

# AVENUE

Édition d'automne 2021



## Carburants alternatifs

Le long chemin vers le remplacement des carburants fossiles



**Roland Bilang**  
Directeur Avenergy Suisse

**Fabian Bilger**  
Responsable HSSE et directeur adjoint

La présente édition du magazine «Avenue» est consacrée aux carburants non fossiles. À titre d'exemple et donc sans prétendre à l'exhaustivité, nous couvrons tout un ensemble qui va de projets encore en phase de développement, comme les carburants à base d'algues (page 14–15), aux produits commercialisables comme les carburants d'aviation durables ou sustainable aviation fuels (CAD/SAF), qui font actuellement leur entrée dans l'industrie aéronautique (à partir de la page 10) – en passant par des installations pilotes comme celles qui sont en usage pour les carburants synthétiques (page 18–23). Pour une fois, l'accent n'est pas mis sur les biocarburants, que nous nous procurons déjà mélangés à l'essence et au diesel dans les stations-service. Par ailleurs, nous avons déjà évoqué le développement de la mobilité à l'hydrogène en Suisse dans l'édition de printemps 2020 du magazine «Avenue», qui, comme tous les numéros de notre magazine, est disponible sur [www.avenergy.ch/fr](http://www.avenergy.ch/fr).

Pour commencer, l'aperçu de la page 4–5 montre l'énorme variété d'alternatives actuellement envisagée pour remplacer les carburants fossiles. Les technologies présentées ici en sont encore souvent au stade du développement. La parole est donc largement donnée à la science dans ce numéro du magazine «Avenue». Nous n'avons pas la prétention de juger dans quelle mesure les technologies et les voies présentées pourront un jour remplacer les produits pétroliers. Il se peut que la solution à tous les problèmes existe, qu'elle n'en soit actuellement qu'au stade de projet annexe et qu'elle passe encore inaperçue aujourd'hui. À l'heure actuelle, il semble plus réaliste de penser qu'il n'y aura pas une seule solution gagnante, mais une juxtaposition de nombreuses approches.

Ces alternatives sont aujourd'hui plus chères, voire pour certaines beaucoup plus chères que les produits pétroliers. Pourtant, un jour, ce ne sera probablement plus le

prix qui décidera si une technologie peut s'imposer. Nous pouvons supposer que, dans l'un ou l'autre cas, grâce à l'optimisation et à la mise à l'échelle des processus de production, un agent énergétique compétitif émergera, du moins à condition que les émissions de CO<sub>2</sub> soient raisonnablement tarifées au niveau mondial. Du point de vue de la sécurité d'approvisionnement, il se peut qu'un jour nous n'ayons pas d'autre choix que de financer des agents énergétiques synthétiques pour disposer d'une assurance en cas de pénurie.

La question de l'échelle, en revanche, est décisive. Bon nombre des installations pilotes en cours de création seront capables d'atteindre des niveaux de production impressionnants dans les années à venir. Les biocarburants liquides, par exemple, représentent déjà environ 2% de la consommation mondiale des carburants. Pourtant, cela ne représente qu'une goutte d'eau dans l'océan au regard des quelque 100 millions de barils de pétrole consommés chaque jour dans le monde. Selon la Statistical Review of World Energy de BP, la consommation mondiale totale d'énergie primaire a été de 556 exajoules en 2020, dont 83% sont à porter au compte des sources d'énergie fossiles que sont le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Les agents énergétiques aux faibles émissions de CO<sub>2</sub> (énergies renouvelables, énergie hydraulique et énergie nucléaire) ont contribué au reste. Le remplacement complet des fossiles par des alternatives sans CO<sub>2</sub> est encore loin, même s'il est possible que nous soyons sur la bonne voie.

**«Nous n'avons pas la prétention de juger dans quelle mesure les technologies et les voies présentées pourront un jour remplacer les produits pétroliers.»**

Bien que ce numéro d'«Avenue» soit très technique, nous ne voulons pas perdre complètement de vue le cadre politique. La communauté internationale travaille actuellement d'arrache-pied pour continuer à le définir. Le dernier chapitre, page 26–27, est donc consacré au paquet «Fit for 55» de l'UE et à la question de savoir quelle influence il aura sur la Suisse.

Nous vous souhaitons une agréable lecture.

# Carburants alternatifs

## Sources de carbone

**CCU**  
Carbon Capture and Utilization  
Captage et utilisation du CO<sub>2</sub>  
→ DAC (Direct-Air-Capture)  
→ Cimenterie  
→ Installation de traitement des déchets

P. 16-17  
ZHAW  
nouveau catalyseur

**Biomasse**

→ **Algues**  
On regroupe sous le nom d'algues des organismes qui vivent dans l'eau et réalisent la photosynthèse. Elles peuvent être utilisées comme biocarburant par différents procédés.

→ **Déchets de bois**  
Environ 5 à 10 kg de bois sont nécessaires pour produire 1 kg de BTL.

→ **Déchets verts**  
Une voiture au gaz naturel/biogaz peut parcourir 1 kilomètre avec le rendement en biogaz de 20 peaux de bananes fermentées.

→ **Huiles alimentaires usagées**  
Les huiles usagées peuvent être retraitées et utilisées comme matière première secondaire grâce à différents procédés de raffinage. Un litre d'huile usagée permet d'obtenir environ 0,9 litre de carburant.

→ **Déchets d'abattoir**  
Qu'il s'agisse d'huile végétale liquide ou de graisse animale solide ou semi-solide, les deux ont une structure chimique identique et ne diffèrent que par la nature de leurs acides gras. Les graisses animales permettent également de produire assez facilement du biodiesel.

→ **Lisier et fumier**  
Pour être utilisé comme carburant, le lisier requiert des installations qui convertissent son potentiel gazeux, le transformant en gaz naturel de qualité.

→ **Boues d'épuration**  
Les boues produites dans les stations d'épuration des eaux usées peuvent être recueillies dans des digesteurs et utilisées pour la production de biogaz.

P. 14-15  
Micro-algues  
comme matière première

**CO<sub>2</sub>**  
Dioxyde de carbone  
Composé chimique de carbone (→ C) et d'oxygène (symbole O). Le dioxyde de carbone est un gaz incombustible, acide, incolore et soluble dans l'eau. Composant important du cycle mondial du carbone et composant naturel de l'air, le CO<sub>2</sub> joue un rôle essentiel comme gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre.

**C**  
Carbone (carbonium)  
Le carbone est présent dans la nature sous forme pure (par exemple graphite, diamant) ou sous forme chimiquement liée (par exemple dioxyde de carbone, biomasse). Grâce à leur propriété particulière – pouvoir former diverses molécules complexes –, le carbone et ses composés sont considérés comme une condition préalable à la vie sur notre planète.

**Production d'électricité renouvelable**

**H<sub>2</sub>O**  
Eau

**N<sub>2</sub>**  
Azote

P. 18-23  
Conteneurs PtX KIT

**PtX**  
Power-to-X  
électricité en X (X = gaz, liquide, partiellement solide)  
L'hydrogène (→ H<sub>2</sub>) est produit à partir de l'eau par électrolyse à l'aide d'électricité (excédentaire et renouvelable). L'hydrogène peut ensuite être utilisé avec le dioxyde de carbone (→ CO<sub>2</sub>) pour produire de l'e-méthane ou des carburants synthétiques liquides. Ce processus s'appelle «Power-to-X». Parmi les domaines d'utilisation importants, on compte les applications du secteur des transports difficiles à électrifier, notamment l'aviation et la navigation, où des carburants à haute densité énergétique continueront d'être nécessaires.

**BtX**  
Biomass-to-X  
Biomasse en X (X = gaz, liquide, partiellement solide)  
Le biogaz (BtG) est principalement produit à partir de la fermentation de la biomasse des déchets, des boues d'épuration et du purin. Toute la biomasse peut être convertie en gaz de synthèse puis transformée en carburants synthétiques tels que le biodiesel (BtL) grâce au procédé dit de Fischer-Tropsch.

## Carburants gazeux

P. 6-9  
Carburants gazeux

**H<sub>2</sub>**  
Hydrogène (hydrogenium)  
L'hydrogène est un gaz incolore, inodore et combustible. C'est l'élément chimique dont la masse atomique est la plus faible. Utilisé dans une pile à combustible, il produit de l'énergie électrique qui sert à entraîner un moteur électrique. Le seul «déchet» produit est de l'eau pure.

**NH<sub>3</sub>**  
Ammoniaque  
L'ammoniaque est un composé chimique d'azote et d'hydrogène. C'est un gaz à l'odeur âcre, incolore, soluble à l'eau et toxique. L'ammoniaque peut également servir de moyen de stockage et de transport pour l'hydrogène (→ P. 24).

P. 24-25  
NH<sub>3</sub> comme carburant

**B-CH<sub>4</sub>**  
Bio-méthane/biogaz

**E-CH<sub>4</sub>**  
Gaz naturel synthétique/e-méthane

## Gaz liquéfiés

**LH<sub>2</sub>**  
Liquid Hydrogen  
Hydrogène liquide

**BGL**  
Liquefied Biogas  
Biogaz liquéfié

**EDM**  
Éther de diméthyle  
L'éther de diméthyle est un gaz incolore, extrêmement inflammable et narcotique. L'EDM, sous-produit de la synthèse du méthanol, est généralement produit directement à partir du gaz de synthèse (CO/H<sub>2</sub>).

**GNL**  
Liquefied Natural Gas  
Gaz naturel liquéfié  
L'appellation GNL est surtout utilisée pour le gaz naturel d'origine fossile, mais aussi pour l'e-méthane ou le bio-méthane et leurs mélanges.

## Carburants liquides

**Bio-éthanol**  
En Suisse, l'alcool produit par la fermentation de biomasse peut être mélangé à l'essence jusqu'à un maximum de 5%.

**Méthanol**  
Un liquide produit synthétiquement, utilisé aussi bien comme carburant que comme base pour d'autres carburants synthétiques.

**HVO (HVH)**  
Hydrotreated Vegetable Oils  
Huiles végétales hydrogénées  
Un carburant pratiquement identique au diesel synthétique peut être produit à partir d'huiles végétales usagées et de graisses animales par hydrogénation chimique avec de l'hydrogène.

**EMC**  
Ester méthylique de colza, également ester méthylique d'huile de colza ou diesel de colza  
L'ester méthylique de colza est obtenu par la transformation chimique de l'huile de colza raffinée avec du méthanol. En Europe, l'EMC représente la plus grande part du biodiesel.

**FAME (EMAG)**  
Fatty Acid Methyl Ester  
Ester méthylique d'acide gras  
L'EMAG est actuellement le biocarburant le plus répandu en Europe. L'EMAG de deuxième génération est par exemple produit à partir d'huiles végétales non comestibles ou de graisses animales.

**SAF**  
Sustainable Aviation Fuels  
Carburant aviation durable  
Le SAF/CAD peut être utilisé sans problème dans les avions jusqu'à une teneur maximale de 50% en bio-carburant et constitue une véritable alternative au kérosène fossile. La production de SAF/CAD correspond actuellement à env. 0,01% de la demande mondiale en kérosène et son prix est à peu près trois fois plus élevé.

P. 10-13  
SAF  
Aéroport de Zurich



# Carburants à base de gaz

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> fixés d'ici 2050, une défossilisation du secteur de la mobilité est inévitable. Mais il n'est pas réaliste d'envisager de passer d'ici là à des véhicules purement électriques dans tous les domaines. De nombreuses alternatives aux carburants non fossiles sont cependant déjà utilisées aujourd'hui, parmi lesquelles différents carburants renouvelables à base de gaz.

Aujourd'hui, quand on parle de mobilité et de carburant, on pense d'abord aux voitures et à l'essence ou au diesel. Ce sont certainement les carburants liquides les plus connus et les plus répandus, tous deux produits à partir du pétrole. Mais on utilise aussi principalement des carburants liquides dans les autres domaines de la mobilité. Dans les transports maritimes, par exemple, on utilise surtout du pétrole lourd et du diesel pour les navires de croisière et les porte-conteneurs. Dans l'aviation, le kérosène est le carburant le plus courant, et le diesel et l'essence sont également encore largement utilisés dans les transports publics pour les bus et les locomotives. Il en est de même pour le domaine des engins de chantier et celui de l'armée, qui utilisent presque exclusivement des carburants fossiles.

## Les gaz dans la mobilité

Outre les carburants liquides, différents gaz sont également utilisés comme carburants dans presque tous les domaines de la mobilité. Dans le transport routier, le gaz le plus répandu est le gaz naturel. C'est ce même gaz qui est utilisé dans de nombreux foyers pour la cuisine et le chauffage. Composé principalement de méthane (CH<sub>4</sub>), il est transporté sous pression dans des gazoducs souterrains. Pour que les voitures au gaz naturel disposent d'une autonomie suffisante, leurs réservoirs sont remplis avec une pression de 200 bar à la colonne. C'est pourquoi le gaz naturel sous forme de carburant est appelé GNC (gaz naturel comprimé). Dans le véhicule, le GNC est injecté dans un moteur à essence légèrement modifié.

Pour obtenir une autonomie encore plus grande pour les camions couvrant de longues distances, il est possible de liquéfier le gaz naturel. Le gaz doit alors être refroidi à -161 °C, ce qui réduit son volume à un six-centième du volume du gaz naturel sous une pression normale. Ce gaz naturel liquéfié, ou GNL, est transporté dans des camions-citernes au lieu de passer par le réseau de gaz naturel.

Un autre gaz largement utilisé comme carburant est un mélange de propane et de butane appelé GPL (gaz de pétrole liquéfié). Sa composition est très similaire à celle du gaz contenu dans les bonbonnes de gaz de camping ou les briquets. Contrairement au gaz naturel, le GPL est toujours utilisé sous forme liquéfiée, car il reste liquide même à température ambiante et à une faible pression, inférieure à 10 bar.



Ces dernières années, un autre gaz – l'hydrogène (H<sub>2</sub>) – a gagné en importance comme carburant pour les voitures et les camions. Il diffère du GNC et du GPL à plusieurs égards. Contrairement aux autres gaz, l'hydrogène n'est pratiquement jamais utilisé dans les moteurs thermiques, mais il est converti dans des piles à combustible en une énergie électrique qui alimente ensuite un moteur électrique. De plus, lorsque l'hydrogène est converti en énergie électrique, seule de l'eau pure est produite en plus de la chaleur utilisable, il n'y a donc aucune émission de CO<sub>2</sub>. Dans le cas de l'hydrogène également, le gaz peut être liquéfié de diverses manières pour augmenter sa densité

## «Les gaz renouvelables ont un rôle important à jouer en matière de défossilisation de la mobilité!»

énergétique. On l'appelle alors LH<sub>2</sub> (hydrogène liquide). Toutefois, le coût de liquéfaction de l'hydrogène est nettement supérieur à celui du GNL.

Un autre gaz utilisé dans le secteur de la mobilité est l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Il se distingue également des autres gaz carburants par différentes propriétés. Ainsi, il ne s'agit pas d'un composé hydrocarboné, raison pour laquelle aucun CO<sub>2</sub> n'est produit lors de sa conversion. L'ammoniac comme carburant est abordé plus en détail dans l'article page 24.

## Carburants gazeux durables

La Stratégie énergétique 2050 du Conseil fédéral prévoit l'abandon progressif des sources d'énergie fossiles pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> fixés dans le cadre de l'Accord de Paris sur le climat. Le GNC, le GPL et l'hydrogène ont ceci en commun qu'ils sont actuellement en grande partie d'origine fossile. Cela signifie que leur production, ainsi que la combustion du GNC et du GPL, émettent du CO<sub>2</sub> provenant de sources fossiles.

Pour que soit atteinte une neutralité en CO<sub>2</sub>, ces gaz doivent donc être produits à partir de sources renouvelables telles que la biomasse ou l'électricité renouvelable. C'est techniquement possible pour tous les gaz considérés et déjà mis en œuvre à grande échelle par divers procédés. Le carbone (C) ou le CO<sub>2</sub> nécessaire à la production est prélevé dans la biomasse ou dans l'air ambiant, de sorte que la même quantité de CO<sub>2</sub> est émise lors de la combustion du carburant, d'où un cycle de CO<sub>2</sub> neutre.

## Production de carburants gazeux alternatifs

Il existe un grand nombre de procédés différents pour la production de carburants gazeux alternatifs durables. Ces procédés peuvent être divisés en deux grandes catégories. D'un côté, il y a les procédés qui produisent du gaz en transformant la biomasse. On les regroupe sous l'appellation BtG («Biomass-to-Gas»). Le deuxième groupe est constitué des procédés qui utilisent de l'énergie électrique renouvelable et des matières premières telles que l'eau ou l'air pour produire des gaz synthétiques. On les appelle également PtG («Power-to-Gas»).

Pour que les gaz produits par BtG soient considérés comme durables et renouvelables, la biomasse utilisée pour la production doit être constituée uniquement de déchets. Il peut s'agir par exemple de déchets verts de cuisine, de résidus de récolte, de lisier et de fumier d'exploitations agricoles, de boues organiques de stations d'épuration ou de bois rési-



Colonne de gaz naturel à la gare de Zurich.

duel et de déchets de la sylviculture et de l'industrie. Les algues peuvent également être utilisées comme biomasse (voir article séparé page 16). Les huiles de cuisson usagées et les déchets d'abattoirs pourraient également être utilisés, bien qu'ils soient plus susceptibles de l'être comme matières premières pour les «biofuels» (biocarburants liquides) comme le biodiesel.

Cette biomasse durable peut ensuite être transformée directement en gaz de synthèse par différents procédés, ou convertie par des processus de pourriture et de fermentation en biogaz brut contenant une proportion élevée de biométhane. Ce dernier est purifié, séché puis concentré dans des étapes ultérieures, de sorte qu'on obtient à la fin du biogaz avec une teneur en méthane d'au moins 96%, qui peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou servir au ravitaillement des véhicules au gaz naturel. Ce biogaz peut également être liquéfié. Il est alors appelé BGL (biogaz liquéfié) ou BML (biométhane liquéfié) et est équivalent au GNL.

Dans le cadre de la production de gaz de synthèse durables par des procédés PtG, l'énergie électrique utilisée doit provenir de sources renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique. Dans la plupart des procédés PtG, la première étape consiste à séparer l'eau en hydrogène et en oxygène par un processus d'électrolyse utilisant le courant électrique. Cet hydrogène est appelé «hydrogène vert» dans la mesure où seule de l'électricité renouvelable a été utilisée. Si, pour l'électrolyse, c'est un mélange d'électricité avec une électricité produite au charbon ou de l'électricité nucléaire qui est utilisé, on parle d'hydrogène jaune ou rose et il n'est plus considéré comme un gaz neutre en CO<sub>2</sub>.

Dans les étapes ultérieures du processus, d'autres gaz peuvent être produits à partir de cet hydrogène vert et du CO<sub>2</sub>



provenant par exemple de l'air ou des gaz d'échappement des usines de traitement des déchets (voir également les articles pages 18 et 20) – par exemple du méthane (CH<sub>4</sub>), également appelé e-méthane ou gaz naturel synthétique (GNS) pour le distinguer du gaz naturel et du biogaz, bien qu'ils soient pratiquement tous identiques chimiquement.

De l'éther de diméthyle, ou EDM, peut alors être obtenu à partir du gaz de synthèse par un autre procédé. Ce gaz liquide étant très proche du GPL en termes de composition et d'application comme carburant, il est utilisé comme substitut durable de celui-ci.

#### Avantages des carburants gazeux

Un avantage décisif des carburants gazeux durables est qu'ils peuvent être consommés de manière pratiquement neutre en CO<sub>2</sub>. En outre, la durée nécessaire pour faire le plein est nettement plus courte que pour les véhicules alimentés par batterie et à peine plus longue que pour les carburants liquides. Grâce à leur haute densité énergétique, les gaz liquéfiés conviennent très bien aux longs trajets en camion ou en bateau.

Un autre avantage, outre la réduction du bilan de CO<sub>2</sub>, est la réduction des émissions polluantes du biogaz ou du GNS. Ainsi, la combustion n'émet pratiquement pas de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) ni de particules fines, et l'émission d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) peut également être réduite de plus de 80% par rapport au diesel. L'utilisation d'hydrogène n'entraîne même aucune émission nocive.

En outre, les procédés PtG peuvent être utilisés pour convertir l'électricité excédentaire inutilisée des centrales éoliennes et photovoltaïques produite en été en une forme facilement transportable via l'infrastructure existante du réseau de gaz naturel ou sous forme liquéfiée.

#### Inconvénients des carburants gazeux

L'un des principaux inconvénients des carburants biogènes ou synthétiques durables est leur prix. En raison de la complexité des procédés BtG et PtG, ils sont actuellement largement plus chers que les gaz correspondants issus de sources fossiles. Mais cette situation pourrait changer au cours des prochaines années en raison des progrès technologiques, de l'augmentation de la taille des installations et de la hausse des taxes CO<sub>2</sub> appliquées aux sources d'énergie fossiles.

Un autre inconvénient est la quantité limitée des matières premières nécessaires. D'une part, la biomasse disponible provenant des déchets est limitée pour la production de biogaz. D'autre part, l'électricité renouvelable disponible pour les processus PtG est actuellement encore trop chère et difficilement disponible sous forme d'électricité excédentaire. Cela ne changera que lorsque l'expansion des centrales éoliennes et photovoltaïques aura nettement progressé. Le rendement des centrales photovoltaïques pouvant être nettement supérieur dans d'autres régions du monde, on peut supposer que, pour des raisons économiques, la production de gaz de synthèse par des procédés PtG se situera principalement dans ces régions, d'où les carburants seront ensuite importés. Une autosuffisance de la Suisse en carburants gazeux biogènes et synthétiques est difficilement réalisable.

Un autre problème pour les carburants gazeux réside dans la demande de gaz dans d'autres secteurs. Une grande partie du biogaz produit est par exemple déjà convertie en chaleur et en électricité dans des centrales de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE). Lorsque les centrales nucléaires suisses seront fermées au cours des prochaines années, la transformation du biogaz en électricité gagnera en importance, notamment pour pouvoir couvrir les pénuries d'électricité en hiver. Mais l'hydrogène et le mé-

thane sont également des matières premières demandées dans l'industrie, et si le prix des gaz fossiles augmente, la demande de H<sub>2</sub> vert et de biogaz s'en trouvera accrue. En outre, la biomasse et les gaz de synthèse sont également très convoités pour la production de carburants liquides tels que le CAD/SAF (Carburant Aviation Durable/Sustainable Aviation Fuel), pour lequel il n'existe pratiquement aucune alternative (voir article page 12). Une bataille pour les matières premières va donc s'engager entre les différents secteurs.

#### Perspectives

Les carburants à base de gaz, en particulier ceux qui sont produits de manière durable comme le biogaz ou l'hydrogène vert, sont importants pour faire avancer aussi rapidement que possible la défossilisation du secteur de la mobilité. Dans plusieurs domaines, aucune autre solution n'est disponible pour l'instant, alors que la technologie nécessaire l'est et est prête à être utilisée. Dans le transport des marchandises, en particulier, de plus en plus d'entreprises de transport misent sur les carburants à base de gaz, car elles sont ainsi quasiment neutres en CO<sub>2</sub>, mais présentent de nets avantages par rapport aux camions alimentés par batterie en termes d'autonomie et de flexibilité. Dans la navigation également, le nombre de navires au gaz ne cesse d'augmenter, car la neutralité en CO<sub>2</sub> ne peut guère être atteinte autrement dans ce secteur.

Il est probable que, dans un avenir proche, les sources de biomasse disponibles seront utilisées de manière plus intensive pour la production de carburant. Plus tard, lorsque la technologie des procédés PtG sera devenue plus efficace et donc plus compétitive, et qu'un surplus d'électricité suffisant sera disponible grâce à l'expansion des centrales photovoltaïques et éoliennes, les carburants synthétiques seront prêts à remplacer les sources d'énergie fossiles.

#### Récapitulatif des carburants gazeux

Abréviation	Désignation	Gaz	Forme d'utilisation
GNC	Compressed Natural Gas (gaz naturel comprimé)	Méthane de sources fossiles, gaz naturel	Gaz comprimé
Biogaz	Biogaz	Biométhane	Gaz comprimé
GNS	Synthetic Natural Gas (gaz naturel synthétique)	E-méthane	Gaz comprimé
H <sub>2</sub>	Hydrogène	Hydrogène	Gaz comprimé
NH <sub>3</sub>	Ammoniac	Ammoniac	Gaz comprimé
GNL	Liquefied Natural Gas (gaz naturel liquéfié)	Méthane	Gaz liquéfié
BGL/BML	Liquefied Biogas/Biomethane (biogaz liquéfié/biométhane liquéfié)	Biométhane	Gaz liquéfié
LH <sub>2</sub>	Liquid Hydrogen (hydrogène liquide)	Hydrogène	Gaz liquéfié
GPL	Liquefied Petroleum Gas (gaz de pétrole liquéfié)	Mélange de propane et de butane	Gaz liquide
EDM	Éther de diméthyle	Éther de diméthyle	Gaz liquide

# L'avenir de l'aviation

Emanuel Fleuti s'occupe des questions environnementales concernant l'aéroport de Zurich. Actuellement, il s'agit principalement du changement climatique.

**Avenergy: Monsieur Fleuti, vous dirigez depuis 1990 le Département Protection de l'environnement de l'Aéroport de Zurich SA. Comment votre travail a-t-il évolué au cours de ces trois décennies?**

**Emanuel Fleuti:** Il a beaucoup changé, suivant en cela l'évolution technologique et sociale. Au début, notre département a dû faire face à des problèmes locaux comme la pollution des eaux usées autour de l'aéroport. Nous avons résolu ces problèmes. Aujourd'hui, nous sommes confrontés à des pro-

blèmes mondiaux comme les particules fines et surtout la pollution climatique.

**Avenergy: Quel est l'objectif de votre activité?**

**Emanuel Fleuti:** Le même qu'il y a 30 ans: il s'agit de réduire les effets indésirables sur l'environnement qu'induisent nos activités d'exploitant d'aéroport. C'est-à-dire de trouver un équilibre entre le besoin de mobilité de notre société et la protection de l'environnement. Nous devons trouver la meilleure solution pour les deux côtés.



«En aviation, les compromis en matière de sécurité sont exclus.»

Emanuel Fleuti

Chef de la durabilité et Environnement, Flughafen Zürich AG

**Avenergy: Les SAF («Sustainable Aviation Fuels» = carburants durables pour l'aviation) promettent une meilleure protection du climat dans le trafic aérien. Les SAF sont-ils à juste titre qualifiés de durables?**

**Emanuel Fleuti:** Oui, les SAF peuvent être considérés comme durables, y compris ceux qui sont déjà disponibles aujourd'hui. D'abord, ils sont en grande partie non fossiles; ensuite, ils n'entrent pas en concurrence avec d'autres besoins humains existentiels.

**Avenergy: Qu'entendez-vous par là?**

**Emanuel Fleuti:** Les SAF biogènes de première génération étaient fabriqués à partir d'aliments tels que le soja. On ne gagne pas grand-chose à proposer des vols «propres» si, parallèlement, le nombre de personnes souffrant de la faim dans le monde augmente. Les SAF d'aujourd'hui, ceux de la deuxième génération, sont fabriqués sans matières premières comestibles et sans exploitation de terres qu'il faut déboiser ou sur lesquelles on pourrait plutôt faire des cultures alimentaires.

**Avenergy: Comment les SAF sont-ils fabriqués aujourd'hui?**

**Emanuel Fleuti:** Il existe des SAF synthétiques et, comme auparavant, des SAF biogènes. L'avenir appartient aux SAF synthétiques composés d'eau, de dioxyde de carbone et d'un apport élevé en énergies renouvelables. Ces carburants nous permettront de nous pas-



Le processus de rechargement

ser entièrement de CO<sub>2</sub> fossile, mais ne seront malheureusement pas disponibles en grande quantité avant un certain temps. Les SAF biogènes de deuxième génération déjà utilisés aujourd'hui sont à 80% non fossiles. Ils ne sont plus produits à partir d'aliments, mais d'huiles comestibles usagées ou de déchets d'abattoirs. Depuis peu, des déchets de bois y sont également ajoutés. Il s'agit donc de déchets qui ont une valeur énergétique élevée, mais qui ont déjà lié le CO<sub>2</sub> nécessaire à leur production.

**Avenergy: Est-il difficile de trouver suffisamment de matières premières pour les SAF biogènes de cette deuxième génération?**

**Emanuel Fleuti:** Mangez plus de frites si vous voulez soutenir les carburants durables! Plus sérieusement, quand les restaurants ont fermé à cause de la pandémie et qu'on n'a pratiquement plus mangé de frites, la disponibilité des matières premières des SAF biogènes s'est effectivement dégradée. La crise de coréa a mis en évidence leurs limites, ce

qui plaide aussi en faveur des carburants synthétiques à long terme.

**Avenergy: Les carburants durables d'aujourd'hui sont-ils sûrs? Y a-t-il lieu d'avoir des craintes en tant que passager si le réservoir de l'avion est rempli de SAF?**

**Emanuel Fleuti:** Absolument pas. En aviation, les compromis en matière de sécurité sont exclus. Il y a une double certification. Le carburant est d'abord certifié comme biogène, puis comme carburant aviation. Ou, pour être plus précis, les SAF sont d'abord testés selon la norme ASTM D7566, puis mélangés à du carburant fossile et enfin certifiés à nouveau selon la norme ASTM D1655 Jet-A1. Ils sont donc identiques au kérosène classique et il n'existe plus aucune distinction.

**Avenergy: Pourquoi et dans quelle proportion le mélange de SAF avec du carburant fossile est-il nécessaire?**

**Emanuel Fleuti:** Ce mélange est encore nécessaire actuellement car les

jointes des anciens réacteurs ont encore besoin d'être lubrifiées. Pour cela, le kérosène est nécessaire car il a une teneur aromatique plus élevée que les SAF. L'addition de SAF est donc limitée à 50% au maximum. Avec une certaine marge de sécurité, il en résulte une pratique de marché établie à env. 35% concernant le taux de SAF. Mais la teneur réelle en SAF par réservoir d'avion est négligeable sur tous les vols – même si une compagnie aérienne commandait exclusivement des SAF.

**Avenergy: Pourquoi?**

**Emanuel Fleuti:** D'un point de vue technique, les SAF peuvent être utilisés en logistique exactement de la même manière que le kérosène. Comme vous le savez, les deux carburants sont identiques. En d'autres termes, il ne sert à rien de mettre en place une deuxième chaîne logistique et, par exemple, d'utiliser de l'acier coûteux et à forte intensité en CO<sub>2</sub> pour installer des réservoirs supplémentaires. En définitive, le système fonc-

tionne de la même manière que pour la commande et la livraison d'électricité. Que je commande de l'électricité verte ou des SAF, je reçois le même produit que les acheteurs d'électricité conventionnelle ou de kérosène, un mélange qui correspond à la totalité des parts d'achat.

**Avenergy: Cela ne réduit-il pas l'intérêt de commander des SAF si je continue à voyager avec un avion presque entièrement alimenté en kérosène?**

**Emanuel Fleuti:** Sur le plan psychologique, bien sûr, ce serait formidable si je pouvais dire: Aujourd'hui, nous volons exclusivement avec des SAF! Mais sur le plan rationnel, l'impact sur l'environnement reste le même. Même si, en fin de compte, tout le monde reçoit le même carburant, je peux quand-même avoir la conscience tranquille car j'ai commandé et payé des SAF et ainsi fait ma part pour protéger l'environnement.

**Avenergy: En Suisse, un projet pilote sur l'utilisation des SAF a été lancé en 2020 dans le cadre du Forum économique mondial (WEF) de Davos. Quelles ont été les conclusions de ce projet?**

**Emanuel Fleuti:** Le projet a mis le doigt sur deux défis, sur lesquels nous avons continué à travailler depuis lors. Le premier concerne le processus d'approvisionnement. La Suisse est un pays très réglementé. La procédure d'importation des carburants aviation comprenant des biocarburants n'avait pas encore été définie jusqu'alors. Les nouveaux produits chimiques, par exemple, doivent être documentés et enregistrés. Entre-temps, concernant cette question, nous avons déjà trouvé des solutions avec l'Office fédéral de la santé publique ou l'administration des douanes. Avenergy a contribué à accélérer ce processus.

**Avenergy: Et le deuxième défi?**

**Emanuel Fleuti:** Le projet pilote a montré à quel point la logistique des SAF est exigeante. La quantité relativement faible de carburant que nous avons commandée pour les avions d'affaires dans le cadre du WEF a été livrée à Zurich depuis la Belgique dans cinq camions-citernes. Il nous a fallu trois heures pour décharger les 70 000 premiers litres. Dans une

même durée, nous déchargeons normalement un train-bloc contenant 1,6 million de litres de kérosène, soit plus de vingt fois plus. Pour nous, cela signifie qu'il est indispensable que les carburants SAF ne soient pas livrés par camion, mais par un train-bloc rempli, qui va de son point de départ jusqu'à Zurich.

**Avenergy: Un autre défi, peut-être le plus important, est lié à l'efficacité logistique: les coûts élevés des SAF.**

**Emanuel Fleuti:** C'est exact. Alors que le prix du kérosène conventionnel dépend principalement de facteurs géopolitiques, celui des SAF est déterminé par les coûts de production et de livraison. Il dépend du prix des matières premières, des processus de production, des possibilités de livraison et donc aussi et surtout des quantités demandées. Actuellement, le prix du marché pour les SAF purs, qui s'élève à 2400 francs suisses par tonne, est quatre fois plus élevé que celui du kérosène, qui coûte environ 600 francs suisses par tonne. Les SAF synthétiques ne sont pas encore disponibles. Selon les estimations actuelles, ils seront au moins deux fois plus chers que les SAF biogènes lorsqu'ils seront lancés sur le marché.

**Avenergy: Une compagnie aérienne peut-elle financer du carburant écologique à long terme?**

**Emanuel Fleuti:** Que dit le proverbe? «There is no free lunch.» (il n'y a rien de gratuit) Nous devons prendre conscience que la mobilité devra coû-

ter plus cher à l'avenir. Les compagnies aériennes ont déjà de l'expérience dans la répercussion des majorations. Dans les années 70, le prix du pétrole a augmenté si rapidement qu'il était impossible de réagir avec le système tarifaire normal. Une taxe sur le carburant a donc été introduite du jour au lendemain, la «Fuel Surcharge», que nous avons conservée sous forme de surtaxe sur les billets d'avion même après la crise pétrolière.

**Avenergy: En Suisse, la révision de la loi sur le CO<sub>2</sub> avait également prévu une augmentation des billets d'avion sous forme de taxe sur le CO<sub>2</sub>. Mais les électeurs ont rejeté la révision, et donc l'augmentation du prix des billets d'avion. Un coup dur pour les SAF?**

**Emanuel Fleuti:** Oui et non. Oui, parce que la révision aurait été un premier pas vers des tarifs aériens plus durables. Non, parce que la proposition de révision était tout sauf idéale. 51% de la taxe sur le CO<sub>2</sub> auraient été reversés à la population, donc à la consommation, qui aurait à son tour contribué à polluer l'environnement en générant du CO<sub>2</sub>. Les 49% restants n'auraient pas non plus financé directement les SAF mais auraient été versés dans un fonds climatique dont l'utilisation n'était pas claire. Le refus de la révision signifie que nous sommes de retour à la case départ et que nous pouvons chercher une solution efficace et harmonisée au-delà des frontières nationales plutôt qu'une solution helvétique isolée.

## Faits

2-3%

C'est la part des émissions de CO<sub>2</sub> d'origine humaine représentée par le trafic aérien dans le monde.

10%

C'est la part du trafic aérien intérieur, des forces aériennes et du trafic aérien international en Suisse.

2050

D'ici là, la Suisse devrait être neutre sur le plan climatique : elle ne devrait plus émettre de gaz à effet de serre.

100%

Rolls-Royce a effectué avec succès de premiers essais sur un moteur d'avion d'affaires pourvu de ce pourcentage de SAF. Selon l'entreprise, cela permettrait de jeter les bases de l'homologation de ce type de carburant. Actuellement, les SAF ne sont approuvés que pour les mélanges jusqu'à 50% avec du kérosène conventionnel.

300 000

C'est le nombre approximatif de vols effectués depuis 2016 avec un mélange de SAF.



**Avenergy: En définitive, le problème du coût des SAF reste étroitement lié à la quantité de leur demande.**

**Emanuel Fleuti:** C'est vrai. Dans ce contexte également, le développement à l'étranger est important. La Commission européenne travaille actuellement sur une législation qui prévoit un mélange obligatoire de SAF à l'échelle de l'UE, avec une part de 2 à 5 pour cent par exemple dans un premier temps. La Commission souhaite que cette législation entre en vigueur dès 2023, soit plus tôt que ce que de nombreuses compagnies aériennes imaginent aujourd'hui.

**Avenergy: Quelle est l'importance des SAF pour le futur modèle économique des compagnies aériennes?**

**Emanuel Fleuti:** Selon moi, ils sont essentiels. L'aviation ne peut pas échapper à l'objectif mondial de neutralité climatique d'ici 2050. 80% des émissions de l'aviation ne peuvent être remplacées par des énergies renouvelables. Nous ne pouvons donc pas passer à côté des SAF synthétiques. Les SAF biogènes ne constituent qu'une étape intermédiaire, mais indispensable. Nous ne pouvons pas rester les bras croisés et attendre que le carburant synthétique soit commercialisable.

**Avenergy: Les compagnies aériennes ont-elles reconnu l'importance des SAF? Participent-elles à leur développement?**

**Emanuel Fleuti:** J'identifie trois attitudes différentes face à cette question.

Un groupe de compagnies aériennes a reconnu la nécessité d'agir. Elles sont prêtes à jouer un rôle de pionnier, dont pourra également être tiré un profit commercial. Un deuxième groupe de compagnies considère que les carburants durables sont importants mais en avançant des raisons pour lesquelles elles ne peuvent ou ne veulent pas encore participer à leur développement. Un troisième groupe ignore la question et se concentre uniquement sur le prix. La pandémie et la chute du nombre de vols ont contribué à augmenter le troisième groupe.

**Avenergy: Et l'Aéroport de Zurich SA? Montre-t-il l'exemple?**

**Emanuel Fleuti:** Nous nous efforçons de le faire, même si nos activités ont un impact beaucoup plus faible sur l'environnement que celles des compagnies aériennes. Mais nous nous sommes également engagés à atteindre l'objectif «net zéro d'ici 2050» et avons défini une feuille de route qui prévoit l'utilisation de combustibles et de car-

## Emanuel Fleuti

Chef de la durabilité et Environnement, Flughafen Zürich AG

Emanuel Fleuti a étudié la géographie et la climatologie à l'Université de Berne. Il dirige depuis 1990 le Département Protection de l'environnement de l'Aéroport de Zurich SA. Expert en protection de l'environnement, il siège dans plusieurs comités d'aviation du monde entier.

burants synthétiques. Aujourd'hui, déjà, nous encourageons la recherche et le développement de carburants synthétiques produits par l'énergie solaire en achetant le carburant à prix coûtant et en l'utilisant dans les véhicules terrestres de l'aéroport. Nous lançons également des projets pilotes comme celui du WEF, les mettons en œuvre et en tirons des enseignements importants pour le secteur.

**Avenergy: Regardons vers l'avenir: comment le trafic aérien va-t-il se développer au cours des 20 prochaines années?**

**Emanuel Fleuti:** C'est difficile à prévoir. Je pense pouvoir affirmer que la mobilité existera toujours à l'avenir et qu'elle augmentera, au moins dans la mesure où la population continuera de croître. Nous continuerons de voler à l'avenir: ce qui était autrefois un trajet quotidien est aujourd'hui un vol quotidien: nous nous sommes habitués à une plus grande mobilité. Il n'y a pas de retour en arrière possible. Mais l'avion va devenir plus cher, nous l'utiliserons donc à meilleur escient. En fin de compte, ce n'est pas le vol qui est le problème, mais le CO<sub>2</sub> qui sort à l'arrière du réacteur. C'est là-dessus que nous devons concentrer nos efforts et ne pas jeter le bébé avec l'eau du bain. Selon les prévisions actuelles, les carburants synthétiques devraient être commercialisables à partir de 2035. Comme le problème des eaux usées à l'aéroport, le problème climatique lié à l'aviation serait alors également résolu.

# La biotechnologie au service d'un nouveau carburant

Comme base des carburants renouvelables, les algues offrent une perspective séduisante qui fait l'objet de recherches et de développements depuis de nombreuses années. Mais, dans les conditions actuelles, le chemin du laboratoire de biotechnologie jusqu'au marché des carburants est encore long et difficile.

Lorsque nous pensons aux algues, nous avons souvent des images désagréables à l'esprit: celles d'une plage de sable idyllique transformée du jour au lendemain en un amas d'algues peu appétissant. Ou d'une tache verte toxique qui se répand sur la façade autrefois blanche d'une maison. Même l'eau cristalline des piscines bio n'est pas à l'abri d'une prolifération d'algues colorées.

Pourtant, les algues sont des organismes extrêmement intéressants et polyvalents (voir encadré). On les utilise de plus en plus souvent pour des applications commerciales. Elles sont connues sous forme d'aliments et d'additifs alimentaires: déjà très répandues en Asie, les algues sont également de plus en plus souvent présentes dans nos assiettes.

Elles peuvent avoir des propriétés physiologiques nutritionnelles, thérapeutiques et pharmacologiques intéressantes. Elles peuvent également servir de matière première pour les matériaux de construction ou le bioplastique.

## Les algues, une source d'énergie prometteuse

Dans le contexte de la production d'énergie, les microalgues unicellulaires présentent un intérêt particulier. Les algues stockent sous forme de sucres et de graisses l'énergie de la lumière solaire captée par photosynthèse. Les graisses sont intéressantes dans la recherche de nouvelles sources de carburant car elles permettent de produire du biodiesel par un processus chimique. Les microalgues poussent rapidement

## Les microalgues pourraient-elles être la matière première idéale pour produire des carburants et faire concurrence aux fossiles?

se cultivent relativement sans problème et peuvent même être génétiquement modifiées. Par rapport aux plantes terrestres, le rendement de la biomasse par surface et par an est beaucoup plus élevé: une culture d'algues à haut rendement peut par exemple produire plus de dix fois plus d'huile que le colza.

Mais surtout, la culture des microalgues peut se pratiquer indépendamment des précieuses terres agricoles. Leur culture est envisageable dans des bioréacteurs en verre empilés les uns sur les autres pouvant être installés n'importe où, de préférence sur des terrains inutilisables à d'autres fins. Compte tenu de ces avantages, les microalgues pourraient-elles être la matière première idéale pour produire des carburants et même faire concurrence aux fossiles?

### Les hauts et les bas de la recherche sur les algues

La recherche dans le domaine des biocarburants fabriqués à partir d'algues a connu un premier essor dans les années 1970 et 1990. Puis, pendant une brève période comprise entre 2009 et 2017 environ, cette technologie de carburant alternatif est devenue la coqueluche de l'industrie des énergies alternatives renouvelables et a été saluée comme la solution au problème climatique. Les entreprises de biotechnologie se sont associées à de grandes entreprises comme Shell, Chevron et Exxon. Leur objectif était de trouver, de tester et d'améliorer génétiquement des souches d'algues pour renforcer et accélérer leur croissance, pour que leur teneur en graisses augmente et en faire ainsi de véritables superstars de l'industrie des biocarburants.

Mais après de nombreux revers, des tests ratés et des coûts de production énormes et imprévus, le biocarburant à base d'algues a depuis perdu son rôle de favori. Entre autres facteurs, l'effondrement provisoire du prix du pétrole a certainement joué un rôle: les entreprises sont redevenues réticentes. D'autres technologies de production d'énergies renouvelables, à savoir l'électricité photovoltaïque et éolienne, ont par ailleurs fait de grands progrès entre-temps.

### Le parcours difficile d'un carburant à base d'algues

La création de parfaites microalgues dans les laboratoires de biotechnologie est un processus long et coûteux. Et pourtant, ce n'est que la première étape sur le long chemin du marché des carburants. Des méthodes ont dû être développées et affinées pour récolter les algues, en décomposer les parois cellulaires par des solvants chimiques, puis extraire les composants tels que les graisses, les protéines et les glucides afin de pouvoir les transformer en biocarburant lors d'une ultime étape de traitement. De nombreux projets de recherche actuels sont consacrés à la question du traitement le plus efficace possible des algues comme matière première. Le plus grand défi consiste cependant à réaliser l'ensemble du processus à grande échelle. Les microalgues doivent par exemple pouvoir être cultivées dans d'immenses réservoirs extérieurs, ce qui nécessite de vastes surfaces et d'énormes quantités d'eau douce ou salée.

Cette impressionnante complexité explique pourquoi l'industrie des biocarburants à base d'algues est encore aujourd'hui une opération spécialisée et très coûteuse, pratiquée uniquement par ceux qui peuvent se le permettre et acceptent de prendre un risque élevé.

### Le dernier mot n'a pas encore été dit

En toute objectivité, les biocarburants à base d'algues restent une option séduisante, même si leur éclat initial s'est légèrement estompé. Tout d'abord, les algues constituent, au même titre que les autres sources d'énergie d'origine biogène, une alternative aux énergies renouvelables à base d'électricité. Après tout, son succès dépend de la capacité à fournir suffisamment d'électricité sans CO<sub>2</sub>. Mais les mêmes conditions s'appliquent également aux biocarburants de deuxième génération: leur compétitivité et leur disponibilité reposent sur les déchets et les résidus biogènes. Il apparaît déjà que ces matières premières risquent de venir à manquer pour un approvisionnement global à l'échelle mondiale. Les algues à croissance rapide pourraient représenter la solution. La hausse des prix du pétrole et du gaz naturel telle que nous l'avons connue ces derniers temps pourrait constituer l'argument décisif contribuant au succès des biocarburants à base d'algues.

### «Qu'est-ce que les algues?»

C'est là une question étonnamment complexe. Appartenant aux organismes les plus simples, les algues utilisent la lumière et le dioxyde de carbone pour produire de la biomasse. Les algues vertes, par exemple, utilisent la photosynthèse pour se développer. Mais les algues ne sont pas considérées comme des plantes. Il s'agit plutôt d'un groupe d'organismes extrêmement variés et génétiquement disparates provenant de quatre domaines biologiques: les bactéries, les chromistes, les plantes et les protozoaires. De récentes recherches indiquent qu'il existe entre 30 000 et 1 million d'espèces d'algues sur terre, avec une diversité étonnante allant des diatomées microscopiques (organismes marins unicellulaires qui produisent plus de 20% de l'oxygène à l'échelle mondiale) aux algues géantes (qui peuvent atteindre une hauteur de 30 mètres). Les algues contiennent les composants de toute vie organique: protéines, lipides, glucides et acides nucléiques. Les lipides, en particulier, peuvent être utiles pour la production d'énergie.

Source: mongabay.com

# Vers le captage direct du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère

L'Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) a mis au point une nouvelle catégorie de matériaux pour capter le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et des flux de gaz d'échappement. Le matériau peut également être régénéré à la température la plus basse signalée à ce jour et le CO<sub>2</sub> récupéré avec un apport énergétique considérablement réduit.



**Prof. Dr Daniel M. Meier**  
Chef du laboratoire de génie des procédés,  
ZHAW School of Engineering



**Dr Nobutaka Maeda**  
Assistant de recherche du laboratoire de génie des procédés,  
ZHAW School of Engineering



Laboratoire de génie des procédés/Remplissage du réacteur

Par «Carbon Capture», on entend le captage du CO<sub>2</sub> de l'air ambiant ou des gaz d'échappement de combustion. Entre-temps, le dioxyde de carbone est capté – différentes substances liquides ou solides sont appropriées. Ensuite, le CO<sub>2</sub> doit être dissous, d'une part, pour le stocker (on parle alors de «Carbon Capture and Storage», CCS) ou pour l'utiliser comme matière première pour les processus chimiques – «Carbon Capture and Usage» (CCU) est une étape technologique intermédiaire importante dans la production d'e-fuels à partir de sources renouvelables de matières premières (voir p. 18–23).

Le laboratoire de génie des procédés de l'Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) de la ZHAW School of Engineering de Winterthour, sous la direction du Professeur Dr Daniel M. Meier et avec le travail scientifique du Dr Nobutaka Maeda, a élargi à un matériau hybride (ci-après IMPE-Cap) les technologies actuellement disponibles pour le captage direct du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Comme les matériaux classiques de ce type, ce matériau filtrant hybride peut adsorber le CO<sub>2</sub> de l'air à température ambiante.

Il s'agit d'un support solide recouvert de différents composants chimiques. Cela permet d'obtenir des conditions de processus plus douces pour les cycles répétés, c'est-à-dire adsorber et régénérer. Une technique spectroscopique de pointe a montré que l'IMPE-Cap affaiblissait la liaison chimique entre le CO<sub>2</sub> et la surface du matériau, ce qui entraîne la libération de CO<sub>2</sub> (régénération du matériau) à 50 °C seulement, la température la plus basse jamais signalée pour ce processus.

Grâce à la faible température de régénération, l'IMPE-Cap a un potentiel dans les applications industrielles au fonctionnement longue durée pour économiser de l'énergie et réduire les coûts d'exploitation pour la capture de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère ou des gaz d'échappement des centrales élec-

triques et des usines. Le travail du laboratoire de génie des procédés a été publié dans la revue «Energy & Fuels» d'ACS Publications (Energy Fuels 2021, 35, 9059–9062).

Depuis, le groupe de recherche a mis au point un autre matériau destiné au même usage, qui peut adsorber davantage de CO<sub>2</sub> et être régénéré à des températures inférieures à 50 °C. Ces résultats prometteurs montrent que la recherche s'efforce en permanence de créer des conditions-cadres plus favorables aux applications industrielles qui peuvent, entre autres, agir contre le changement climatique anthropique sans qu'il y ait à restreindre le niveau de vie auquel nous sommes habitués.

## Prof. Dr Daniel M. Meier

Le Professeur Dr Daniel M. Meier a étudié et obtenu son doctorat à l'École Polytechnique Fédérale (EPF) de Zurich. Depuis août 2021, il est professeur à l'Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW). Son groupe de recherche est spécialisé dans les domaines suivants: procédés de séparation, catalyse hétérogène, analyse des procédés, production de particules et technique de réaction pour les procédés continus et discontinus.

## Dr Nobutaka Maeda

Nobutaka Maeda a étudié et obtenu son doctorat à l'Université de Kanagawa, au Japon. Depuis avril 2020, il travaille comme chargé de recherche au laboratoire de génie des procédés de l'Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW) à Winterthour, où il supervise différents projets dans les domaines du captage et de l'utilisation du CO<sub>2</sub>, de la conversion énergétique, de l'épuration des gaz résiduels, du traitement des eaux usées et de la synthèse chimique fine.

# Le carburant qui vient de l'air

Sans les carburants synthétiques, vols, voyages en bateau ou autres transports lourds neutres sur le plan climatique seraient inconcevables. En visite chez le professeur Roland Dittmeyer, nouvel espoir de la politique climatique.



**Roland Dittmeyer**

Ingénieur chimiste et professeur de technologie des microprocessus à l'Institut de Technologie (KIT) de Karlsruhe.

## I: Ce qui est en jeu

Le professeur Roland Dittmeyer est assis dans la sobre salle de réunion du bâtiment 605 situé sur le vaste site du KIT, l'Institut de technologie de Karlsruhe – une sorte d'EPF du Land allemand de Bade-Wurtemberg, centre de recherche d'importance nationale.

Depuis dix ans, le professeur Dittmeyer, qui dirige l'Institut d'ingénierie des microprocessus, s'efforce de faire progresser les carburants synthétiques. Au début, seule la communauté des chercheurs proches s'intéressait à son travail. Mais aujourd'hui, à l'automne 2021, même la candidate et les deux candidats à la chancellerie allemande discutent des avantages et

des inconvénients des carburants synthétiques.

Le sujet de Dittmeyer, alors marginal pour la société, se retrouve au cœur des débats politiques publics.

«Ce n'est pas trop tôt», déclare Dittmeyer, mettant un instant de côté sa réserve scientifique. «L'objectif de stopper le changement climatique est une priorité absolue. Depuis le mouvement climatique autour de Greta Thunberg, cet objectif a fait l'objet d'une grande attention. Cela me rend optimiste. Aujourd'hui, il est incontestable que nous devons entreprendre quelque chose contre le réchauffement climatique, y compris en matière de mobilité – et qu'il faut que ce

soit dans les dix prochaines années, sinon il sera trop tard.»

Le domaine de recherche de Dittmeyer est très populaire chez les étudiantes et étudiants du KIT. Beaucoup veulent contribuer à un monde meilleur.

En dehors du campus également, tout le monde est aujourd'hui d'accord : une nouvelle mobilité est nécessaire. Seule question: laquelle, et comment l'atteindre?

## II: Une boucle pleine de charme

On crée généralement quelque chose de nouveau en optimisant les choses qui existent et en les reliant entre elles – ou plutôt en les couplant.

Pour la première fois au monde, Dittmeyer et son équipe ont réussi à mettre en service une installation intégrée qui produit des carburants respectueux du climat (essence, diesel ou kérosène) à partir d'air, d'eau et

## Prof. Roland Dittmeyer

Roland Dittmeyer est ingénieur chimiste et professeur de technologie des microprocessus à l'Institut de Technologie (KIT) de Karlsruhe. Il y dirige le Energy Lab 2.0, un laboratoire dans lequel on effectue des recherches sur les systèmes énergétiques de demain.



Synthèse de biocarburants et de carburants à base d'électricité dans l'Energy Lab 2.0 du KIT

d'électricité renouvelable. Ce faisant, quatre processus sont couplés entre eux (voir page 20–21).

Ce succès très remarqué au niveau international a vu le jour dans le cadre d'un projet Kopernikus financé par le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche à hauteur de 10 millions d'euros par an depuis 2016, et pas seulement pour le sujet de Dittmeyer.

Le chercheur Dittmeyer, par ailleurs totalement acquis à la sobriété, à l'argumentation rationnelle et au raisonnement rigoureux, utilise le terme lyrique de «charme».

Selon lui, l'usine compacte de production de carburant construite sur le terrain du KIT, qui utilise l'électricité pour produire des carburants liquides, a du charme. Le dioxyde de carbone nécessaire au processus provient directement ou indirectement de l'atmosphère. Ainsi, le CO<sub>2</sub> émis lors de l'utilisation des carburants est préalablement prélevé dans l'air, ce qui boucle la boucle du CO<sub>2</sub> et rend le carburant neutre en CO<sub>2</sub>.

Dittmeyer qualifie le cycle autonome de référence absolue, et celle-ci devrait également être appliquée à d'autres domaines qui dépendent des matières premières: «Nous devons apprendre à régénérer nos ressources.»

L'électricité ou l'énergie utilisée pour produire le carburant est également renouvelable. Elle provient de l'énergie éolienne ou solaire.

## III: L'ouverture technologique

La lutte contre le changement climatique passe aussi par les carburants synthétiques: Dittmeyer fait face à cette grande responsabilité avec la méticulosité de la science. Il avance pas à pas, ne voit pas d'obstacles insurmontables, pense que les carburants synthétiques s'imposeront dans certains domaines.

Dans le cadre de la mission mondiale visant à mettre fin au changement climatique, Dittmeyer a un objectif précis: réduire à leur minimum les émissions des gaz à effet de serre dues aux voyages en avion et aux transports lourds, tels les transports bar bateau ou par camion.

«Nous avons besoin d'une ouverture technologique», déclare Dittmeyer. Et il s'empresse de préciser que, par ouverture technologique, il n'entend pas s'en tenir à des technologies dépassées parce qu'elles sont encore rentables, mais plutôt développer différentes solutions pour de nouveaux défis, en saine concurrence les unes avec les autres.

De son point de vue, cela signifie que, si l'on se concentre sur la seule mobilité électrique, on passe à côté de possibilités de réduire les émissions de gaz à effet de serre par d'autres moyens également. «Et en ce qui concerne le changement climatique, nous ne pouvons pas nous permettre de manquer des occasions», affirme-t-il avec conviction.

L'ouverture technologique, poursuit-il, exige une évaluation aussi objective et globale que possible des dif-

## Projets Kopernikus

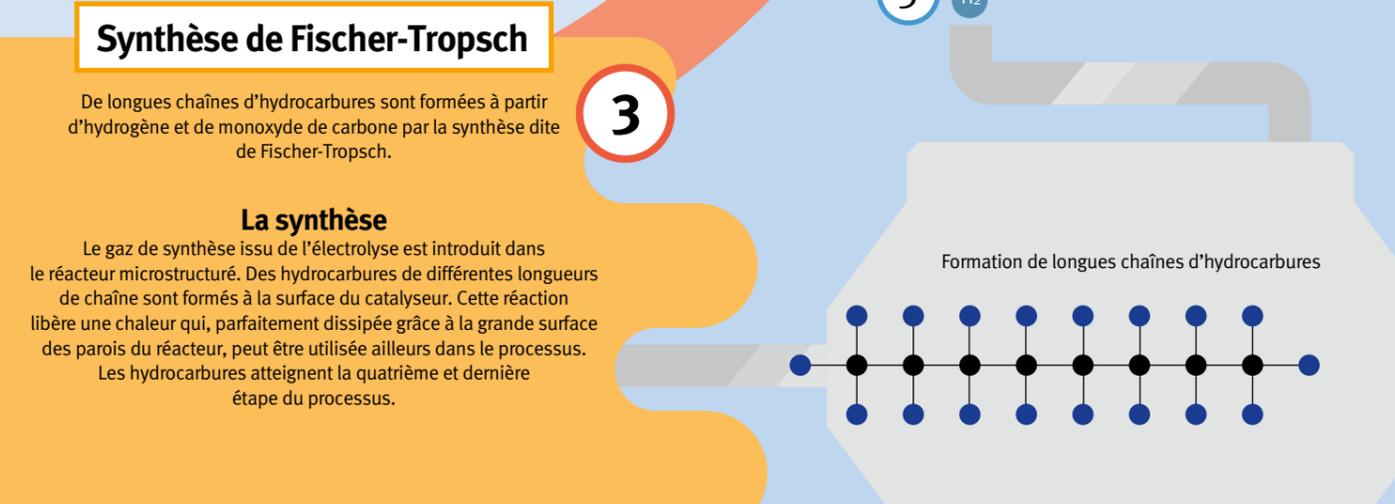
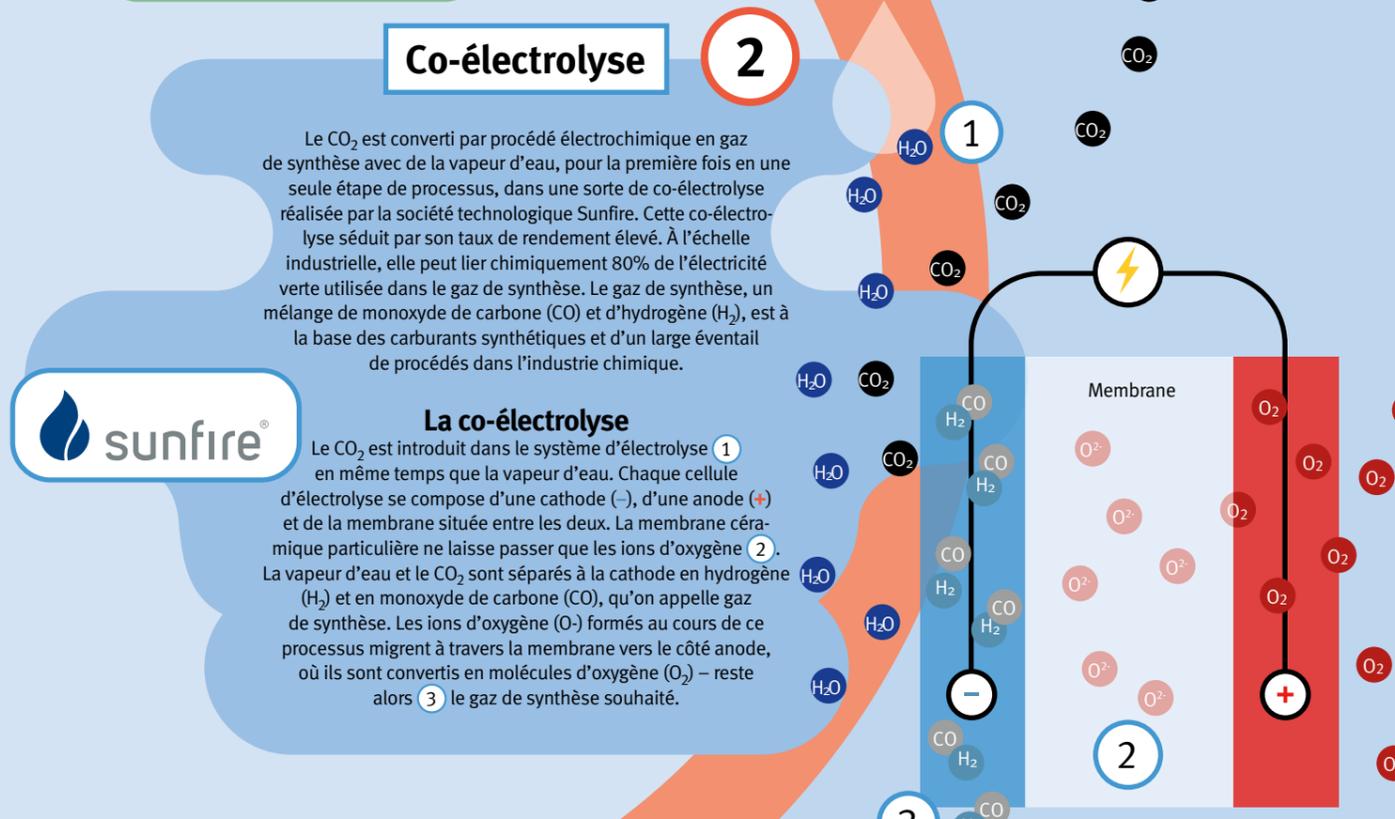
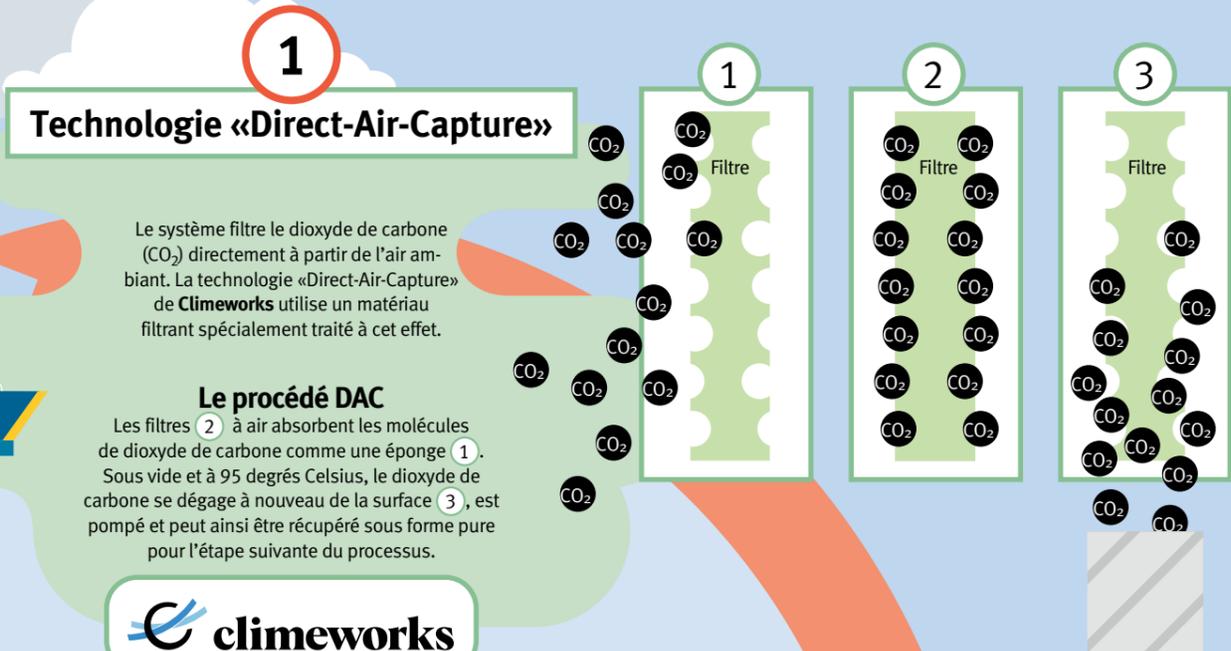
Le projet Power-to-X (P2X), dans le cadre duquel l'Institut de technologie de Karlsruhe est chargé de la production de e-fuels, est l'un des quatre projets Kopernikus. À l'instar de Nicolas Copernic et de sa vision héliocentrique du monde, ces projets ont pour objectif d'entraîner un changement de paradigme dans la science et la société. Les projets Kopernikus recherchent, développent et démontrent des solutions et des technologies qui, arrivés à leur maturité commerciale, permettront une Allemagne climatiquement neutre en 2050.

Pour en savoir plus: [www.kopernikus-projekte.de](http://www.kopernikus-projekte.de)

# Vers le carburant en quatre étapes

De l'air au carburant: le premier couplage au monde de quatre étapes de processus a été rendu possible grâce à une coopération initiée par l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) sous la direction du professeur Roland Dittmeyer et avec l'implication de trois entreprises du secteur privé: les entreprises Ineratec (spin-off de l'institut KIT), Sunfire et Climeworks (spin-off de l'EPF de Zurich) participent au projet.

Le procédé est prometteur car il est de conception modulaire et peut être installé de manière décentralisée. Le risque de mise à l'échelle est faible par rapport à une grande usine chimique centralisée. Le processus peut être utilisé là où les énergies solaire, éolienne ou hydraulique sont disponibles.



**!**

Le gaz de synthèse qui n'a pas réagi et les sous-produits gazeux sont renvoyés dans le processus d'électrolyse. Concrètement, plus de 90% du carbone extrait de l'air lors de la première étape se retrouvent dans le produit liquide.



Pour la synthèse de Fischer-Tropsch dans ce procédé, la société **Ineratec** fournit un réacteur microstructuré qui offre une vaste surface dans un espace extrêmement réduit pour évacuer en toute sécurité la chaleur du procédé et l'utiliser pour d'autres étapes du processus. Les molécules obtenues par la synthèse sont les composants essentiels des carburants synthétiques. Chimiquement, ces molécules correspondent déjà aux molécules contenues dans les combustibles fossiles.

1925

férentes options. Dans une vision complète, de nombreux facteurs d'évaluation jouent un rôle. Par exemple, les carburants synthétiques ne requièrent aucune nouvelle infrastructure, c'est-à-dire pas de nouvelles stations de recharge, mais peuvent être distribués par des pompes existantes.

Cela permet, au moment de la mise sur le marché, de réaliser des économies et surtout de gagner du temps, denrée rare au vu des scénarios climatiques.

Par ailleurs, les centrales de conversion de l'électricité en carburant peuvent être installées n'importe où dans le monde, y compris à proximité immédiate de centrales hydroélectriques, éoliennes ou solaires, où l'excédent d'énergies renouvelables est abondant.

#### IV: Le meilleur argument

Dittmeyer exige avant tout de lui-même une ouverture technique. Aller chercher toujours plus loin, vérifier si ce qu'on fait soi-même est encore orienté vers l'avenir ou deviendra obsolète dans un avenir proche.

Selon les calculs du KIT, à partir d'une certaine taille, les installations de conversion de l'électricité en carburant peuvent stocker jusqu'à 60% de l'électricité utilisée sous forme de carburant liquide produit synthétiquement.

C'est plus que ce qui était possible jusqu'à présent. Mais toujours moins qu'avec l'électromobilité.

«Nous ne devons pas nous mentir à nous-même sur l'efficacité globale», affirme Dittmeyer, contredisant sa propre argumentation. Pour les voitures particulières, il estime que la propulsion électrique présente un avantage par rapport aux carburants synthétiques.

C'est le meilleur argument qui compte: l'indicateur «besoin en énergie par kilomètre parcouru» fait la différence, tout du moins dans des pays comme l'Allemagne ou la Suisse, où un réseau électrique efficace est disponible pour l'infrastructure.

Dans sa vie privée, Dittmeyer, à la recherche d'un carburant neutre en CO<sub>2</sub>, a remplacé sa voiture diesel par un petit véhicule électrique il y a un an. «Et», constate-t-il, «j'en suis satisfait!»

Mais l'électricité ne permettra pas dans un avenir proche de voyager loin en avion, d'alimenter de lourds navires ou de transporter des marchandises. «C'est pourquoi nous nous concentrons sur les applications qui ne fonctionneront pas avec des batteries électriques avant longtemps, comme l'aviation ou la navigation.»

En outre, les avions, les navires ou les locomotives de transport ont des cycles de vie beaucoup plus longs que les voitures et pouvant atteindre jusqu'à 50 ans. Il est donc judicieux de ne pas mettre en sommeil la flotte existante pour les décennies à venir, mais de la faire fonctionner avec du carburant synthétique.

La mission de Dittmeyer n'est pas «les carburants synthétiques avant tout», mais: «À chaque application de mobilité une propulsion la plus respectueuse possible de l'environnement.» Toujours dans une vision globale.

#### V: Perspectives

Toute personne visitant le complexe Energy Lab 2.0 du KIT ne manquera pas d'y remarquer les grands conteneurs. Peints en bleu et blanc, ils se



E-fuel fabriqué à partir du dioxyde de carbone de l'air environnant, d'eau et d'électricité renouvelable

trouvent à côté d'un champ photovoltaïque. Ils rappellent un port et donnent un sentiment de départ. Effectivement, ce qui se trouve dans les conteneurs devrait conquérir le monde très bientôt – sous forme de solutions les plus commercialisables possibles pour un avenir énergétique respectueux de l'environnement.

En 2019, Dittmeyer et son équipe ont construit la première installation de conversion de l'électricité en carburant très compacte et intégrée dans un tel conteneur. La production était limitée à 200 litres par jour.

Aujourd'hui, les partenaires de projet autour de Dittmeyer sont en train de construire une installation plus grande pour produire des quantités plus importantes, démontrer la mise en œuvre pratique et clarifier les dernières questions relatives à la recherche. Et prouver, par exemple, qu'on peut aussi voler avec le carburant qui vient de l'air.

La mise à l'échelle est la prochaine étape importante sur la voie de la commercialisation des carburants synthétiques neutres en CO<sub>2</sub>. Seules des installations pilotes suffisamment grandes fournissent des données significatives pour l'introduction industrielle.

Capacité visée de l'Energy Lab 2.0, dont la mise en service est prévue pour mars 2022: environ 100 tonnes de carburant synthétique par an si l'usine fonctionnait à pleine charge

24 heures sur 24. Même cela ne représente qu'une goutte d'eau dans l'océan au vu de l'urgence croissante liée au réchauffement climatique.

Dittmeyer estime qu'il faudra encore une dizaine d'années avant que le carburant synthétique ne devienne un produit de masse. Pour cela, il faudrait construire de grandes usines, ce qui prendra un certain temps et nécessitera éventuellement des accords internationaux. Et surtout d'importants investissements.

C'est pourquoi Dittmeyer tente de servir plus rapidement les niches de marché avec d'autres concepts pour des applications décentralisées à plus petite échelle. Et, dans le même temps, de promouvoir la confiance des investisseurs potentiels dans cette technologie.

En Allemagne ou en Suisse, l'électricité excédentaire – et donc verte – pourrait être utilisée pour alimenter des installations décentralisées et de petite taille. Lorsque le vent est fort et que le soleil brille, les éoliennes et les systèmes photovoltaïques produisent souvent beaucoup plus d'électricité que la consommation alors nécessaire. Le prix de l'électricité verte baisse, jusqu'à devenir négatif pour soulager les réseaux, ce qui rend son utilisation intéressante.

À l'avenir, le deuxième obstacle à l'introduction des matériaux synthétiques sera le prix du carburant, lié à des conditions cadres réglementaires.

Dittmeyer estime que le prix du carburant, qui est aujourd'hui pratiquement le seul critère d'évaluation, ne doit pas rester le seul, car «Il sera toujours moins cher de creuser un trou et d'extraire du sol des combustibles fossiles qui ont mûri naturellement pendant des millions d'années que de réaliser nous-mêmes une telle synthèse.»

Selon lui, des labels doivent être créés pour les différentes normes de durabilité énergétique, à l'instar des dix classes énergétiques de G à A+++ pour les appareils ménagers – une sorte d'empreinte CO<sub>2</sub> basée sur des critères d'évaluation objectifs. Il faudrait s'en servir comme base d'imposition ou pour des mesures de soutien politique, comme ce fut le cas par le passé pour l'énergie solaire photovoltaïque. «Si l'on donne à l'industrie un premier coup de pouce par le biais de subventions, elle sera en mesure de faire baisser les prix grâce à la courbe d'apprentissage.»

Dans le débat international sur les prix, les quotas de mélange ou le prix du CO<sub>2</sub> pour les carburants sont également un sujet qui permettra de réaliser des modèles économiques pour l'introduction sur le marché d'une énergie de mobilité respectueuse de l'environnement.

Dittmeyer, qui suit sa voie depuis dix ans, en est convaincu: «Les carburants synthétiques sont une pièce importante du puzzle de notre avenir en matière d'énergie et de mobilité.»



Installation pilote compacte pour la production décentralisée d'e-fuels (env. 200 litres par jour)

# 24 L'ammoniac – nutriment, moyen de stockage et carburant

Matière première pour la production d'engrais, l'ammoniac a nourri de nombreux sols depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Il devra désormais servir à l'humanité de moyen de stockage et de transport pour l'hydrogène provenant de sources neutres en CO<sub>2</sub>. Plusieurs scénarios sont également testés pour l'utiliser comme carburant.



La production classique d'ammoniac comme engrais pourrait également devenir plus respectueuse du climat grâce au H<sub>2</sub> vert.

Lorsque Fritz Haber et Carl Bosch ont vu pour la première fois le procédé portant leur nom fonctionner dans une usine BASF en 1913, ils n'auraient probablement pas pensé que leur méthode de synthèse directe de l'ammoniac à partir des éléments azote et hydrogène jouerait encore un rôle important sur le plan industriel 100 ans plus tard.

### «Pain de l'air»

L'effet positif des composés azotés sur la croissance des plantes a été reconnu dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle. Toutefois, en raison de la croissance de la population mondiale, il n'a bientôt plus été possible de satisfaire la demande en engrais naturels. Les chimistes de l'époque ont pensé qu'une solution possible à ce problème consistait en la liaison de l'azote de l'air en une substance pouvant être absorbée par les plantes. Ces expériences étaient connues sous l'appellation «pain de l'air».

Ce n'est que bien des années plus tard, en tenant compte des différentes avancées techniques, que les deux chimistes allemands Haber et Bosch ont pu présenter leur méthode de synthèse prête à être utilisée dans l'industrie. Aujourd'hui, la production de l'ammoniac se fait encore en grande partie selon le même procédé.

### L'ammoniac – un produit chimique bien établi à l'échelle mondiale

Au cours du siècle dernier, de grandes quantités d'ammoniac ont été produites, si bien que son volume de production est aujourd'hui le deuxième plus important au monde avec plus de 150 millions de tonnes par an. Cette production nécessite une infrastructure de transport et de stockage sophistiquée et bien établie.

C'est ainsi qu'est née l'idée de l'ammoniac comme moyen de stockage et de transport de l'hydrogène issu d'une production neutre en CO<sub>2</sub>. Par rapport à l'hydrogène, l'ammoniac peut être liquéfié dans des conditions plus clémentes, à savoir à température ambiante standard (25 °C) et environ 10 bar, ou bien à -33 °C et à pression ambiante (ca. 1 bar).

Toutefois, le procédé Haber-Bosch tel que ses concepteurs l'avaient prévu est très gourmand en énergie et en CO<sub>2</sub>, ce qui rendrait le stockage de l'hydrogène vert tout sauf

neutre sur le plan climatique. Plusieurs groupes de recherche en Australie et au Japon tentent actuellement de rendre neutre en CO<sub>2</sub> l'ensemble de la production d'ammoniac grâce à un nouveau catalyseur.

### Du carburant à base d'air ...

D'autres groupes de recherche vont plus loin: puisque l'ammoniac peut être stocké et transporté beaucoup plus facilement et plus efficacement que l'hydrogène, pourquoi réduire ensuite davantage le taux de rendement par une étape supplémentaire pour libérer de nouveau de l'hydrogène du moyen de stockage? Il serait beaucoup moins coûteux d'utiliser directement l'ammoniac comme carburant pour les piles à combustible. Maintenant, grâce aux «crackers», il semblerait que la réaction de l'ammoniac dans le moteur ait été considérablement améliorée.

Pour le transport maritime, en particulier, l'ammoniac devrait constituer dans un avenir proche une alternative appropriée au pétrole lourd et au diesel. Il convient toutefois de noter que par rapport au carburant fossile, l'ammoniac nécessiterait une masse et un volume plus importants pour la même quantité d'énergie. Les projets de construction de nouveaux navires devront en tenir compte.

Sur un plan purement théorique, la technologie de pile à combustible utilisant de l'ammoniac comme carburant pourrait également être utilisée dans les transports routiers. Mais les chercheurs nourrissent de grandes réserves sur la manipulation de ce produit chimique toxique au quotidien. Tandis que la production à grande échelle et les infrastructures de transport et de stockage de l'ammoniac font l'objet de recherches depuis des années et ont atteint un niveau de sécurité élevé, on ne pourrait pas garantir cette sécurité dans le cadre du ravitaillement des voitures et des camions. Une fuite ou une inattention à la station-service pourrait rapidement entraîner de graves brûlures.

Néanmoins, pour atteindre la neutralité climatique dans les prochaines décennies, il faudra combiner de nombreuses technologies et voies de réduction du CO<sub>2</sub>. L'expansion de la production d'ammoniac vert ne constitue qu'une autre pièce du puzzle.



# Union européenne

## «Fit for 55»

En juillet de cette année, la Commission européenne a présenté sa proposition pour un nouveau paquet législatif sur le climat. Baptisé «Fit-for-55», le programme devrait apporter à l'Union européenne une réduction de 55% des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2030.

L'annonce a suscité peu d'échos dans les médias, ce qui pourrait être dû non seulement au fait qu'elle s'est faite en plein milieu des vacances d'été, mais aussi aux réticences de la Commission sous la présidence de Mme von der Leyen. On semble avoir conscience que les modifications prévues pour les dispositions en vigueur en matière d'énergie, de transport et de climat et les nouveaux instruments envisagés ne seront pas accueillis favorablement par tous les États membres. Nous voulons ci-dessous examiner de plus près les différents points du programme «Fit-for-55» et leur impact possible sur la Suisse.

### Processus législatif de l'UE

En premier lieu, le paquet climatique doit passer par les instances de l'UE, et le chemin peut être long. La proposition de la Commission sera d'abord discutée dans les différents groupes d'experts du Conseil de l'UE. Les ministres des 27 États membres sont représentés au Conseil de l'UE, mais seulement les ministres responsables du domaine concerné. Une fois que chaque proposition aura été discutée, le Conseil devra se mettre d'accord sur une position commune pour chaque affaire législative. C'est avec cette position que le Conseil entamera des négociations avec le Parlement européen. Ce n'est qu'après l'accord du Parlement et du Conseil

sur une position commune que la proposition deviendra effectivement une loi européenne.

Le simple calendrier peut laisser supposer que l'UE manquera probablement ses objectifs. En effet, les États membres ont moins de huit ans pour mettre en œuvre les éventuelles modifications de la loi, et un accord sur tous les points dès 2022 relèverait d'un petit miracle. La Suisse n'en devrait pas moins examiner elle aussi les initiatives de ses voisins européens et se préparer en conséquence.

Pour comprendre le projet «Fit-for-55», le mieux est de le diviser en trois grands groupes de mesures: tarification, directives et mesures de soutien.

### Augmentation des prélèvements sur les énergies fossiles

Si la Commission obtient gain de cause, les coûts de l'énergie fossile et des émissions directes de CO<sub>2</sub> augmenteront. La directive adaptée sur la taxation de l'énergie prévoit donc des taux d'imposition minima plus élevés pour presque tous les agents énergétiques, ce qui entraînera inévitablement une hausse des prix à la consommation. Aujourd'hui, au sein de l'UE, la tarification des émissions de CO<sub>2</sub> se fait principalement par le système communautaire d'échange des quotas d'émissions (SCEQE). Jusqu'à présent toutefois, seuls certains secteurs comme la production d'énergie ou encore les indus-

tries à forte consommation d'énergie telles que les raffineries de pétrole et les aciéries y étaient soumis. Ces acteurs devront réaliser des réductions beaucoup plus importantes d'ici 2030, à savoir 61% par rapport à 2005. Parallèlement, il est prévu d'étendre le système SCEQE au secteur maritime ainsi qu'au transport routier et au secteur du bâtiment. Ces derniers impliquent également un changement de paradigme massif dans le SCEQE. Alors que, jusqu'à présent, les certificats correspondants devaient toujours être acquis par les véritables émetteurs dans le cadre du SCEQE, ce seront les distributeurs de carburants et de combustibles qui en seront responsables dans le cas du transport routier et des bâtiments. La Commission considère ce mécanisme comme une incitation à investir dans les carburants et les combustibles renouvelables et à les lancer sur le marché. À court et moyen terme, l'extension du SCEQE devrait toutefois se traduire principalement par une hausse des prix de l'énergie.

### Directives et interdictions

Dans sa communication sur le programme «Fit-for-55», la Commission le dit elle-même: les mécanismes de tarification ne seront pas suffisants pour atteindre les objectifs de réduction massifs. Par conséquent, il ne reste que les interdictions et les directives, qui sont nombreuses dans le nouveau paquet. Il y a d'abord les nouvelles prescriptions d'émissions pour les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers. La Commission souhaite que la flotte de véhicules nouvellement immatriculés réduise ses émissions de 55% d'ici 2030, et de 100% d'ici 2035 par rapport à 2021. Pour les nouveaux véhicules utilitaires légers, les objectifs de réduction sont de 50% d'ici 2030, et de 100% d'ici 2035. Bien que la nouvelle proposition de réglementation consiste en des formulations techniquement neutres, l'intention est

**Par des directives, des interdictions et des taxes climatiques plus élevées, «Fit-for-55» accélérera encore davantage la désindustrialisation en Europe.**

claire: il s'agit d'interdire le moteur thermique sur la route. Dans le même temps, l'UE sait également que le développement d'infrastructures alternatives de recharge et de ravitaillement en électricité et en hydrogène est nettement en deçà des attentes en dehors des pays les plus riches de l'UE. C'est pourquoi la «directive sur la construction d'infrastructures pour les carburants alternatifs» est accompagnée d'un texte de loi adapté qui impose aux pays de mettre en place des stations de recharge rapide électrique tous les 60 kilomètres sur les autoroutes et les grands axes routiers d'ici 2025 et des stations de ravitaillement en hydrogène tous les 150 kilomètres d'ici 2030. Cependant, les aspects tels que la viabilité économique ainsi que l'exploitation et l'entretien à long terme sont délibérément ignorés.

Pendant ce temps, dans les transports maritimes et aériens, tous les espoirs sont tournés vers les carburants renouvelables. Ici aussi, la proposition consiste en un cahier des charges pour la construction d'infrastructures d'approvisionnement et, parallèlement, en l'obligation pour les compagnies maritimes et aériennes d'accepter des quantités minimales de carburant renouvelable dans les ports et les aéroports européens. Il s'agit d'empêcher les navires et les avions d'obtenir du carburant moins cher en dehors de l'Europe et de l'utiliser ensuite pour couvrir des itinéraires intraeuropéens. D'ici 2030, 5% des carburants utilisés dans le secteur de l'aviation devront être renouvelables. Ce quota devra augmenter petit à petit pour atteindre 63% d'ici 2050.

### Mesures compensatoires

Il n'est pas nécessaire d'être un expert pour comprendre que, si elles sont adoptées, les réglementations européennes plus strictes désavantageront les entreprises produisant en Europe par rapport aux sociétés concurrentes d'Asie et d'Amérique. L'UE tente de compenser ce «désavantage en matière de CO<sub>2</sub>» en essayant d'appliquer le prix européen du CO<sub>2</sub> à certains produits importés de l'extérieur de l'UE. Dans le cadre du système de compensation frontalière des émissions de CO<sub>2</sub>, des certificats devront être achetés à partir de 2026 dans le cadre de l'importation de ciment, de fer, d'acier, d'aluminium, d'engrais et d'électricité en provenance de pays hors UE. Le prix de ces certificats doit correspondre à la taxe sur le CO<sub>2</sub> qui serait engendrée pour la production au sein de l'UE. Ce mécanisme de compensation s'est déjà révélé très controversé lors de la première consultation informelle des États. Quoi qu'il en soit, la Suisse ne sera probablement pas affectée par cette compensation frontalière; le projet de la Commission exclut déjà les pays pratiquant une tarification du CO<sub>2</sub> comparable ou supérieure, dont la Suisse.

Hausse des prix, objectifs d'investissement et interdictions technologiques de facto: les États membres les plus pauvres de l'UE, en particulier, s'opposeront au paquet Fit-for-55, craignant un accroissement supplémentaire des inégalités au sein de l'Union. Pour anticiper cette situation, la Commission avance le «fonds social climatique», auquel en particulier les États les plus riches doivent contribuer pour soutenir les membres les plus pauvres et les groupes de population particulièrement touchés. La question de savoir qui aura le droit de puiser dans ce fonds et sous quelle forme sera probablement abordée lors des négociations au Conseil et au Parlement.

### Signification pour la Suisse

Dans l'ensemble, ces mesures risquent de rendre l'Europe encore moins attrayante en tant que site industriel. Les entreprises doivent s'attendre à une hausse des coûts de l'énergie, des transports et de la production, ce qui entraînera inévitablement une augmentation des prix à la consommation. La Suisse, dont les deux tiers des importations proviennent de l'UE, ressentira également les effets de ce niveau des prix généralement plus élevé. Avec la poursuite probable de la désindustrialisation européenne, les dépendances mondiales à l'égard des sites de production asiatiques, en particulier, vont encore augmenter. La Suisse ferait bien de mettre l'accent sur la sécurité d'approvisionnement et les accords multilatéraux avec les pays non européens au cours des prochaines années.

Ensemble des abréviations et termes importants, avec une brève explication

#### **Ammoniac – NH<sub>3</sub>**

Gaz composé d'azote et d'hydrogène, utilisé comme matériau de base pour différents produits tels que les engrais, mais aussi comme carburant.

#### **Azote – N<sub>2</sub>**

Gaz qui constitue env. 78% de l'air. L'azote est utilisé dans de nombreux composés chimiques comme dans les engrais ou les explosifs.

#### **BGL – Biogaz liquéfié**

Lorsque le biogaz est liquéfié pour être utilisé comme carburant, par exemple, on parle de BGL (voir également GNL).

#### **Biodiesel**

Terme générique désignant les carburants diesel et les combustibles diesel produits à partir de biomasse (voir également BtL).

#### **Bioéthanol**

Alcool produit à partir de biomasse et pouvant, en Suisse, être ajouté à l'essence comme carburant à hauteur de 5% maximum (voir également éthanol).

#### **Biofuel – (biocarburant ou biocombustible)**

Carburants et combustibles liquides produits à partir de biomasse (voir également BtL).

#### **Biogaz**

Gaz contenant du méthane et produit à partir de biomasse. Après un traitement adéquat, il correspond au gaz naturel normal (voir également BtG).

#### **Biomasse**

Dans le domaine de la technologie énergétique, le terme de biomasse est utilisé pour désigner toutes les substances biologiques susceptibles d'être

utilisées pour produire de l'énergie. Il s'agit notamment de déchets tels que le lisier, les déchets verts, le bois résiduel, les boues d'épuration ou les déchets d'abattoirs, utilisés pour produire une énergie durable.

#### **Biométhane**

Gaz méthane produit à partir de biomasse (voir également BtG). Après un traitement adéquat, il correspond au gaz naturel normal.

#### **BML – Biométhane liquéfié**

Autre désignation pour BGL (voir également BGL, GNL).

#### **BtG – Biomass-to-Gas (biomasse-en-gaz)**

Procédé consistant à produire du gaz à partir de biomasse par exemple par gazéification ou fermentation (voir également BtX).

#### **BtL/BzL – Biomass-to-Liquid (biomasse-en-liquide)**

Procédé consistant à produire des carburants ou des combustibles liquides à partir de biomasse, directement ou en convertissant des biogaz (voir également BtX).

#### **BtX/BzX – Biomass-to-X (biomasse-en-X)**

Terme générique désignant les processus consistant à convertir la biomasse en une autre forme d'énergie utilisable, telle que la chaleur, l'électricité ou les carburants (voir également BtG, BtL).

#### **C – Carbone**

(voir carbone)

#### **Carbone – C**

Élément chimique présent dans une multitude de composés qui constituent la base de la vie sur terre.

#### **CCC – Centrale à cycle combiné gaz et vapeur ou centrale à turbine à gaz et vapeur**

Centrale électrique pour la production d'électricité dans laquelle les gaz d'échappement chauds d'une turbine à gaz sont utilisés pour générer de la vapeur pour une turbine à vapeur. Le taux de rendement de l'ensemble du système peut ainsi être considérablement augmenté par rapport à une simple turbine à gaz (voir également CCF).

#### **CCF – Couplage chaleur-force**

Procédé dans lequel l'énergie motrice et la chaleur résiduelle sont toutes deux utilisées pour augmenter le taux de rendement d'une installation (voir également CETE).

#### **CCS – Carbon Capture and Storage (captage et stockage du dioxyde de carbone ou du CO<sub>2</sub>)**

Procédé dans lequel le CO<sub>2</sub> est séparé d'un processus ou de l'air et collecté, par exemple pour être stocké sous terre pendant une longue durée (voir également DAC).

#### **CCU – Carbon Capture and Utilization (captage et utilisation du dioxyde de carbone ou du CO<sub>2</sub>)**

Procédé dans lequel le CO<sub>2</sub> est séparé d'un processus ou de l'air et collecté afin d'être utilisé pour d'autres processus comme la production de carburants synthétiques (voir également DAC).

#### **CETE – Centrale à énergie totale équipée**

Installation produisant par exemple simultanément de l'énergie électrique et de la chaleur au moyen d'un moteur à gaz (voir également CCF).

#### **CH<sub>4</sub> – Méthane**

(voir méthane)

#### **CO – Monoxyde de carbone**

(voir monoxyde carbone)

#### **CO<sub>2</sub> – Dioxyde de carbone**

(voir dioxyde de carbone)

#### **CtG/CzG – Coal-to-Gas (charbon-en-gaz)**

Procédé de transformation de la lignite ou de la houille en agents énergétiques gazeux (voir également CtL, CtX).

#### **CtL/CzL – Coal-to-Liquid (charbon-en-liquide)**

Procédé de transformation du lignite ou de la houille en carburants et combustibles liquides (voir également CtG, CtX).

#### **CtX/CzX – Coal-to-X (charbon-en-X)**

Procédé de transformation du lignite ou de la houille en d'autres formes d'énergie (voir également CtG, CtL).

#### **DAC – Direct Air Capture (captage direct de l'air)**

Procédé permettant de filtrer directement le CO<sub>2</sub> de l'air ambiant (voir également CCU, CCS).

#### **Dioxyde de carbone – CO<sub>2</sub>**

Le dioxyde de carbone est un composé chimique à base de carbone (C) et d'oxygène (O). En tant que gaz, le CO<sub>2</sub> est un élément important du cycle mondial du carbone et, en tant que

composant naturel de l'air, un important gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre.

#### **Dioxyde de soufre – SO<sub>2</sub>**

Composé gazeux de soufre (S) et d'oxygène (O). Il se forme lors de la combustion de combustibles et de carburants fossiles et est un polluant atmosphérique responsable de la formation des pluies acides.

#### **EDM – Éther de diméthyle**

Gaz liquide généralement produit à partir du gaz de synthèse obtenu à partir de biomasse. Ses propriétés sont similaires à celles du gaz liquide GPL. Il peut être utilisé pour le remplacer.

#### **e-fuels**

Combustibles et carburants liquides produits synthétiquement par différents procédés avec de l'énergie électrique (voir également PtL).

#### **e-gaz**

Terme désignant les gaz produits à partir d'eau et de courant électrique par procédé d'électrolyse. Il s'agit principalement de l'hydrogène et des gaz produits à partir de celui-ci, comme l'e-méthane (voir également PtG).

#### **EMAG – Ester méthylique d'acide gras**

Communément appelé biodiesel, il est produit à partir d'huiles végétales et de graisses animales. Il est très similaire au diesel classique et, selon la norme, il peut lui être mélangé jusqu'à une proportion de 7% en volume.

#### **EMC – Ester méthylique de colza**

Également appelé ester méthylique d'huile de colza ou diesel de colza, ce biodiesel est obtenu par la transforma-

tion chimique de l'huile de colza raffinée avec du méthanol. Il représente la plus grande part du biodiesel en Europe.

#### **e-méthane**

Gaz méthane produit synthétiquement à partir de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène provenant d'un processus d'électrolyse (voir également PtG).

#### **EOM – Éther d'oxyméthylène**

(voir éther d'oxyméthylène)

#### **Éthanol**

Composé chimique dont la formule est C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O. Liquide à température normale, il est connu sous l'appellation «alcool ordinaire» (voir également bioéthanol).

#### **Éther d'oxyméthylène – EOM**

Substance liquide pouvant être obtenue à partir de biomasse. Elle a des propriétés similaires à celles du diesel et peut être mélangée à celui-ci comme additif pour obtenir une combustion avec des émissions polluantes plus faibles.

#### **FF55 – Fit-for-55**

Proposition de la Commission européenne pour un paquet législatif devant permettre une réduction de 55% des émissions de CO<sub>2</sub> de l'Union européenne d'ici 2030.

#### **Gaz de pétrole liquéfié**

Également connu sous l'appellation GPL (voir également gaz liquide, GPL).

#### **Gaz liquide**

Ce terme ne désigne pas seulement les gaz à l'état liquide. Il est également utilisé dans le secteur des carburants pour désigner le gaz combustible GPL (voir également GPL, gaz de pétrole liquéfié).

**Gaz naturel**

Gaz composé en grande partie de méthane et extrait de sources fossiles.

**GNC – Gaz naturel comprimé (compressed natural gas)**

Le gaz naturel est comprimé pour être transporté et stocké. Le terme GNC est surtout utilisé dans le domaine des carburants gazeux (voir également GNL).

**GNL – Gaz naturel liquide**

La densité énergétique du gaz naturel peut être augmentée par liquéfaction pour le stockage ou le transport. Pour cela, il doit être refroidi à une température inférieure à  $-161^{\circ}\text{C}$ . Le GNL est de plus en plus utilisé comme carburant pour les camions pour les longues distances (voir également BGL).

**GNS – Synthetic/Substituté Natural Gas (gaz naturel synthétique)**

Ce terme désigne principalement le biogaz dont la qualité a été améliorée pour atteindre celle du gaz naturel. Mais il est aussi parfois utilisé pour le e-méthane synthétique.

**GPL – Gaz de pétrole liquide**

Également connu sous l'appellation de gaz liquide comme carburant. Il consiste en un mélange gazeux de propane et de butane et est principalement obtenu lors de la distillation du pétrole (voir également gaz liquide).

**GtL/G2L – Gas-to-Liquid (gaz-en-liquide)**

Procédé permettant de produire des combustibles liquides à partir d'un gaz tel que le méthane.

**H<sub>2</sub> – Hydrogène**

(voir hydrogène)

**HEFA – Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (esters hydrotraités et acides gras)**

Désignation utilisée en Suisse pour HVO (voir HVO).

**HUCO – Hydrotreated Used Cooking Oil (huile de cuisson usagée hydrogénée)**

Sous-groupe de HVO dans lequel seules les huiles de cuisson usagées sont utilisées pour la production.

**HVO – Hydrotreated Vegetable Oils (huiles végétales hydrogénées)**

Sont produites à partir d'huiles végétales (usagées) et de graisses animales par un procédé appelé hydrogénation chimique avec de l'hydrogène. Le biodiesel qui en résulte a des propriétés pratiquement identiques à celles du combustible ou du carburant diesel fossile.

**Hydrogène – H<sub>2</sub>**

L'hydrogène est un gaz actuellement produit principalement par reformage à la vapeur à partir de gaz naturel fossile, mais qui, à l'avenir, sera de plus en plus produit par électrolyse à partir de courant électrique et d'eau. Pour une distinction plus aisée, l'hydrogène est désigné par une couleur différente selon son processus de production: Par exemple, H<sub>2</sub> vert > électrolyse avec de l'électricité renouvelable, H<sub>2</sub> jaune > électrolyse avec de l'électricité non renouvelable, H<sub>2</sub> rose ou rouge > électrolyse avec de l'électricité nucléaire, H<sub>2</sub> gris > reformage à la vapeur du gaz naturel, H<sub>2</sub> bleu > reformage à la vapeur du gaz naturel avec CCS, H<sub>2</sub> turquoise > pyrolyse du méthane (voir également LH<sub>2</sub>, PtG).

**Hydrogène liquide – LH<sub>2</sub>**

Hydrogène gazeux qui, pour obtenir une densité énergétique plus élevée, est liquéfié à  $-252^{\circ}\text{C}$ . Sous forme d'hydrogène liquide, le gaz peut être utilisé comme carburant pour les poids lourds, et il est plus aisé à transporter en grandes quantités sous cette forme que sous forme comprimée.

**LH<sub>2</sub> – Hydrogène liquide**

(voir hydrogène liquide)

**LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carriers (liquides organiques porteurs d'hydrogène)**

Liquides organiques ayant la propriété de pouvoir absorber et libérer de l'hydrogène par des réactions chimiques. Ils peuvent donc être utilisés pour stocker l'hydrogène.

**Méthane – CH<sub>4</sub>**

Gaz obtenu principalement à partir de sources fossiles (gaz naturel) ou de biomasse (biométhane).

**Méthanol**

Composé chimique dont la formule est CH<sub>4</sub>O. Il est liquide à température normale et connu sous l'appellation «alcool de bois». Le méthanol peut être utilisé comme carburant pour les piles à combustible et les moteurs thermiques, ou comme matière première pour la production d'autres carburants synthétiques.

**Monoxyde de carbone – CO**

Le monoxyde de carbone est un gaz composé de carbone (C) et d'oxygène (O). Il se forme lors de la combustion incomplète de substances contenant du carbone.

**N<sub>2</sub> – Azote**

(voir azote)

**NH<sub>3</sub> – Ammoniac**

(voir ammoniac)

**NO<sub>x</sub> – Oxydes d'azote**

(voir oxydes d'azote)

**Oxydes d'azote – NO<sub>x</sub>**

NO<sub>x</sub> désigne les différents oxydes d'azote. Produits lors de la combustion de carburants, ils sont considérés comme des polluants atmosphériques.

**PC – Pile à combustible**

Les piles à combustible sont des composants techniques qui transforment des combustibles tels que l'hydrogène en énergie électrique.

**Procédé Haber-Bosch**

Procédé mis au point par Fritz Haber et Carl Bosch pour produire de l'ammoniac à partir d'hydrogène et d'azote provenant de l'air ambiant.

**PtF/P2F – Power-to-Fuel (électricité-en-combustible/carburant)**

Procédé de transformation de l'énergie électrique (de préférence renouvelable excédentaire) en combustible et carburant. Correspond au terme PtL (voir également PtL, PtX).

**PtG/P2G – Power-to-Gas (électricité-en-gaz)**

Procédé de transformation de l'énergie électrique (de préférence renouvelable excédentaire) en gaz. Il s'agit principalement de procédés d'électrolyse (voir également e-méthane, PtL, PtX).

**PtL/P2L – Power-to-Liquid (électricité-en-liquide)**

Procédé de transformation de l'énergie électrique (de préférence renouvelable excédentaire) en combustible et carburant liquide. Il consiste généralement,

dans une première étape, à produire de l'hydrogène par électrolyse, puis de le convertir en substances liquides dans des étapes ultérieures avec du CO<sub>2</sub> (voir également e-fuel, PtG, PtX).

**PtX/P2X – Power-to-X (électricité-en-X)**

Terme générique désignant les procédés de transformation de l'énergie électrique en une autre forme d'énergie. Pour pouvoir créer des produits durables, de l'électricité renouvelable excédentaire provenant de l'énergie photovoltaïque ou hydraulique doit être utilisée pour les processus (voir également PtG, PtG).

**PV – Photovoltaïque**

Production d'énergie électrique renouvelable à partir de la lumière du soleil à l'aide de cellules solaires.

**ReFuel – Renewable Fuel (combustibles et carburants renouvelables)**

Terme générique désignant les combustibles et carburants produits synthétiquement à partir de sources non fossiles telles que la biomasse ou l'électricité.

**SAF – Sustainable Aviation Fuels (carburants d'aviation durables)**

Il s'agit de carburants d'aviation renouvelables devant être mélangés à du kérosène classique ou qui devront le remplacer complètement à l'avenir. Ils peuvent être obtenus à partir de biomasse ou produits entièrement par synthèse par des procédés PtL (voir également BtL, PtL).

**SCEQE – Système de négoce des émissions de l'Union européenne**

Système de tarification des émissions de CO<sub>2</sub>, qui doit prochainement être

étendu aux secteurs de la navigation, du transport routier et des bâtiments.

**SO<sub>2</sub> – Dioxyde de soufre**

(voir dioxyde de soufre)

**Synfuel – Synthetic Fuel (combustible ou carburant synthétique)**

Terme générique pour tous les combustibles et carburants produits synthétiquement.

**Syngas – Synthesis Gas (gaz de synthèse)**

Mélange gazeux composé d'hydrogène et de monoxyde de carbone (CO) qui est produit par exemple lors de la gazéification du charbon. Il est utilisé comme matière première pour la production de substances telles que le méthane, le méthanol et l'ammoniac.

**Synthèse de Fischer-Tropsch**

Procédé mis au point par Franz Fischer et Hans Tropsch pour produire des hydrocarbures liquides tels que le diesel, l'essence ou le kérosène, à partir de gaz synthétique.

**Synthèse F-T – Synthèse de Fischer-Tropsch**

(voir synthèse de Fischer-Tropsch)

**UCOME – Used Cooking Oil Methyl Ester (ester méthylique d'huiles comestibles usagées)**

Biodiesel, combustible ou carburant produit à partir d'huiles comestibles usagées comme l'huile de friture (voir également EMAG).



## 2 Editorial

«Nous n'avons pas la prétention de juger dans quelle mesure les technologies et les voies présentées pourront un jour remplacer les produits pétroliers.»

## 4 Carburants alternatifs

La vue d'ensemble en un coup d'œil

## 6 Carburants à base de gaz

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> fixés d'ici 2050, une défossilisation du secteur de la mobilité est inévitable.

## 10 L'avenir de l'aviation

Emanuel Fleuti s'occupe des questions environnementales concernant l'aéroport de Zurich. Actuellement, il s'agit principalement du changement climatique.



## 14 La biotechnologie au service d'un nouveau carburant

Comme base des carburants renouvelables, les algues offrent une perspective séduisante qui fait l'objet de recherches et de développements depuis de nombreuses années.

## 16 Vers le captage direct du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère

L'Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) a mis au point une nouvelle catégorie de matériaux pour capter le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et des flux de gaz d'échappement.

## 18 Le carburant qui vient de l'air

Sans les carburants synthétiques, vols, voyages en bateau ou autres transports lourds neutres sur le plan climatique seraient inconcevables. En visite chez le professeur Roland Dittmeyer, nouvel espoir de la politique climatique.



## 24 L'ammoniac – nutriment, moyen de stockage et carburant

Matière première pour la production d'engrais, l'ammoniac a nourri de nombreux sols depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle.

## 26 Union européenne «Fit for 55»

En juillet de cette année, la Commission européenne a présenté sa proposition pour un nouveau paquet législatif sur le climat. Baptisé «Fit-for-55», le programme devrait apporter à l'Union européenne une réduction de 55% des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2030.

## 28 Glossaire

Ensemble des abréviations et termes importants, avec une brève explication

### Impressum

Tirage D 31500/F 11000 | Rédaction Avenergy Suisse | Auteurs Roland Bilang, Fabian Bilger, Natascia Turrà, Bernhard Wüest  
Photos Avenergy Suisse, Cover: © Butusova Elena / Shutterstock | Flughafen Zürich AG | istockphoto.com | ZHAW | KIT | Graphiques wapico AG  
Conception Avenergy Suisse | Contact Avenergy Suisse, Spitalgasse 5, 8001 Zürich | T 044 218 50 10, F 044 218 50 11 | info@avenergy.ch, www.avenergy.ch, twitter@avenergysuisse | Impression sur papier certifié FSC