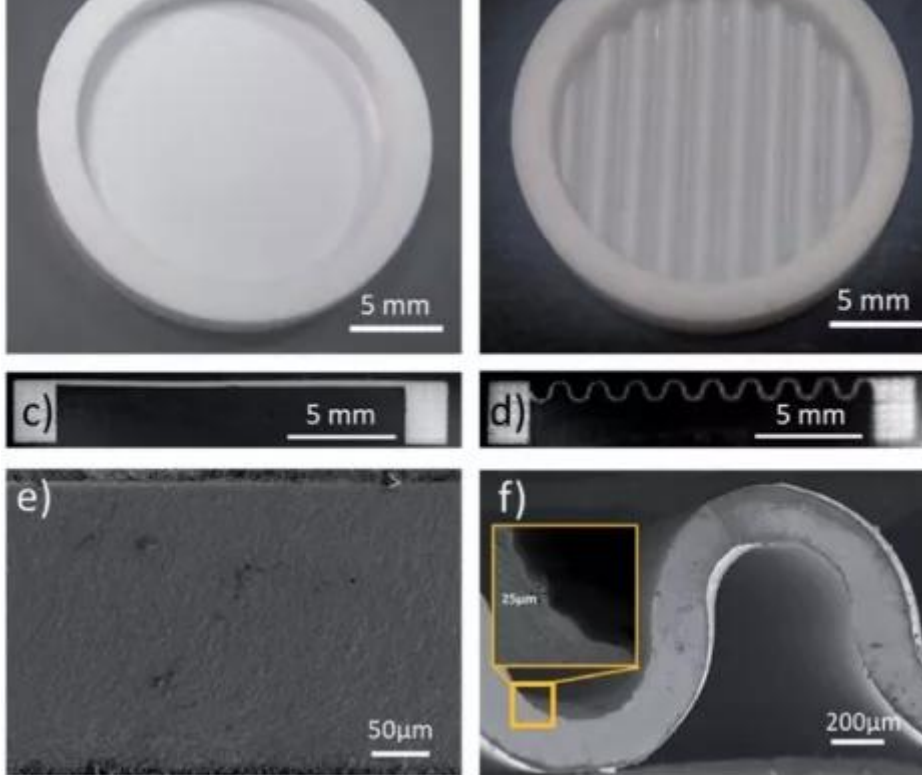


(Source : projet Matisse)

La liberté de forme de l'impression 3D augmente la surface active et les performances

L'impression 3D de matériaux fonctionnels permet de surmonter les limites de forme des techniques de fabrication actuelles. Elle autorise en outre des formes complexes et de nouvelles fonctionnalités. Les possibilités de l'impression 3D pour ce domaine d'application en sont encore au stade de la recherche.

- Le projet européen Cell3Ditor a étudié les possibilités de concepts innovants imprimés en 3D pour les piles à combustible et d'électrolyse électrocéramiques à base d'oxydes solides. Des électrolytes plans et ondulés conventionnels d'une épaisseur de 250 µm et d'un rapport L/H élevé ont été imprimés avec de la zircone stabilisée à l'yttrium afin de réaliser des cellules à oxyde solide. Une augmentation de la surface active des cellules par la formation de vagues de l'électrolyte réduit la résistance interne de la cellule (c.-à-d. la résistance spécifique à la surface $ASR = R/A$), ce qui augmente proportionnellement la performance par surface projetée. Les surfaces ondulées ont montré une augmentation de 57% de leurs performances en modes « pile à combustible » et « coélectrolyse », directement proportionnelle à l'augmentation de la surface par rapport aux versions plates. La recherche montre que la combinaison d'un design amélioré et de la durabilité accrue des pièces imprimées en 3D (moins de 35 mV/ 1000 h) offre de nouvelles possibilités de conception à fort impact pour les futures générations de dispositifs de conversion ou de stockage de l'énergie à l'état solide.



Membranes 8YSZ plates et ondulées imprimées en 3D

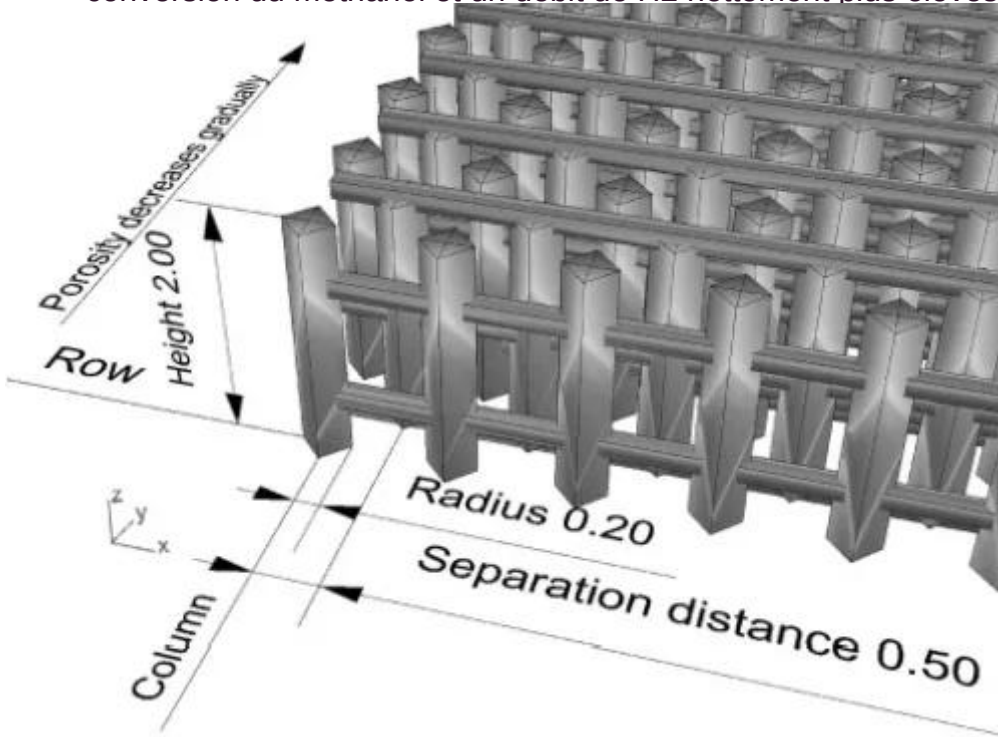
(Source : Cell3Ditor EU project <http://www.cell3ditor.eu/about/>)

- La métallurgie des poudres, l'impression 3D, l'électrodéposition et la pulvérisation sont à la base de la production d'électrodes hautement efficaces et robustes. Le Fraunhofer IFAM ([Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials](http://www.ifam.fraunhofer.de)) a mis au point des électrodes poreuses imprimées en 3D afin d'augmenter la surface électrocatalytique active et de contrôler le flux gaz-électrolyte. Ces deux aspects dépendent de la structure des pores. Des électrodes poreuses en 3D et des catalyseurs efficaces contribuent à l'efficacité et la performance des cellules. Ils allient des alliages métalliques nanocristallins (à base de Fe et de Ni) à des procédés d'impression 3D et de traitement ou de dépôt de surface.



(Source : <https://www.ifam.fraunhofer.de>)

- Les chercheurs ont étudié et simulé les possibilités de fusion laser sélective en 3D de métaux poreux, destinés à servir de structure de support pour le catalyseur d'un microréacteur de reformage de méthane à la vapeur pour la production d'hydrogène (fossile). L'examen de différentes structures de pores, porosités et matériaux montre que la porosité du métal a un impact significatif sur l'infiltration du catalyseur, le processus de réaction et l'efficacité de la production d'hydrogène. Un métal poreux en acier inoxydable recouvert de cuivre avec une structure contrôlée et échelonnée et un gradient de porosité de 80 à 60% a montré une conversion du méthanol et un débit de H₂ nettement plus élevés en raison de meilleures



Production de métal poreux par SLM (fusion laser sélective) comme support de catalyseur pour un microréacteur de production d'hydrogène
[\(https://www.sciencedirect-com.kuleuven.ezproxy.kuleuven.be/\)](https://www.sciencedirect-com.kuleuven.ezproxy.kuleuven.be/)

- Les chercheurs (notamment de la TU Eindhoven) ont mis au point un catalyseur comprenant des nanocages creux d'un alliage de nickel et de platine, qui présente une activité 20 fois supérieure. Grâce à ce nouveau catalyseur, ils ont pu mettre au point une cellule électrolytique d'environ 10 MW, de la taille d'un réfrigérateur. Les tests d'endurance du catalyseur dans une pile à combustible n'ont montré qu'une diminution négligeable de l'activité.

Sirris étudie les possibilités des entreprises belges dans le domaine de l'hydrogène et leurs besoins.

Sources

- <https://www.waterstofnet.eu/nl>
- Precors GmbH CoBIP project, BMWi Grant number: [03ETB020C](https://www.electrive.com/2021/04/05/fraunhofer-to-automate-fuel-cell-stack-production-on-continuous-line/),
<https://www.electrive.com/2021/04/05/fraunhofer-to-automate-fuel-cell-stack-production-on-continuous-line/>

- Cell3Ditor, quick deployment of 3D mass manufacturing technology of SOFC stacks, <http://www.cell3ditor.eu/>
- <https://www.borit.be/>
- <https://www.ilt.fraunhofer.de/en/>
- <https://www.now-gmbh.de/en/projectfinder/precoil/>
- Fraunhofer UMSICHT (Institute for Environmental, Safety, and Energy Technology), <https://www.umsicht.fraunhofer.de/en/research-for-the-market/hydrogen.html>

Auteurs



Bart Verlinden