



Vers une aviation zéro fossile

(état mai 2020¹)

À moins d'énormes progrès techniques, les grands avions fonctionneront encore longtemps au kérosène ou aux carburants aux propriétés proches du kérosène. La production de carburants de sources non fossiles représente à cet égard la clé d'une aviation zéro fossile.

L'énergie nécessaire pour un vol doit être stockée sous une forme appropriée à bord de l'avion dès avant le départ. Pour être en mesure de transporter des passagers et du fret ainsi que le carburant embarqué sur des liaisons long-courriers, les avions doivent afficher une efficacité énergétique relativement élevée. Cela signifie en particulier que le stock d'énergie embarquée ne doit pas être trop lourd puisque chaque kilo supplémentaire doit être compensé par un supplément de poussée. Les réacteurs d'avion sont relativement légers et figurent parmi les moteurs à combustion interne les plus efficaces qu'il soit. Le recours à des carburants de sources non fossiles pourrait drastiquement faire baisser l'impact du trafic aérien sur le climat². La route vers l'aviation zéro fossile passe cependant par une réflexion sur les procédés de production du kérosène. Pourra-t-il à l'avenir être obtenu à partir de sources non fossiles ?

Il est possible aujourd'hui déjà de produire du kérosène synthétique à partir de n'importe quelle source de carbone combinée avec de l'hydrogène et une source d'énergie adéquate. Les sources de carbone sont entre autres la biomasse, les déchets, les émissions de CO₂, soit le CO₂ prélevé dans l'air. L'énergie nécessaire au processus peut, provenir d'électricité renouvelable (*Power to Liquid*). Dans ce procédé, l'hydrogène nécessaire à la production de kérosène peut être produit par électrolyse, c'est-à-dire à partir d'eau et d'électricité. Une autre possibilité consiste à utiliser l'énergie solaire sous forme de faisceau de chaleur pour extraire les éléments constitutifs du kérosène à partir de l'air (*Sun to Liquid*). Le procédé *Power to Liquid* se trouve déjà à un stade de développement avancé en vue d'une production industrielle de kérosène, alors que le procédé *Sun to Liquid* n'en est qu'à ses débuts. Leur coût élevé constitue le principal frein au développement de ces procédés.

1. Comparaison entre les carburants

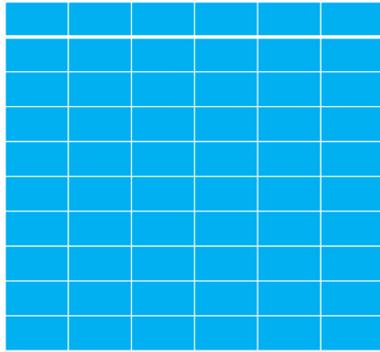
1.1. Kérosène et énergie électrique

Un litre ou un kilo de kérosène contient beaucoup d'énergie et requiert de ce fait peu de place (grande densité d'énergie massique et volumique). L'énergie contenue dans un kilo de kérosène est 60 fois plus élevée que celle contenue dans la plus performante des batteries rechargeables actuellement sur le

¹ L'auteur a bénéficié des commentaires, des indications bibliographiques et de la relecture du professeur K. Boulouchos de l'EPF, directeur du Centre suisse de compétence en recherche énergétique - approvisionnement en électricité (SCCER). L'exactitude des informations à caractère général a été vérifiée avec le concours de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

² Le CO₂ d'origine fossile peut être drastiquement réduit. On ignore exactement le potentiel de réduction d'autres effets sur le climat par les carburants zéro fossile.

marché. Par contre, le rendement d'un avion électrique serait théoriquement deux fois plus élevé environ si le poids de l'avion restait identique³.



Énergie emmagasinée dans un 1 kg de kérosène



Énergie emmagasinée dans 1 kg de batterie haute performance

En même temps, les batteries actuelles requièrent 20 fois plus d'espace de stockage que le kérosène, à énergie équivalente. En termes de sécurité aérienne, le kérosène est également une énergie idéale⁴ sans compter que l'infrastructure d'avitaillement est disponible partout dans le monde alors que l'infrastructure nécessaire à l'aviation électrique reste à réaliser. Malgré le rendement supérieur de la technologie électrique, on ne verra pas de sitôt dans le ciel des avions de ligne à propulsion électrique intégrale. Même en admettant que l'on parvienne à multiplier par cinq l'énergie emmagasinée dans les batteries haute performance, on serait encore loin du compte⁵. Les systèmes hybrides sont les plus susceptibles de s'imposer dans les décennies à venir. Ces systèmes fonctionnent toujours au kérosène avec en appoint des batteries et des réacteurs électriques. Qui plus est, il existe d'autres contraintes qui font que les avions de ligne tout électrique resteront encore pendant de nombreuses années hors de portée et écologiquement problématiques (voir à ce propos la fiche sur l'électrification des avions).

1.2. Hydrogène

L'hydrogène peut être utilisé dans des piles à combustible combinées à des batteries dans un système de propulsion électrique ou directement comme source d'énergie des réacteurs d'avion. Carburant ne contenant pas de carbone, l'hydrogène peut être produit directement par électrolyse de l'eau, par exemple en utilisant l'électricité solaire photovoltaïque ou éolienne excédentaire.

Un kilo d'hydrogène renferme presque trois fois plus d'énergie qu'un kilo de kérosène. En revanche, le volume de stockage par kWh est nettement plus important et constitue le principal obstacle, dans la mesure où il s'agit d'embarquer de grandes quantités d'énergie dans un avion. Le volume d'hydrogène doit être réduit au maximum pour être utilisé par les avions. Les réservoirs à très haute pression (aux environs de 700 bar) que l'on trouve sur les premières automobiles à hydrogène commercialisées n'entrent pas en ligne de compte au vu des exigences de rayon d'action des avions. Compte tenu de l'énergie requise pour le vol, les réservoirs seraient encore bien trop volumineux et bien trop lourds. L'hydrogène liquide, carburant utilisé par les fusées spatiales, représente une variante plus légère et moins volumineuse. Or, dans des conditions de pression normales, l'hydrogène doit être conservé à très basse température dans des réservoirs isolés pour maintenir son état liquide. Sous pression atmosphérique, l'hydrogène liquide doit être conservé à une température de -253°C , soit une température voisine du zéro absolu (cryogénique⁶). Le volume de stockage nécessaire reste malgré tout quatre fois plus élevé que dans le cas du kérosène. Autrement dit, même sous forme liquide, l'hydrogène occupe encore trop de place pour fournir l'énergie nécessaire pour de longs vols.

³ Le rendement thermique des réacteurs (kérosène → rotation de la soufflante) est supérieur à 50 % en vol de croisière. Le rendement électrique (batterie → rotation de la soufflante) dépasse 90 %.

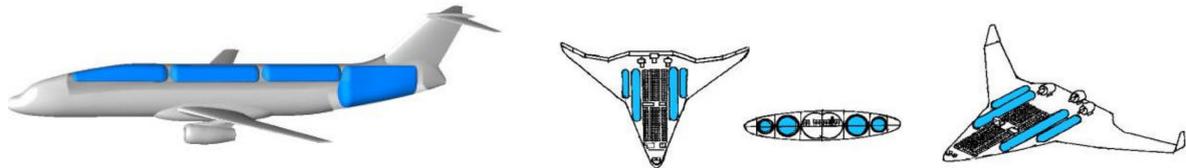
⁴ Le point d'éclair est suffisamment haut. Le point de congélation se situe à -47° (pour le carburant Jet A1 d'utilisation courante).

⁵ Analyse de l'OFAC et de Bauhaus Luftfahrt

⁶ La cryogénique désigne la technique de fabrication et d'utilisation des matériaux à très basse température, habituellement au-dessous de -150°C . Compte tenu des lois de la physique, la liquéfaction de l'hydrogène intervient à des températures inférieures à -240°C , même à des pressions atteignant plusieurs atmosphères.

L'avionneur russe Tupolev a développé en 1998 une version du TU-154 (désignation TU-155) modifiée pour pouvoir fonctionner à l'hydrogène, démontrant ainsi la faisabilité de principe de ce système de propulsion. Une poignée de vol seulement ont eu lieu et on ignore les raisons qui ont conduit à l'abandon de ce projet ambitieux. L'appareil a été ultérieurement modifié pour fonctionner au gaz naturel liquéfié.

Entre 2000 et 2002, un projet de recherche européen tout aussi ambitieux a été mené sous la direction d'Airbus afin d'étudier la commercialisation d'un avion de ligne fonctionnant à l'hydrogène. Le projet baptisé Cryoplane⁷ a montré qu'un avion de ce type serait à peine plus lourd qu'un avion de ligne classique mais que, vu son plus grand volume, sa consommation d'énergie serait probablement supérieure d'environ 10 %. L'illustration ci-dessous tirée du rapport de recherche du projet Cryoplane montre plusieurs variantes pour le logement des réservoirs d'hydrogène liquide.



Source : CRYOPLANE

Le stockage intermédiaire et le transport de l'hydrogène liquide à une température de -253°C seraient en outre très coûteux et énergivores. Les chercheurs ont estimé le surcroît de consommation d'énergie à 30 % et mettent en évidence les coûts élevés de la mise en place d'une infrastructure d'avitaillement mondiale. Par comparaison, le kérosène est facile à stocker, à transporter et à distribuer.

Dix-sept ans après la fin du projet Cryoplane, le stockage de l'hydrogène représente toujours le problème majeur pour des avions de taille et de rayon d'action usuels pour le transport des passagers⁸. En raison de la puissance nécessaire aux grands avions, un système de propulsion combinant piles à combustible et batteries n'est pour l'instant pas à l'ordre du jour : en l'état actuel des progrès techniques en matière

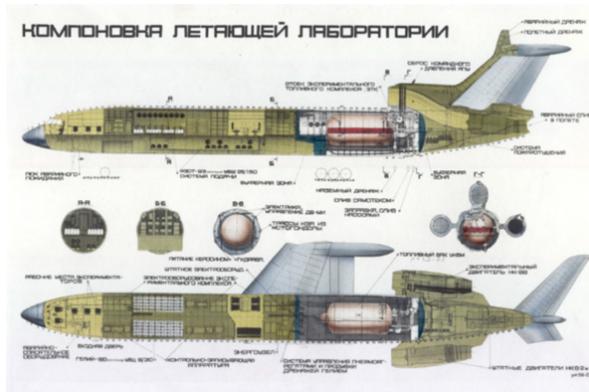


Planche originale du Tupolev. Le réservoir d'hydrogène se trouve dans un compartiment pressurisé et ventilé à l'arrière du fuselage afin de rejeter l'hydrogène. Le réacteur droit a été modifié pour fonctionner à l'hydrogène. (source : Tupolev)



Le TU-155, retiré de la circulation. (source : Juergen Schiffmann)

de batterie, rien que le poids des batteries tampons nécessaires pour les piles à combustible dépasserait le poids d'un avion de ligne de conception moderne⁹. Les piles à combustible ou les turbines à gaz ne rejettent pas de CO_2 . Par contre, les émissions de vapeur à haute altitude pourraient tripler par rapport aux émissions de vapeur d'un moteur fonctionnant au kérosène¹⁰. On ignore encore si la vapeur d'eau ainsi rejetée serait de nature à renforcer les effets hors CO_2 du transport aérien. En Europe, le projet

⁷ Projet européen de référence GRD1-1999-10014, Liquid Hydrogen Fueled Aircraft – System Analysis

⁸ Matériaux de stockage et conducteurs solides adaptés aux avions, évaporation (*boil-off*), fourniture en vol, durée de vies des éléments

⁹ Puissance utile maximale limitée des piles à combustible et des batteries en lien avec la durée de vie. Un avion pouvant emporter 180 passagers a besoin de 30 mégawatts environ au décollage. Pour les données relatives au poids, voir la fiche « Les aéronefs électrique »

¹⁰ Estimation à partir de l'énergie requise par chaque mode de propulsion (à prestation de transport identique) et à partir des équations de réactions chimiques

de suivi ENABLEH₂ a été lancé en septembre 2018¹¹ dans le but d'étudier plus en profondeur certains aspects techniques, écologiques et économiques de la propulsion à l'hydrogène.

1.3. Adéquation des différents types de carburant

En raison des propriétés physiques et techniques des avions à propulsion électrique ou fonctionnant à hydrogène, leur construction et leur exploitation posent à la science et aux ingénieurs des problèmes techniques et pratiques pour lesquels il n'existe aucune solution à l'heure actuelle. Il faudra sans doute patienter plusieurs décennies avant que de grands avions passagers dotés de systèmes de propulsion alternatifs soient opérationnels, si tant est que les problèmes susmentionnés puissent être résolus. Les avions fonctionnant au kérosène qui sont mis en service actuellement ou qui le seront dans les prochaines années, ont une durée de vie moyenne de trente ans. Par conséquent, il est probable que le kérosène restera la principale source d'énergie pour le transport aérien d'ici à 2050 dans le meilleur des cas. À brève échéance, la réduction de CO₂ d'origine fossile dans l'aviation passe donc à la fois par une réduction de la consommation¹² et par une production de kérosène à partir de carbone non fossile et utilisant des énergie renouvelable.

2. Production de carburant à partir de carbone non fossile

On est d'ores et déjà capable de produire du kérosène synthétique à partir de n'importe quelle source de carbone combinée avec de l'hydrogène et une source d'énergie adéquate. Le choix de la source de carbone et de la source d'énergie joue un rôle central pour aboutir réellement à une réduction globale du CO₂. La source d'énergie utilisée doit elle-même générer très peu de CO₂, sinon la production de carburant synthétique risque de produire davantage de CO₂ que le kérosène fossile (voir note 13).

2.1. Sources de carbone

Certains *végétaux* servent déjà produire des carburants synthétiques. Les végétaux tirent le carbone nécessaire à leur croissance de l'air ambiant (par photosynthèse). Ce carbone est ensuite rejeté dans l'atmosphère lorsque le carburant se consume, ce qui clôt le cycle du carbone. Le recours à des carburants biogènes peut ainsi diminuer l'impact climatique puisque leur combustion n'entraîne pas de rejet supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère. Cela dit, cette manière d'utiliser les végétaux entre en concurrence avec la production vivrière, mobilise de surcroît de grandes surfaces de terre arable et requiert beaucoup d'eau¹³.

Les carburants peuvent également être produits à partir de *déchets carbonés* (p. ex. déchets ménagers, agricoles ou industriels). Sur l'ensemble du processus, ce mode de production possède un meilleur potentiel de réduction du CO₂ que la culture de plantes exclusivement destinées à la production de carburants. Seul bémol : la matière première disponible ne permet de couvrir qu'une petite partie des besoins en carburants alternatifs.

Enfin, le carbone nécessaire *peut être tiré de l'air* : la production de carburant à l'aide carbone tiré de l'atmosphère ou de procédés de production n'émettant pas de CO₂ fossile¹⁴ est la solution qui a le meilleur impact climatique – à condition que l'énergie nécessaire au procédé provienne autant que possible de sources d'énergie renouvelable les plus pauvres en CO₂ (énergie hydraulique, énergie solaire directe). Le mode de production de carburant aussi neutre que possible pour le climat à partir d'énergie renouvelable comporte les étapes suivantes :

1. Extraction de CO₂ et de H₂O (eau) présents dans l'air ;

¹¹ ENABLing cryogenic Hydrogen based CO₂ free air transport, EC grant no 769241, Horizon 2020, <https://www.enableh2.eu/>

¹² Comme dans d'autres secteurs, la réduction mondiale de la consommation constitue la mesure la plus efficace en termes d'impact climatique.

¹³ German Environment Agency (UBA), Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel, 2016, Authors: LBST, BHL M. S. Wigmostaet al., National microalgae biofuel production potential and resource demand, Water Resour. Res., 47, W00H04, 2011. La production d'huile de palme constitue un exemple de culture particulièrement négative.

¹⁴ Par exemple, à partir de la production de ciment : dans ce cas, le CO₂ de la cimenterie serait émis par le transport aérien. L'utilisation du CO₂ d'une centrale électrique fossile ne saurait par contre être admise comme mesure de réduction globale du CO₂ (voir note 15).

2. Réduction de ces composants aux gaz appelés « de synthèse CO (monoxyde de carbone) et H₂ (hydrogène) » ;
3. Production de kérosène à partir des gaz de synthèse.

3. Production de kérosène à partir des gaz de synthèse

Outre la matière première utilisée, la source d'énergie choisie pour le procédé détermine le degré de neutralité climatique du carburant produit. Selon les dernières conclusions du Centre de compétence suisse pour la recherche énergétique (SCCER)¹⁵, la production d'électricité hydraulique émet le moins de CO₂ par kWh, suivie de l'éolien et du photovoltaïque. Ces derniers requièrent en outre des accumulateurs pour pouvoir livrer le courant en continu, ce qui émet du CO₂ et renchérit le processus. Dans l'idéal, il faudrait par conséquent utiliser de l'électricité d'origine hydraulique. Or, une extension des capacités de production hydrauliques est difficilement imaginable en Suisse à l'heure actuelle, bien que ce mode de production soit le plus respectueux pour le climat. La concurrence fait rage entre les acteurs des secteurs énergétiques pour l'utilisation de l'hydraulique précisément parce qu'il fournit une énergie en ruban (disponible 24 heures sur 24) et de réglage renouvelable à bas coût sur le long terme. Sans entrer dans les spécificités nationales, on ne pourra se passer du photovoltaïque et de l'éolien pour la production.

Des procédés de production de carburant, comme le procédé « Solar-to-Liquid » (voir ci-après), utilisent non pas l'électricité mais la chaleur à haute température. Lorsque la chaleur servant à produire le carburant provient directement du rayonnement solaire, le procédé est extrêmement pauvre en carbone, plus ou moins comparable à l'hydraulique. De plus, le stockage local de chaleur à haute température pour combler les périodes sans soleil ou les nuits est nettement plus simple que le stockage d'énergie électrique.

Deux procédés au moins sont aujourd'hui disponibles pour les deux premières étapes de production du carburant (voir ci-dessus) :

- a. « Direct Air Capture **Power-to-Liquid** (PtL) » : le CO₂ contenu dans l'air ambiant est capturé directement à l'aide de grands filtres. Parallèlement, de l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau en utilisant une énergie renouvelable. Une partie de l'hydrogène est utilisée pour convertir le CO₂ en CO¹⁶. Du gaz de synthèse (CO et H₂) est produit en cours de processus, qui donnera par la suite le kérosène. Le bilan carbone global de l'opération dépend de l'énergie et des ressources exigées par l'infrastructure utilisée et de la part d'énergie renouvelable entrant dans l'énergie de production (énergie thermique et électrique).
- b. « **Sun-to-Liquid** (StL) »¹⁷ : le CO₂ et la vapeur d'eau sont directement prélevés de l'air ambiant et convertis en monoxyde de carbone et en dihydrogène au moyen de réacteurs thermochimiques chauffés par le soleil. Les gaz de synthèse ainsi obtenus servent ensuite à produire le kérosène. Le bilan carbone et en termes de préservation des ressources peut être qualifié de très bon puisque le carbone et l'hydrogène proviennent de l'air et que la chaleur de production est d'origine solaire.

¹⁵ SCCER Joint Activity: White Paper Power-to-X, Juni 2019, PSI, ETH, Empa, Université de Genève, ZHAW, HSR, Universität Luzern, darin: C.Bauer, S. Hirschberg (eds.) et al., «Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies», 2017

¹⁶ Par réaction du gaz à l'eau

¹⁷ <https://www.sun-to-liquid.eu/>



Installation pilote StL, Móstoles, Espagne (photo : Christophe Ramage ©ARTTIC 2019)

La troisième étape, la production de kérosène à partir des gaz de synthèse, utilise divers procédés connus depuis des décennies et certifiés pour l'aviation. Cette étape produit davantage d'énergie thermique que nécessaire pour alimenter en permanence le processus. Une fois le procédé de production lancé, aucune source d'énergie supplémentaire n'est donc requise.

Les deux procédés (PtL et StL) présentent les avantages suivants :

1. Le CO₂ rejeté dans l'atmosphère durant la combustion du kérosène a été prélevé dans l'atmosphère pour la production du kérosène. Ce carburant est en ce sens neutre en carbone.
2. Le procédé StL utilise directement la chaleur du soleil de sorte que l'énergie renouvelable utilisée dans le procédé de production du carburant n'a pas besoin d'être stockée, ni transformée.
3. Le procédé StL capte le carbone et l'hydrogène contenu dans l'air. Les installations de productions peuvent être implantées sur des terres improductives.
4. Les héliostats utilisés par le procédé StL prennent relativement peu de place si l'ensoleillement est abondant. Une surface d'une superficie équivalente à celle de la Suisse permettrait de couvrir les besoins actuels globaux en kérosène¹⁸.
5. Le procédé PtL a atteint un stade de développement avancé.
6. Le carburant produit peut d'ores et déjà être mélangé à raison de 50 % dans le carburant utilisé par les avions conventionnels sans qu'il soit d'apporter une modification technique. Les avions de nouvelle génération pourraient être conçus pour fonctionner entièrement au kérosène synthétique issu des procédés PtL ou StL¹⁹.
7. L'infrastructure logistique et d'avitaillement mondiale peut être utilisée telle quelle. Aucune ressource supplémentaire ne doit être sacrifiée à la réalisation d'une nouvelle infrastructure mondiale de distribution de carburant et d'avitaillement.
8. Le kérosène issu de ces procédés ne contient ni soufre, ni aromatiques et sa combustion se traduit par moins d'émissions de particules, même avec les réacteurs actuels, ce qui rejait positivement sur la qualité de l'air aux environs des aéroports et sur l'impact climatique du transport aérien (en évitant les germes de condensation de vapeur d'eau).

3.1. Défis à surmonter

Question **coûts** de production, le kérosène synthétique ne peut pour l'heure rivaliser avec les produits dérivés du pétrole, du charbon ou du gaz naturel²⁰. Le litre de kérosène issu des petites installations de démonstration revient de cinq à six fois plus cher que le kérosène fossile. Mais cet écart devrait sensiblement se réduire au fur et à mesure de l'industrialisation de la production. Sans compter que la tarification de la tonne de CO₂ dans le cadre des échanges de quotas d'émissions et le standard mondial CORSIA²¹ devraient

¹⁸ Communication personnelle du prof. Aldo Steinfeld, EPF

¹⁹ Le kérosène purement synthétique sans aromatiques a un faible pouvoir lubrifiant.

²⁰ SUN-to-LIQUID DeliverableD1.6: Economic analysis and risk assessment

²¹ Standard aéronautique (mondial) de compensation de la croissance des émissions de CO₂ générées par le transport aérien mondial. Monitoring des émissions 2019-2020.

rendre le kérosène synthétique plus concurrentiel. Le procédé PtL est quant à lui plombé par le coût des filtres utilisés pour capter le CO₂ présent dans l'air.

D'après les estimations, le prix du kérosène synthétique pourrait passer en-dessous de celui du kérosène fossile avant 2030 si le prix mondial de la tonne de CO₂ fossile passait à 200 euros.

Légende graphique (de gauche à droite et de haut en bas)

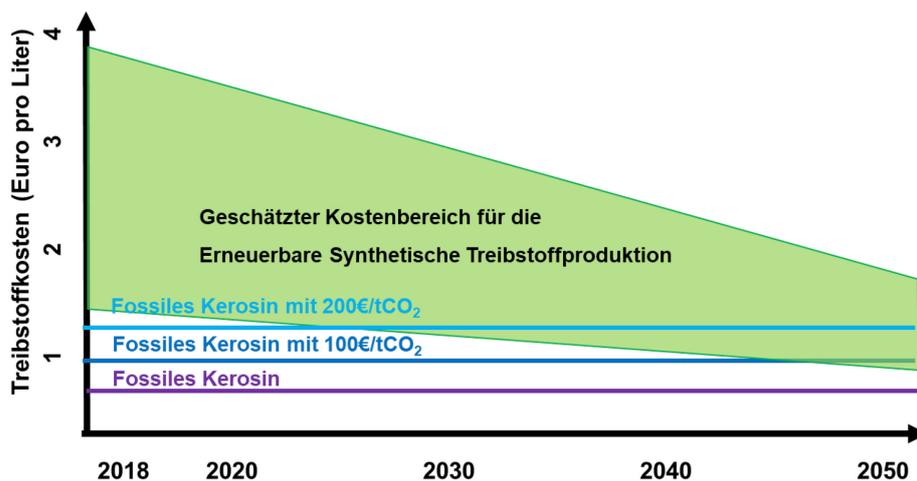
Prix du carburant (euros par litre)

Fourchette des coûts de production du carburant synthétique renouvelable

Kérosène fossile à 200 euros la tonne de CO₂

Kérosène fossile à 100 euros la tonne de CO₂

Kérosène fossile



Évolution comparée du prix du kérosène synthétique et du kérosène fossile (OFAC²²)

Les **sites** propices à la production d'énergie primaire sont relativement faciles à sélectionner, par exemple sur la base de l'ensoleillement direct annuel requis. Dans l'idéal, les sites pressentis devraient en outre se trouver à proximité de bioraffineries (ou « Green Refineries ») qui seraient installées ou déjà existantes et adaptables. Encore faut-il que la production de kérosène synthétique sur les sites qui s'y prêtent soit possible compte tenu du contexte local.

La mise en œuvre des procédés PtL et StL requiert une volonté forte de la part de tous les acteurs concernés. Les trois axes suivants méritent à cet égard d'être relevés :

1. Intensifier la recherche sur l'accroissement de l'efficacité et les nouveaux matériaux des installations PtL et StL décrites afin d'améliorer le rapport coût-efficacité²³.
2. Encourager la construction de grandes installations afin notamment de rendre le procédé StL plus concurrentiel.

²² Sources : 1) AGORA, The future cost of electricity based synthetic fuels, 2) PROGNOSES, Status and Perspectives of Liquid Energy Sources in the Energy Transition, 3) Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production, C. Falter et al., Environmental Science and Technology, 50(1), pp 470 – 477, 2016

²³ C. Falter, Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production, Environ. Sci. Technol., 2016, 50 (1)

3. Mener des discussions à l'échelon des États afin de trouver les sites de production les plus propices et de convenir de conditions cadres équitables.

Empêcher de nouvelles émissions de CO₂ est plus payant à long terme que la compensation d'émissions après coup.