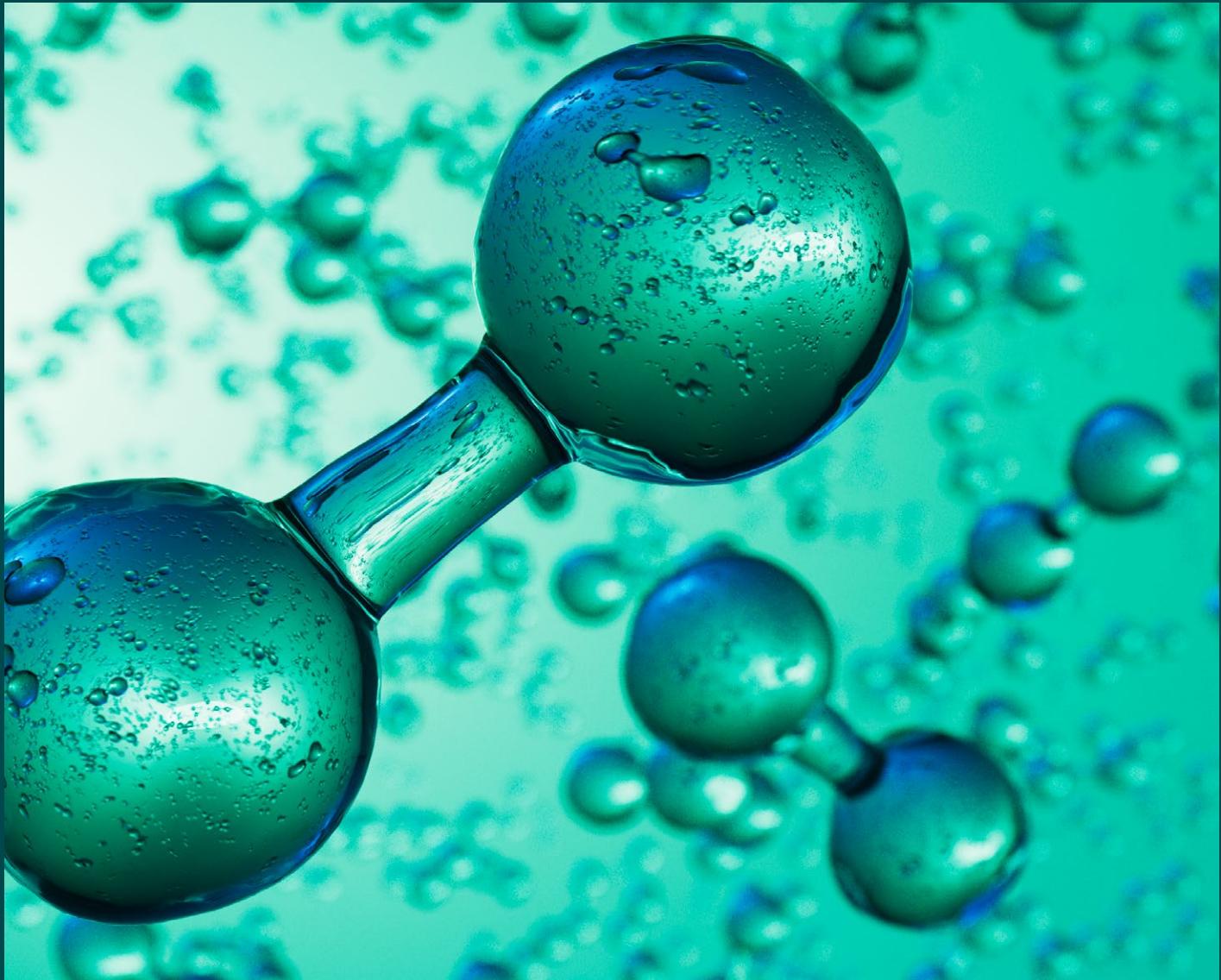


Boussole de l'énergie **PSI**

Naviguer dans
la transition énergétique
#1/2026

L'hydrogène et le puzzle énergétique

Quel rôle joueront les molécules à faible teneur
en carbone dans la transition vers la neutralité
climatique?



8

Des priorités
s'imposent

12

Assembler les
pièces du puzzle:
l'hydrogène
dans le système
énergétique suisse

16

Secteur clé:
l'aviation

22

Secteur clé:
le transport maritime



PSI

Editorial

L'hydrogène, l'élément chimique le plus léger et le plus simple de l'univers, sera un composant important de la transition énergétique. Bien que sa production à partir d'électricité issue d'énergies renouvelables ne génère pratiquement aucune émission de gaz à effet de serre, il ne fait pas l'unanimité. Considéré par certains comme le «couteau suisse» de la transition énergétique, une solution universelle pour tous les défis imaginables du système énergétique, d'autres le jugent trop cher, trop inefficace et trop dangereux pour jouer un rôle significatif. La réalité se situe probablement entre ces deux extrêmes, comme nous le montrerons dans notre deuxième édition de *La Boussole de l'énergie* du PSI.

L'hydrogène présente de nombreux avantages. Son utilisation ne génère pas d'émissions de gaz à effet de serre, il peut être stocké et remplir diverses fonctions dans l'économie, par exemple comme carburant ou pour produire de la chaleur à haute température. Un autre avantage de l'hydrogène réside dans les vecteurs énergétiques dérivés qu'il permet de produire, notamment les carburants synthétiques comme le méthanol et l'ammoniac.

Mais l'hydrogène présente également des inconvénients. Sa production durable, plus précisément, la production de la molécule de dihydrogène est coûteuse. De plus, cette molécule minuscule peut facilement s'échapper lorsque l'infrastructure de stockage et de transport a été initialement conçue pour le gaz naturel. Il est essentiel d'éviter tout fuite de celle-ci car l'hydrogène exerce une action indirecte mais importante sur le climat en réagissant avec le méthane, l'ozone, et la vapeur d'eau. Bien que sa densité énergétique par unité de masse soit assez élevée, elle est faible par unité de volume: son stockage nécessite donc beaucoup de place, ce qui est peu pratique pour des applications comme l'aviation. L'hydrogène a également tendance à fragiliser les différents types d'acier utilisés pour les pipelines, ce qui réduit leur durée de vie par rapport à l'utilisation d'autres gaz. Il est également plus explosif que d'autres gaz, ce qui peut constituer un risque pour la sécurité et, par conséquent, réduire son acceptation au sein de la société. Enfin, d'autres alternatives telles que l'électrification directe des processus sont moins gourmands en énergie et en ressources que la production durable d'hydrogène.

Malgré ces inconvénients, un consensus scientifique émerge: l'hydrogène et les vecteurs énergétiques à base d'hydrogène représentent une valeur ajoutée dans certains secteurs. Cependant, même ces domaines d'application limités nécessitent une augmentation significative de la production d'hydrogène et impliquent de nombreux compromis, comme nous le verrons dans les pages suivantes.

Pour que l'hydrogène et les vecteurs énergétiques à base d'hydrogène puissent jouer un rôle à l'avenir, certains obstacles doivent être surmontés. Actuellement, le développement de la production et de l'utilisation de l'hydrogène est entravé par la complexité des options, la multitude d'acteurs impliqués et les implications à long terme des choix technologiques qui façonnent le système énergétique pour les décennies à venir. Dans ce numéro, nous examinons les rôles potentiels de l'hydrogène et de ses dérivés, ainsi que les opportunités et les défis qu'ils représentent pour un avenir neutre en carbone.

Equipe rédactionnelle

Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques
Institut Paul Scherrer PSI

Contenu

- 3 **Tourner le dos aux énergies fossiles**
- 6 **L'arc-en-ciel de l'hydrogène**
- 8 **Des priorités s'imposent**
- 10 **L'hydrogène vert implique des compromis environnementaux**
- 12 **Assembler les pièces du puzzle: l'hydrogène dans le système énergétique suisse**
- 14 **Les molécules sur les marchés de l'énergie**
 - Secteur clé: l'aviation
- 16 **Les carburants durables sont-ils une solution pour le transport aérien?**
- 18 **«La décarbonation pose des défis considérables à l'aviation.»**
 - Entretien avec Ramon Hess et Gabriel Müller
- Secteur clé: le transport maritime
- 22 **Décarboner le transport maritime**
- 24 **«Les navires peuvent déjà fonctionner avec ces nouveaux carburants.»**
 - Entretien avec Daniel Bischofberger
- 27 **Perspectives**

Photo de couverture
Molécules d'hydrogène (H_2)
Photo: Monika Blétry, PSI



Tourner le dos aux énergies fossiles

Un système énergétique durable doit pouvoir se passer du pétrole, du charbon et du gaz naturel. Parmi les alternatives recherchées, l'hydrogène serait-il une option?

A priori, l'objectif est clair et conforme à l'Accord de Paris: zéro émission nette de gaz à effet de serre d'ici le milieu du siècle. Cependant, le chemin pour l'atteindre est encore long et surtout incertain. En effet, réduire au minimum les émissions des principaux gaz à effet de serre (CO_2 et méthane) implique que le pétrole, le charbon et le gaz naturel n'ont plus leur place dans notre approvisionnement énergétique. Or, malgré tous les efforts déployés pour protéger le climat, ces énergies fossiles couvrent encore aujourd'hui plus de 80 % des besoins en énergie primaire dans le monde. En Suisse, cette part d'énergie primaire est nettement inférieure, à peine de 50 %, grâce à l'électricité produite par les centrales hydroélectriques et les centrales nucléaires. Néanmoins, remplacer le mazout et le gaz naturel pour le chauffage; l'essence, le diesel et le kérósène pour les transports; et le gaz naturel pour l'industrie par des alternatives respectueuses du climat représente une tâche titanique, même dans notre pays.

Mais quelles alternatives peuvent être envisagées?

D'une part: l'électricité issue des énergies renouvelables et l'énergie nucléaire, car celles-ci ne génèrent pratiquement pas d'émissions de gaz à effet de serre. Dans de nombreux cas, l'électricité peut remplacer directement les combustibles fossiles si une technologie appropriée est disponible.

D'autre part: l'hydrogène (H_2), à condition qu'il soit produit de manière durable. Il peut être utilisé directement ou, en combinaison avec du CO_2 , pour synthétiser des hydrocarbures comme le kérósene, le méthane, le diesel ou l'essence.

Utiliser de l'hydrogène à l'état pur n'est pas simple. Son usage direct nécessite des technologies et des processus spéciaux, par exemple des véhicules à pile à combustible au lieu de moteurs à combustion interne. Le transport et le stockage de l'hydrogène sont tout sauf anodins: en raison de sa faible densité énergétique (volumétrique), l'hydrogène doit être fortement comprimé, ce qui nécessite une pression élevée ou des températures basses et, dans tous les cas, des matériaux appropriés, comme des réservoirs en fibre de carbone ou des pipelines en acier spécial. La compression et le refroidissement sont également très énergivores, ce qui entraîne des coûts élevés liés par exemple au recours à des matériaux spéciaux.

Les hydrocarbures synthétiques, en revanche, ont un large éventail d'applications: le kérósene, le méthane, le diesel ou l'essence produits à partir d'hydrogène et de CO_2 peuvent remplacer à l'identique les sources d'énergie fossiles utilisées aujourd'hui, avec la même infrastructure de transport et de stockage.

L'hydrogène et ses émissions de gaz à effet de serre

Tout comme l'électricité, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais un vecteur d'énergie: il doit être fabriqué à partir d'énergies primaires avant de pouvoir être utilisé. Cette transformation peut s'opérer de nombreuses façons. Un code couleur a été adopté pour distinguer les différents types de production d'hydrogène. Cette nomenclature est étroitement liée aux émissions de gaz à effet de serre générées lors de la production.

Pour que l'hydrogène puisse contribuer le plus efficacement possible à la protection du climat, sa production doit être associée à de très faibles émissions de gaz à effet de serre. Et ce sur l'ensemble de la chaîne de valeur, de l'extraction des ressources à leur transformation en hydrogène.

L'hydrogène vert et rose sont ceux qui répondent le mieux à l'exigence de faibles émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène bleu et turquoise peuvent également satisfaire à ces conditions, mais uniquement

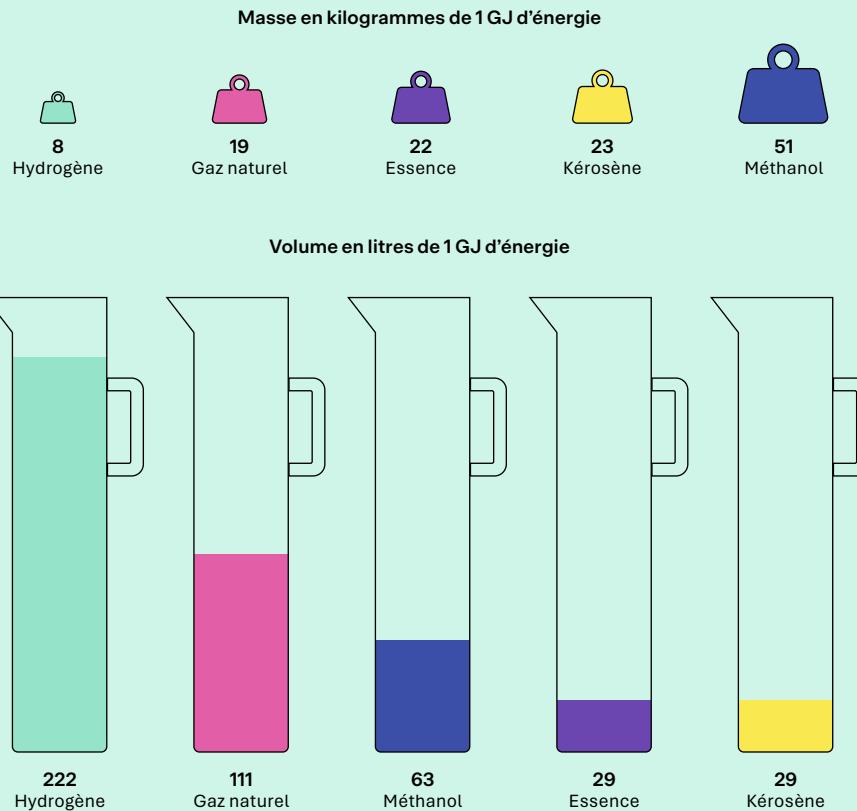
si les émissions de méthane liées à l'approvisionnement en gaz naturel sont faibles et si la majeure partie du carbone libéré lors du reformage et de la pyrolyse du gaz naturel est stockée de manière permanente. Aucune couleur ne s'est encore imposée pour l'hydrogène issu de la biomasse. Elle pourrait toutefois devenir significative, car la gazéification de la biomasse est également un moyen de produire de l'hydrogène moyennant de très faibles émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène brun et gris, qui représente aujourd'hui environ 85% de la production mondiale, n'a pas sa place dans l'économie de l'hydrogène de demain si nous voulons atteindre les objectifs climatiques, car il génère trop de gaz à effet de serre.

A l'heure actuelle, la transition vers l'hydrogène vert et bleu est à peine entamée: moins de 1% de la production totale est issue de ces sources. Cela s'explique principalement par les coûts élevés qui ne devraient pas diminuer notablement dans un avenir proche. Il est à prévoir que l'hydrogène restera une ressource rare et coûteuse, qu'il faudra utiliser de la manière la plus judicieuse possible.



Figure 1: Masse et volume pour 1 GJ d'énergie, par type de carburant

La figure montre la masse en kg de carburant qui correspond à un gigajoule (GJ) d'énergie (haut) et le volume en litres pour cette même quantité d'énergie (bas). L'hydrogène a une haute teneur d'énergie par masse mais, à cause de sa faible teneur d'énergie par volume, prend beaucoup plus de place comparé au hydrocarbures liquides comme le kérósène ou l'essence. Les volumes indiqués sont basés sur des conditions de stockage typiques: hydrogène comprimé à environ 700 bars, gaz naturel comprimé à environ 250 bars, et essence, kérósène et méthanol sous forme liquide à température ambiante.



L'arc-en-ciel de l'hydrogène

L'hydrogène peut être produit de différentes manières, qui ont chacune un impact différent sur l'environnement. Pour distinguer ces méthodes de production, on utilise souvent une convention de dénomination basée sur les couleurs, qui n'est toutefois pas standardisée.

Une caractéristique distinctive importante est la quantité d'émissions de gaz à effet de serre générées tout au long du cycle de vie de la production d'hydrogène. Certaines méthodes de production impliquent le captage et le stockage géologique du dioxyde de carbone. Comme le montre la figure 2, ces caractéristiques peuvent même induire des émissions négatives lors de l'utilisation de la biomasse, c'est-à-dire un retrait global de dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Actuellement, la quasi-totalité des 97 millions de tonnes d'hydrogène produites dans le monde proviennent de ressources fossiles. Cela entraîne des émissions annuelles de CO₂ d'environ 920 millions de tonnes.

Vert

L'«hydrogène vert» est produit par électrolyse en utilisant de l'électricité issue de sources d'énergies renouvelables comme l'énergie éolienne ou l'énergie solaire pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Ce procédé ne génère pratiquement pas d'émissions. Ses principaux inconvénients sont son coût relativement élevé, sa consommation importante d'eau et d'électricité, ainsi que les besoins

élevés en énergies renouvelables qui en découlent si la production d'hydrogène vert est développée à grande échelle.

Jaune



L'«hydrogène jaune» désigne l'hydrogène produit par électrolyse à partir de l'électricité du réseau. Cette méthode est certes

flexible et permet d'utiliser l'infrastructure électrique existante. La quantité de gaz à effet de serre générée varie en fonction de l'intensité carbone du réseau électrique local. Dans les régions où une grande partie de l'électricité provient de combustibles fossiles, comme le charbon ou le gaz naturel, les émissions peuvent être considérables et même dépasser celles de l'hydrogène gris.

Turquoise



L'«hydrogène turquoise» est produit par la décomposition chimique du méthane en hydrogène et en carbone solide par une augmentation importante de sa température en absence d'oxygène, la pyrolyse. Si ce procédé est alimenté par une énergie renouvelable et que les fuites de méthane sont contrôlées tout

au long de la chaîne d'approvisionnement, il peut être qualifié de procédé à faibles émissions. Le carbone solide généré comme sous-produit peut être stocké de manière permanente ou être utilisé dans des applications industrielles. Cependant, cette technologie est encore à un stade précoce de développement et n'est donc pas encore commercialement viable.

Rose



L'«hydrogène rose», «violet» ou parfois «rouge» est produit par électrolyse à partir d'électricité d'origine nucléaire. Ce procédé présente de faibles émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie. Cependant, il suscite des préoccupations liées aux déchets radioactifs, aux risques pour la sécurité et aux coûts élevés.

Gris



L'«hydrogène gris» est issu du reformage à la vapeur du gaz naturel, un procédé dans lequel on fait réagir celui-ci avec de la vapeur d'eau à haute température en présence d'un catalyseur. Il s'agit du

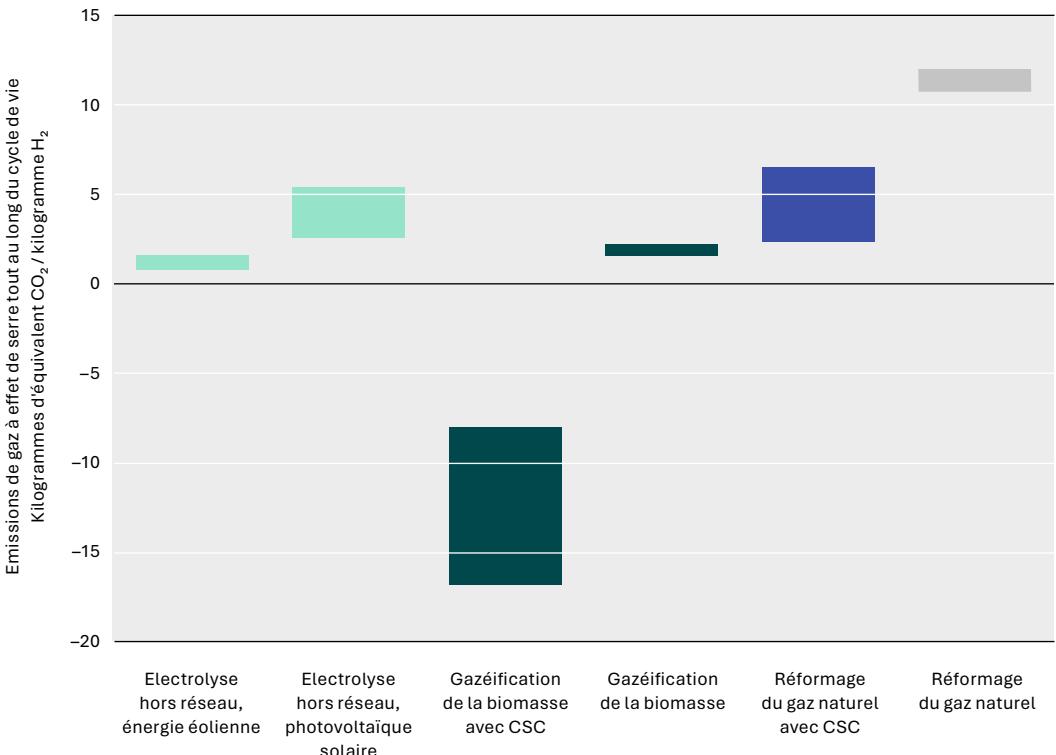


Figure 2: Fourchettes possibles des émissions de gaz à effet de serre de certaines méthodes de production d'hydrogène

Cette figure présente les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie pour la production d'hydrogène par des méthodes différentes. Les émissions varient considérablement: l'électrolyse à partir d'énergie éolienne et d'énergie solaire a un impact relativement faible, tandis que le reformage du gaz naturel sans captage et stockage du carbone (CSC) est l'option la plus émettrice.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

procédé de production le moins coûteux et le plus répandu, mais, sans captage et stockage du carbone, il génère d'importantes émissions de CO₂, (voire la figure 2).

Bleu

 Tout comme l'hydrogène gris, l'«hydrogène bleu» est produit par reformage à la vapeur du gaz naturel, mais combiné avec le captage et le stockage du CO₂. Ce processus peut réduire considérablement l'empreinte carbone et utilise l'infrastructure existante pour le gaz naturel. Un inconvénient réside toutefois dans le fait que le captage et le stockage du CO₂ sont très gourmands en énergie et ne permettent pas d'éliminer toutes les émissions.

Noir/brun



L'«hydrogène noir» ou «brun» est obtenu par la gazéification du charbon. A haute température et en limitant la concentration d'oxygène, le charbon est converti en gaz de synthèse, un mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone. Ensuite, on obtient plus d'hydrogène en faisant réagir le monoxyde de carbone dans le mélange avec de la vapeur d'eau. Il s'agit de l'une des méthodes de production d'hydrogène présentant la plus forte intensité carbone.

Blanc



L'«hydrogène blanc» est un hydrogène naturel présent dans des gisements souterrains. L'utilisation de cet hydrogène comme ressource naturelle est encore à ses débuts, avec une seule installation opérationnelle. Des incertitudes subsistent quant à l'importance et à l'accessibilité

des gisements mondiaux, à la rentabilité de l'extraction et aux éventuels impacts environnementaux des forages et des perturbations souterraines.

Hydrogène issu de la biomasse (sans couleur «officielle»)



L'hydrogène peut également être produit à partir de la biomasse par des procédés thermochimiques ou biochimiques. Les émissions de gaz à effet de serre liées à sa production varient considérablement en fonction de la matière première utilisée, des effets du changement d'affectation des sols et de la question de savoir si le dioxyde de carbone est capté et stocké. Dans certaines configurations, notamment lors de l'utilisation de biodéchets avec captage et stockage du CO₂, ce procédé peut entraîner des émissions négatives: le dioxyde de carbone lié à la biomasse est définitivement soustrait à l'atmosphère. Cependant, des préoccupations en matière de durabilité peuvent limiter son utilisation à grande échelle.

Des priorités s'imposent

L'hydrogène à faible teneur en carbone restera rare et coûteux dans les années à venir.

Il convient donc de bien réfléchir à son utilisation.



De l'hydrogène pour les voitures? Probablement pas. Pour les bateaux d'excursion? C'est peu probable également. Pour chauffer nos maisons? Certainement pas. Ces applications de l'hydrogène sont souvent citées mais elles sont peu pertinentes. Il existe d'autres alternatives plus efficaces, plus faciles à utiliser et moins coûteuses qui peuvent également remplacer les combustibles fossiles. Pour les voitures, les propulsions électriques à batterie représentent une alternative plus judicieuse. Idem pour les pompes à chaleur électriques dans le cas du chauffage: elles utilisent directement l'électricité,

ce qui évite les pertes de conversion. Un véhicule individuel alimenté à l'essence synthétique à base d'hydrogène et de CO₂ consomme environ cinq fois plus d'électricité qu'un véhicule à batterie, et un chauffage au gaz naturel synthétique dix fois plus d'énergie qu'une pompe à chaleur. De plus, les véhicules à batterie et les pompes à chaleur sont aujourd'hui à peine plus chers que les technologies fossiles si l'on tient compte de leur durée de vie.

Si ces applications n'ont donc aucun sens, à quoi sert alors tout cet hydrogène vert et bleu dans les scénarios qui répondent aux objectifs de protection

du climat? Tout d'abord, il s'agit de couvrir les besoins actuels en hydrogène, qui s'élèvent à quelque 100 mégatonnes par an, dans les raffineries de pétrole, l'industrie chimique et la production d'engrais. En outre, pour de nombreuses applications, il n'existe aucune alternative à l'hydrogène ou aux vecteurs énergétiques qui en sont issues. Et celles-ci se distinguent à leur tour par le montant des coûts supplémentaires engendrés et la quantité de gaz à effet de serre pouvant être économisée. La figure 3 montre les différentes voies de production de l'hydrogène et les nombreuses applications possibles.

Nos recherches montrent que les réductions les plus importantes d'émissions de gaz à effet de serre peuvent être réalisées si l'hydrogène remplace le charbon dans la production d'acier. Remplacer le gaz naturel utilisé aujourd'hui pour la production d'ammoniac et de méthanol par l'hydrogène vert entraînerait également des réductions d'émissions considérables. L'ammoniac et le méthanol sont des carburants bien adaptés au transport maritime mondial, qui fonctionne aujourd'hui au fioul lourd (voir «Décarboner le transport maritime»). Enfin, partout où des températures très élevées sont nécessaires, par exemple dans la production de verre ou le traitement des métaux, l'hydrogène peut également remplacer le gaz naturel et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le point commun de ces applications est le suivant: l'électricité ne peut remplacer les combustibles fossiles que de manière très limitée. Cela vaut également dans certains cas pour les hydrocarbures synthétiques dérivés de l'hydrogène et du CO₂, notamment dans l'utilisation du kérozène synthétique comme carburant d'aviation (voir «Les carburants durables, une solution pour le transport aérien?»). Du moins pour les vols commerciaux moyen-courriers et long-courriers, il n'existe ici aucune alternative aux hydrocarbures liquides qui stockent le plus d'énergie.

Pour toutes ces applications, l'hydrogène semble incontournable. La biomasse peut venir en complément, tel que les carburants d'aviation produits à partir d'huiles usagées ou de résidus agricoles. Cependant, le potentiel de biomasse uti-

lisable de manière durable (de préférence d'origine résiduelle) est trop faible pour remplacer l'hydrogène en tant qu'alternative durable au gaz naturel, au charbon et au pétrole.

Pour toutes les applications utiles mentionnées, la question décisive est de savoir quelle sera l'ampleur de la demande. Une chose est claire: il ne s'agit pas seulement d'applications de niche à petite échelle. Au contraire. Si l'on se base sur la demande actuelle en ammoniac, en méthanol, en carburant pour l'aviation, en chaleur à haute température et en acier, l'hydrogène et ses dérivés représenteront à l'avenir un marché conséquent de plus de 100 millions de tonnes par an. D'un point de vue économique, il est donc logique de donner la priorité à ces applications.

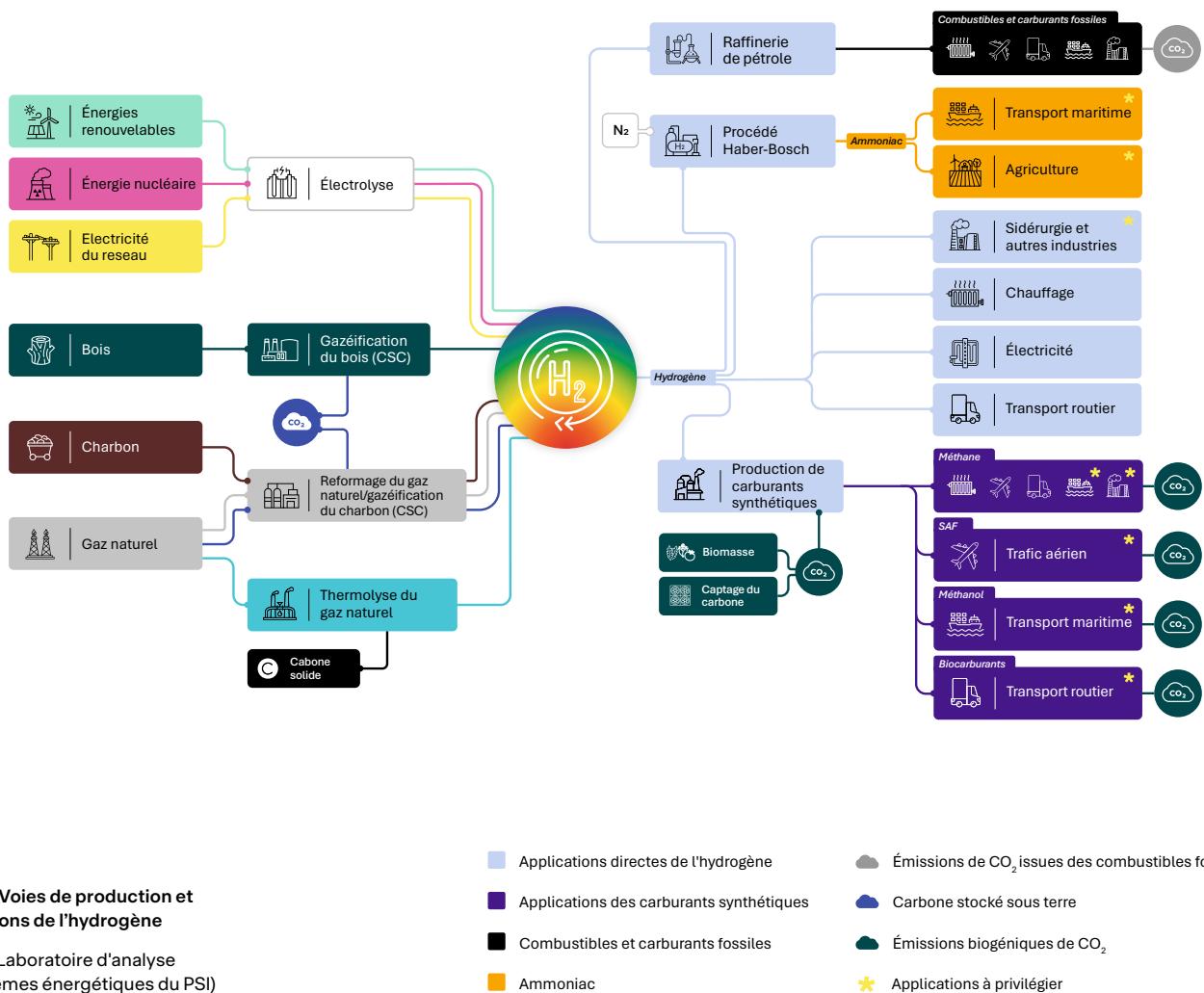


Figure 3: Voies de production et applications de l'hydrogène

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

L'hydrogène vert implique des compromis environnementaux

Figure 4: Coûts de production de l'hydrogène vert pour les sites les plus économiques (2025)

Cette carte montre neuf régions où la production d'hydrogène vert est relativement économique, ainsi que le degré respectif de pénurie d'eau, allant de faible (vert) à sévère (rouge).

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

La demande mondiale en hydrogène devrait augmenter considérablement pour décarboner divers secteurs économiques: de l'industrie lourde à l'aviation, en passant par l'agriculture et le transport maritime. L'hydrogène vert nécessite d'importantes quantités d'eau, de matériaux et d'électricité. Il implique donc des compromis environnementaux et économiques.

Actuellement, l'hydrogène n'est pas utilisé principalement comme source d'énergie, mais comme matière première dans les raffineries de pétrole et l'industrie chimique pour produire de l'ammoniac, des engrains et du méthanol. Cependant, pour limiter le réchauffement climatique, il faudra recourir à l'hydrogène à faible teneur en carbone pour remplacer les combustibles fossiles dans différentes applications, principalement l'industrie lourde, l'agriculture, le stockage énergétique et le transport longue distance. En conséquence, la demande mondiale en hydrogène augmentera fortement. Tout cet hydrogène devrait être produit à l'aide de procédés à faibles émissions de gaz à effet de serre.

Augmenter la production: l'importance de la géographie

Trouver des sites de production adaptés fait partie des défis liés à l'augmentation de la production d'hydrogène vert, car l'électrolyse nécessite une occupation des sols importante, ainsi que de l'eau douce et de l'électricité renouvelable. Nous avons mené une analyse mondiale des régions où l'hydrogène vert peut être produit à moindre coût. Elle montre que l'Amérique du Sud, l'Australie, le Midwest des États-Unis et les déserts d'Afrique et d'Asie occupent les premières places. Mais même en tenant compte de l'optimisation des sites et des progrès technologiques, il

faudra encore des décennies pour que les coûts de production de l'hydrogène vert baissent au niveau du prix actuel de l'hydrogène produit à partir de ressources fossiles, comme nous le verrons plus en détail dans l'article «Les molécules sur les marchés énergétiques».

Par ailleurs, le coût de l'hydrogène et des carburants à faible teneur en carbone qui en sont dérivés varie selon les endroits et dépend fortement du risque d'investissement lié à un pays donné. En fait, le risque d'investissement peut être un facteur aussi déterminant que la disponibilité des énergies renouvelables. La réduction des risques financiers, par exemple grâce à des subventions et à des réglementations claires et cohérentes, peut attirer davantage d'investissements dans les pays qui disposent d'un potentiel prometteur en matière de ressources naturelles mais où le risque d'investissement est important, comme dans certains pays d'Afrique.

Equilibrer les opportunités et les compromis

Bien que la production d'hydrogène vert génère peu d'émissions de gaz à effet de serre, son développement à grande échelle pourrait avoir un impact environnemental considérable. La disponibilité de l'eau pourrait constituer un défi, car les électrolyseurs nécessitent de l'eau purifiée pour le craquage de l'eau. Plus de 60% du potentiel de production d'hy-

drogène vert que nous avons identifié se trouve dans des régions où l'eau est rare (comme le montre la figure 4). En outre, les besoins en électricité pour l'électrolyse de l'eau connectée au réseau pourraient peser sur les réseaux électriques, car des sources d'énergie renouvelables supplémentaires doivent être installées.

La demande en matières premières pourrait également poser problème. Les chaînes d'approvisionnement en hydrogène dépendent souvent de matières premières critiques, comme l'iridium dans certains électrolyseurs et les terres rares nécessaires à la fabrication des aimants utilisés dans les éoliennes. L'approvisionnement en ces matières peut s'accompagner de graves problèmes sociaux et environnementaux: de mauvaises conditions de travail, la dégradation des écosystèmes et la contamination de l'eau due à l'exploitation minière. Par ailleurs, l'extraction et le raffinage de ces matières critiques sont généralement concentrés en Chine et dans un petit nombre d'autres pays, ce qui pose des risques supplémentaires potentiels pour la sécurité de la chaîne d'approvisionnement.

Dans l'ensemble, le déploiement à grande échelle de l'hydrogène et des carburants à faible teneur en carbone à base d'hydrogène nécessite un examen attentif de ces critères économiques et environnementaux, ainsi qu'une hiérarchisation des priorités en fonction de ces compromis.



Parc solaire en Australie



Assembler les pièces du puzzle: l'hydrogène dans le système énergétique suisse

Les vecteurs énergétiques moléculaires, notamment l'hydrogène et les carburants synthétiques, sont appelés à jouer un rôle stratégique dans la décarbonation de la Suisse. Nos scénarios suggèrent qu'ils pourraient couvrir environ 15% des besoins énergétiques du pays d'ici 2050: en grande partie grâce aux importations qui dépendraient de développements au niveau européen.



L'électrolyseur de la plateforme ESI du PSI

L'hydrogène et les carburants synthétiques deviennent de plus en plus les options clés pour réduire les émissions liées à l'aviation, le transport maritime et l'industrie lourde. Cependant, leur utilisation annuelle mondiale est encore inférieure à 1 million de tonnes (Mt) aujourd'hui. A titre de comparaison, cela ne représente que 1% de la demande mondiale actuelle de pétrole. Selon le dernier rapport de l'AIE sur l'hydrogène, pour limiter le réchauffement global à 1,5°C, l'utilisation annuelle d'hydrogène bas-carbone à des fins énergétiques devrait atteindre 44 Mt en 2030 et 280 Mt en 2050 à l'échelle mondiale. En Suisse, selon notre analyse, elle pourrait atteindre 0,3 Mt en 2050.

Les ambitions de la Suisse en matière d'hydrogène

L'UE a placé l'hydrogène au centre de son Green Deal, avec des réglementations telles que RefuelEU et FuelEU qui encouragent l'utilisation des carburants synthétiques dans les avions et les navires. Conformément aux ambitions européennes, la Suisse a publié sa propre stratégie pour l'hydrogène en 2024. Elle y définit une vision pour un hydrogène neutre en CO₂ conforme aux règles de durabilité de l'UE. Mais contrairement à la stratégie de l'UE, elle ne mentionne aucun objectif contraignant en matière de production ou d'utilisation. Néanmoins,

elle adopte les objectifs obligatoires en matière de mélange pour les carburants synthétiques, issus du règlement RefuelEU Aviation. La Suisse se concentre sur le regroupement de producteurs en cluster ou «pôles», la simplification de la réglementation et la facilitation des investissements du secteur privé. Cette stratégie est soutenue par les programmes fédéraux de décarbonation et d'innovation, d'un montant total de 1,2 milliard de francs suisses dans le cadre de la loi sur le climat et l'innovation (LCI), plutôt qu'avec une allocation spécifique à l'hydrogène.

Les résultats de notre modélisation du système énergétique et de scénarios montrent que l'hydrogène peut jouer un double rôle dans la transition énergétique de la Suisse en fournissant:

- un combustible propre pour les secteurs difficiles à électrifier, comme le ciment, les produits chimiques et l'acier, et un carburant synthétique durable pour l'aviation (SAF) pour les avions ravitaillés en Suisse;
- un équilibrage saisonnier du système électrique, en stockant l'électricité excédentaire produite en été pour une utilisation en hiver.

Dans le cadre d'une transition rentable vers la neutralité carbone, l'utilisation annuelle d'hydrogène dans le système énergétique suisse atteindra 0,2 à 0,3 Mt, soit 24 à 26 pétajoules (PJ), d'ici 2050. De plus, l'aviation et le chauffage industriel dépendront d'environ 90 PJ par an de carburants

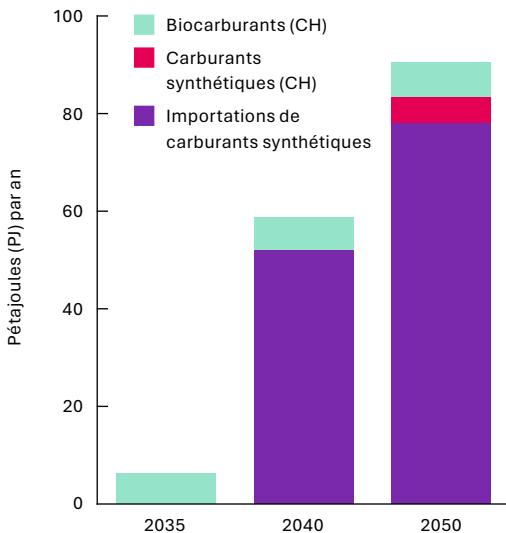


Figure 5: Production nationale de carburants durables et importations en Suisse jusqu'en 2050

Dans notre scénario zéro émission nette, la production nationale de biocarburants et de carburants synthétiques durables en Suisse reste limitée et la majeure partie de l'approvisionnement futur devra provenir de carburants synthétiques importés. D'ici 2050, les carburants synthétiques importés domineront le mix de carburant durable.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

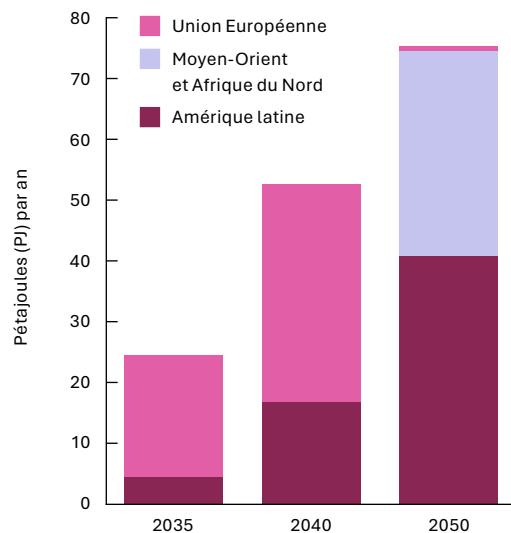


Figure 6: Importations suisses d'e-carburants par provenance jusqu'en 2050

Dans notre scénario zéro émission nette, les importations suisses de carburants synthétiques devraient connaître une forte croissance, l'Union européenne fournissant l'essentiel de l'approvisionnement jusqu'en 2040. D'ici 2050, l'Amérique latine, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord devraient devenir des exportateurs majeurs.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

synthétiques (principalement importés) d'ici 2050 (voir figure 5). Sur ce total, la demande en carburants d'aviation durables (SAF) représente à elle seule 65 PJ (pour plus d'informations à ce sujet, voir «Les carburants durables, sont-ils une solution pour le transport aérien?»). Parallèlement, les besoins de stockage saisonnier en Suisse pourraient atteindre 5 à 7 PJ. Le fournisseur d'énergie suisse Gaznat prévoit de construire des cavités rocheuses tapissées d'une enveloppe en acier dans l'Oberwallis, d'une capacité de 5,5 PJ, soit l'équivalent de 4% de la consommation annuelle actuelle de gaz naturel en Suisse.

Exclure l'hydrogène et les carburants synthétiques du mix énergétique suisse sans tenir compte de l'aviation internationale augmenterait les coûts annuels du système de 200 francs suisses par habitant pour les 25 prochaines années (soit environ 5000 francs suisses par habitant, cumulés de 2025 à 2050) et rendrait la décarbonation plus difficile.

Passage à l'échelle à partir de projets pilotes

A l'heure actuelle, la production d'hydrogène en Suisse est minime. La capacité installée des électrolyseurs est d'environ 11 mégawatts, répartis entre de petits projets à Dietikon, Reichenau, Uri et Gruyère. La production nationale actuelle est bien inférieure à 0,01 Mt/an. Notre modélisation suggère que d'ici 2050, la production nationale pourrait atteindre 0,2 Mt/an à partir de l'électrolyse, avec un potentiel supplémentaire de 0,1 Mt/an issu de la gazéification de la biomasse ou du reformage du méthane avec capture du carbone. Pour atteindre cette échelle, il faudrait investir environ 22 milliards de francs suisses rien que dans les infrastructures de production. Ces résultats soulignent l'ampleur du défi et l'importance de signaux politiques clairs à long terme.

Même dans les scénarios de production nationale élevée, plus de 90% de l'hydrogène et de tous les carburants synthétiques en Suisse seraient importés, principalement d'Afrique du Nord, du Moyen-Orient et d'Amérique latine (voir

figure 6). Cela souligne la nécessité pour la Suisse de se connecter aux infrastructures européennes, par exemple par le biais de contrats d'importation à long terme, afin de maintenir la stabilité des coûts et la sécurité de l'approvisionnement. Mais aussi d'être partie prenante de projets tels que la Dorsale européenne de l'hydrogène (European Hydrogen Backbone), une initiative des opérateurs de réseaux de transport de gaz européens visant à créer une dorsale dédiée au transport de l'hydrogène à travers l'Europe.

Ces carburants ne sont pas seulement des vecteurs énergétiques: ils relient aussi les secteurs, renforcent la résilience et contribuent à assurer la neutralité climatique pour un avenir durable. Si elle veut mettre en place à temps un système fonctionnant à l'hydrogène pour atteindre les objectifs de zéro émission nette, la Suisse devra établir des liens transfrontaliers, conclure des partenariats d'importation et envoyer des signaux clairs à long terme aux investisseurs. Ces mesures doivent être prises dès maintenant afin d'éviter de se retrouver bloqués dans des trajectoires plus coûteuses et moins adaptables.



Les molécules sur les marchés de l'énergie

Les marchés, la technologie et les structures de propriété détermineront le rôle de l'hydrogène dans un système à zéro émission nette. Et ce faisant, l'avenir énergétique de la Suisse.

Pour faire de l'hydrogène un vecteur énergétique largement répandu, il faudra mettre en place tout un système de pipelines, d'installations de stockage et de plateformes commerciales, similaire aux systèmes dont dépendent les marchés actuels du gaz naturel. Contrairement au méthane, l'hydrogène ne dispose pas aujourd'hui de réseau ni de plateformes commerciales dédiés, de sorte que son transport repose généralement sur des camions coûteux. Aujourd'hui, le marché de l'hydrogène reste petit et onéreux, avec

des prix de détail d'environ 8 à 10 francs suisses par kilogramme selon l'HYDRIX, un indice de l'hydrogène créé en Allemagne en 2023. Cela correspond à environ cinq francs suisses à la pompe pour une quantité d'essence à contenu énergétique équivalent (en supposant une charge fiscale similaire à celle de l'essence). Le coût élevé et le manque d'infrastructures dédiées sont des raisons importantes pour lesquelles le mélange est considéré comme une option intéressante.

Les défis du mélange et du transport de l'hydrogène

Certains pays ont testé le mélange de petites quantités d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel. Il est généralement possible d'ajouter jusqu'à 15% en volume sans problèmes techniques majeurs. Des proportions plus élevées sont possibles, mais nécessiteraient des modifications au niveau des vannes, des tuyaux et des appareils. De plus, comme la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire et éolienne a tendance à être intermittente, le mélange obtenu varierait dans le temps, ce qui soulève des questions de sécurité et de fiabilité. Pour ces raisons, de nombreux experts estiment que l'hydrogène aura finalement besoin de sa propre infrastructure dédiée s'il veut jouer un rôle important dans le système énergétique.

Stockage de l'hydrogène: utilisations quotidiennes et saisonnières

L'un des avantages de l'hydrogène est qu'il peut être stocké pour une utilisation ultérieure, que ce soit pendant quelques



nomique que d'essayer d'augmenter la capacité des batteries ou des centrales à accumulation par pompage pour la même durée. Cependant, la Suisse ne dispose actuellement d'aucune capacité de stockage de gaz significative sur son territoire. Actuellement, 3 térawattheures de capacité de stockage sont utilisées dans l'UE (principalement en France) et la conversion au stockage d'hydrogène n'est pas garantie, même d'un point de vue technique. Sans la construction d'installations de stockage d'hydrogène, celui-ci ne contribuera qu'en partie à la flexibilité requise. Cependant, une solution viable de stockage saisonnier basée sur l'hydrogène nécessitera des signaux de prix de l'électricité saisonniers plus forts qu'aujourd'hui, ou des politiques de soutien qui réduisent la dépendance aux importations hivernales et renforcent la sécurité énergétique.

Qui devrait être propriétaire des infrastructures?

La propriété des électrolyseurs et des installations de stockage peut également influencer les résultats du marché. Si un acteur important contrôle une partie clé du marché, il peut manipuler l'offre ou la demande afin d'influencer les prix. C'est ce qu'on appelle le pouvoir de marché.

Les électrolyseurs utilisent de l'électricité et la plupart appartiennent à des services publics qui produisent également de l'électricité. Si un tel service public est suffisamment important, il peut influencer à la fois l'offre et la demande et faire évoluer les prix de l'électricité en sa faveur. Il peut donc exercer un pouvoir de marché.

Dans un modèle simplifié où un seul producteur d'électricité et un seul exploitant d'électrolyseurs détiennent tous deux un pouvoir de marché, nous avons examiné comment la propriété influe sur le bien-être global, c'est-à-dire les avantages combinés pour les producteurs et les consommateurs découlant de l'écart entre les prix du marché et les coûts réels du système. Tant que la capacité des électrolyseurs reste faible, comme c'est le cas aujourd'hui, le bien-être global est maximal lorsque les deux sont détenus par la

même entreprise. Cependant, à mesure que leur capacité prend de l'ampleur, le bien-être global s'améliore lorsqu'ils sont détenus séparément.

Ces résultats soulignent l'influence que peuvent avoir la répartition des capacités et la propriété sur le pouvoir de marché. Ils suggèrent également que la conception optimale du marché peut dépendre de l'échelle de production d'hydrogène vert par électrolyse par rapport à l'approvisionnement en électricité. Un autre facteur important est l'aversion au risque, qui consiste à préférer des revenus stables et prévisibles plutôt que de parier sur des pics futurs incertains qui pourraient également entraîner des pertes. Les entreprises peuvent préférer des rendements stables à des profits maximaux, en particulier sur les marchés énergétiques volatils. Vu sous un autre angle, les entreprises avares au risque veulent maximiser leur profit moyen et limiter le risque de faibles profits. A l'aide de notre modélisation, nous avons constaté que dans un tel contexte, lorsque le stockage est géré par un consommateur d'énergie (plutôt que par un producteur), le système tend à mieux utiliser le stockage, ce qui se traduit par un bien-être global plus élevé. Avec des contrats financiers bien conçus, il est toutefois possible d'aligner les incitations entre les différents propriétaires.

Perspectives

Outre la production potentielle de carburants synthétiques tels que le carburant aviation durable (CAD ou SAF), le rôle de l'hydrogène en Suisse dépend du stockage saisonnier. La propriété des électrolyseurs et des installations de stockage d'hydrogène est importante pour garantir le bon fonctionnement du futur marché de l'hydrogène. Dans le même temps, les règles du marché devraient empêcher les grands acteurs de fausser les prix et garantir que même les entreprises peu enclines à prendre des risques exploitent pleinement la capacité de stockage.

heures, quelques jours ou même d'une saison à l'autre. Cela le rend potentiellement précieux pour équilibrer les variations de production d'électricité renouvelable issue du solaire et de l'éolien.

Mais le stockage a un coût. Le stockage d'électricité à base d'hydrogène, souvent appelé power-to-power (P2P), consiste à convertir l'électricité en hydrogène par électrolyse, à le stocker, puis à le retransformer en électricité à l'aide d'une pile à combustible. Ce processus est onéreux, avec des coûts compris entre 330 et 500 francs suisses par mégawattheure d'électricité fourni, ce qui est bien supérieur à la fourchette actuelle des prix de l'électricité entre le jour et la nuit. Pour devenir compétitif, il faudrait à l'avenir réduire les coûts et améliorer l'efficacité. Pour les cycles de stockage quotidiens, il existe actuellement d'autres options moins chères, comme l'hydroélectricité par pompage et les batteries.

Un domaine où l'hydrogène peut offrir un avantage en termes de coûts est le stockage saisonnier. Stocker de l'hydrogène dans des réservoirs ou des cavités souterraines pendant des semaines ou des mois pourrait s'avérer plus éco-

Les carburants durables sont-ils une solution pour le transport aérien?

De nombreuses compagnies aériennes se sont fixé pour objectif la neutralité climatique d'ici 2050. Pour l'atteindre, les carburants durables à base d'hydrogène jouent un rôle important. Mais changer de carburant ne suffira pas.

La réduction de l'impact climatique de l'aviation représente un défi particulier. Contrairement à d'autres secteurs, l'électrification directe de la plupart des avions n'est pas possible. Si les moteurs électriques fonctionnent bien dans les voitures, les batteries nécessaires pour les avions sont trop lourdes, en particulier pour les long-courriers. Et contrairement aux camions, aucun avion fonctionnant à l'hydrogène n'est prévu dans un avenir proche. Cela s'explique principalement par la faible densité énergétique volumique de l'hydrogène (voir figure 1), qui nécessiterait soit de repenser complètement la conception des avions, soit de réduire considérablement le nombre de sièges.

Les carburants d'aviation durables (CAD ou SAF de l'anglais Sustainable Aviation Fuels) constituent en revanche une option viable au kérosène traditionnel. Les SAF sont une catégorie de carburants certifiés, fabriqués à partir de biomasse (bioSAF) ou d'un mélange d'hydrogène et de dioxyde de carbone (CO_2) non fossile (SAF synthétiques), réduisant considérablement les émissions de CO_2 fossile. Le bioSAF et le SAF synthétique jouent tous deux un rôle central dans l'obligation de mélange imposée par l'Union européenne qui entrera en vigueur en 2023. Celle-ci stipule que d'ici 2050, les carburants d'aviation devront être composés d'au moins 70% de SAF, dont la moitié devra être du SAF synthétique.

Plus complexe qu'il n'y paraît

A première vue, le carburant d'aviation synthétique semble être une solution élégante au problème climatique posé par le transport aérien. Cependant, les résultats des recherches menées par notre laboratoire brossent un tableau plus complexe.

Si le SAF synthétique permet de réduire considérablement les émissions de CO_2 fossile, deux tiers des effets actuels du réchauffement climatique liés au trafic aérien sont dus à ce que l'on appelle les «effets non liés au CO_2 ». Il s'agit d'effets climatiques causés par d'autres processus et émissions que le dioxyde de carbone, parmi lesquels figurent la formation de traînées de condensation et de cirrus, les émissions d'oxyde d'azote et la vapeur d'eau à haute altitude, qui contribuent toutes au réchauffement climatique.

Le SAF synthétique brûle certes plus proprement que le kérosène, ce qui réduit la formation de traînées de condensation. Cependant, l'augmentation du trafic aérien réduira les avantages climatiques du SAF. En cas d'augmentation soutenue du trafic aérien, les «effets non liés au CO_2 » continueraient à représenter plus de 50% de l'impact climatique total de l'aviation. Même si ces effets non liés au CO_2 sont souvent de courte durée, l'augmentation du trafic aérien entraîne leur multiplication, ce qui induit finalement un réchauffement climatique continu. En d'autres termes, les effets non liés au CO_2 ne peuvent être



évités uniquement en changeant de carburant; nous devons également réduire nos déplacements en avion et modifier les itinéraires de vol afin de réduire la formation de traînées de condensation.

Il faut aussi prendre en compte les énormes besoins en énergie et en ressources requis par la production de SAF synthétique en grande quantité. Si les besoins européens en carburant d'aviation étaient couverts exclusivement par du SAF synthétique, la demande en électricité de l'Europe doublerait au cours de la seconde moitié de ce siècle, compte tenu du taux de croissance actuel du trafic aérien. Même avec l'ajout de biocarburants synthétiques, les besoins en carburants synthétiques restent un énorme défi.

En outre, des technologies telles que le captage et le stockage direct du CO_2 dans l'air (DACCs) ou des procédés similaires sont nécessaires pour capter



le CO₂ présent dans l'atmosphère et compenser les effets persistants du réchauffement climatique liés à l'utilisation de carburants alternatifs durables. Le captage et le stockage du CO₂ sont également des processus très énergivores qui nécessitent non seulement une énergie supplémentaire climatiquement neutre, mais aussi une infrastructure géologique de stockage du CO₂ à grande échelle qui n'existe pas encore.

Nécessaire, mais insuffisant

Il ne fait aucun doute que le SAF synthétique est une pièce importante du puzzle de la décarbonation de l'aviation. Il offre une compatibilité, de faibles émissions de CO₂ fossile et une réduction modérée des ef-

fets non liés au CO₂. Cependant, ces carburants aériens durables ne sont pas une panacée. Nos recherches montrent clairement que le SAF, en tant que substitut au kérosène, ne suffira pas à rendre le transport aérien véritablement neutre sur le plan climatique.

D'autres alternatives permettant de réduire l'impact climatique du trafic aérien sont la conception de nouveaux avions, l'amélioration des moteurs (en particulier pour réduire les émissions d'oxyde d'azote) et des mesures économiques visant à freiner la demande. Pour conclure, les vols neutres en carbone entraîneront des coûts plus élevés pour les passagers et une diminution du nombre de voyages en avion.

4,78 milliards

Nombre de passagers dans le monde en 2024

12,4 milliards

Nombre de passagers attendus dans le monde en 2050

(Sources: IATA et OACI)

«La décarbonation pose des défis considérables à l'aviation.»

Ramon Hess

Entretien avec Ramon Hess et Gabriel Müller,
Swiss International Air Lines

Le trafic aérien connaît une forte reprise depuis le creux de la pandémie de coronavirus, tandis que le secteur aérien s'est engagé à réduire son impact négatif sur l'environnement. Comment concilier ces deux aspects?

Gabriel Müller: Oui, le trafic aérien reprend, ce qui montre à quel point la mobilité est importante pour notre société. Dans le même temps, nous sommes conscients que notre secteur a la responsabilité de réduire considérablement son impact sur l'environnement. La transition vers un transport aérien plus durable s'accompagne de défis considérables. Chez SWISS, nous poursuivons des objectifs ambitieux en matière de CO₂ et misons sur un nombre important de leviers et de mesures visant à réduire les émissions de CO₂ liées à l'exploitation aérienne. Nous nous sommes engagés dans cette voie, mais nous ne sommes encore qu'au début du chemin qui mène à un transport aérien durable.

SWISS s'est également fixé pour objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Comment cela va-t-il fonctionner concrètement?

Ramon Hess: Comme Gabriel l'a déjà indiqué, SWISS poursuit différentes approches pour réduire ses émissions de CO₂. Notre flotte constitue un levier

central: les avions modernes comme l'A320neo ou l'A350 consomment nettement moins de carburant que leurs prédecesseurs. Nous misons également sur des mesures visant à accroître l'efficacité des opérations aériennes quotidiennes. Il s'agit par exemple de procédures d'approche optimisées, ou

Hormis leur réduction grâce aux SAF, éliminer de l'air les émissions restantes de CO₂ est un élément indispensable de notre stratégie visant à atteindre zéro émission nette de CO₂. Mais c'est également un aspect clé de la stratégie de l'ensemble du secteur.

«Actuellement, la capacité de production mondiale de SAF ne couvre qu'environ 0,7% de la demande mondiale.»

Gabriel Müller

encore d'aides à la décision numériques et d'optimisations permettant d'économiser du carburant.

La clé de la décarbonation réside dans la promotion et l'utilisation de carburants aériens durables (Sustainable Aviation Fuels ou SAF), grâce à des partenariats ciblés avec des pionniers technologiques comme Synhelion, par exemple. Etant donné que de nombreuses technologies clés pour la décarbonation de l'aviation sont encore en cours de développement ou en phase initiale de mise à l'échelle, il est essentiel de les promouvoir de manière ciblée dès aujourd'hui.

L'hydrogène est également considéré comme un carburant potentiel pour l'aviation. Envisagez-vous des applications réalisistes pour une compagnie aérienne comme SWISS, ou l'accent continuera-t-il d'être mis sur les hydrocarbures synthétiques?

RH: L'hydrogène est considéré à juste titre comme un carburant prometteur pour l'aviation, mais surtout pour les petits avions et les vols court-courriers à l'avenir. Dans l'état actuel des choses, les avions long-courriers, qui sont responsables de la majeure partie des émissions de CO₂, continueront à

fonctionner avec du carburant liquide en 2050. A moyen terme, nous considérons qu'une utilisation directe de l'hydrogène est peu réaliste. Nous nous concentrons donc clairement sur les hydrocarbures synthétiques, c'est-à-dire les SAF qui sont produits à partir d'hydrogène vert et de CO₂. Ceux-ci sont compatibles avec la flotte et les infrastructures existantes et offrent une solution évolutive pour la décarbonation de l'aviation.

Quels sont selon vous les défis liés à la transition vers des carburants aériens durables?

GM: L'un des principaux défis est leur disponibilité. Actuellement, la capacité de production mondiale de SAF ne couvre qu'environ 0,7% de la demande mondiale et les carburants synthétiques ne sont pas encore disponibles sur le marché.

RH: À cela s'ajoutent des coûts élevés. Les SAF biogènes sont actuellement trois à cinq fois plus chers que le kérosène fossile et les SAF synthétiques jusqu'à dix fois plus cher. Aujourd'hui, les coûts de carburant représentent déjà quelque 30% des coûts d'exploitation d'une compagnie aérienne. Pour les transporteurs aériens, une utilisation à grande échelle des SAF n'est actuellement pas viable sur le plan économique, c'est pourquoi des concepts de

promotion internationaux sont nécessaires de toute urgence. La transition ne pourra réussir qu'en faisant progresser conjointement la production, le développement technologique et la demande.

Comment évaluez-vous la disposition des clients à payer pour des vols plus durables?

GM: Nous observons un intérêt croissant pour des vols plus durables et les contributions de nos clients sont essentielles à la transformation du transport aérien. Actuellement, environ 5% de nos passagers choisissent l'une de nos offres pour rendre leur voyage en avion plus durable. Dans les classes premium, la disposition à payer est nettement plus élevée.

Outre les gaz à effet de serre, les effets non liés au CO₂ comme les traînées de condensation jouent également un rôle dans l'impact climatique de l'aviation. Comment SWISS aborde-t-elle cette question?

RH: SWISS est consciente que l'impact global du transport aérien sur le climat ne se limite pas à l'effet du CO₂. L'ampleur des effets non liés au CO₂ fait encore l'objet de recherches, c'est pourquoi nous soutenons de manière ciblée des projets qui étudient ces effets et les mesures d'atténuation possibles. Et comme nous l'avons déjà mentionné, nous encourageons l'utilisation de carburants alternatifs durables, qui contiennent moins d'hydrocarbures aromatiques et ont une teneur en soufre plus faible. Leur combustion produit moins de particules de suie



Ramon Hess

est Corporate Responsibility Manager chez Swiss International Air Lines. Il est notamment chargé du suivi et du pilotage de la feuille de route CO₂, de veiller au respect des objectifs environnementaux et de mettre en place des partenariats stratégiques pour la réduction des émissions de CO₂.



Gabriel Müller

occupe depuis dix ans différentes fonctions chez Swiss International Air Lines. Depuis 2022, il travaille au sein de l'équipe chargée du développement durable, où il s'occupe notamment du développement et de la commercialisation de carburants durables, des offres clients pour des vols plus durables et de différents partenariats stratégiques.

et d'aérosols, ce qui peut réduire la formation de traînées de condensation. Les SAF peuvent donc contribuer de manière importante à la réduction des effets non liés au CO₂.

Les mesures politiques telles que les quotas pour les SAF ou une taxe sur le kérosène font l'objet de débats controversés. Quel type de réglementation jugez-vous approprié pour promouvoir une aviation plus durable? Les objectifs européens ambitieux en matière de SAF sont-ils réalistes?

RH: Les mesures politiques doivent être coordonnées au niveau international – idéalement au niveau mondial – et conçues de manière à ne pas fausser la concurrence. C'est la seule façon de garantir l'efficacité des instruments de politique climatique et d'éviter la fuite de carbone, c'est-à-dire le transfert des flux de trafic et des émissions de CO₂ à l'étranger. Si les instruments nationaux sont absolument inefficaces, le mandat SAF dans le cadre de ReFuelEU Aviation, par exemple, entraîne également des distorsions de concurrence. Le quota de mélange rend les liaisons via les hubs européens plus coûteuses et entraîne des désavantages concurrentiels ainsi qu'un transfert des émissions. Cela souligne l'importance d'une législation climatique coordonnée au niveau international et les défis liés à l'élaboration d'instruments efficaces pour le transport aérien.

GM: La réalisation des objectifs de durabilité des entreprises et des responsables politiques dépend également de conditions de concurrence équitables à l'échelle mondiale. Cela nécessite une adaptation de la réglementation qui ne fausse pas la concurrence, par exemple par le biais d'une taxe sur les passagers dans l'UE, dont les recettes pourraient être utilisées pour les SAF. Parallèlement, une stratégie de promotion des

carburants durables est nécessaire. Il faut augmenter rapidement la production de carburants durables afin de garantir la disponibilité des quantités nécessaires à des prix compétitifs.

Les coopérations sont essentielles dans un domaine aussi complexe que l'aviation neutre en carbone. Quels partenariats SWISS poursuit-elle pour atteindre son objectif de zéro émission nette?

RH: Nous travaillons avec des aéroports, des producteurs de carburant, des instituts de recherche et des partenaires technologiques afin de développer et de déployer des solutions concrètes. Il s'agit notamment de projets visant à optimiser les procédures de vol, à introduire les SAF ou à éliminer le CO₂. Nous sommes très fiers de nos partenariats avec les deux entreprises suisses

Nous examinons en permanence d'autres partenariats afin d'élargir notre portefeuille de manière ciblée. En 2025, par exemple, nous avons conclu une coopération avec neustark, une entreprise suisse qui stocke durablement le CO₂ dans du béton recyclé.

L'aviation fait régulièrement l'objet de critiques, notamment par rapport à d'autres modes de transport. Que pensez-vous de l'idée selon laquelle «voler moins» serait la mesure la plus efficace?

GM: La mobilité est indispensable pour de nombreuses personnes et entreprises, elle permet les échanges et le commerce à l'échelle mondiale. Un monde sans transport aérien n'est plus concevable aujourd'hui. Notre objectif est donc de rendre les vols plus du-

«Il faut augmenter rapidement la production de carburants durables afin de garantir la disponibilité des quantités nécessaires à des prix compétitifs.»

Gabriel Müller

pionnières: Synhelion et Climeworks. Ensemble, nous promouvons des technologies clés pour la décarbonation de l'aviation.

Les coopérations sont également importantes pour améliorer l'efficacité des opérations aériennes quotidiennes. En collaboration avec Google, SWISS a par exemple développé une plateforme basée sur la technologie Google Cloud afin d'améliorer la planification et le contrôle de ses opérations aériennes quotidiennes. Cela permet de réaliser d'importantes économies de carburant.

rables. Nous misons sur la transparence et offrons à nos clients des possibilités concrètes de réduire leurs émissions de CO₂ liées aux vols.

RH: La décarbonation pose des défis considérables à l'aviation. Une chose est sûre: les mesures de réduction des émissions de CO₂ nécessitent une coopération avec les start-ups, les scientifiques et les clients.



Décarboner le transport maritime

En raison de la taille gigantesque de ses navires, de ses besoins colossaux en carburant et de son infrastructure mondiale, le transport maritime est un secteur difficile à décarboner. Alors que l'industrie recherche des alternatives durables au fioul lourd, une nouvelle génération de carburants à base d'électricité, tels que l'e-ammoniac et l'e-méthanol, voit le jour. Chacun de ces carburants synthétiques a ses propres avantages et inconvénients techniques et environnementaux.

Dans le secteur en pleine croissance du transport maritime, l'objectif de la neutralité climatique est clairement défini, mais la voie pour y parvenir est loin d'être évidente. Des quantités colossales d'énergie sont nécessaires pour propulser d'énormes navires sur de longues distances sans possibilité de ravitaillement. Actuellement, la plupart des navires dans le monde fonctionnent au fioul lourd à faible teneur en soufre. Comme dans l'aviation, l'électrification directe n'est pas une option pour le transport maritime. Les longues distances compliquent la re-

charge des batteries et leur densité énergétique nettement inférieure par rapport au fioul lourd entraînerait une réduction considérable de la capacité de chargement des navires en raison du poids et de la taille de ces accumulateurs.

De plus, la disponibilité des carburants marins à faible teneur en CO₂ est très limitée et il n'existe pas d'infrastructure mondiale pour soutenir les systèmes de propulsion alternatifs. La plupart des carburants marins à faible teneur en CO₂ utilisés aujourd'hui sont des biocarburants comme l'huile végétale hydrogénée et

l'ester méthylique d'acide gras, qui sont obtenus à partir d'huiles alimentaires usagées, de graisses animales et de certaines huiles végétales.

Il faut toutefois s'attendre à ce qu'un nombre croissant de nouveaux «carburants verts» fassent leur apparition sur le marché au cours de cette décennie, synthétisés en utilisant de l'électricité renouvelable. Parmi ces e-carburants figurent l'e-ammoniac, l'e-méthanol, l'e-diesel et l'e-méthane. Le préfixe «e» signifie «à base d'électricité». L'hydrogène est l'un des principaux composants de tous ces carburants, qui représentent des options prometteuses pour réduire l'intensité carbone du transport maritime, comme le montre la figure 7. Tout comme la neutralité climatique du secteur aérien, celle de ce secteur dépend donc de la mise en place d'un approvisionnement fiable en e-carburants à base d'hydrogène. Contrairement aux avions, qui ont besoin de carburants à caractéristiques très spécifiques, les moteurs de navire peuvent être adaptés plus facilement aux carburants alternatifs.

Les navires de fret transportent plus de 80 % du volume mondial de marchandises. Ils peuvent acheminer des milliers de conteneurs à la fois et des marchandises en vrac comme le charbon, le minerai de fer ou les céréales. Certains mesurent plus de 400 mètres de long.



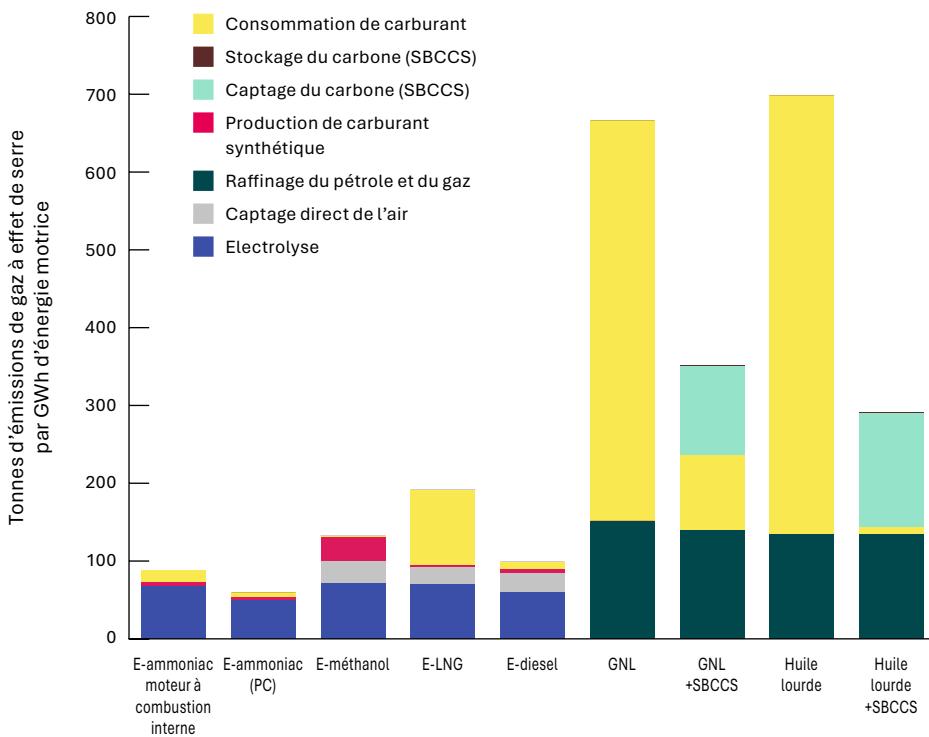


Figure 7: Emissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie de différents types de carburants marins

Cette figure montre les émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie de différents carburants utilisés pour le transport maritime. Un gigawattheure d'énergie de propulsion navale reflète à la fois la densité énergétique du carburant et le rendement du moteur. PC signifie «pile à combustible», GNL «gaz naturel liquéfié» et SBCCS «captage et stockage du CO₂ à bord des navires». Le sous-processus SBCCS comprend les émissions générées par la combustion supplémentaire de carburant lors du fonctionnement de l'installation de captage. Les résultats présentés dans ce graphique se réfèrent à la production en Espagne de carburant synthétique à partir d'hydrogène vert.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

Nos recherches montrent que les carburants synthétiques produits à partir d'électricité renouvelable et de dioxyde de carbone ou d'azote atmosphérique peuvent atteindre, voire dépasser, le seuil de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 80 % par rapport au fioul lourd, tel qu'il a été fixé conformément au règlement FuelEU maritime. Toutefois, la faisabilité d'une mise à l'échelle de ces technologies et leur coût restent des questions ouvertes. En outre, chaque type de carburant alternatif soulève des préoccupations différentes.

L'e-ammoniac, par exemple, est toxique et corrosif et n'est pas compatible avec les moteurs actuels. De plus, l'infrastructure nécessaire à l'approvisionnement des navires avec ce carburant est encore en cours de développement. La principale préoccupation environnementale liée à l'utilisation de l'ammoniac comme carburant marin est le risque d'émissions de protoxyde d'azote (N₂O) – un puissant gaz à effet de serre – produit lors de sa combustion dans les moteurs à combustion interne. Au-delà de la combustion, la production d'ammoniac – en particulier la source de chaleur utilisée pour sa synthèse – peut entraîner des émissions d'oxyde d'azote (NO_x). Ces deux composés sont nocifs pour la santé humaine et les écosystèmes, et nécessitent un contrôle

strict de leurs émissions. Afin de réduire au maximum les émissions de gaz à effet de serre et autres impacts environnementaux, l'e-ammoniac pourrait être utilisé dans des piles à combustible à oxyde solide. Cela permettrait d'éviter complètement la combustion sur les navires.

L'e-diesel et l'e-méthanol se caractérisent par leur compatibilité avec les moteurs actuels. Cependant, à long terme, ils devraient coûter 35 à 90 % plus cher que l'e-ammoniac. De plus, la combustion de l'e-méthanol peut produire du formaldéhyde et d'autres sous-produits toxiques. Le formaldéhyde étant associé à des problèmes respiratoires et environnementaux, il est important de contrôler les émissions lors de l'utilisation du méthanol comme carburant.

L'e-méthane (ou e-LNG), chimiquement identique au gaz naturel liquéfié, est un autre candidat. Ce carburant présente un profil plus complexe. D'une part, il bénéficie d'une infrastructure mondiale bien établie et de moteurs qui répondent naturellement à des normes d'émission strictes, mais d'autre part, le méthane non brûlé qui s'échappe des moteurs des navires – ce qu'on appelle les «fuites de méthane» – peut prétériter sa compatibilité climatique. Les fuites de méthane pourraient potentiellement faire grimper les émissions de gaz à effet de serre

bien au-delà de l'objectif de réduction de 80 %, ce qui rendrait l'e-méthane moins attrayant par rapport à d'autres carburants synthétiques.

En fin de compte, nos recherches montrent que la décarbonation du transport maritime nécessite une stratégie hybride. Il convient d'utiliser des carburants à faible teneur en CO₂, notamment des biocarburants et des carburants de synthèse. Des systèmes de captage du CO₂ devraient également être installés sur les grands navires. Une surveillance stricte des émissions tout au long du cycle de vie des carburants, ainsi que la surveillance et le contrôle des fuites d'hydrogène, des fuites de méthane et des émissions d'oxyde d'azote issues de la combustion de l'ammoniac, doivent devenir une priorité réglementaire. Les technologies de propulsion assistée par le vent et les gains d'efficacité des petits navires devraient également jouer un rôle. Pour progresser, il faut des investissements ciblés, des normes internationales coordonnées et la volonté de l'ensemble du secteur d'agir avant même que les carburants du futur ne soient prêts à être largement utilisés. Il s'agit du problème ancien de l'œuf et de la poule: sa solution nécessite des engagements précoce de la part des fabricants de carburants, des opérateurs maritimes et des exploitants portuaires.

«Les navires peuvent déjà fonctionner avec ces nouveaux carburants.»

Entretien avec Daniel Bischofberger, PDG d'Accelleron

D'un côté, nous avons la croissance économique mondiale et l'augmentation du transport de marchandises par navire, traditionnellement alimenté par du fioul lourd polluant. De l'autre, les objectifs de zéro émission nette de CO₂. Comment concilier ces deux aspects selon vous?

Daniel Bischofberger: Le secteur maritime transporte environ 80 à 90 % de l'ensemble des marchandises. D'ici 2050, le volume de transport devrait doubler et la consommation de carburant augmenter de 70 %. Il existe donc encore un potentiel d'amélioration de l'efficacité.

Autrefois, le secteur maritime était en quelque sorte la décharge de l'industrie pétrolière. Il récupérait les derniers restes de pétrole et les brûlait sur les navires. On observe aujourd'hui un changement radical de la part de l'Organisation maritime internationale (OMI). L'OMI est une organisation des Nations Unies responsable de l'ensemble du secteur maritime. Elle s'est engagée à atteindre la neutralité climatique d'ici 2050. La première priorité est le passage à des combustibles à faible teneur en CO₂, la deuxième priorité est l'amélioration de l'efficacité. Le transport maritime est la seule industrie réglementée à l'échelle mondiale. Cela offre une occasion unique de jouer un rôle de premier plan dans la décarbonation.

Selon vous, quelles sont les solutions les plus prometteuses pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?

DB: Le transport maritime est considéré comme une «industrie difficile à décarboner», c'est-à-dire qu'il ne peut être décarboné uniquement par l'électrification. Exemple: un grand porte-conteneurs reliant la Chine à l'Europe consomme

pour leur production. L'ammoniac et le méthanol ont par ailleurs une faible densité énergétique. Par rapport au diesel, il faut deux fois plus de carburant, ce qui signifie plus d'espace sur le navire.

Un autre défi réside dans le fait qu'un navire est aujourd'hui construit pour une durée de vie de 30 ans. Il faudra probablement moderniser le navire après la moitié de cette période afin de pouvoir

«Nous devons maintenant relier les secteurs entre eux, car nous avons tous besoin de la même chose: de l'hydrogène vert.»

40 gigawattheures d'énergie. Cela correspond à environ une fois et demie la production quotidienne de Leibstadt, la plus grande centrale nucléaire de Suisse. Une batterie équivalente pèserait environ 200 000 tonnes. Un tel navire ne dispose pas de la capacité de chargement nécessaire pour transporter un poids pareil.

A long terme, les carburants synthétiques représentent clairement la solution principale. Dans le domaine du transport maritime, la tendance est à l'ammoniac et au méthanol. En général, les carburants synthétiques sont coûteux et nécessitent beaucoup d'équipements

utiliser de nouveaux carburants. Pour nous, c'est idéal, car nous pourrons alors moderniser ou réviser nos produits deux ou trois fois.

Quels sont les défis technologiques liés à l'adaptation des navires aux nouveaux carburants à faible teneur en CO₂?

DB: Il est important que tout le monde comprenne bien une chose: les navires peuvent déjà fonctionner avec ces nouveaux carburants. Ils utilisent

depuis longtemps déjà du biodiesel et des carburants similaires. Les premiers porte-conteneurs fonctionnant au méthanol naviguent depuis 2023 et les premiers navires fonctionnant à l'ammoniac feront leur apparition cette année.

Les navires sont prêts. La technologie existe. Il ne manque plus que de nouvelles normes. L'ammoniac étant toxique, il faut bien sûr définir de nouvelles normes de sécurité et de manipulation et former les équipages. Les premiers projets pilotes ont déjà vu le jour.

Quels changements faut-il apporter dans les ports?

DB: C'est bien sûr un défi de taille. Il ne suffit pas de savoir qu'il existe un port qui dispose de carburant. Il faut également vérifier s'il s'agit d'ammoniac, de méthanol, de gaz naturel ou de fioul lourd.

A cela s'ajoute le problème de l'œuf ou la poule: les navires sont prêts, mais le carburant n'est pas encore disponible. Il existe de nombreuses industries dites «difficiles à décarboner» qui recherchent toutes de l'hydrogène vert. Qui va finalement le produire? Le transport maritime est important, mais pas suffisamment pour mettre en place à lui seul un tel écosystème hydrogène.

Nous devons donc maintenant relier les différents secteurs entre eux, car nous avons tous besoin de la même chose: de l'hydrogène vert. Si nous regroupons nos besoins, il nous en faudra d'énormes quantités. L'industrie aéronautique, le transport maritime, la production d'acier,

monde voudrait le combustible le moins cher. Quelqu'un doit prendre en charge le financement initial, étant donné que ces combustibles synthétiques sont aujourd'hui cinq à dix fois plus chers que les combustibles fossiles. Mais on estime que dès que de grandes quantités

«Dans le domaine des carburants, le défi n'est pas technologique, mais commercial.»

la chimie et le ciment, l'industrie des engrains et même les centrales électriques: ensemble, ces secteurs auront besoin d'environ 600 millions de tonnes d'hydrogène par an.

«Nous devons maintenant relier les secteurs entre eux, car nous avons tous besoin de la de la même chose: de l'hydrogène vert.»

Il faudrait donc exploiter les synergies entre ces secteurs?

DB: Oui. La concurrence ne ferait qu'empêcher toute avancée, car tout le

seront produites et que les technologies seront industrialisées, ils ne coûteront que deux à trois fois plus . Qui voudrait investir aujourd'hui dans une installation de production, alors que des solutions moins coûteuses seront disponibles dans cinq ans? Dans le domaine des carburants, le défi n'est pas technologique, mais commercial. «Dans le domaine des carburants, le défi n'est pas technologique, mais commercial.»

Qu'en est-il de l'obligation d'acheter ces nouveaux carburants dans le secteur maritime?

DB: Il faut désormais mettre en place des réglementations. Soit on oblige tout le monde à investir, soit on commence par les acteurs du secteur maritime qui en ont les moyens. Pour les marchandises qui ont une valeur élevée, les frais de transport sont négligeables. Si une paire de baskets coûte désormais 5 ou 10 centimes de plus, les gens continueront à l'acheter.

Cela signifie donc que le coût des carburants synthétiques devrait d'abord être reportés sur les biens de consommation transportés à l'échelle mondiale qui sont les moins sensibles au prix?

DB: Oui. Le secteur maritime se moque que le transport coûte 10 ou 20 % de plus. Ce n'est pas parce que le bateau



Daniel Bischofberger

est depuis 2022 PDG d'Accelleron, un fournisseur de technologies de turbocompresseurs et de solutions énergétiques. Axé sur la décarbonation, il a élargi le portefeuille de l'entreprise au-delà de sa compétence fondamentale centenaire en turbocompresseurs pour inclure des systèmes d'injection pour la transition énergétique ainsi que des solutions numériques et basées sur l'IA. Auparavant, il a occupé divers postes de direction dans l'industrie.

coûte plus cher que le transport se fait par avion. Le train n'est pas non plus une alternative. Le bateau est le seul moyen de transport efficace capable de parcourir les longues distances entre les continents.

Accelleron est présent à l'international. Quelles différences observez-vous entre les marchés européens, asiatiques et autres en matière de transition énergétique dans le secteur des transports?

DB: Il y a effectivement des différences. L'UE est pionnière en la matière. Elle exige par exemple que chaque navire entrant dans un port de l'UE achète des certificats pour 50 % des émissions de CO₂ émises entre le dernier port et l'Europe. Nous constatons également que la Chine et l'Australie investissent désormais dans la production d'hydrogène. L'Australie occidentale dispose déjà, par exemple, d'un hub d'ammoniac. Au Canada, des investissements sont également réalisés dans la production d'ammoniac à partir d'hydrogène vert. Et nous voyons que des ports comme Singapour ou Rotterdam investissent dans les infrastructures.

Qu'en est-il des réglementations des différents ports concernant l'utilisation de carburants propres? Les réglementations sur la qualité de l'air jouent-elles un rôle?

DB: Oui. Tout d'abord, les navires ne sont plus autorisés à utiliser du fioul lourd dans certaines zones. Nombre d'entre eux sont désormais équipés de moteurs dits bicarburant, qui fonctionnent avec une combinaison de diesel et de

méthanol ou de fioul lourd et de gaz naturel. Il existe toutes sortes de combinaisons pour répondre aux différentes exigences.

Ensuite, les navires ont besoin d'électricité dans les ports, mais l'infrastructure nécessaire pour l'approvisionnement à partir de la terre ferme doit d'abord être mise en place. Tout cela est faisable et les choses bougent, il faut juste plus de sécurité juridique

Mais il faut aussi veiller à éviter que finalement rien ne se passe et que l'on se contente de payer la sanction.

La décarbonation n'est pas gratuite. Les carburants sont plus chers. Mais je pense qu'il faut comparer ce qui est comparable. Les combustibles fossiles fournissent l'énergie la moins chère. Seulement, leur prix ne reflète pas leur coût réel. A l'avenir, nous devrons payer des sommes colossales pour compen-

«La décarbonation est un projet qui s'étend sur un siècle, mais il ne nous reste plus que 25 ans.»

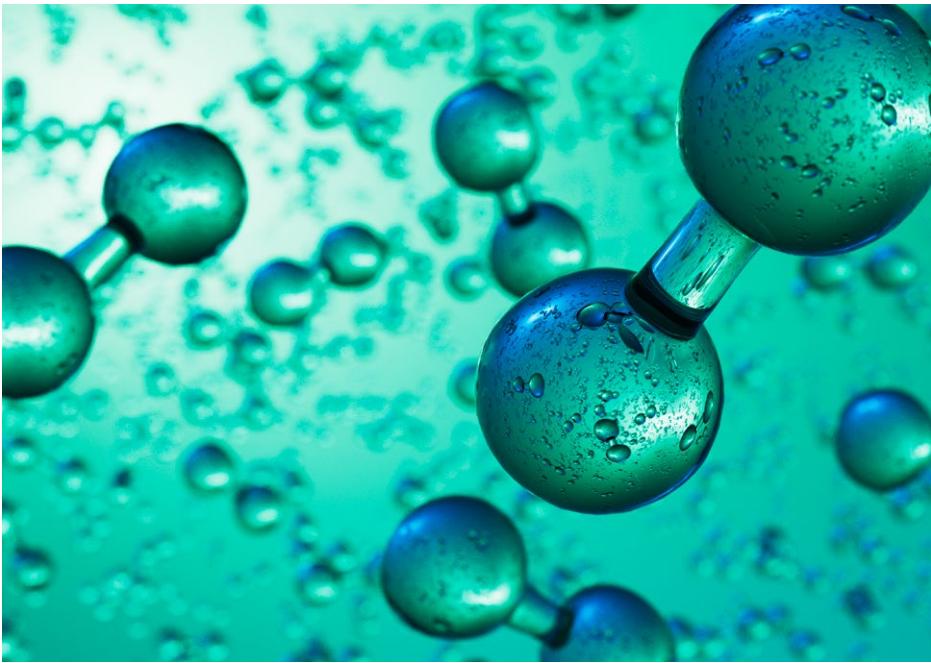
pour amortir les investissements. On remarque que le secteur maritime est en pleine mutation. La décarbonation est un projet qui s'étend sur un siècle, mais il ne nous reste plus que 25 ans. Nous devons donc accélérer le mouvement. Au rythme actuel, ce sera plutôt un projet de 200 ans.

Selon vous, quelles conditions politiques ou réglementaires seraient décisives pour accélérer la montée en puissance des moteurs durables sur le marché?

DB: Dans l'intervalle, les biocarburants et le gaz naturel restent toujours meilleurs que le fioul lourd. Nous devons toutefois veiller à ce que les solutions transitoires actuelles ne deviennent pas des solutions permanentes.

D'autre part, il n'est évidemment pas question de détruire l'ensemble du secteur maritime à coup de sanctions.

ser les dommages causés par l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Personnellement, je trouve cela tout à fait injuste pour les générations futures et mes enfants. Nous sommes en train de leur léguer une lourde hypothèque en leur disant: «Nous avons eu des combustibles bon marché, mais c'est à vous de payer les coûts qui en découlent.» Je pense qu'en fin de compte, la question est la suivante: la société est-elle prête à investir dans l'avenir et pas seulement dans sa consommation actuelle?



Perspectives

Malgré toutes les contraintes en matière de ressources, de possibilités d'importation et d'acceptation sociale, l'hydrogène et les vecteurs énergétiques qui en sont dérivés sont indispensables. Leur avenir dépend autant du politique que de la technologie.

L'hydrogène et les vecteurs énergétiques qui en sont dérivés ne sont pas des solutions miracles. Dans les secteurs de l'aviation, du transport maritime et de l'industrie, ils s'assortissent de coûts élevés, impliquent des besoins importants en ressources et rencontrent des obstacles liés aux infrastructures. Une mise en œuvre à grande échelle, neutre sur le plan climatique, nécessite un développement considérable des énergies renouvelables, mais aussi du captage et du stockage du dioxyde de carbone. Dans cette édition de La Boussole de l'énergie du PSI, nous avons mis en évidence les points suivants:

- **Il est indispensable de définir les priorités.** L'hydrogène vert consomme des ressources rares comme l'eau douce et certaines matières premières critiques et nécessite une occupation des sols importante, tandis que l'hydrogène bleu dépend du stockage du CO₂ dont la Suisse ne dispose pas. L'hydrogène et les sources d'énergie qui en sont issues

sont particulièrement utiles dans l'industrie sidérurgique, cimentière et chimique, dans le transport longue distance et dans le stockage saisonnier d'énergie, mais pas dans les systèmes de chauffage ou les voitures.

- **L'approvisionnement mondial implique des compromis.** Le plus grand potentiel de production à faible coût se trouve en Australie, en Afrique et en Amérique, souvent dans des régions souffrant de pénurie d'eau et dépendantes de chaînes d'approvisionnement fragiles pour les matières premières critiques. L'hydrogène est autant une question de géopolitique et de limites écologiques que de technologie. Parmi les questions les plus importantes figurent l'impact de l'extraction et du traitement des matières premières, ainsi que les défis liés à l'utilisation des terres et à la certification.
- **L'hydrogène jouera un rôle important en Suisse.** La place de l'hydrogène doit être comprise dans un contexte systémique.

L'hydrogène favorise la décarbonation de l'industrie et le stockage saisonnier en transférant l'énergie solaire produite en été vers l'approvisionnement hivernal. La production nationale restant limitée, la Suisse continuera de dépendre des importations. Pour cela, des pipelines transfrontaliers, des certifications, des normes et des contrats à long terme sont indispensables.

- **Les marchés jouent également un rôle.** Sans réseaux internationaux, le stockage saisonnier ne fonctionne qu'en cas d'importantes différences de prix entre l'hiver et l'été, et avec des réglementations favorisant un approvisionnement à faible teneur en dioxyde de carbone. La structure du marché déterminera si l'hydrogène réduit les risques ou renforce les acteurs établis. Une harmonisation européenne des marchés, des normes et des infrastructures représente une perspective plus solide que des approches isolées.

- **L'aviation et le transport maritime montrent les limites de la substitution.** Les carburants synthétiques sont certes indispensables, mais ils ne suffiront pas. L'aviation doit par ailleurs renoncer à la croissance illimitée et se doter de nouveaux avions, tandis que le transport maritime a besoin de stratégies hybrides combinant carburants synthétiques, gains d'efficacité et captage du dioxyde de carbone.

Il est important de poursuivre les recherches sur le rôle de l'hydrogène dans le puzzle de la transition énergétique. Notre laboratoire mène actuellement des projets visant à étudier l'acceptation sociale des technologies de l'hydrogène, la priorisation mondiale des applications de l'hydrogène, ainsi que l'impact environnemental et la faisabilité des projets mondiaux prévus dans ce domaine, y compris l'intégration des développements suisses dans le système européen. Le débat ne doit pas porter sur la question de savoir si l'hydrogène aura un rôle à jouer, mais plutôt sur la manière dont le politique, les infrastructures et la coopération internationale peuvent être coordonnés afin que l'hydrogène et ses dérivés soient utilisés là où ils apportent le plus grand bénéfice pour le climat et la société.

S'abonner à La Boussole de l'énergie du PSI

Si vous souhaitez recevoir nos analyses holistiques et scientifiques par courrier physique ou numérique deux fois par an, il suffit de vous abonner gratuitement en utilisant le lien ou le code QR ci-dessous:



[www.psi.ch/fr/news/
la-boussole-de-lenergie-du-psi](http://www.psi.ch/fr/news/la-boussole-de-lenergie-du-psi)

Impressum

La Boussole de l'énergie du PSI

— Naviguer dans la transition énergétique

Edition #1/2026

ISSN 3042-7231

Editeur

Institut Paul Scherrer PSI

Forschungsstrasse 111

5232 Villigen PSI

Rédaction

Carolyn Kerchof, Christian Bauer,
Vinh Dang, Evangelos Panos,
Russell McKenna

Autres chercheurs contributeurs

Martin Densing, Zipeng Liu,
Christian Moretti, Romain Sacchi,
Tom Terlouw et Karin Treyer

Soutien rédactionnel

Martina Gröschl

Traduction de l'édition en allemand

Daniel Bullinger, Christian Bauer

Traduction de l'édition en français

Catherine Riva, Vinh Dang

Mise en page

Monika Blétry

Graphiques

Carolyn Kerchof sauf

Figure 3: Costas P. Polatoglou

Photos

Adobe Stock sauf

Couverture/page 27: Monika Blétry,
page 12: Scanderbeg Sauer

Photography,
page 19: Ramon Hess, Gabriel Müller,
page 25: Accelleron
(Daniel Bischofberger)

Analyse des systèmes

énergétiques au PSI

Le Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques (LEA) mène des recherches analytiques globales sur divers systèmes et technologies énergétiques, y compris le nucléaire, les énergies fossiles et les énergies renouvelables. Notre mission est de mener des recherches axées sur les défis qui soutiennent la prise de décision, renforcent les capacités, sensibilisent et font progresser l'éducation dans le domaine de l'analyse des systèmes énergétiques.

Laboratoire d'analyse
des systèmes énergétiques
www.psi.ch/fr/lea
lea-info@psi.ch

Connectez-vous avec nous
sur LinkedIn



@PSI Laboratory
for Energy Systems
Analysis (LEA)

Publications citées dans ce numéro

Allgoewer, L., Becattini, V., Patt, A., Grandjean, P., Wiegner, J. F., Gazzani, M., & Moretti, C. (2024). Cost-effective locations for producing fuels and chemicals from carbon dioxide and low-carbon hydrogen in the future. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c01287

Brazzola, N., Meskaldji, A., Patt, A., Tröndle, T., & Moretti, C. (2025). The role of direct air capture in achieving climate-neutral aviation. *Nature Communications*, 16, 588.
DOI: 10.1038/s41467-024-55482-6

Ingwersen, A., Hahn Menacho, A. J., Pfister, S., Peel, J. N., Sacchi, R., & Moretti, C. (2025). Prospective life cycle assessment of cost-effective pathways for achieving the FuelEU Maritime Regulation targets. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177880

Kober, T., et al. (2024). GAZNAT lined rock cavern (LRC) storage report. GAZNAT.

Liu, Z., Terlouw, T., Frey, P., Bauer, C., & McKenna, R. (2025). Global cost drivers and regional trade-offs for low-carbon fuels: A prospective techno-economic assessment [Preprint, ChemRxiv].

Panos, E., et al. (2023). An assessment of energy system transformation pathways to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland. *Communications Earth & Environment*. DOI: 10.1038/s43247-023-00813-6

Panos, E., et al. (2024). POLIZERO – Swiss policy towards zero CO₂ emissions compatible with the European decarbonisation pathways: Final report to SFOE. Ittigen: Swiss Federal Office of Energy.

Sacchi, R., Becattini, V., Gabrielli, P., Cox, B., Dirnachner, A., Bauer, C., & Mazzotti, M. (2023). How to make climate-neutral aviation fly. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-023-39749-y

Saad, D. M., Terlouw, T., Sacchi, R., & Bauer, C. (2024). Life cycle economic and environmental assessment of producing synthetic jet fuel using CO₂/biomass feedstocks. *Environmental Science & Technology*. DOI: 10.1021/acs.est.4c01578

Terlouw, T., Rosa, L., Bauer, C., & McKenna, R. (2024). Future hydrogen economies imply environmental trade-offs and a supply-demand mismatch. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-024-51251-7

Terlouw, T., Moretti, C., Harpprecht, C., Sacchi, R., McKenna, R., & Bauer, C. (2025). Global greenhouse gas emissions mitigation potential of existing and planned hydrogen projects. *Nature Energy*. DOI: 10.1038/s41560-025-01892-9

Treyer, K., Sacchi, R., & Bauer, C. (2022). *Life cycle assessment of synthetic hydrocarbons for use as jet fuel: "Power-to-Liquid" and "Sun-to-Liquid" processes*. Bern: Swiss Federal Office of Civil Aviation (FOCA).

Recherche soutenue par: l'Office fédéral de l'énergie; Innosuisse; l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT); la Commission européenne; l'Agence exécutive européenne pour la santé et le numérique (HaDEA); le Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation; le Center for Sustainable Future Mobility; UK Research and Innovation; Gaznat; la plateforme Energy System Integration du PSI; le Ministère fédéral allemand de la Recherche, de la Technologie et de l'Espace; l'Office fédéral de l'aviation civile; et le Conseil des EPF