



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

# Recherche énergétique et innovation

## Rapport 2019





## Editorial

L'avenir de l'approvisionnement énergétique de la Suisse et les défis du changement climatique font partie des sujets les plus importants de la politique quotidienne suisse. La recherche énergétique a un rôle important à jouer dans l'analyse du système énergétique de plus en plus complexe, avec ses diverses interactions entre un large éventail d'acteurs, de secteurs énergétiques (mot-clé: couplage sectoriel) et dans l'élaboration de solutions technologiques.

Ces dernières années, un travail important a été réalisé pour développer la recherche énergétique, notamment grâce aux différents Centres de compétences suisses pour la recherche énergétique (SCCER) qui, après huit ans, prendront fin en 2020. Le programme de soutien SWEET initié par l'Office fédéral de l'énergie OFEN contribuera de manière décisive à ce que les capacités de recherche mises en place, soient désormais axées sur les développements nécessaires à la stratégie énergétique. De manière générale, l'OFEN joue un rôle central en Suisse depuis plusieurs décennies en fournissant un soutien au travers différents programmes à la recherche et au développement technologique dans le domaine de l'énergie.

Cette brochure présente quelques exemples de projets que l'OFEN soutient et accompagne étroitement. Ces projets sont un reflet du grand nombre de projets de recherche et de projets pilotes et de démonstration soutenus. Les codes QR indiqués fournissent des informations détaillées (par exemple les rapports finaux). Dans ce numéro, une attention particulière a été accordée à la thématique de la «chaleur» et plusieurs projets innovants sur l'utilisation des pompes à chaleur sont présentés.

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Section recherche énergétique et cleantech

**(Photo de couverture)** Installation photovoltaïque flottante installée en 2019 sur le réservoir d'eau du «Lac des Toules» à 1810 m d'altitude. Grâce à l'utilisation de modules bifaciaux avec un albédo fort en hiver et grâce à une plus grande irradiation dans la région alpine, la production d'énergie devrait être jusqu'à 50 % plus élevée que dans une installation similaire sur le Plateau central. Les conditions climatiques extrêmes (neige, glace, vents forts, fluctuations de température) ainsi que les fluctuations saisonnières du niveau de l'eau (0 à 50 m) posent des défis à relever (source: Romande Energie, [www.solaireflottant-lestoules.ch](http://www.solaireflottant-lestoules.ch)).

**(Gauche)** Centrale au fil de l'eau du fournisseur d'énergie Alpiq à Gösgen. L'entreprise Hydrosvider y met en service une installation d'électrolyse de 2 MW qui produit jusqu'à 300 tonnes d'hydrogène renouvelable par an et peut ainsi assurer l'approvisionnement de 40 à 50 camions à pile à combustible. Une expérience significative a été acquise avec un projet pilote à Aarau pendant plusieurs années (voir article: «L'hydrogène sur les routes suisses», page 15) (source de l'image: Alpiq/Patrick Lüthy, Imagopress).

**(Page suivante)** Gros plan d'un collecteur solaire à concentration de NEP Solar dans la centrale thermique de la Latria Engadinaisa SA à Bever exploitée par ewz. Le système de 115 m<sup>2</sup> est en service depuis 2011 et est évalué par l'Institut de technologie solaire SPF de l'Université des sciences appliquées de Rapperswil (source: ewz).



# Sommaire

Editorial 3

Sommaire 4

Promotion de la technologie et de l'innovation par l'Office fédéral de l'énergie 5

Programmes de recherche thématiques 6

Statistiques de la recherche énergétique suisse 6

## Efficacité énergétique

Intégration des énergies renouvelables de «manière harmonieuse» 11

Les pompes à chaleur avec le soutien au soleil 13

L'hydrogène sur les routes suisses 15

Soulagement du réseau par la flexibilité 17

La terre comme climatiseur 17

Stocker l'électricité avec de l'air comprimé 17

## Énergies renouvelables

Carburants solaires pour l'aviation 19

Le «biochar» issu des déchets 21

Une alternative aux pompes à chaleur air/eau 23

Potentiel des vents au comportement complexes 25

Plus d'énergie solaire de la même surface 25

De l'aluminium pour prolonger l'été 25

## Socioéconomie

Les facteurs sociaux dans les décisions en faveur des systèmes solaires 27

## Affaires internationales

Coopération internationale 29

Participation aux programmes de collaboration technologique de l'AIE 30

Participation aux ERA-NETs – European Research Area Networks 31

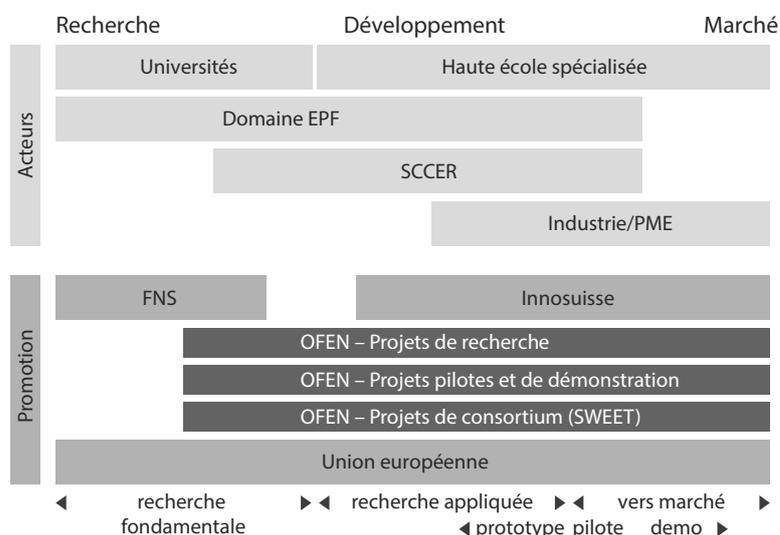
Autres coopérations internationales 31

# Promotion de la technologie et de l'innovation par l'Office fédéral de l'énergie

La recherche énergétique de la Confédération a un rôle particulièrement important au vu de la décision du Conseil fédéral et du Parlement prise en 2011, et également soutenue par le peuple suisse, au sujet de la transformation du système énergétique suisse jusqu'en 2050. Les programmes de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) couvrent tout l'éventail de la recherche énergétique dans les domaines de l'efficacité énergétique et de l'énergie renouvelable et s'appuient sur le «Concept de recherche énergétique de la Confédération» élaboré par la Commission fédérale de la recherche énergétique (CORE). Grâce à son approche thématique de soutien séparé par programme et à son rôle de coordination, l'OFEN assume la fonction de plaque tournante dans le paysage suisse de la recherche énergétique.

La politique énergétique et climatique de la Suisse doit relever d'importants défis. Pour réaliser les objectifs fixés dans la Stratégie énergétique 2050 du Conseil fédéral, il convient de développer substantiellement les énergies renouvelables et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, de l'industrie, des transports et des appareils électriques. D'importants progrès seront encore nécessaires dans la recherche au-delà de 2020 pour atteindre les objectifs fixés par la Stratégie énergétique 2050. C'est pourquoi il faut des modes de pensée complètement nouveaux, de nouvelles approches et de nouvelles technologies. Or, c'est précisément l'abandon de voies éprouvées qui nécessite une stratégie de financement qui ne fasse pas un lien direct entre le franc investi dans la recherche au kilowattheure directement économisé. La recherche a besoin d'un espace libre qui permette de considérer et d'expérimenter des idées fondamentalement nouvelles.

La promotion de l'OFEN, avec ses différents instruments de financement, rend cela possible en soutenant non seulement la recherche orientée vers la mise en œuvre, mais aussi la recherche fondamentale orientée vers l'application et les projets pilotes et de démonstration. L'OFEN est le seul organisme de financement du sec-



**L'Office fédéral de l'énergie coordonne la recherche et l'innovation dans le secteur de l'énergie sur une grande partie de la chaîne de valeur. (Innosuisse = Agence suisse pour la promotion de l'innovation; FNS = Fonds national suisse de la recherche scientifique).**

teur public qui soutient des thèmes de recherche dans le secteur de l'énergie par le biais de programmes soutenus sur des longues périodes de dix ans ou plus. Avec son nouveau programme de financement SWEET («Swiss energy research for the energy transition»), l'OFEN permet également de réaliser des projets de consortium avec des visions à long terme sur des sujets sélectionnés et de financer la recherche sur les technologies de rupture.

La coopération nationale et internationale renforce l'efficacité des ressources utilisées et permet un échange efficace de connaissances entre les chercheurs. La mise en réseau nationale et internationale des chercheurs suisses est donc l'une des tâches principales de la promotion de l'OFEN, au même titre que le soutien actif de projets de recherche économiquement risqués et le comblement des lacunes dans la chaîne d'innovation.



## Programmes de recherche thématiques

Avec ses programmes de recherche thématiques, l'OFEN couvre tout le spectre de la recherche énergétique dans les domaines de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Ces programmes sont étroitement liés aux autres instruments de financement de l'OFEN comme le

programme pour les projets pilotes et de démonstration et le nouveau programme SWEET. Les différents programmes sont orientés selon les axes suivants: efficacité énergétique, énergies renouvelables, sciences humaines, sociales et économiques, stockage et réseaux. Des thèmes

centraux tels que la «numérisation», le «couplage sectoriel» et le «stockage de l'énergie» sont traités dans l'ensemble des programmes.



### Programmes de recherche dans le domaine de l'efficacité énergétique:

- |   |   |   |
|---|---|---|
|  Bâtiments et cités (3–8)  |  Mobilité (4–8)                      |  Processus industriels (3–8)              |
|  Réseaux (3–8)             |  Technologies de l'électricité (3–8) |  Systèmes énergétiques à combustion (3–8) |
|  Piles à combustible (2–8) |  Batteries (2–8)                     |  Pompes à chaleur et froid (4–8)          |

### Programmes de recherche dans le domaine des énergies renouvelables:

- |  |  |   |
|--|--|---|
|  Chaleur solaire et stockage de la chaleur (4–8) |  Photovoltaïque (3–8)    |  Energie solaire à haute température (CSP) (3–8) |
|  Hydrogène (2–8)                                |  Bioénergie (3–8)       |  Force hydraulique (4–8)                        |
|  Géoénergie (3–8)                               |  Energie éolienne (4–8) |  Barrages (3–8)                                 |

### Programmes de recherche en sciences humaines et sociales / questions transversales:

- |  |   |
|--|---|
|  Energie – économie – société |  Déchets radioactifs |
|--|---|

**Aperçu des programmes thématiques de l'OFEN. Le niveau de maturité technologique couvert par le programme est indiqué entre parenthèses. Pour plus d'informations: «Concept de recherche énergétique de la Confédération 2017–2020», CORE (2016) et «Concept de recherche énergétique de l'Office fédéral de l'énergie 2017–2020», OFEN (2016).**

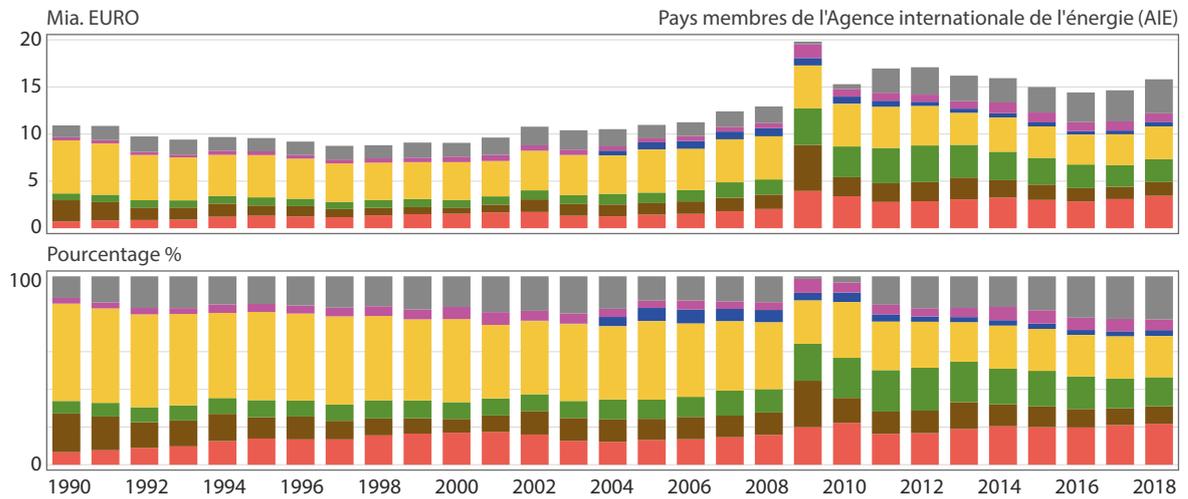
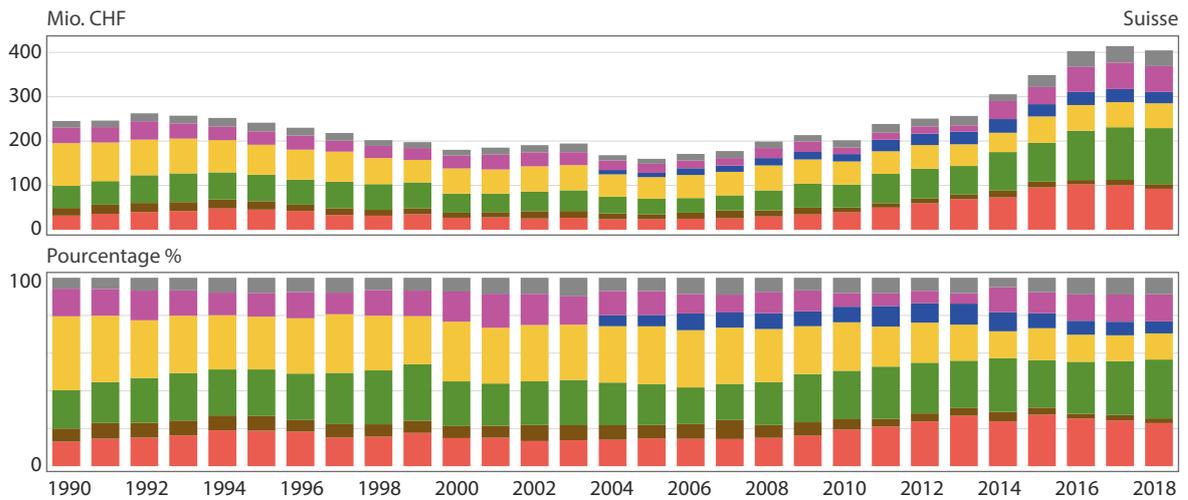
## Statistiques de la recherche énergétique suisse

Depuis 1977, l'OFEN recense des données relatives aux projets de recherche et développement et aux projets pilotes et de démonstration. Ce relevé ne concerne que les projets financés – totalement ou en partie – par les pouvoirs publics (Confédération et cantons),

le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), Innosuisse ou l'Union européenne (UE). Les informations relatives à chaque projet spécifique sont disponibles dans le système d'information public de la Confédération ([www.aramis.admin.ch](http://www.aramis.admin.ch)), du FNS ([p3.snf.ch](http://p3.snf.ch)) et

de l'UE ([cordis.europa.eu](http://cordis.europa.eu)), ainsi que sur le site Internet des institutions concernées.

Le graphique de la page suivante montre les dépenses du secteur public pour la recherche énergétique en Suisse et dans les pays membres



- Efficacité énergétique
- Énergies renouvelables
- Électricité et stockage
- Sources d'énergie fossile / CCS
- Fission et fusion nucléaires
- Hydrogène et piles à combustible
- Recherche transversale

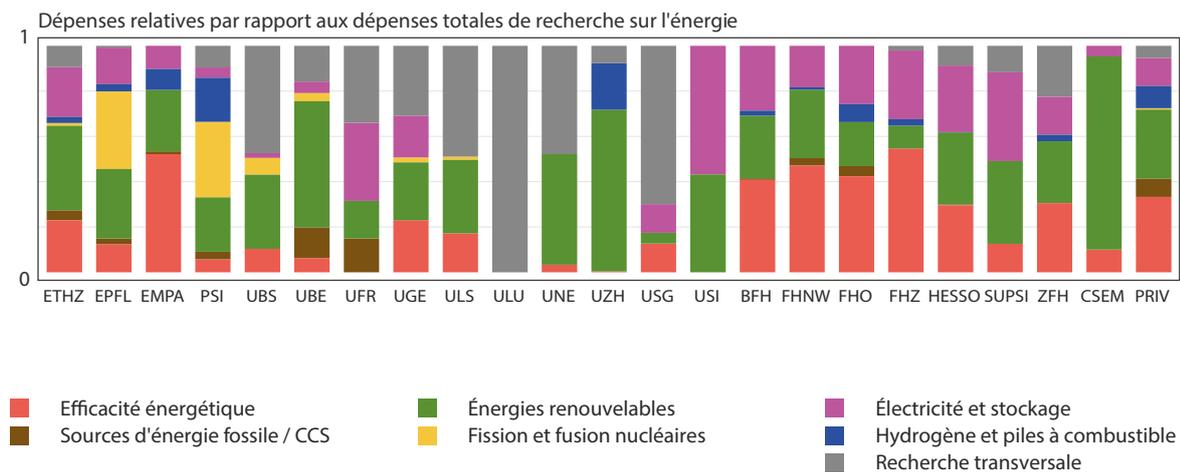
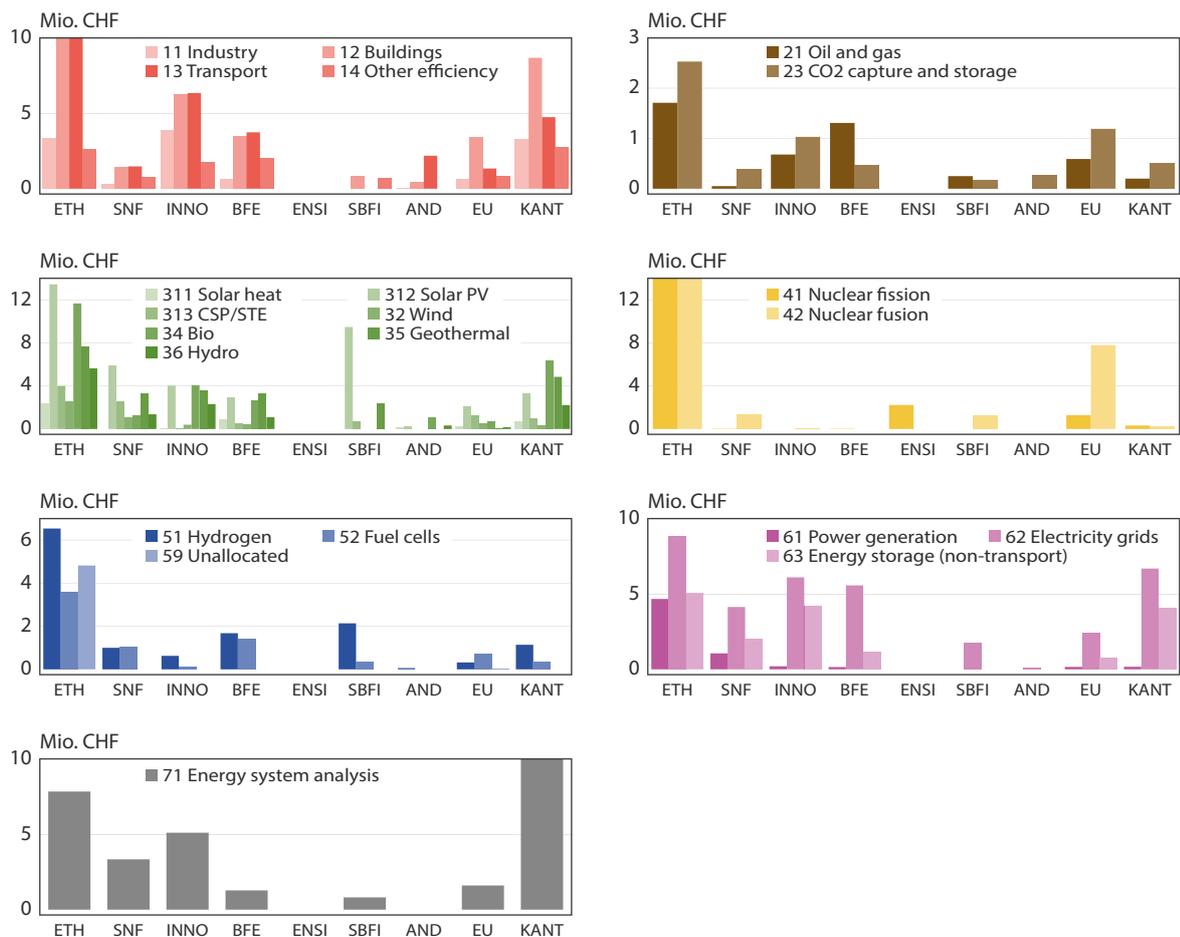
**Aperçu à long terme des fonds publics consacrés à la recherche énergétique en Suisse et dans les pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Les valeurs réelles (corrigées de l'inflation) sont indiquées et se situent entre 0,3 et 0,65 pour mille du produit intérieur brut pour la Suisse. Les fonds utilisés sont ventilés selon la classification de l'AIE.**

de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) depuis 1990 (en millions de francs suisses, corrigés de l'inflation ou en milliards d'euros), ventilées selon la classification de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

En 2018, le secteur public en Suisse aura dépensé 404 millions de francs

suisses pour la recherche sur l'énergie. Le domaine des EPF y a contribué le plus largement, à hauteur de 39 % (voir le graphique de la page suivante). L'OFEN, avec le Fonds national suisse de la recherche scientifique, a été le troisième sponsor de la recherche après Innosuisse (13 %), avec une part de 9 et 8 % respective-

ment. Sur les 35.3 millions de francs dépensés par l'OFEN en 2018, environ 18.5 millions sont allés à des projets d'efficacité énergétique, environ 16.9 millions à des projets d'énergies renouvelables et environ 2 millions à des projets dans le domaine des sciences humaines et sociales.



(Haut) Origine du financement public en 2018, ventilé par domaines de recherche selon la classification de l'Agence internationale de l'énergie AIE (en millions de francs suisses, non corrigé de l'inflation). EPF = Domaine des EPF, FNS = Fonds national suisse de la recherche scientifique, INNO = Innosuisse, BFE = Office fédéral de l'énergie, IFSN = Inspection fédérale de la sécurité nucléaire, SBFI = Secrétariat d'Etat à l'éducation, à la recherche et à l'innovation, AND = Autres, EU = Union européenne, KANT = Cantons.

(Bas) Dépenses relatives en 2018 pour des activités de recherche énergétique des haute écoles suisses (voir la légende dans le diagramme de la page suivante) selon la classification de l'AIE.



Dépenses en 2018 pour les activités de recherche énergétique dans différentes universités suisses: ETHZ = EPF Zurich, EPFL = EPF Lausanne, EMPA = Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, PSI = Institut Paul Scherrer, UBS = Univ. Basel, UBE = Univ. Bern, UFR = Univ. Fribourg, UGE = Université de Genève, ULS = Université de Lausanne, ULU = Université de Lucerne, UNE = Université de Neuchâtel, UZH = Université de Zurich, USG = Université de Saint-Gall, USI = Université de la Suisse italienne, BFH = Haute école spécialisée de Berne, FHNW = Haute école spécialisée du Nord-Ouest de la Suisse, FHO = Haute école spécialisée de Suisse orientale, FHZ = Haute école spécialisée de Suisse centrale, HESSO = Haute école spécialisée de Suisse occidentale, SUPSI = Haute école spécialisée de Suisse italienne, ZFH = Haute école spécialisée de Zurich, CSEM: Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique, PRIV = Secteur privé.

# Effacité énergétique



ue

ité énergétique

## Intégration des énergies renouvelables de «manière harmonieuse»

En tant que réseaux électriques locaux, les «microgrids» peuvent servir à soutenir le réseau de distribution en équilibrant les fluctuations de la production d'énergie renouvelable. L'efficacité au sein d'un «microgrids» devrait croître si l'on peut se passer des conversions entre courant continu (DC) et courant alternatif (AC). Divers projets sur ce thème sont en cours en Suisse, en partie dans le cadre de la coopération européenne, où les technologies nécessaires sont développées et testées.

Les «microgrids» sont des réseaux électriques autonomes comprenant des générateurs d'énergie, des installations de stockage et des consommateurs. Ils peuvent être structurés en réseaux locaux insulaires ou en réseaux partiellement autonomes. Avec l'augmentation de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, les «microgrids» gagnent en importance: au lieu d'alimenter le réseau public en électricité solaire produite celle-ci est directement consommée ou stockée localement. Cela signifie que les réseaux de transport et de distribution sont moins affectés par les fluctuations de la production. Les chercheurs estiment que ces réseaux peuvent permettre l'intégration en Suisse d'énergies renouvelables pour produire jusqu'à 50 % de la consommation annuelle totale d'électricité sans avoir à renforcer le réseau électrique.

Les modules photovoltaïques génèrent du courant continu; celui-ci est généralement converti en

courant alternatif et alimente les consommateurs ou le réseau électrique public. Dans l'industrie par contre, de nombreux moteurs fonctionnent à courant continu ou Certains consommateurs fonctionnent à base de courant continu comme l'éclairage LED ou les moteurs industriels qui sont de gros consommateurs. Alors pourquoi convertir d'abord l'énergie solaire en courant alternatif et ensuite la rectifier vu que chaque conversion entraîne des pertes? Les chercheurs s'intéressent donc de plus en plus aux «DC microgrids».

Jusqu'à présent, la technologie de transmission en courant continu a été peu utilisée en Suisse et il n'existe pratiquement aucun système standard sur le marché. Les chercheurs de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale en Valais (HES-SO Valais Wallis) veulent changer cela. Dès 2015, un «DC microgrid» semi-autonome a été en place en tant que démonstrateur. Depuis lors, le système a été déve-

**La Haute école spécialisée de Suisse occidentale en Valais (HES-SO Valais Wallis) fait la démonstration d'un micro-réseau («microgrids») entièrement fonctionnel, dans lequel sont intégrés les composants pour la production, le stockage et la consommation d'électricité. Ces composants sont couplés via un circuit intermédiaire innovant (bus) basé sur une tension DC de 700 V. La puissance de crête de 20 kW générée par le photovoltaïque est dimensionnée de manière à pouvoir étudier les niveaux de puissance pertinents pour les applications industrielles (source: Christoph Ellert, HES-SO Valais).**

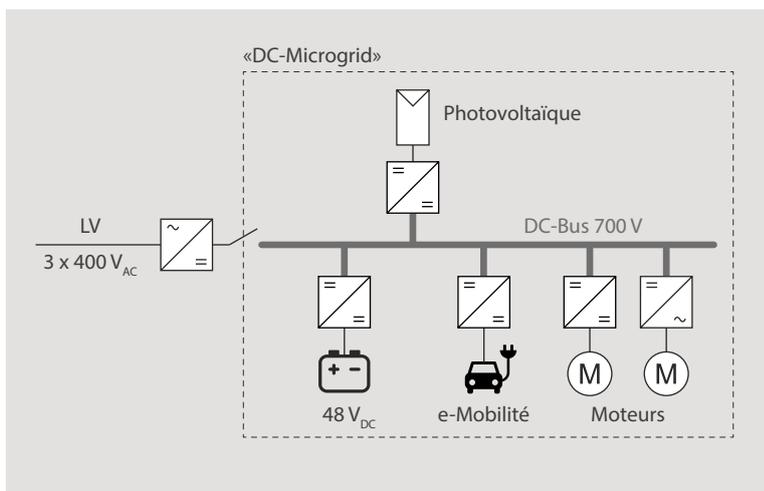
loppé de manière continue et de nouveaux composants, algorithmes de contrôle et interfaces de communication ont été mis en œuvre. Aujourd'hui, ce démonstrateur offre toutes les fonctions nécessaires à un large éventail d'applications dans l'environnement industriel et permet ainsi de tester de nouveaux développements et composants.

Le projet européen «DCSMART» est également axé sur le courant continu. Il s'agit de développer des technologies en courant continu pour les utiliser dans des réseaux dits intelligents («smart grids»). Des chercheurs suisses sont partenaires de ce projet et se concentrent sur l'intégration du photovoltaïque, du stoc-

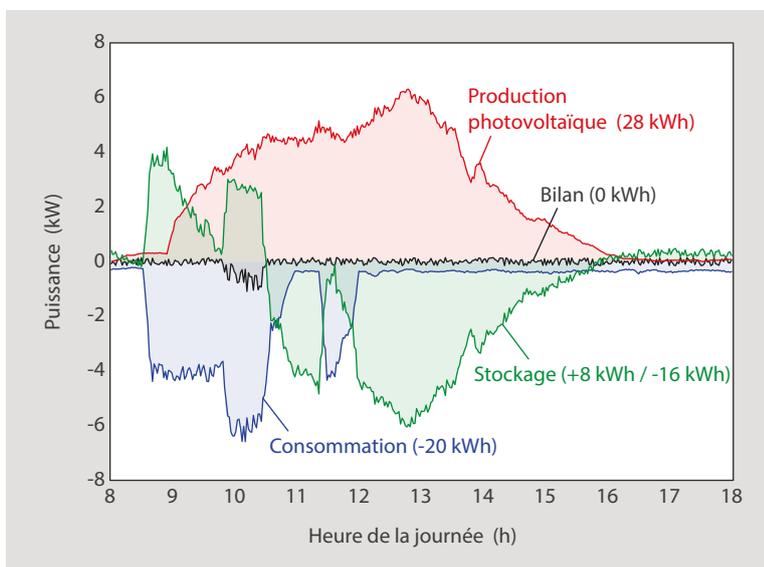
kage des batteries et des moteurs industriels. Dans le cadre d'un projet pilote connexe, des chercheurs du Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique ont construit un petit «DC microgrid» à la station d'épuration des eaux usées de Neuchâtel (STEP): un emplacement intéressant car de nombreux processus à forte consommation d'énergie y sont présents et la STEP produit de l'électricité localement. Les essais ont permis d'augmenter la consommation interne et de lisser les pics de production, ce qui pourrait présenter un intérêt économique.



Convertisseurs DC/DC individuels modules photovoltaïques sur le toit de la HES-SO Valais Wallis. Chaque des 45 modules disponibles est connecté au «bus» DC via son propre convertisseur permettant à chaque module d'opérer de manière optimale. L'efficacité des convertisseurs individuels est de 97 à 98 % (source: HES-SO Valais Wallis).



En règle générale, les systèmes de distribution électrique à basse tension fonctionnent avec la technologie du courant alternatif (AC). Les systèmes basés sur le courant continu (DC) avec des tensions entre 300 et 750 V sont particulièrement intéressants pour les applications industrielles. Un «bus» DC est connecté au réseau de distribution AC local avec une seule unité «frontale». En éliminant les conversions AC/DC supplémentaires entre les sources DC (photovoltaïque) et les charges DC (variateurs de vitesse pour moteurs, pompes, compresseurs) ou le stockage (batteries, électrolyse), l'efficacité devrait augmenter (graphique selon la HES-SO Valais Wallis).



Un projet de la Haute école spécialisée de Sion (HES-SO Valais Wallis) étudie les avantages techniques et économiques d'un micro-réseau à courant continu à l'échelle industrielle. Les prévisions météorologiques et de consommation permettent de lisser l'échange avec le réseau de distribution. L'exemple montre les performances de l'algorithme de contrôle, qui permet d'obtenir un lissage complet de l'équilibre DC/AC malgré la forte fluctuation de la production d'électricité photovoltaïque. L'axe vertical indique la puissance en kW. Les chiffres en kWh entre parenthèses indiquent la puissance intégrée sur la journée (graphique basé sur les données de la HES-SO Valais Wallis).

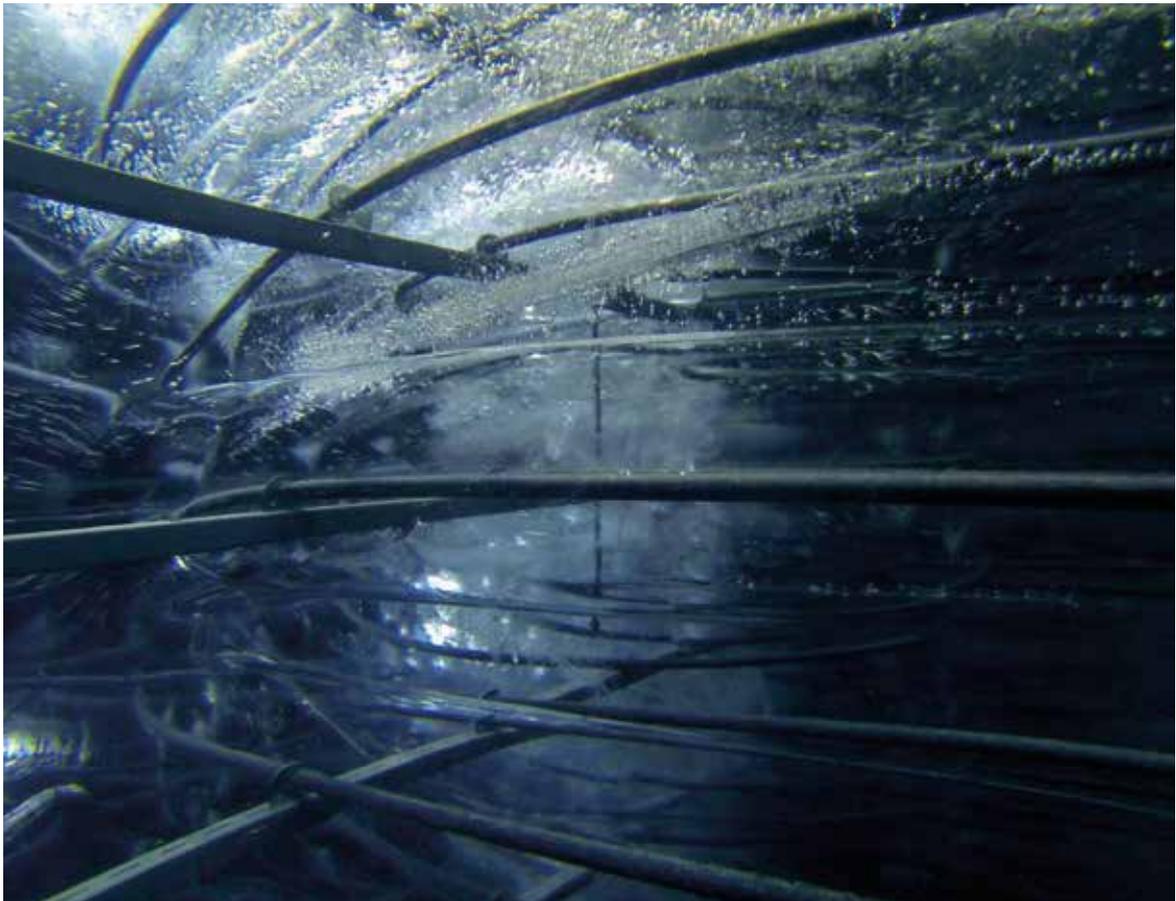
## Les pompes à chaleur avec le soutien au soleil

La décarbonisation de l’approvisionnement en chaleur est une préoccupation centrale de la «Stratégie énergétique 2050». Les pompes à chaleur, qui sont déjà standard dans les nouveaux bâtiments aujourd’hui, présentent le plus grand potentiel pour y arriver. Reste à savoir comment les exploiter efficacement et les compléter par l’énergie solaire. La Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse a étudié différentes approches de pompes à chaleur fonctionnant sans sonde géothermique.

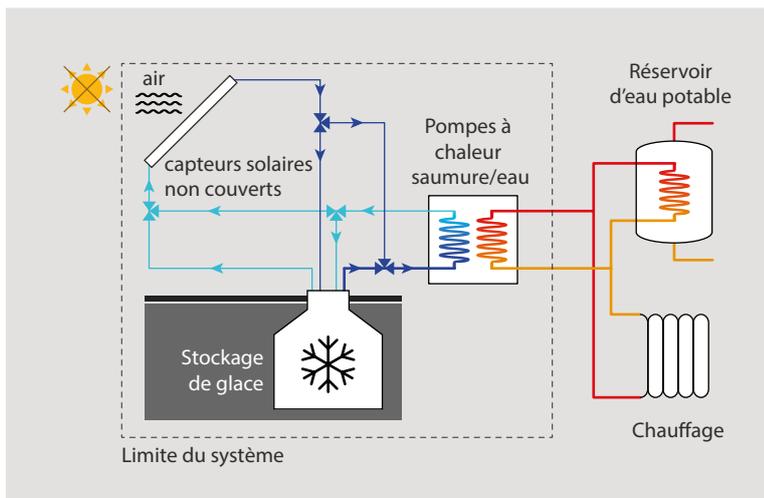
La combinaison du photovoltaïque (PV) et de la pompe à chaleur est déjà largement utilisée dans les maisons individuelles et les petits immeubles à appartements. Pour mieux utiliser sa propre électricité PV, le système peut être complété par un plus grand réservoir de chaleur ou une batterie. Avec une batterie, la pompe à chaleur peut fonctionner avec sa propre électricité

même lorsque le soleil ne brille pas. En outre, la quantité d’électricité tirée du réseau est réduite. Le bilan est encore meilleur si l’on utilise un système intelligent de gestion de l’énergie (EMS). Il contrôle la pompe à chaleur en fonction de l’énergie solaire disponible et non de la demande de chaleur: si le soleil brille, le réservoir de chaleur est chargé. Pour augmenter sa capacité, le ré-

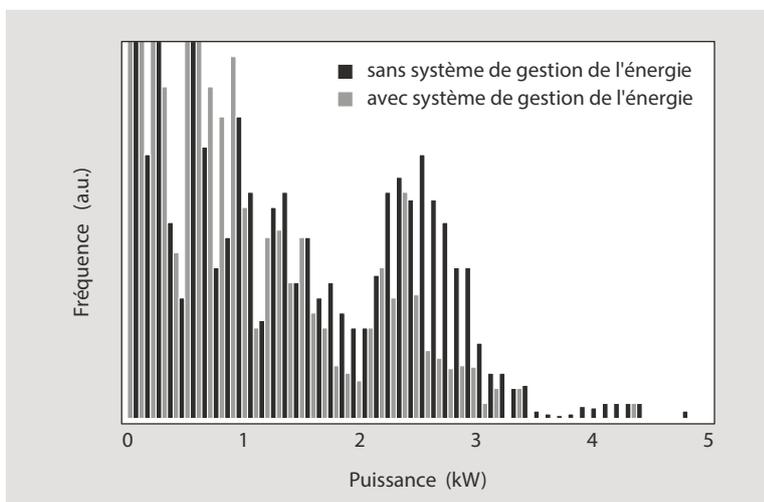
servoir de stockage est également chauffé plus que d’habitude. Des simulations réalisées par des chercheurs de la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW) ont montré, qu’un bâtiment résidentiel équipé d’une pompe à chaleur air/eau consomme moins d’électricité sur le réseau grâce à l’EMS. Cependant, la consommation totale d’électricité est plus élevée, parce que l’ef-



**Système de stockage de glace souterrain avec une capacité de 30 000 kWh. Les systèmes de stockage de glace utilisent la chaleur latente de l’eau pour stocker ou relâcher de la chaleur lors de la transition de phase entre l’eau et la glace. Dans la plage de température supérieure à 0 °C, ils peuvent également servir d’accumulateurs de chaleur sensibles (source: SCHNEPF Planungsgruppe Energietechnik, Nagold, Allemagne).**



Dispositif d'essai dans lequel la pompe à chaleur est alimentée en chaleur par un capteur solaire (absorbeur à tube non couvert) et un réservoir de stockage de glace. Le réservoir de glace fonctionne également comme un réservoir pour la chaleur solaire (graphique selon FHNW).



Dans un système de chauffage avec une pompe à chaleur air-eau, un système photovoltaïque et une batterie, un système de contrôle intelligent (EMS) soulage le réseau. Un système de gestion de l'énergie réduit la fréquence des pics de demandes et d'injections, un paramètre important pour le gestionnaire de réseau (graphique basé sur les données du FHNW).

efficacité de la pompe à chaleur pour atteindre la température plus élevée dans le réservoir de stockage est plus faible. Du point de vue des gestionnaires de réseau, un EMS présente des avantages, car les pics de demande et d'injection sont moins fréquents.

Une façon d'exploiter la chaleur solaire est d'utiliser des absorbeurs solaires en combinaison avec un réservoir de stockage de glace installé dans un réservoir en béton non isolé mais enterré de quelques mètres dans le sol. Il est intéressant de noter, que l'eau contenue dans le réservoir est chauffée davantage par le sol environnant et dans une moindre mesure par les absorbeurs solaires. Pendant la saison froide, cette chaleur

est extraite par la pompe à chaleur via un système de tuyaux. Si l'eau autour de ces tuyaux atteint la limite du zéro degré, des cristaux de glace se forment. Pendant cette phase de transition de liquide à solide, de la chaleur latente est libérée. Tant que le réservoir de glace ne gèle pas complètement, l'énergie thermique de la transition de phase peut être utilisée. Comme le montrent les calculs du modèle, la pompe à chaleur ne tire néanmoins qu'une petite partie de la chaleur du réservoir de stockage de glace, la plus grande partie provenant directement de l'absorbeur solaire.

Par rapport à une pompe à chaleur air/eau, le système avec absorbeur solaire et stockage de glace a un

facteur de performance annuel nettement plus élevé, ce qui équivaut à un système avec sondes au sol. Le gain d'efficacité n'est pas seulement dû au réservoir de stockage, mais surtout au fait que l'absorbeur solaire n'a pas besoin de ventilateur pour aspirer l'air ambiant. Cela permet également de réduire les émissions sonores. L'effet du réservoir de stockage de glace est d'extraire la chaleur du sol, un effet secondaire positif et important. Elle agit donc comme une «sonde géothermique».



## L'hydrogène sur les routes suisses

Les transports sont responsables d'environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre en Suisse et la décarbonisation de la mobilité est ainsi essentielle pour atteindre les objectifs climatiques. La mobilité à l'hydrogène est une alternative aux batteries, en particulier pour le trafic lourd, et est également respectueuse du climat au contraire des carburants fossiles. Les acteurs suisses font un important travail de pionnier dans ce domaine.

Si seule de la vapeur d'eau s'échappe du pot d'échappement, un véhicule à pile à combustible est sur la route: l'hydrogène ( $H_2$ ) et l'oxygène ( $O_2$ ) sont convertis en électricité dans une pile à combustible, qui à son tour entraîne un moteur électrique. Cette technologie présente un grand potentiel pour une mobilité sans  $CO_2$ , pour autant que l'hydrogène soit produit par électrolyse en utilisant de l'électricité renouvelable («hydrogène vert»). Un des avantages est la possibilité d'atteindre de hautes densités de stockage d'énergie ce qui, selon l'application, la rend plus pertinente que les batteries, comme pour le transport de poids lourds.

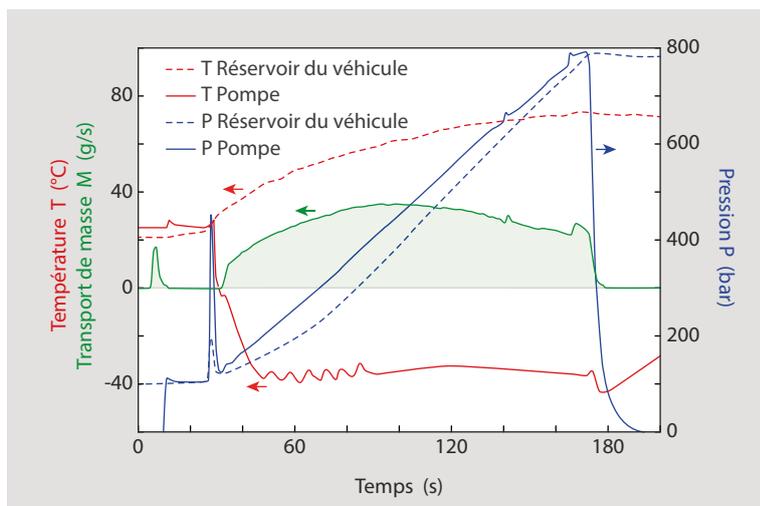
En Suisse, la mobilité de l'hydrogène est actuellement encouragée par l'initiative privée. En 2018, l'association «H2 Mobility» a été fondée, rassemblant un grand nombre d'acteurs clés de l'industrie des transports et des exploitants de stations-service dans le but d'établir une infrastructure de stations-service pour l'hydrogène à l'échelle nationale. Grâce aux camions à pile à combustible, dont la consommation d'hydrogène est de 30 à 50 fois supérieure à celle des voitures particulières, il est possible de rentabiliser les stations de ravitaillement. On utilise des camions à pile à combustible, qui sont introduits en Suisse

dans le cadre d'un joint-venture entre le fabricant coréen Hyundai et la société suisse H2energy. En 2020, les premiers d'un millier de camions arriveront en Suisse.

Une deuxième joint-venture entre H2energy, l'énergéticien Alpiq et le groupe industriel Linde garantit la production d'«hydrogène vert», qui est fourni aux stations de remplissage en Suisse – six nouvelles stations d'hydrogène sont prévues pour 2020. A cet effet, une installation d'électrolyse de 2 MW sera bientôt mise en service dans la centrale au fil de l'eau «Gösgen» d'Alpiq.



Prototype de camion à pile à combustible développé par Esoro en coopération avec Swiss Hydrogen: Essai de démarrage réussi dans une pente de 30 % et un poids total (camion plus remorque) de 35 tonnes (source: Esoro)



Depuis 2016, les véhicules à pile à combustible en Suisse peuvent être ravitaillés en hydrogène à 700 bars. Selon le protocole SAE J2601, un tel ravitaillement ne prend que quelques minutes. Pour éviter que la température dans le réservoir du véhicule n’augmente trop, l’hydrogène doit être pré-refroidi à la station-service. Le débit massique lors d’un tel ravitaillement correspond à un débit de puissance de plus de 5 MW (source: Empa, graphique basé sur les données de l’Empa).

La chaîne – production d’«hydrogène vert», construction et exploitation d’une station-service publique pour l’hydrogène et utilisation d’un camion à pile à combustible - a été démontrée à l’échelle pilote ces dernières années dans le cadre de projets plus vastes soutenus par l’Office fédéral de l’énergie. En 2016, par exemple, la première station-service d’hydrogène accessible au public a été mise en service à Hunzenschwil,

où les véhicules peuvent être ravitaillés en hydrogène à 350 (pour les camions) et 700 bar (pour les voitures particulières) en quelques minutes seulement. Entre 2017 et 2019, la consommation d’hydrogène s’est élevée en moyenne à 80 kg par semaine. Dans le cadre de ce projet, une autre station de remplissage de 700 bars a été construite à l’Empa. En outre, une directive suisse pour les stations de remplissage d’hydrogène a été élaborée, qui décrit le processus d’approbation des futures stations de remplissage a été élaborée.

Dans un troisième projet pilote, la production d’«hydrogène vert» à une échelle de 180 kW de capacité d’électrolyse a été testée à la centrale au fil de l’eau d’Eniwa à Aarau. En moyenne tous les 20 jours, l’hydrogène produit est transporté par une remorque d’un volume de stockage de 223 kg d’hydrogène à 200 bar jusqu’à la station-service de Hunzenschwil, située à une vingtaine de kilomètres. Il y est stocké temporairement dans un réservoir fixe à 50 bar. Il a été observé que la faible taille d’une telle installation de stockage intermédiaire pouvait être limitante pour le fonctionnement de la station-service. Ainsi, des unités de stockage mobiles plus grands, d’une pression nominale de 350 bar qui pourront être transportées sous forme de conteneurs standardisés seront utilisées à l’avenir. En plus de gagner l’expérience générale sur l’exploitation, un des objectifs de ce projet de démontrer le contrôle dynamique de l’électrolyse pendant les 5600 heures de fonctionnement pour que les futures installations puissent fournir des services système au réseau électrique, comme de l’énergie de réglage.



En 2020, un système d’électrolyseur de 2 MW de Hydrospider sera mis en service à la centrale au fil de l’eau «Gösgen» pour produire de l’«hydrogène vert» pour les camions à pile à combustible. Cette image montre des conteneurs-citernes où l’hydrogène produit est stocké temporairement et qui seront ensuite utilisés pour alimenter en hydrogène les stations de remplissage en Suisse (source: Hydrospider).



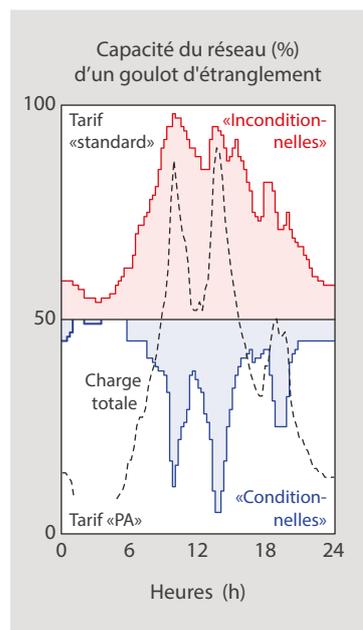
## Soulagement du réseau par la flexibilité

L'expansion de l'énergie renouvelable pousse le réseau électrique existant à ses limites dans certains cas. Au lieu d'étendre l'infrastructure du réseau, le projet «PowerAlliance (PA)» utilise la capacité redondante du réseau de moyenne tension pour alimenter des installations qui tolèrent un niveau de sécurité d'approvisionnement plus faible. Cela comprend p. ex. les systèmes Power-to-X, qui peuvent être éteints dès que la capacité de réserve du réseau est nécessaire. Les clients précisent ces charges conditionnelles dans un programme pour le lendemain et bénéficient en retour d'un tarif plus

favorable. Dans un autre projet («Optiflex»), un marché local pour la flexibilité décentralisée a été techniquement testé, dans lequel des installations de biogaz, de photovoltaïque et de stockage sont intelligemment intégrées. Un système tarifaire spécial récompense les comportements compatibles avec le réseau.



**Capacité du réseau dans le domaine des «charges inconditionnelles» (rouge) avec une sécurité d'approvisionnement élevée et des «charges conditionnelles» (bleu), qui accepte avec une sécurité d'approvisionnement moindre et bénéficie ainsi d'un tarif plus bas (par exemple, les électrolyseurs ou les batteries). Cette répartition permet une utilisation intelligente des réserves inutilisées du réseau.**



## Stocker l'électricité avec de l'air comprimé

Dans ce type de stockage, l'électricité à stocker entraîne un compresseur qui comprime l'air, lequel est ensuite stocké dans une caverne. Lorsque le stockage est déchargé, l'air comprimé se détend dans une turbine et un générateur attaché produit de l'électricité. Dans les systèmes de stockage d'air comprimé adiabatique, la chaleur de compression est également stockée dans une unité de stockage thermique, ce qui augmente l'efficacité globale. Grâce à ces systèmes, les fluctuations de la production d'électricité peuvent être compensées efficacement – à condition que les cycles de compression et d'expansion ne soient pas trop

courts. C'est qu'un modèle de simulation développé par la Haute école spécialisée la Suisse italienne (SUPSI) et l'EPF de Zurich, en collaboration avec des partenaires industriels montre. Comme les unités combinées compresseur-détendeur disponibles sur le marché sont relativement inefficaces, ces deux composants doivent être optimisés indépendamment l'un de l'autre.



## La terre comme climatiseur

Plus de 100 000 sondes géothermiques sont utilisées en Suisse, principalement pour chauffer des bâti-

ments. Si elles sont utilisées en été pour rafraîchir un bâtiment, on parle de «géocooling». Comme effet secondaire bienvenu, le sol est régénéré après l'extraction de chaleur de l'hiver et une grande partie de l'énergie de chauffage peut être restituée de cette manière. La grande différence de température entre les températures intérieures élevées et les basses températures souterraines est exploitée. Des études du SUPSI dans une propriété de Lugano à montré que le froid généré correspond à environ 30 fois l'énergie utilisée.



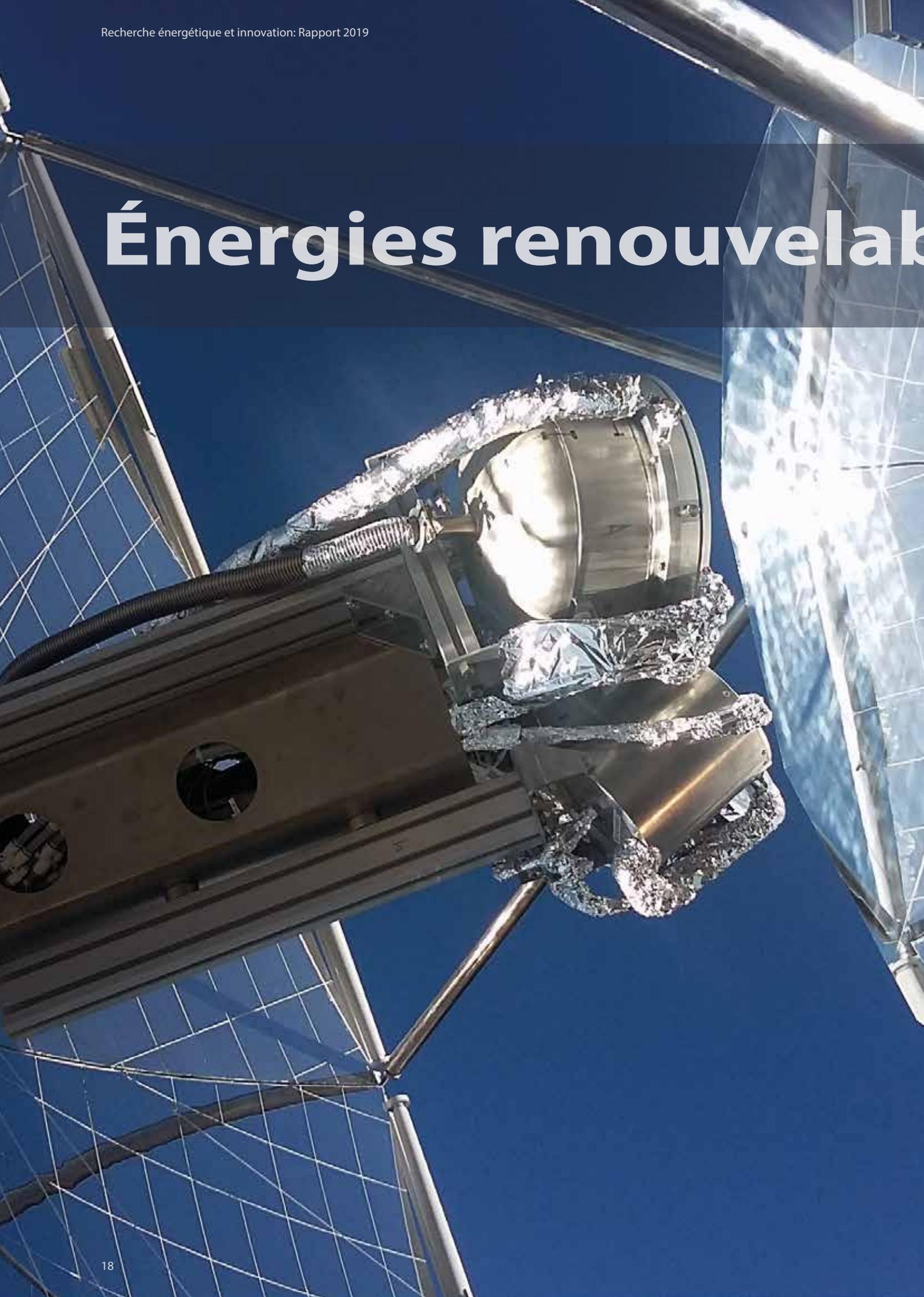
**Turbine d'un compresseur d'air à trois étages (source: MAN, Augsburg).**



**Un bâtiment situé au centre de Lugano chauffé et refroidi à l'aide de sondes géothermiques (source: SUPSI).**



# Énergies renouvelables



solaire

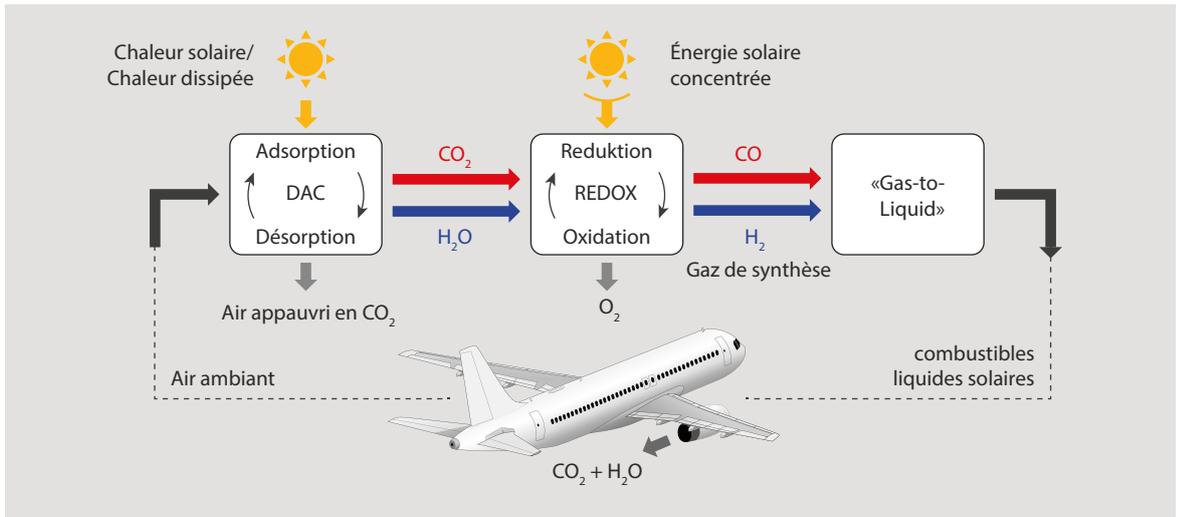
## Carburants solaires pour l'aviation

En y incluant le trafic aérien international, le secteur des transports représente environ 40 % des émissions de gaz à effet de serre de la Suisse. Même si les avions d'aujourd'hui sont au moins 50 % plus efficaces en termes de consommation de carburant qu'il y a 30 ans, ce secteur pose des défis majeurs pour la politique énergétique et climatique en raison de sa croissance rapide. Les acteurs suisses sont des leaders mondiaux dans le développement de combustibles liquides renouvelables à base d'énergie solaire concentrée et sont soutenus dans leur initiatives par l'OFEN. L'industrie de l'aviation montre un grand intérêt à cet égard, comme le soulignent les récentes déclarations d'intention communes avec le groupe Lufthansa.

Des chercheurs de la Chaire des sources d'énergie renouvelables de l'EPF de Zurich (EPFZ, Prof. Steinfeld) ont pu démontrer en 2019 pour la première fois la production d'hydrocarbures liquides – dont sont faits tous les carburants courants – à partir de la lumière solaire concentrée et de l'air ambiant dans des conditions réelles. Dans une mini-raffinerie solaire située sur le toit de l'EPFZ, un réacteur solaire à haute température sépare le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) obtenus directement dans l'air ambiant et produit un gaz de synthèse – un mélange d'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et de monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ). Ce mélange peut être transformé en hydrocarbures liquides tels que le méthanol ou le kérosène en utilisant des procédés «Gas-to-Liquid» éprouvés. La chaîne de processus alimentée par l'énergie solaire (voir la figure de la page suivante) utilise l'ensemble du spectre solaire et permet de produire des combustibles solaires de manière thermodynamiquement favorable.

La technologie de récupération directe du  $\text{CO}_2$  et de l' $\text{H}_2\text{O}$  de l'air ambiant est basée sur une adsorption et une désorption cyclique à commande thermique où un sorbant fonctionnalisé par une amine est appliqué. Le gaz de synthèse est ensuite produit dans une unité redox solaire, qui clive thermochimiquement le  $\text{CO}_2$  et l' $\text{H}_2\text{O}$  par un processus de cycle de réduction-oxydation (redox) en utilisant le cérium comme matériau redox. Dans une première étape (solaire), le cérium oxydé est réduit thermiquement avec de l'énergie solaire concentrée, ce qui libère de l'oxygène. Dans une deuxième étape (non solaire), l'oxyde de cérium réduit réagit avec le  $\text{CO}_2$  et l' $\text{H}_2\text{O}$  pour produire le gaz de synthèse. Le cérium est ensuite réoxydé et est disponible pour d'autres cycles. Dans le système de mini-raffinerie solaire de l'EPFZ, l'absorption de l'énergie solaire (récepteur) et la réaction thermochimique ont lieu au sein du même réacteur. Deux réacteurs solaires identiques sont utilisés en parallèle pour effec-

**Mini-raffinerie solaire pour la production de combustibles solaires à partir d'air et d'énergie solaire sur le toit de l'EPFZ (source: EPFZ).**



En 2019, l'EPFZ a pu démontrer pour la première fois la production de combustibles liquides solaires à base d'eau et de dioxyde de carbone extraits de l'air et utilisant l'énergie solaire concentrée. La technologie développée à l'EPFZ a été démontrée à la fois dans une mini-raffinerie directement sur le toit de l'EPFZ et à plus grande échelle sur une tour solaire à Madrid dans le cadre d'un projet de l'UE. Les carburants liquides renouvelables sont particulièrement importants pour le trafic aérien, où il existe peu ou pas d'alternatives techniques (graphique selon EPFZ-PREC).

tuer les deux réactions – la réduction solaire et l'oxydation non solaire – en alternance.

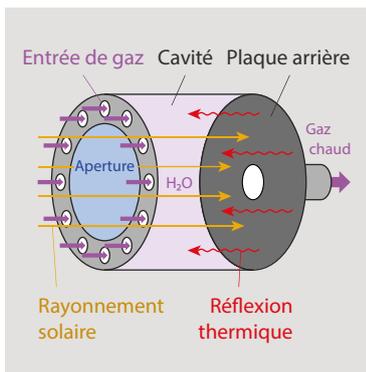
Deux spin-offs de l'EPFZ ont émergé du groupe de recherche d'Aldo Steinfeld: Climeworks et Synhelion. Ces dernières années, Climeworks a développé avec succès un produit pour capturer le CO<sub>2</sub> de l'air comme décrit ci-dessus. Synhelion travaille à la mise sur le marché de la technologie pour la production de combustibles solaires. Pour mettre en œuvre ce processus, l'approche de Synhelion consiste à séparer l'absorption de l'énergie solaire, le stockage de

la chaleur à haute température et la réaction thermochimique afin d'optimiser le rendement global. Dans un absorbeur solaire haute température nouvellement développé, le principe de «l'effet de serre» est exploité: le volume de gaz dans une cavité absorbe la réflexion thermique de la plaque noire chauffée par le rayonnement solaire concentré et est ainsi fortement chauffé. Le gaz (vapeur ou CO<sub>2</sub> par exemple) sert de caloporteur et, couplé à une unité de stockage thermique, fournit en continu l'énergie thermique nécessaire à la décomposition thermochimique du CO<sub>2</sub> et du H<sub>2</sub>O dans un réacteur non solaire.

Après que ce nouveau concept d'absorbeur a été étudié intensivement de manière théorique avec des chercheurs de la Haute école spécialisée la Suisse italienne (SUPSI), un premier réacteur pilote à l'échelle de 200 kW a été testé avec succès en 2019 sur le simulateur solaire de 300 kW du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR). En utilisant la vapeur comme gaz absorbant, des températures supérieures à 1550 °C sont atteintes.



Nouveau concept d'absorbeur solaire de Synhelion avec transfert de rayonnement vers le gaz caloporteur (graphique d'après Synhelion). Un réacteur pilote de 200 kW (source: Synhelion) a été testé avec succès en 2019 sur le simulateur solaire de 300 kW du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) (à droite, source: DLR/M. Hauschild) et des températures supérieures à 1550 °C sont atteintes.



## Le «biochar» issu des déchets

Dans la carbonisation hydrothermale (HTC), la biomasse est carbonisée sous chaleur et pression. De cette façon, les résidus organiques peuvent être utilisés pour produire de l'énergie et les nutriments des plantes peuvent être restitués au sol.

La Suisse produit de grandes quantités de résidus organiques riches en nutriments, tels que les boues d'épuration, le lisier, les déchets verts ou les restes de nourriture qui peuvent être valorisés pour la production d'énergie et comme engrais naturels. Pour ce faire, des installations de fermentation qui produisent du biogaz à partir de biomasse humide sont souvent utilisées mais le carbone lié organiquement n'est généralement pas complètement converti en biogaz.

Si une valorisation optimale de la matière organique au niveau énergétique est visée, l'HTC est une alternative. Dans ce processus, correspondant principalement à une formation accélérée de lignite, la biomasse humide est transformée de manière écologique et respectueuse du climat en un produit hydrophobe et inerte en termes d'hygiène épidémique qui est similaire au charbon. De cette manière, presque l'entier du carbone est disponible pour une

éventuelle utilisation énergétique dans un processus de combustion ou de gazéification. En raison de sa grande capacité d'adsorption, le charbon peut également être utilisé comme conditionneur de sol et comme matériau auxiliaire agricole. Selon le substrat initial, le phosphore reste dans la majorité du charbon ou est transféré dans l'eau de traitement. Le traitement HTC des boues d'épuration est solution efficace de récupération du phosphore.



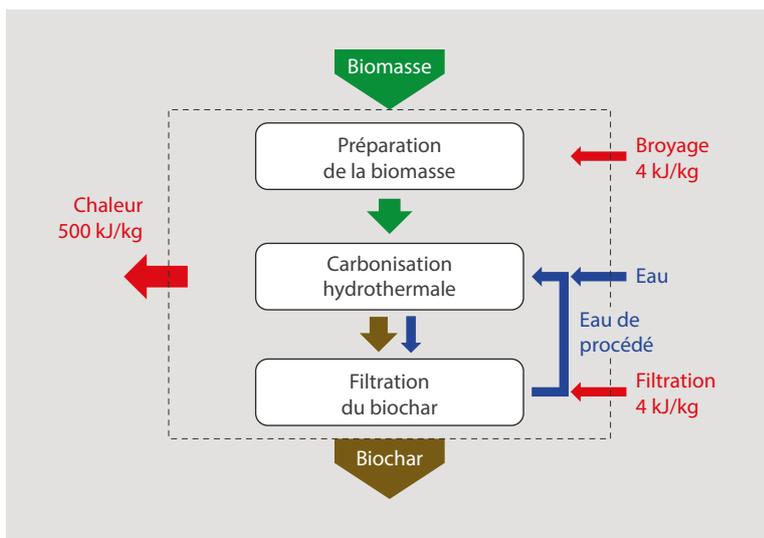
La carbonisation hydrothermale permet la valorisation des matières organiques pour la production d'énergie ou l'utilisation comme nutriments pour les plantes dans l'agriculture de manière écologique, hygiénique et respectueuse du climat. La figure montre le biochar de fumier sous forme de granulés avec une densité énergétique de 10–12 GJ/m<sup>3</sup> (source : FHNW).

Au Campus de l'innovation «Rheinmühle» à Coire, un réacteur HTC fonctionnant en continu a été réalisé dans le cadre d'un projet pilote OFEN. Dans ce réacteur, la biomasse, qui se compose principalement de carbone, d'oxygène et d'eau, est carbonisée sous pression à des températures allant de 180 à 240 °C. Les longues molécules d'hydrocarbures organiques y sont divisées en molécules plus courtes et les réactions libèrent de la chaleur qui peut être utilisée comme chaleur de processus. L'eau utilisée durant le processus peut également être fermentée en anaérobiose.

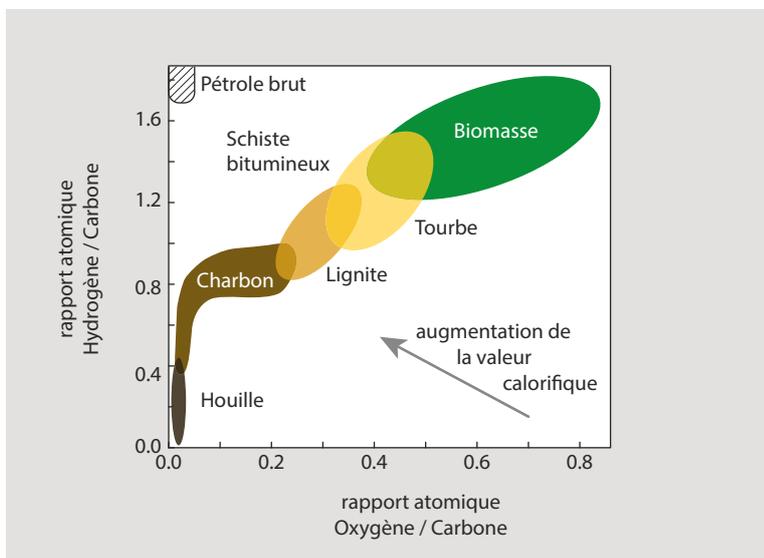
Cette installation pilote est destinée à démontrer pour la première fois

en Suisse une filière de traitement du lisier, des boues d'épuration et des déchets de restauration, qui génère de l'électricité et de la chaleur. L'optimisation des différentes étapes du processus sera étudiée et documentée de manière scientifique. Depuis janvier 2018, l'installation traite 10 tonnes de biomasse par jour. Ainsi, chaque année, environ 1000 m<sup>3</sup> de lisier provenant d'une exploitation d'élevage et environ 100 tonnes de boues d'épuration provenant de la station d'épuration de Coire devraient être traités séparément. Le charbon ainsi produit sert de combustible stockable pour les systèmes de gazéification et de combustion. Après quelques difficultés initiales, l'installation est maintenant stable.

Actuellement, les limites de gaz d'échappement (NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub>) sont encore dépassées lors des essais de combustion dans les installations de laboratoire utilisant le charbon HTC. S'ils étaient utilisés dans une installation moderne d'incinération des déchets ou dans une cimenterie, ces polluants seraient de toute façon éliminés dans les filtres de gaz de combustion. Le charbon HTC ainsi obtenu est un combustible solide intéressant en raison de son pouvoir calorifique comparable à celui du bois.



La carbonisation hydrothermale (HTC) est un processus chimique exothermique qui permet de convertir la biomasse humide en biochar. Dans ce processus, la proportion de carbone et donc la valeur calorifique sont fortement augmentées. Le processus se déroule sous pression (20 bars) et à des températures d'environ 200 °C. Bilan carbone: jusqu'à 90 % du carbone de la biomasse initiale peut être utilisé thermiquement sous forme de biochar. Bilan énergétique: selon la substance initiale, 60 à 90 % du pouvoir calorifique supérieur de la matière première est disponible dans le charbon HTC produit (source: selon ZHAW/Aqua and Gas 2014).



Différents stades de carbonisation (formation du charbon) passant de la biomasse (cellulose/bois), à la tourbe, puis à la lignite jusqu'au charbon et à la houille dans le diagramme de van Krevelen, où le rapport atomique de l'hydrogène au carbone est tracé versus le rapport atomique de l'oxygène au carbone.

## Une alternative aux pompes à chaleur air/eau

Les systèmes thermiques photovoltaïques (PVT) utilisent de manière optimale la surface du toit d'un bâtiment: ils produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur qui peuvent être utilisées dans une pompe à chaleur. La Haute école spécialisée zurichoise (ZHAW) a étudié en détail cette combinaison écologiquement et économiquement judicieuse.

Les propriétaires s'appuient souvent sur des pompes chaleur air/eau lors du renouvellement des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles, ce qui contribue grandement à la décarbonisation de l'approvisionnement en chaleur, à condition d'utiliser de l'électricité renouvelable. Toutefois, ces systèmes ont l'inconvénient de ne pas être très efficaces et de générer du bruit, surtout en hiver lorsque les températures extérieures sont basses. Dans le cadre du projet «L-Sol», des cher-

cheurs du groupe «Energies renouvelables» de la Haute école spécialisée de Zurich (ZHAW) ont étudié un nouveau système, dans lequel des modules hybrides PVT fournissent à la fois de l'électricité et de la chaleur pour la pompe à chaleur.

Ces modules consistent en une combinaison de modules photovoltaïques (PV) et solaires thermiques (T). La pompe à chaleur utilise un réservoir tampon à basse température comme source de chaleur, qui

peut être chargé avec la chaleur des capteurs PVT non couverts (non isolés). Ainsi, la chaleur est utilisée efficacement à basse température et les modules PV ont un rendement plus élevé grâce à des températures plus basses. Les premières simulations de systèmes sont prometteuses: dans les nouveaux bâtiments et les maisons individuelles rénovées au niveau énergétique, les besoins en électricité sont inférieurs d'environ 5 à 30 % par rapport à une pompe à chaleur air/eau. Les modules PVT



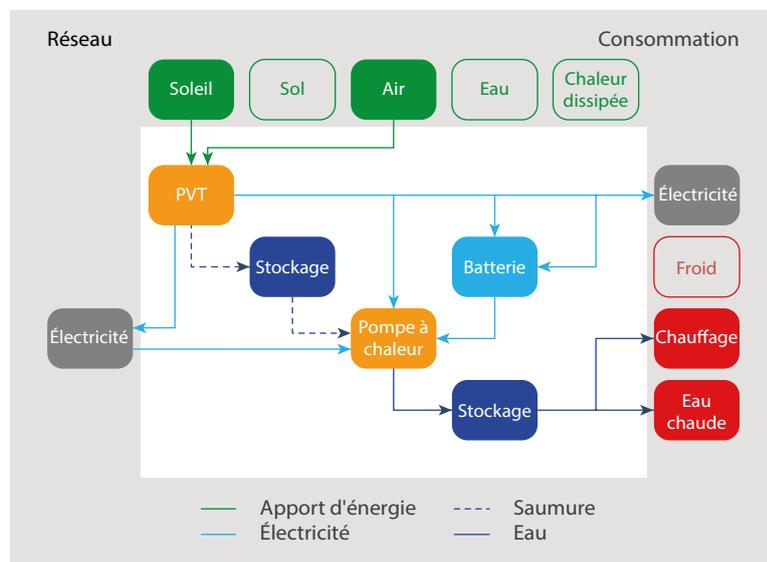
Modules thermiques photovoltaïques hybrides (PVT) sur le toit de la linth-arena sgu (source: ZHAW).

situés sur le toit fonctionnent de manière totalement silencieuse et ne dérangent donc aucun voisin. Comme aucun terrassement n'est nécessaire, le système est particulièrement adapté aux bâtiments existants et aux endroits où aucune sonde géothermique ou extraction d'eau souterraine n'est possible.

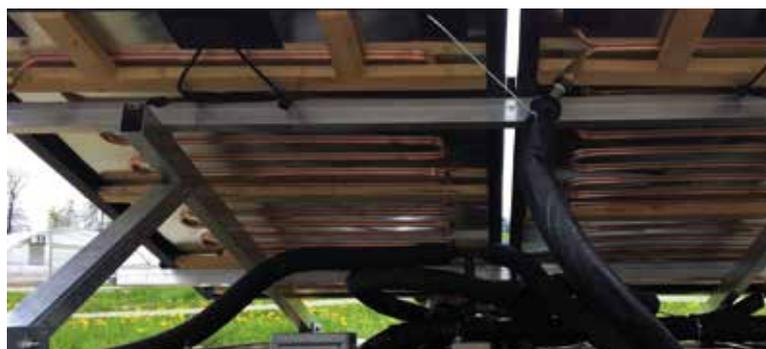
Cette technologie innovante n'est pas bon marché. Cependant, les coûts totaux peuvent être réduits sur 20 ans au niveau d'un système de pompe à chaleur air/eau si les modules PV normaux sont équipés d'échangeurs de chaleur à l'arrière. Bien que ces derniers produisent individuellement 20 % de chaleur en moins que les modules PVT d'origine, cela n'est guère perceptible dans le système global grâce à une durée de vie allongée de ces nouveaux panneaux. Les avantages l'emportent ainsi, malgré des coûts d'investissement plus élevés.

Ce système est judicieux pour les bâtiments bien isolés: p. ex. si le système de chauffage au mazout d'une maison individuelle sur le Plateau suisse, dont la consommation annuelle de mazout est de 1000 litres, est remplacé par le système «L-Sol», un système PVT de 48 m<sup>2</sup> peut générer la totalité des besoins en chaleur et environ 20 % des besoins annuels en électricité de la pompe à chaleur elle-même. Si le système est contrôlé de manière à ce que la pompe à chaleur fonctionne lorsque le soleil brille, le bâtiment peut couvrir également environ 45 % des besoins en électricité de la pompe à chaleur. De plus, le bâtiment peut être refroidi passivement en été grâce au circuit hydraulique du chauffage par le sol. La chaleur dissipée par le bâtiment est utilisée pour l'eau chaude sanitaire ou libérée la nuit par les modules PVT.

Une matrice de dimensionnement développée dans le cadre du projet offre une aide à la planification: elle indique le domaine d'application et permet un dimensionnement initial et approximatif des composants. Un système typique pour une maison individuelle comprend 15 à 30 modules PVT, un ballon tampon, une pompe à chaleur et un réservoir de 600 litres.



**Vue d'ensemble du système «L-Sol»:** le soleil et l'air (vert) servent de sources de chaleur ambiante, les collecteurs hybrides PVT produisent de l'électricité et de la chaleur, une pompe à chaleur génère le niveau de température requis (orange). Les réservoirs de stockage thermique sont représentés en bleu foncé et l'énergie électrique en bleu clair. (Présentation selon la classification de la tâche 44 du programme SHC de l'AIE «Systèmes solaires et pompes à chaleur» selon les données de la ZHAW).



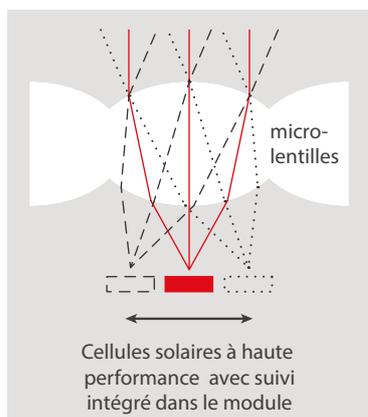
**Électricité et chaleur pour la pompe à chaleur:** cette image montre un module PV conventionnel a été équipé d'un échangeur de chaleur (source: ZHAW).

## Plus d'énergie solaire de la même surface

Le «Start-up» Insolight développe des modules photovoltaïques, où des micro-lentilles optiques concentrent la lumière du soleil et la focalisent sur des cellules à haute performance. Afin de garantir que les faisceaux de lumière frappent les cellules à n'importe quel angle d'incidence, la paroi arrière du module avec les cellules solaires intégrées est ajustée de quelques millimètres au cours de la journée. Bien que cette solution innovante soit techniquement complexe, il faut beaucoup moins de modules pour obtenir le même rendement électrique et les coûts de production de l'énergie pourraient être considérablement plus bas. Sur des toits, où l'espace est limité, produire plus de la même surface est un avantage conséquent.



**Le rayonnement solaire direct est regroupé sur des cellules à haute performance grâce à un système de concentrateur optique plane avec un grand nombre de lentilles individuelles (source: Insolight).**



## Potentiel des vents au comportement complexes

En général, les conditions de vent sont déterminées par des phénomènes météorologiques à grande échelle. En Suisse, cependant, celles-ci sont aussi fortement influencées par la topographie locale complexe. Le vent souffle souvent dans certaines régions de Suisse, alors que d'autres régions d'Europe sont calmes – et vice versa. À l'aide de modèles de calcul, les chercheurs de l'EPFZ étudient si ces corrélations peuvent être utilisées pour équilibrer d'autres productions d'énergie renouvelables variables.

Les analyses montrent, p. ex., que la force des vents dans la région du Léman et dans le coude du Rhône en Valais est nettement plus élevée dans les conditions météorologiques de haute pression que dans les régions voisines plus plates. Des modes de production anticycloniques peuvent inciter la construction de nouvelles éoliennes en Suisse, même si la seule vitesse moyenne du vent semble y être défavorable.



**En Suisse, les conditions de vent sont fortement influencées par la topographie complexe (source: pixabay.com).**

## De l'aluminium pour prolonger l'été

Il s'agit en quelque sorte du «chaînon manquant» d'un approvisionnement en énergie renouvelable: le stockage du surplus d'énergie solaire estival qui se produira à l'avenir. Un projet de l'Institut de technologie solaire (SPF) de l'université des sciences appliquées de Rapperswil est basé sur un cycle de stockage chimique de l'énergie à partir de l'aluminium: l'oxyde d'aluminium peut être réduit en aluminium élémentaire par électrolyse au sel fondu. Grâce à la densité élevée de stockage de l'énergie chimique, l'aluminium peut être stocké et transporté sous forme de granulés pendant des mois sans perte. L'énergie peut être obtenue à partir de l'aluminium par réaction oxydative avec l'eau (vapeur). Cela li-

bère de l'hydrogène, qui génère de l'électricité et de la chaleur dans une pile à combustible.

Les premiers tests avec un modèle fonctionnel au SPF ont été prometteurs.



**(A droite) Prototype de laboratoire d'un convertisseur d'aluminium pour la production d'hydrogène en combinaison avec une pile à combustible de 12 W (source: SPF).**



# Socioéconomie



## Les facteurs sociaux dans les décisions en faveur des systèmes solaires

Il est essentiel que de nombreux individus décident de produire leur propre énergie afin d'augmenter de manière significative la part d'énergie renouvelable. Le rôle joué par les voisins ne doit pas être sous-estimé.

Compte tenu du calendrier ambitieux de la «Stratégie énergétique 2050» il est important de trouver de nouveaux moyens de susciter l'intérêt de la population pour les sources d'énergie renouvelable. Des études antérieures ont déjà montré qu'en plus des incitations financières sous forme de subventions ou de taxes, la «contagion sociale» a également une influence sur le développement de nouveaux systèmes photovoltaïques. Celle-ci désigne le phénomène qui consiste pour des personnes à adopter consciemment ou inconsciemment un comportement ou un mode de pensée qu'elles observent chez les autres. On distingue deux formes: le bouche à oreille et l'imitation. Grâce au bouche à oreille, les propriétaires de systèmes photovoltaïques fournissent des informations, qui permettent à d'autres de surmonter l'incertitude qui accompagne un investissement. L'imitation est une forme de contagion plus subtile, dans laquelle on se sent contraint de suivre la norme.

Les études précédentes sur la «contagion sociale» dans le domaine de l'énergie solaire se limitaient aux ménages privés. La Haute école spécialisée de Genève a examiné non seulement les ménages, mais aussi les

entreprises et les exploitations agricoles, et a distingué différents types de systèmes photovoltaïques (systèmes en toiture, intégrés au bâtiment et au sol). Environ 60 000 systèmes installés entre 2006 et 2015 ont été examinés dans toute la Suisse.

Les résultats montrent que non seulement les particuliers, mais aussi les entreprises et les exploitations agricoles peuvent être convaincus par la «contagion sociale» du photovoltaïque, mais que l'effet de contagion est plus important chez les particuliers. Les entreprises et les exploitations agricoles sont plus susceptibles d'être influencées par des systèmes provenant d'autres entreprises que par des systèmes installés sur des toits privés. Les facteurs importants sont la proximité, la taille et l'âge des «installation modèles»: De nouvelles installations sont notamment générées lorsque d'autres sont construites à proximité immédiate. Il est montré, que les grandes installations ont un impact élevé et que les installations intégrées aux bâtiments ont un effet d'imitation plus important que les celles sur le toit – peut-être parce qu'elles sont plus visibles.



**Développement et test d'un nouveau type de technologie de système photovoltaïque adapté à l'utilisation hivernale dans la région alpine sur un toit à Saint-Moritz. Avec des modules bifaciaux posés verticalement, les inconvénients des systèmes photovoltaïques inclinés standard suivants peuvent être évités: la perte de production d'électricité en hiver (quand elle est le plus nécessaire) en raison de la couverture de neige, les structures de support massives et le risque de dommages aux modules PV et à la structure de montage en raison des charges de neige élevées (source: reech).**

# Affaires internationales



## Coopération internationale

La coopération internationale dans la recherche énergétique occupe une place privilégiée en Suisse. Au plan institutionnel, l'OFEN coordonne ses programmes de recherche avec les activités internationales afin d'en exploiter les synergies et d'éviter des doublons. Une importance particulière est accordée à la collaboration et à l'échange d'expériences dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Par le biais de l'OFEN, la Suisse participe ainsi à plusieurs programmes de collaboration technologique de l'AIE, qui s'appelaient auparavant «Implementing Agreements» ([www.iea.org/tcp](http://www.iea.org/tcp)), voir la page suivante.

A l'échelle européenne, la Suisse prend une part active – dans la mesure du possible – aux programmes de recherche de l'UE. Au niveau institutionnel, l'OFEN coordonne notamment la recherche énergétique avec le plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (SET-Plan), les European Research Area Networks (ERA-NET), les plates-formes technologiques européennes et les initiatives technologiques conjointes (JTI). Dans plusieurs domaines thématiques (réseaux intelligents, géothermie), la Suisse entretient une étroite coopération multilatérale avec certains pays.

**Une partie de l'intérieur de la station d'hydrogène de l'Empa à Dübendorf avec des raccords pour l'hydrogène, deux étages de compresseurs (à droite 440 bar, à gauche 900 bar), un stockage tampon d'hydrogène pour l'électrolyse et deux réservoirs finaux d'hydrogène pour le ravitaillement à 440 et 900 bar respectivement (source: Empa).**

**(Page 31 en haut) Dans le cadre d'un projet soutenu par l'OFEN, des chercheurs de l'Empa travaillent avec Solaronix SA au développement d'un nouveau procédé pour la production à grande échelle de cellules solaires en pérovskite par un procédé utilisant une buse à fente. Dans ces cellules solaires, la couche absorbant la lumière a une structure cristalline de pérovskite de la forme  $ABX_3$ , avec A et B représentant deux ions de taille très différente, positivement chargés (cations) et X un ion négatif (anion). Pour la production de cellules solaires en pérovskite, cinq couches composées de matériaux différents doivent être déposées. La méthode de l'Empa permet de les appliquer directement les unes après les autres, alors que dans le procédé de sérigraphie standard, les différentes couches doivent être séchées et compactées individuellement (source: Empa).**

**(Page 31 en bas) Les composants formant le cristal de pérovskite sont infiltrés sous forme de solution précurseur (encre). Cela se fait généralement par un pipetage semi-automatique, qui n'est pas très précis. Pour mieux contrôler les paramètres du processus lors de l'infiltration, l'Empa a développé une infiltration «goutte à goutte» de l'encre précurseur par impression à jet d'encre. (source: Solaronix SA/Empa).**

## Participation aux programmes de collaboration technologique de l'AIE

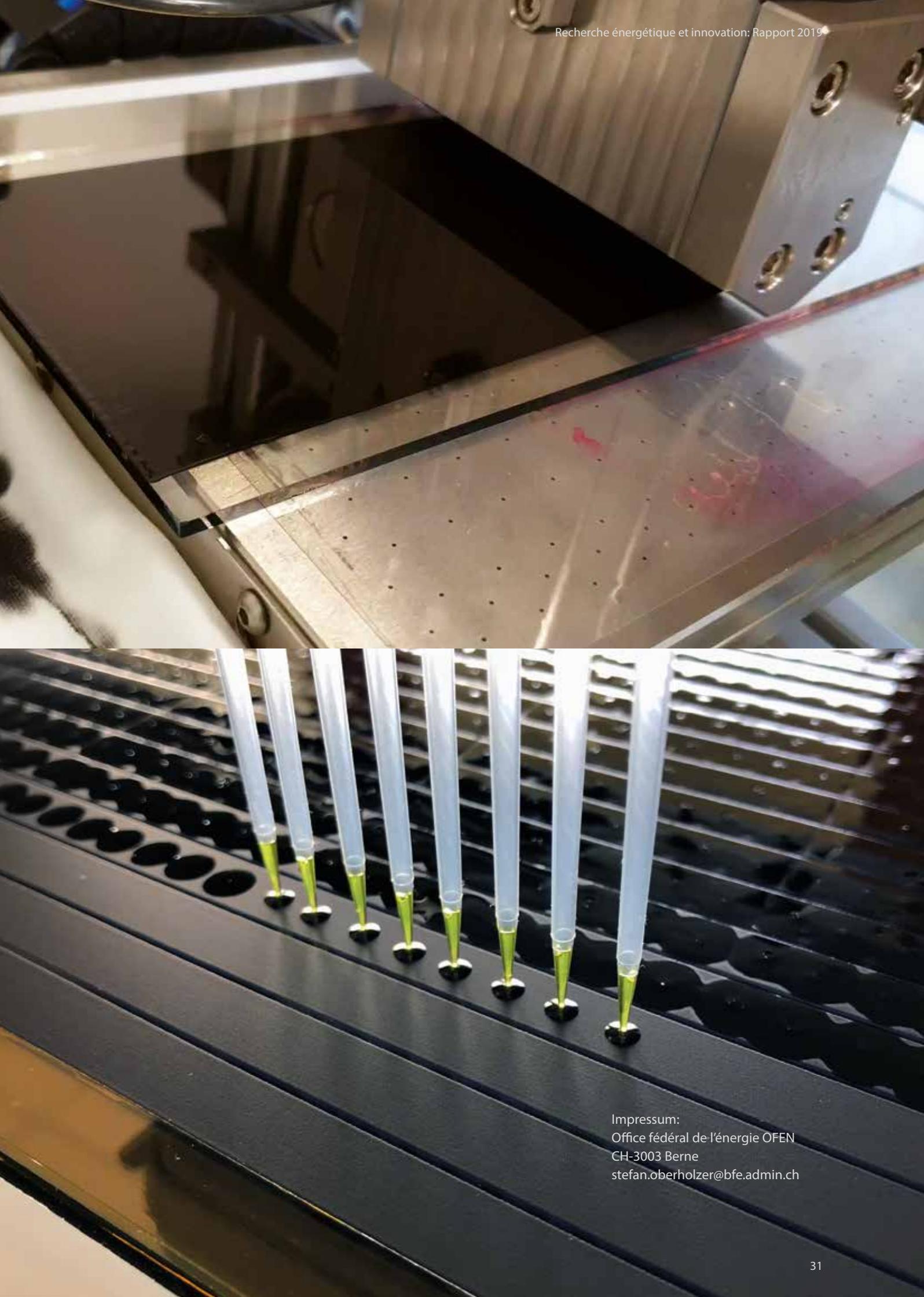
	Energy Conservation through Energy Storage (iea-eces.org)		Energy in Buildings and Communities (iea-ebc.org)
	Energy Efficient End-Use Equipment (iea-4e.org)		Heat Pumping Technologies (heatpumpingtechnologies.org)
	Demand Side Management (ieadsm.org)		International Smart Grid Action Network (iea-isgan.org)
	High-Temperature Super Conductivity		Advanced Fuel Cells (ieafuelcell.com)
	Clean and Efficient Combustion (ieacombustion.com)		Advanced Motor Fuels (iea-amf.org)
	Hybrid & Electric Vehicles Technologies (ieahev.org)		Bioenergy (ieabioenergy.com)
	Geothermal (iea-gia.org)		Hydrogen (ieahydrogen.org)
	Hydropower (ieahydro.org)		Photovoltaic Power Systems Programme (iea-pvps.org)
	Solar Heating and Cooling (iea-shc.org)		Solar Power and Chemical Energy Systems (solarpaces.org)
	Wind (community.ieawind.org)		Greenhouse Gas (ieaghg.org)
	Gas and Oil Technologies (gotcp.net)		Energy Technology Systems Analysis Program (iea-etsap.org)

## Participation aux ERA-NETs – European Research Area Networks

	Bioenergy (eranetbioenergy.net)		Solar (Cofund1 & Cofund2) (solar-era.net)
	Smart Cities and Communities (jpi-urbaneurope.eu/calls/enscc)		Accelerating CCS Technologies (act-ccs.eu)
	Concentrated Solar Power (csp-eranet.eu)		Geothermica (geothermica.eu)
	Smart Energy Systems (eranet-smartenergysystems.eu)		

## D'autres coopérations internationales

	Cooperation DACH Smart cities and communities		Cooperation DACH Smart grids
	International Partnership for Geothermal Technology		Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking



Impressum:  
Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne  
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

[www.recherche-energetique.ch](http://www.recherche-energetique.ch)