

De nouvelles technologies de l'énergie en rupture ?

Par Hervé BERCEGOL, Sophie DIDIERJEAN, Mathieu ÉTIENNE, François KALAYDJIAN, Jean LE BIDEAU, Fabrice LEMOINE, Guy MAISONNIER, Gaël MARANZANA, Fabrice PATISSON et Abdelilah SLAOUI
Alliance ANCRE ⁽¹⁾

La question climatique impose une forte accélération de l'innovation dans les technologies de l'énergie et les procédés bas carbone. L'introduction massive d'énergie renouvelable intermittente nécessite la mise en œuvre de dispositifs de stockage de l'électricité à bas coût et durables, l'utilisation de vecteurs énergétiques décarbonés et versatiles, tels que l'hydrogène produit par électrolyse. Au-delà, les secteurs des carburants pour les transports, de la chimie et des matériaux doivent être massivement défossilisés, en ayant recours au captage et à la séquestration du CO₂ dans les procédés industriels, dont une partie peut être réutilisée comme matière première, ou en faisant appel à des procédés plus neutres en carbone dans les secteurs très émetteurs (sidérurgie). Enfin, la co-conversion de l'hydrogène et du dioxyde de carbone en carburants et molécules d'intérêt mise sur des technologies de rupture, telles que la biologie synthétique, la photocatalyse ou encore l'électrosynthèse.

Enjeux pour 2050 : décarboner et défossiliser l'énergie

La question climatique, cruciale pour le rythme de transformation des technologies de l'énergie, a été remise sur le devant de la scène par l'Accord de Paris lors de la COP21. L'Agence internationale de l'énergie (IEA, 2017) note que limiter au plus à + 2°C (2DS « 2°C scenario ») l'augmentation de la température mondiale suppose un volontarisme sans précédent pour déployer les technologies bas carbone existantes et un soutien très fort à l'innovation, des efforts qui devraient être encore amplifiés dans un scénario visant à rester en deçà de 2°C (B2DS, pour "beyond 2 degrees scenario" équivalent à + 1,75°C). Le rapport spécial du GIEC, publié en octobre 2018 (IPCC, 2018), a mis en lumière l'intérêt et la difficulté de limiter l'augmentation de température moyenne à + 1,5°C par rapport au niveau préindustriel, à l'horizon 2100. Les scénarios permettant d'atteindre cet objectif (IPCC, 2018) reposent soit sur des efforts inédits d'efficacité énergétique et de sobriété à réaliser au plus tôt, soit sur la mise en œuvre à grande échelle, avant 2050 et jusqu'à la fin du XXI^e siècle, de technologies d'émissions négatives de CO₂.

(1) L'Alliance ANCRE réunit l'ensemble des organismes de recherche publics français concernés par les problématiques de l'énergie, soit en tant que membres fondateurs (CEA, CNRS, CPU, IFPEN), soit en tant que membres associés (Andra, BRGM, CDEFI, Cerema, Cirad, CSTB, Ifremer, Ifsttar, Ineris, Inra, Inria, IRD, IRSN, Irstea, LNE, Onera). Le site Internet de l'Association est : <https://www.allianceenergie.fr/>

Au niveau mondial, l'objectif du respect des 2°C (IEA, 2017) impose déjà d'avoir réduit en 2040 de près de 80 % les émissions du secteur électrique et d'environ 35 % en moyenne celles liées à la consommation énergétique finale des secteurs des transports, du bâtiment et de l'industrie. Pour ce faire, il faut agir sur chacun des maillons de la chaîne énergétique.

La production d'électricité renouvelable, nucléaire ou fossile décarbonée, complétée par des outils de flexibilité comme le stockage d'électricité (voir le paragraphe « Le stockage électrochimique »), et l'utilisation de biomasse et de chaleur renouvelable font ainsi partie des options permettant d'envisager une décarbonation quasi complète. Un panel de solutions devra être déployé intégrant sobriété, gestion de l'offre et de la demande, efficacité énergétique, développement des énergies décarbonées ou des émissions négatives de CO₂ par la mise en œuvre de technologies de CCUS ⁽²⁾.

L'hydrogène (voir le paragraphe « L'électrolyse de l'eau et la bio-électrolyse ») et les technologies CCUS sont en cours de mobilisation pour arriver à décarboner l'industrie (voir le paragraphe « La défossilisation des carburants, de la chimie et des matériaux »). Cela ouvre alors la voie aux options de valorisation du CO₂ sous forme de CH₄ grâce aux procédés de méthanation, ou encore aux carburants de synthèse, « e-fuels », avec le stockage d'énergie élec-

(2) CCUS : captage, stockage et utilisation du CO₂ (en anglais : CO₂ Capture, Utilisation et Storage).

trique ou plus directement d'énergie solaire sous forme d'hydrocarbures. Cela viendrait compléter, pour le secteur de la mobilité, les motorisations électriques avec ou sans le recours à une pile hydrogène, ou l'usage des biocarburants et du biogaz.

Cet article va balayer différents domaines technologiques dans lesquels des ruptures pourraient survenir pour approcher au plus près des objectifs évoqués *supra*.

Le stockage électrochimique

La décarbonation de l'électricité

La décarbonation de l'électricité par le recours aux énergies renouvelables demande des technologies permettant un stockage efficace et de longue durée de l'énergie. Le stockage électrochimique figure parmi les solutions les plus prometteuses. De très grands efforts, sur le plan scientifique et technologique, sont déployés en vue d'augmenter la densité massique d'énergie, la capacité globale de stockage, la durabilité des batteries, et ce tout en assurant la soutenabilité de la filière en termes de consommation des ressources primaires.

Les batteries du futur à électrodes solides

La demande croissante en stockage d'énergie et les prévisions d'une diminution par 2 du coût du kWh stocké dans une batterie lithium accentuent plus encore la question du caractère limité des ressources en lithium et en cobalt (Nykqvist, 2015).

Parmi les alternatives possibles, les dispositifs à base de sodium semblent particulièrement intéressants en raison de l'abondance de celui-ci, de son bas prix et du faible impact écologique de son extraction. Ces batteries présentent des performances raisonnables, entre autres grâce au potentiel redox du couple Na^+/Na , conduisant à des performances presque aussi élevées que celles obtenues avec le couple Li^+/Li (Kundu, 2015). Les batteries à air pourraient utiliser le dioxygène ambiant en tant qu'espèce électro-active pour l'électrode positive et apporter un gain théorique très important du fait de la disponibilité illimitée, en tout lieu, du dioxygène. Le développement de ces techniques se heurte à la présence des autres composants de l'air qui limitent le nombre des cycles possibles de charge et de décharge (Asadi, 2018). Seules les batteries zinc-air, qui affichent une énergie stockée moindre que les batteries lithium-air (pour un coût nettement inférieur), trouvent actuellement un débouché commercial⁽³⁾. Les systèmes aqueux sont eux aussi très étudiés, mais ils présentent une capacité de stockage d'énergie moindre ainsi qu'une puissance limitée⁽⁴⁾. Il faut aussi noter les efforts importants pour amener sur le marché des systèmes à base de soufre qui présentent des densités massiques d'énergie plus élevées que celles des batteries au lithium, ou encore plus élevées que des batteries à base de silicium. Enfin, le développement des batteries organiques est en cours, ce qui va permettre de s'affranchir à faible

coût de nombreuses contraintes environnementales et géopolitiques.

Les batteries redox flow durables

Les batteries redox à circulation (*redox flow batteries*) sont parfaitement adaptées au stockage massif de l'énergie électrique intermittente, du fait que la puissance électrique produite par leurs cellules électrochimiques (typiquement 100 à 500 kW) est découplée de leur capacité de stockage dans des volumes variables d'électrolyte (jusqu'à 800 MWh pour un projet développé à Dalian, en Chine). Elles sont généralement d'une mise en œuvre relativement facile, tout comme l'est leur maintenance ; *a fortiori*, la perspective d'un coût de fabrication réduit pourrait les rendre rapidement compétitives. Développée dans les années 1980 par une équipe australienne, la technologie actuellement la plus mature est la batterie « tout vanadium ». Dans le but de diminuer encore le coût du stockage de l'énergie et éviter de dépendre de ressources limitées en vanadium, d'autres couples redox sont en cours d'étude : il s'agit de mettre au point des électrolytes à base de composés organométalliques et de molécules organiques en milieu aqueux. Les batteries développées avec ces composés, notamment par la société française Kemiwatt, s'inscrivent clairement dans la logique de développement durable, mais elles nécessitent encore un effort de recherche dans les domaines de la chimie, des matériaux et de l'ingénierie.

L'électrolyse de l'eau et la bio-électrolyse

En dépit des progrès attendus, les batteries ne pourront pas répondre aux besoins de stockage exigeant d'associer compacité et grande capacité. Le seul exemple de stockage dense, fiable et de longue durée est l'énergie associée aux liaisons chimiques.

La première des molécules visées est l'hydrogène H_2 , obtenu par conversion de l'énergie électrique grâce à un électrolyseur. Le déploiement à grande échelle des énergies électriques renouvelables variables va conduire à des excédents de production, qui seront autant d'énergie bon marché à valoriser sous forme d'hydrogène. Une cellule élémentaire d'un électrolyseur est constituée d'un électrolyte, dont le rôle est de transporter des ions, pris en sandwich entre deux électrodes poreuses à la surface desquelles se produisent les demi-réactions de dégagement d'hydrogène et d'oxygène. Il existe différentes technologies qui diffèrent par la nature de l'électrolyte utilisé (voir la Figure 1 de la page suivante). Les électrolyseurs alcalins qui utilisent une solution de potasse (KOH) sont une technologie mature pour la production stationnaire de grandes quantités d'hydrogène, mais ils sont mal adaptés aux fluctuations typiques des énergies intermittentes. Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons sont beaucoup plus compacts et réactifs, mais leurs électrodes sont à base d'iridium et de platine, deux métaux disponibles en quantité limitée. La technologie à oxyde solide qui fonctionne à haute température (700°C) semble prometteuse en termes d'efficacité, mais elle est d'une mise en œuvre peu souple. Si l'on postule que l'énergie

(3) www.nantenergy.com

(4) www.aquionenergy.com ; www.znrblog.wordpress.com

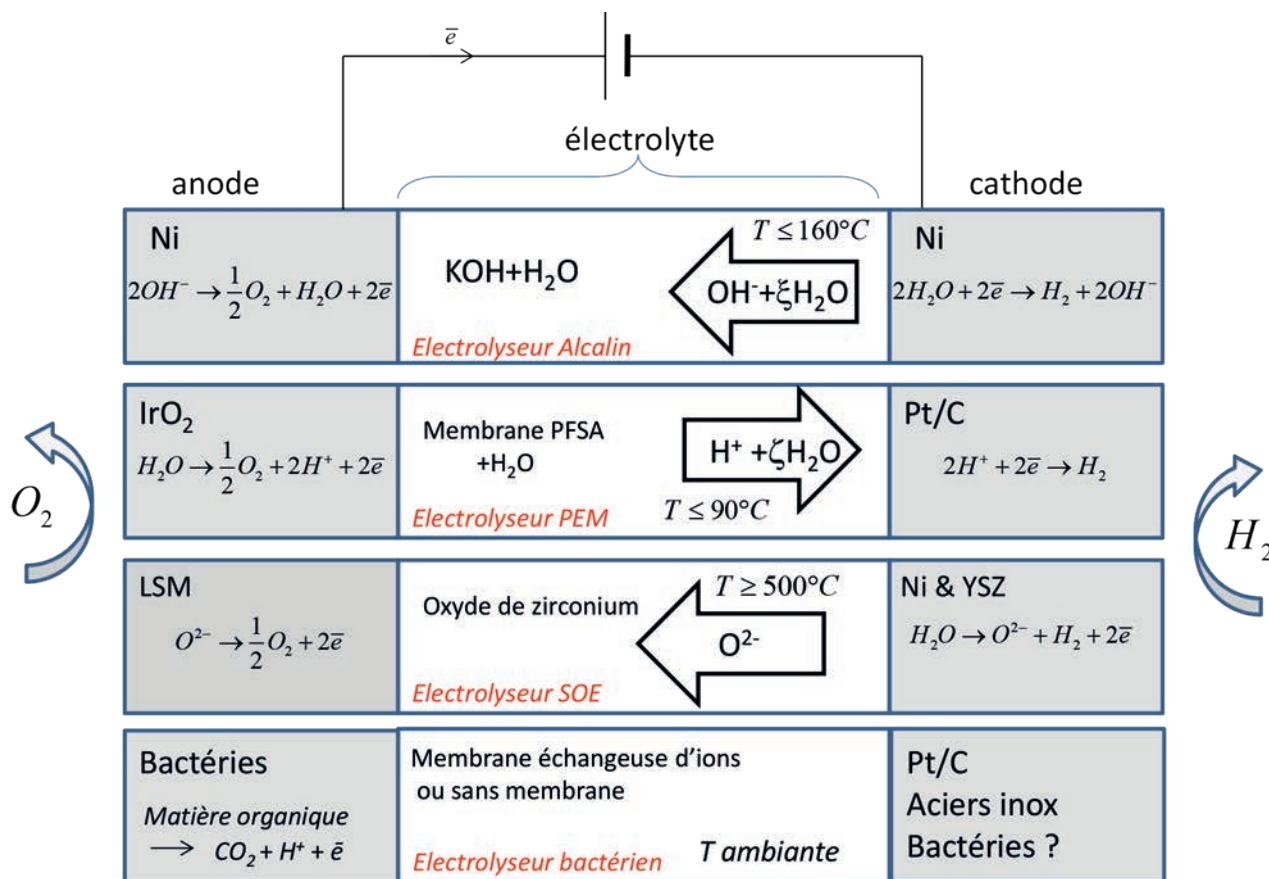


Figure 1 : Schéma de principe des différentes voies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

électrique excédentaire sera bon marché et dispersée, comme le sont les usages de l'hydrogène, sur l'ensemble du territoire, il y a un intérêt tout particulier à développer une technologie de bas CAPEX : elle est peut-être moins efficace, mais elle est implantable à grande échelle. Il s'agit peut-être de l'électrolyse à membrane alcaline qui ne nécessite pas l'utilisation de métaux nobles, mais seulement des membranes échangeuses d'anions suffisamment performantes et durables. On mentionnera aussi la bio-électrolyse qui associe la biodégradation de matière organique par une bio-anode à la production d'hydrogène. Cette approche diminue fortement l'énergie électrique nécessaire pour produire l'hydrogène au niveau de la cathode, dont le catalyseur pourrait également être bactérien.

La défossilisation des carburants, de la chimie et des matériaux

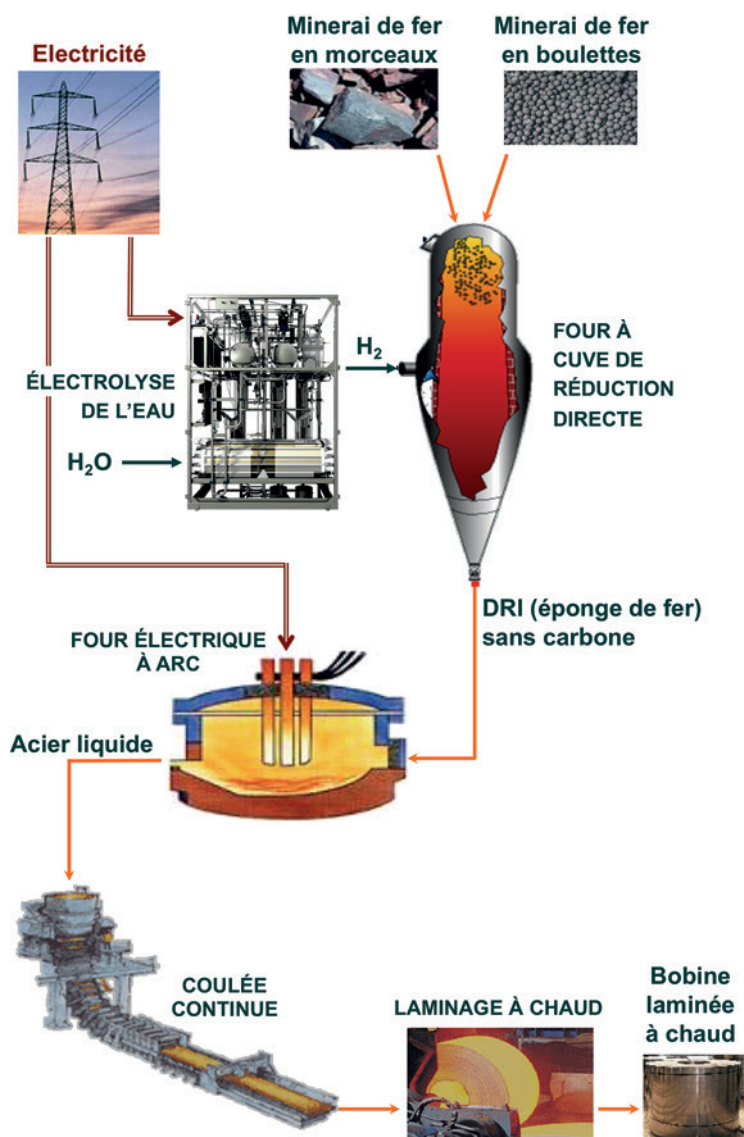
De nombreux travaux visent à passer outre le recours aux ressources fossiles. On citera la défossilisation de la sidérurgie (voir le paragraphe suivant), où le charbon est remplacé par l'hydrogène obtenu par des procédés bas carbone. Mais, dans la plupart des cas, le carbone reste un élément important des produits. Il s'agit dès lors de travailler sur le cycle du carbone pour le rapprocher le plus possible d'une économie circulaire. Nous aborderons la question du CCUS *infra* (voir le paragraphe « Les technologies de captage, d'utilisation et de stockage du CO₂ (CCUS) »).

Défossiliser la sidérurgie

Dans la sidérurgie, l'emploi de charbon et de coke dans les hauts fourneaux pour à la fois réduire le minerai (oxydes de fer) et chauffer le réacteur conduit à des émissions de CO₂ considérables (1,9 t CO₂/t d'acier et 7 % des émissions anthropiques). Remplacer le carbone par de l'hydrogène comme agent réducteur supprimerait les émissions liées à la réduction (émission d'H₂O au lieu de CO₂). Une filière acier fondée sur l'hydrogène pour l'opération de réduction et sur le four électrique pour celle de la fusion est envisageable (voir la Figure 2 de la page suivante) ; elle conduirait à une réduction de 80 % des émissions de CO₂ spécifiques à ces opérations (Ranzani, 2013) selon les données du projet ULCOS (2004-2010). Plusieurs programmes de R&D et démonstrateurs sont actuellement consacrés à ce sujet en Europe (Suède : HYBRIT ; Allemagne : SALCOS, projet européen H2FUTURE). Ces technologies sont matures, le seul véritable verrou est aujourd'hui surtout d'ordre économique.

Les technologies de captage, d'utilisation et de stockage du CO₂ (CCUS)

Le sigle CCUS recouvre un certain nombre de technologies qui s'appliquent tant à la décarbonation de la production d'électricité qu'à celle de la production industrielle. Il s'agit de capter le CO₂ émis par les centrales thermiques à flamme et les émissions des grandes unités industrielles des secteurs de la sidérurgie, de la cimenterie ou du raffinage.



FILIÈRE ACIER BASÉE SUR L'HYDROGÈNE

Figure 2 : Filière sidérurgique basée sur l'hydrogène et l'électricité bas carbone (©Fabrice PATISSON).

Les technologies de captage ont reposé jusqu'à présent sur des procédés d'absorption chimique ou physique par solvants ou sur des procédés d'oxycombustion⁽⁵⁾, l'oxygène résultant d'une distillation cryogénique de l'air au bilan énergétique peu favorable. Des voies en rupture émergent cependant : il s'agit des réacteurs à centrifugation, ils sont plus compacts que les tours d'absorption et marquent un progrès par rapport à l'oxycombustion, l'oxygène étant produit par boucle chimique⁽⁶⁾ (CLC) au moyen de deux réacteurs, l'un alimenté par de l'air, l'autre par un hydrocarbure. Des particules métalliques transitent alternativement de l'un à l'autre, s'oxydant dans le premier et transférant l'oxygène à l'hydrocarbure dans le second. Nombre de verrous techniques restent à être levés : stabilité mécanique des réacteurs tournants, réactivité et durée de vie des particules métalliques pour le CLC.

(5) Oxycombustion : combustion à l'oxygène.

(6) Ce procédé est appelé Chemical Looping Combustion (CLC).

Le CO₂ capté peut être soit transporté puis stocké dans le sous-sol (CCS), soit transformé et séquestré dans des produits manufacturés (CCU). Le CCU semble revêtir aujourd'hui une dimension stratégique au niveau de nombreux pays développés (Sapea, 2018). L'impact climatique d'une telle séquestration est lié au temps de résidence du CO₂ dans le produit dans lequel il est transformé, qu'il s'agisse de matériaux solides, comme le ciment, ou de carburants alternatifs (réaction entre le CO₂ et de l'hydrogène). Cette dernière option est développée dans des démonstrateurs (méthanation dans le démonstrateur JUPITER1000 à Fos-sur-Mer⁽⁷⁾ ou production de méthanol par Carbon Recycling International en Islande), mais elle ne permet qu'un gain relatif, le CO₂ étant réémis lors d'une oxydation. Pour optimiser l'impact climatique de cette solution, il est nécessaire d'associer un hydrogène vert électrolytique avec un CO₂ « naturel ». Le mode le plus économique consiste à utiliser la biomasse, un concentrateur naturel du carbone de l'air, mais il pâtit de l'efficacité limitée de la photosynthèse naturelle pour convertir l'énergie solaire. Des technologies de capture directe du CO₂ atmosphérique se sont également développées dans le même temps, d'un point de vue scientifique (Lackner, 2013) et technologique (Keith, 2018). Des entreprises comme Carbon Engineering ou Climeworks proposent des procédés de captage direct du CO₂ dans l'air, qui reposent en général sur deux boucles chimiques.

Chimie, carburants électriques et solaires

Après captage du CO₂, l'enjeu est de convertir efficacement en liaisons chimiques les flux d'énergie propres (électricité non carbonée ou flux photonique solaire). L'exploitation durable de la biomasse pourrait permettre de réaliser au moins en partie ce travail de conversion, mais l'on se heurte à une limitation de son rendement (un taux de conversion du flux solaire en molécules organiques utiles inférieur à 1 %). Le niveau de déploiement des solutions à base de biomasse sera contraint par la concurrence qu'elles instaurent avec l'agriculture fournissant des produits alimentaires et par la nécessité d'assurer la protection de certains territoires pour préserver la biodiversité. À l'échelle d'un continent densément peuplé, comme l'Europe ou la Chine, la mise en œuvre de technologies plus efficaces sur le plan énergétique est indispensable. Si l'on souhaite atteindre des rendements surfaciques au minimum dix fois plus importants que ceux de la biomasse traditionnelle⁽⁸⁾, quatre types de solutions sont alors envisageables :

- Dans le but de contourner les limites de la photosynthèse naturelle des plantes, des micro-organismes, dont le métabolisme peut être modifié grâce au génie génétique ou à la biologie synthétique, sont utilisés pour produire des biocarburants de troisième génération et des produits chimiques. Il s'agit ici de mettre à profit l'extraordinaire diversité du vivant (Sorigué, 2017).

(7) Lancé en 2016 sur le port de Marseille (Fos-sur-Mer), un projet de démonstrateur pionnier en France doit produire de l'hydrogène grâce aux électrolyseurs de la société McPhy, et valoriser, par méthanation, le CO₂ émis par les cheminées d'un site industriel.

(8) Ces solutions laisseraient donc toute la place nécessaire à l'agriculture vivrière et aux zones sanctuarisées pour la biodiversité.

- À côté de ces procédés biologiques, diverses solutions physico-chimiques sont développées (Tuller, 2017). Dans les régions d'ensoleillement élevé et quasi constant, le flux solaire concentré permet de réaliser des cycles thermochimiques fournissant de l'hydrogène à partir d'eau ou du monoxyde de carbone à partir de CO₂ (Marxer, 2017).
- Pour tirer parti de la disponibilité d'une production électrique renouvelable à prix bas voire négatifs, on peut aussi exploiter l'électrocatalyse pour produire l'hydrogène en tant qu'intermédiaire réactionnel, co-électrolyser le CO₂ et le H₂O, ou réduire le CO₂ en CO, en méthanol, etc. La production de gaz de synthèse (Chen, 2019), constitué de H₂ et CO, a l'avantage de permettre l'entrée sur un éventail de procédés très bien connus de l'industrie pour produire des hydrocarbures, des carburants pour le transport routier ou aérien, en recourant à la technologie Fischer-Tropsch, par exemple (Marques-Mota, 2019).
- Enfin, on peut combiner la conversion photon-électron et l'électrosynthèse : ces systèmes photo-électro catalytiques (PEC) ont récemment atteint un niveau très intéressant de conversion de l'énergie solaire en hydrogène : 19 % (Cheng, 2018), un taux représentant 85 % de la limite théorique de ce type de dispositif basé sur des empilements multijonction de semi-conducteurs. Cependant, la durabilité du dispositif n'est pas avérée du fait de l'utilisation d'éléments très rares comme catalyseurs, le ruthénium et le rhénium. Si la photo-électro-catalyse directe de CO₂ n'obtient pas un tel score, elle fait néanmoins l'objet de développements très importants aujourd'hui (Wang, 2018).

Les perspectives

Face à l'ampleur du défi lancé par la COP21, de nombreuses pistes existent. Au-delà de la mise au point des procédés, il faut travailler sur l'ensemble du système énergétique et sur les déterminants assurant sa soutenabilité : retour sur investissement énergétique (EROI) (Hall, 2017), utilisation sobre des matières premières et emprise minimale au sol. Nous avons déjà évoqué le dernier paramètre ; le second fait depuis peu l'objet d'attentions marquées, nous n'y reviendrons pas ici. Quant au premier, pour une usine d'hydrogène photoélectrochimique (PEC) (Sathre, 2014 ; Greenblatt, 2019), les premières estimations théoriques de l'EROI sont de l'ordre de 2, ce qui reste très insuffisant pour fournir toute l'énergie dont a besoin une société aussi complexe que la nôtre (Hall, 2017). Sur le plan économique, la création d'une usine PEC ne bénéficie pas d'un contexte favorable aujourd'hui en l'absence d'une taxe carbone élevée et du fait d'un coût de l'hydrogène produit cinq à dix fois plus élevé que celui du procédé de reformage du méthane à la vapeur (Shaner, 2016). Malgré tout, la littérature reste optimiste (Greenblatt, 2019) ; des gains sont attendus dans les décennies à venir, similaires à ceux obtenus pour les panneaux photovoltaïques, dont l'EROI a été multiplié par un facteur 3 environ sur une durée de vingt-cinq ans, alors même que le prix était au minimum divisé par 10 (Fraunhofer, 2019).

Références bibliographiques

- ASADI M. *et al.* (2018), *Nature* 555, pp. 502-506.
- CHEN P. *et al.* (2019), "Syngas Production from Electrocatalytic CO₂ Reduction with High Energetic Efficiency and Current Density", *J. Mater. Chem. A*.
- CHENG W.-H. *et al.* (2018), "Monolithic Photoelectrochemical Device for Direct Water Splitting with 19% Efficiency", *ACS Energy Letters* 3 (8), pp. 1795-1800.
- FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME (2019), "ISE, Photovoltaic report", www.ise.fraunhofer.de
- GREENBLATT J. R. (2019), "Photo-electrochemical Hydrogen Plants at Scale: A Life-cycle Net Energy Assessment", in *Integrated Solar Fuel Generators*, SHARP I. D., ATWATER H. A. & LEWERENZ H.-J. (ed), The Royal Society of Chemistry.
- HALL C. A. S. (2017), *Energy Return on Investment*, Springer.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2017), "Energy Technology Perspectives 2017, Catalysing Energy Technology Transformations", OECD/IEA, voir également : <https://www.iea.org/etp2017/summary/>
- IPCC (2018), "Global Warming of 1.5 °C, an IPCC special report", 6 october.
- KEITH D. *et al.* (2018), "A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere", *Joule* 2, pp. 1573-1594.
- KUNDU D., TALAIE E., DUFFORT V. & NAZAR L. F. (2015), *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54, pp. 3431-3448.
- LACKNER K. S. (2013), "The thermodynamics of direct air capture of carbon dioxide", *Energy* 50, pp. 38-46.
- MARQUES-MOTA F. & KIM D. H. (2019), "From CO₂ methanation to ambitious long-chain hydrocarbons: alternative fuels paving the path to sustainability", *Chem. Soc. Rev.* 48, pp. 205-259.
- MARXER D. (2017), "Solar thermochemical splitting of CO₂ into separate streams of CO and O₂ with high selectivity, stability, conversion, and efficiency", *Energy Environ. Sci.* 10, p. 1142.
- NYKVIST B. & NILSSON M. (2015), *Nature Climate Change* 5, pp. 329-332.
- RANZANI DA COSTA A. *et al.* (2013), *J. Cleaner Prod.*
- SCIENCE ADVICE FOR POLICY BY EUROPEAN ACADEMIES (2018), *Novel carbon capture and utilization technologies: research and climate aspects*, Berlin, <https://www.sapea.info/wp-content/uploads/CCU-report-web-version.pdf>
- SATHRE R. *et al.* (2014), "Life-cycle net energy assessment of large-scale hydrogen production via photoelectrochemical water splitting", *Energy Environ. Sci.* 7, pp. 3264-3278.
- SHANER M. R. *et al.* (2016), "A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy", *Energy Environ. Sci.*, 9, pp. 2354-2371.
- SORIGUÉ D. *et al.* (2017), "A microalgal photoenzyme converts fatty acids to hydrocarbons", *Science* 357, pp. 903-907.
- TULLER H. L. (2017), "Solar to fuels conversion technologies: a perspective", *Materials for Renewable & Sustainable Energy* 6:3, pp. 1-16.
- WANG Y. *et al.* (2018), "Efficient solar-driven electrocatalytic CO₂ reduction in a redox-medium-assisted system", *Nature Communications* 9, p. 5003.