



Carburants produits à l'aide d'électricité renouvelable ou d'énergie thermosolaire : une solution pour voler sans énergie fossile ?

Référence du dossier : BAZL-047.1-5/1

Section Environnement (LEUW), en collaboration avec l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)

2 juillet 2020

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) s'est fixé pour objectif à long terme de réduire les émissions de CO₂ fossile dues à l'aviation civile. Dans cette perspective, il a notamment été décidé qu'à partir de 2020, la croissance du secteur aéronautique mondial devait être neutre en carbone. Or, pour les importantes prestations de transport de l'aviation civile internationale, aucune solution alternative, telle que la motorisation électrique ou hybride, ne s'offre à moyen ou à long terme. Une solution consiste dès lors à remplacer le kérosène fossile par des carburants synthétiques.

Les carburants synthétiques ne se distinguent du kérosène fossile que par leur source de matière première (hydrogène et carbone) et leur processus de production. Il s'ensuit que le potentiel de réduction des émissions de CO₂ d'un carburant synthétique dépend principalement du choix de ces sources ainsi que de l'origine de l'énergie utilisée pour le produire.

Dernièrement, de gros efforts ont été entrepris à l'échelle internationale pour développer des biocarburants¹ destinés à l'aviation. Toutefois, s'ils ne sont pas produits exclusivement à partir de déchets, ces biocarburants présentent plusieurs inconvénients : ils concurrencent la production alimentaire, impliquent l'exploitation intensive de vastes surfaces de terres agricoles (ainsi que d'éventuels changements d'affectation de ces terres) et nécessitent de grandes quantités d'eau d'irrigation. De plus, outre qu'elle est fortement limitée par le manque de matière première, la production de biocarburants pour l'aviation entre souvent en concurrence avec celle, moins coûteuse, de biocarburants destinés au trafic routier.

Compte tenu de ces inconvénients, les carburants produits à l'aide d'électricité renouvelable ou d'énergie solaire sont une alternative intéressante aux biocarburants, puisque leur production émet moins de CO₂ et que les ressources nécessaires sont pratiquement inépuisables.

Actuellement, les coûts de production de carburants à l'aide d'électricité ou d'énergie solaire sont de trois à six fois supérieurs à ceux du kérosène conventionnel. Ces carburants ne seront donc compétitifs que lorsqu'ils seront produits en quantité suffisante pour réaliser des économies d'échelle et que l'on aura créé des instruments de réglementation incitant à les utiliser.

¹ Produits à partir d'huiles et de matières grasses végétales, de sucres ou de déchets (ménagers agricoles et industriels).



1 Procédés de production de carburants à d'énergie électrique ou solaire

Connus sous leur nom anglais de « Power-to-Liquid » (PtL) et « Sun-to-Liquid » (StL), les procédés de production de carburants à l'aide d'énergie électrique ou solaire consistent à fabriquer des hydrocarbures liquides synthétiques à l'aide d'électricité ou de chaleur, d'eau et de CO₂.

1.1 Power-to-Liquid (PtL)

La première étape du procédé PtL consiste à produire de l'hydrogène (H₂) par électrolyse de l'eau (H₂O). Une partie de cet hydrogène est ensuite utilisé pour produire du monoxyde de carbone (CO) à partir de dioxyde de carbone (CO₂), au moyen de la réaction du gaz à l'eau. Les moyens suivants permettent de se procurer du CO₂ :

- capture directe de CO₂ atmosphérique (*direct air capture*, DAC) ;
- capture du CO₂ de sources biogènes (p. ex. biogaz) ;
- lavage des gaz de fumées d'installations industrielles (p. ex. CO₂ émis par les cimenteries ou les centrales fossiles).

L'étape suivante consiste à synthétiser des hydrocarbures (C_xH_y) au moyen du procédé de Fischer-Tropsch à partir du mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂), appelé gaz de synthèse. Ce procédé reposant sur une réaction chimique exothermique, la chaleur qu'il produit peut être utilisée dans le processus de production (p. ex. pour l'électrolyse). Lors de la dernière étape les précurseurs ainsi obtenus sont transformés en carburants pour l'aviation.

1.2 Sun-to-Liquid (StL)

Dans le procédé StL, à la différence du procédé PtL, on se sert directement des très hautes températures obtenues par concentration des rayons solaires comme énergie de production du gaz de synthèse. Les sources de carbone sont les mêmes que dans le procédé PtL. La vapeur d'eau (H₂O) et le dioxyde de carbone (CO₂) sont décomposés en hydrogène (H₂) et monoxyde de carbone (CO) par une réaction thermochimique. La synthèse d'hydrocarbures liquides par le procédé de Fischer-Tropsch et leur transformation en carburants sont ensuite assurées comme dans le processus de production PtL.

2 Niveau de développement technologique

Électrolyse : l'électrolyse alcaline est une technologie bien établie, qui est donc à disposition. Quant à l'électrolyse acide, ou électrolyse PEM (*proton exchange membrane*), elle se répand actuellement à plus grande échelle et offre le double avantage d'une densité de courant plus élevée et d'une plus grande flexibilité d'exploitation². Enfin, il existe également des cellules d'électrolyse à oxyde solide (*solid oxide electrolysis cell*, SOEC), qui sont cependant encore en phase de développement.

Extraction du CO₂ : la séparation du CO₂ du biogaz³ ainsi que le lavage des gaz de fumées sont des procédés industriels rodés, tandis que la capture directe de CO₂ atmosphérique (DAC) est technologiquement moins avancée.

Procédé de Fischer-Tropsch : technologiquement au point, ce procédé est déjà utilisé à grande échelle dans différentes techniques de production de carburants, tels que le procédé Coal-to-Liquid (CtL: transformation de charbon en hydrocarbures liquides). Son application dans le processus de production de carburants synthétiques pour l'aviation conformément à la norme ASTM D7566⁴ a en outre

² Flexibilité d'exploitation: les électrolyseurs PEM sont idéaux pour exploiter des parts élevées d'énergie électrique photovoltaïque ou éolienne, dont la production subit de fortes fluctuations journalières et saisonnières.

³ Durant le processus de fermentation des déchets organiques, des bactéries produisent un mélange gazeux composé d'environ deux tiers de méthane et d'un tiers de CO₂. Toutefois, pour être utilisé comme combustible de haute qualité (meilleur pouvoir calorifique), ce biogaz ne doit être composé pratiquement que de méthane. Il faut donc en séparer le CO₂ à l'aide d'une technologie appropriée et moyennant la consommation d'énergie de production.

⁴ ASTM, D7566, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, 2018

déjà été certifiée. Pour l'instant, ces carburants synthétiques ne peuvent cependant être utilisés que mélangés à du kérosène conventionnel dans une proportion de 50 % au plus, avec une teneur en composés aromatiques de 8 % au minimum.

Sun-to-Liquid : le développement du procédé StL est moins avancé que celui du procédé PtL. Pour l'instant, il n'est pas encore passé du stade de la recherche (projets de l'OFEN « SOLIFUEL », « FUELREC » et « HYBREC » ; projets de l'Union européenne « SOLAR-JET » et « Sun to Liquid » [projet Horizon 2020]⁵) à celui de l'application industrielle, alors que les premières grandes installations industrielles exploitant le procédé PtL sont en cours de planification.

3 Durabilité des carburants produits à l'aide d'électricité ou d'énergie solaire

3.1 Neutralité climatique

Pour que les carburants produits à l'aide d'électricité ou d'énergie solaire fassent sensiblement diminuer les émissions de CO₂ du secteur aéronautique, il faut que leur production soit aussi neutre que possible sur le plan climatique. En ce qui concerne le procédé PtL, il est donc indispensable que l'électricité utilisée pour l'électrolyse provienne de sources d'énergies renouvelables (hydraulique, éolienne ou solaire) et que le CO₂ nécessaire soit capturé directement dans l'atmosphère ou séparé de résidus ou déchets biogènes (p. ex. biogaz produit à partir de boues d'épuration, de déchets verts, de produits résiduels agricoles ou de purin). De plus, le bilan écologique du processus de production dépend aussi de la manière dont la chaleur émise par le procédé de Fischer-Tropsch est utilisée dans ce processus.

Compte tenu de tous ces aspects, l'économie d'émissions de CO₂ résultant de l'utilisation de carburants PtL pourrait atteindre 100 %⁶ par rapport au kérosène conventionnel⁷. En tenant compte des émissions de gaz à effet de serre liées à la construction des installations de production, la réduction des émissions de CO₂ serait de 69 à 83 % par rapport au kérosène conventionnel. Par comparaison, les biocarburants offrent un potentiel de réduction des émissions de CO₂ se situant entre 30 et 80 %, en fonction de la matière première biogène et du procédé de production utilisés⁸. Enfin, selon nos premières estimations, parmi toutes les possibilités examinées plus haut, c'est la production de carburants synthétiques à l'aide du procédé StL qui présente l'un des plus hauts potentiels de réduction des émissions de CO₂⁹.

3.2 Consommation d'eau

Le procédé PtL utilise de l'eau comme matière première pour l'électrolyse. Selon les estimations ressortant d'une étude de l'office allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*⁶), il faut entre 1,3 et 1,4 litre d'eau pour produire un litre de carburant synthétique. Par comparaison, la production d'un litre de biocarburant nécessite entre 1500 et 20 000 litres d'eau, en fonction de la matière première utilisée¹⁰. C'est une des raisons pour lesquelles seul doit être poursuivi le développement des biocarburants dits avancés (*advanced biofuels*), qui sont beaucoup moins gourmands en eau.

3.3 Utilisation du sol

Les installations photovoltaïques, les parcs éoliens et les lacs de retenue nécessaires pour produire de l'électricité à partir d'énergies renouvelables occupent, par unité d'énergie produite, moins de surface

⁵ « Sun to Liquid » [en ligne].

⁶ Umweltbundesamt (UBA). Power-to-Liquids (PtL): Sustainable alternative fuels produced from renewable electricity, 2016

⁷ Les émissions de gaz à effet de serre durant tout le cycle de vie du kérosène conventionnel s'élèvent à environ 89 grammes d'équivalent CO₂ par mégajoule (gCO₂eq/MJ) (ordre de grandeur, car les données concernant les émissions pendant le cycle de vie dépendent aussi de la méthode de calcul appliquée).

⁸ Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), Environmental Report, 2019

⁹ Le procédé StL est encore en phase de développement et les bilans écologiques scientifiques sont en cours d'élaboration.

¹⁰ Centre commun de recherche (*Joint Research Center*, JRC) de la Commission européenne: Bioenergy and Water, Report EUR 26160, 2013

de terrain que celle nécessaire à la production de biocarburants. Ainsi s'agissant d'installations éoliennes, plus de 95 % de la surface occupée peut être exploitée à d'autres fins, par exemple pour l'agriculture. Pour les installations photovoltaïques situées sur des terres arables, cette proportion est d'environ 66 %⁶. Un autre aspect intéressant est la possibilité d'utiliser des surfaces autrement inexploitable pour produire de l'électricité à partir d'énergies renouvelables ou directement de la chaleur à partir d'énergie solaire. Cela ouvre des perspectives économiques intéressantes en particulier aux États possédant de vastes surfaces improductives propices à la production d'énergies renouvelables.

4 Coûts des carburants produits à l'aide d'électricité ou d'énergie solaire

Dépendants du rendement du processus de production, les coûts liés à la quantité d'énergie utilisée, sont une composante majeure des coûts de production de ces carburants. De plus, certaines étapes du processus, en particulier pour le procédé StL, sont encore en phase de développement. Les coûts de production restent donc globalement encore très élevés. De ce fait, le prix des carburants PtL ou StL est actuellement de trois à six fois plus élevé que celui du kérosène conventionnel^{11, 12, 13}.

Le kérosène issu de PtL ou StL ne pourra donc concurrencer le kérosène conventionnel que lorsqu'il sera produit en quantité suffisante pour réaliser des économies d'échelle. Cela signifie qu'il faut agrandir les installations de production existantes et en créer de nouvelles, afin de produire en grandes quantités. Toutefois, même lorsque les économies d'échelle escomptées seront réalisées, la compétitivité des carburants PtL sera largement tributaire des coûts de l'électricité. Pour que la production de carburants synthétiques pour l'aviation par le procédé PtL soit rentable, il faudra donc s'assurer que les installations de production puissent être alimentées par de l'électricité renouvelable bon marché.

5 Promotion en Suisse

On observe en Suisse une intense activité de recherche et de développement technologique en relation avec les procédés PtL et StL. Largement soutenue par les pouvoirs publics, cette activité relève aussi bien de projets de l'Union européenne que de projets promus par l'OFEN et par le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS).

Dans le domaine des carburants solaires (StL), les principaux centres d'activité sont l'EPFZ¹⁴, ses deux *spin-off* Synhelion¹⁵ et Climeworks¹⁶, la Haute école spécialisée de la Suisse italienne (SUPSI)¹⁷ et, pour la production d'hydrogène solaire, l'EPFL¹⁸. Les acteurs suisses sont à la pointe de la recherche à l'échelle internationale. De nombreuses activités sont également en cours dans le domaine des carburants PtL, l'accent étant mis sur la production d'hydrogène renouvelable (projets de recherche sur l'électrolyse, installations pilotes Power-to-Hydrogen [PtH] ou Power-to-Methane [PtM])¹⁹.

De manière générale, l'approvisionnement en électricité d'origine solaire ou éolienne connaît de fortes fluctuations journalières et saisonnières. Source d'électricité renouvelable constante et à très faibles émissions de CO₂, l'énergie hydraulique serait particulièrement indiquée pour le procédé PtL (énergie en bande et longue durée de vie des infrastructures).

¹¹ AGORA, The future cost of electricity based synthetic fuels, 2018

¹² PROGNOSE, Status and Perspectives of Liquid Energy Sources in the Energy Transition, 2018

¹³ Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production, C. Falter et al., Environmental Science and Technology, 50(1), pp. 470 à 477, 2016

¹⁴ <https://prec.ethz.ch>

¹⁵ <https://synhelion.com>

¹⁶ <https://www.climeworks.com>

¹⁷ <https://www.supsi.ch> : Mechanical Engineering and Materials Technology Institute (MEMTi)

¹⁸ <https://www.epfl.ch/labs/lrese/>

¹⁹ Pour une vue d'ensemble des acteurs du secteur de l'hydrogène en Suisse, voir : <https://h2fc.ch>.

Les technologies PtL peuvent à la rigueur servir à mieux équilibrer l'offre (forte en été) et la demande (forte en hiver) lorsque l'électricité est produite à partir d'énergie solaire et éolienne. Toutefois, la création de grandes installations de production de carburants pour l'aviation à l'aide d'électricité renouvelable (hydraulique, éolienne et photovoltaïque) n'est guère réaliste en Suisse. D'abord parce que l'habitat y est très dense ; ensuite parce que les capacités sont développées à d'autres fins en priorité (remplacement de l'énergie nucléaire, électromobilité). Quant au procédé StL, il n'est pas non plus adapté à un pays comme le nôtre où l'ensoleillement est relativement modeste et où les surfaces appropriées font défaut.

Le secteur aérien n'en est pas moins très intéressé par l'utilisation de carburants synthétiques durables²⁰, comme en témoignent les déclarations d'intention de SWISS et du groupe Lufthansa relatives à l'établissement d'un partenariat avec les acteurs suisses du secteur (EPFZ, Synhelion, Climeworks), en vue du développement et de la commercialisation de carburants solaires²¹.

²⁰ Voir: <http://www.safug.org/>.

²¹ Voir communiqué de presse: <https://www.lufthansagroup.com/de/verantwortung/klima-umwelt/treibstoffverbrauch-und-emissionen/sustainable-aviation-fuel.html#cid2903>.