

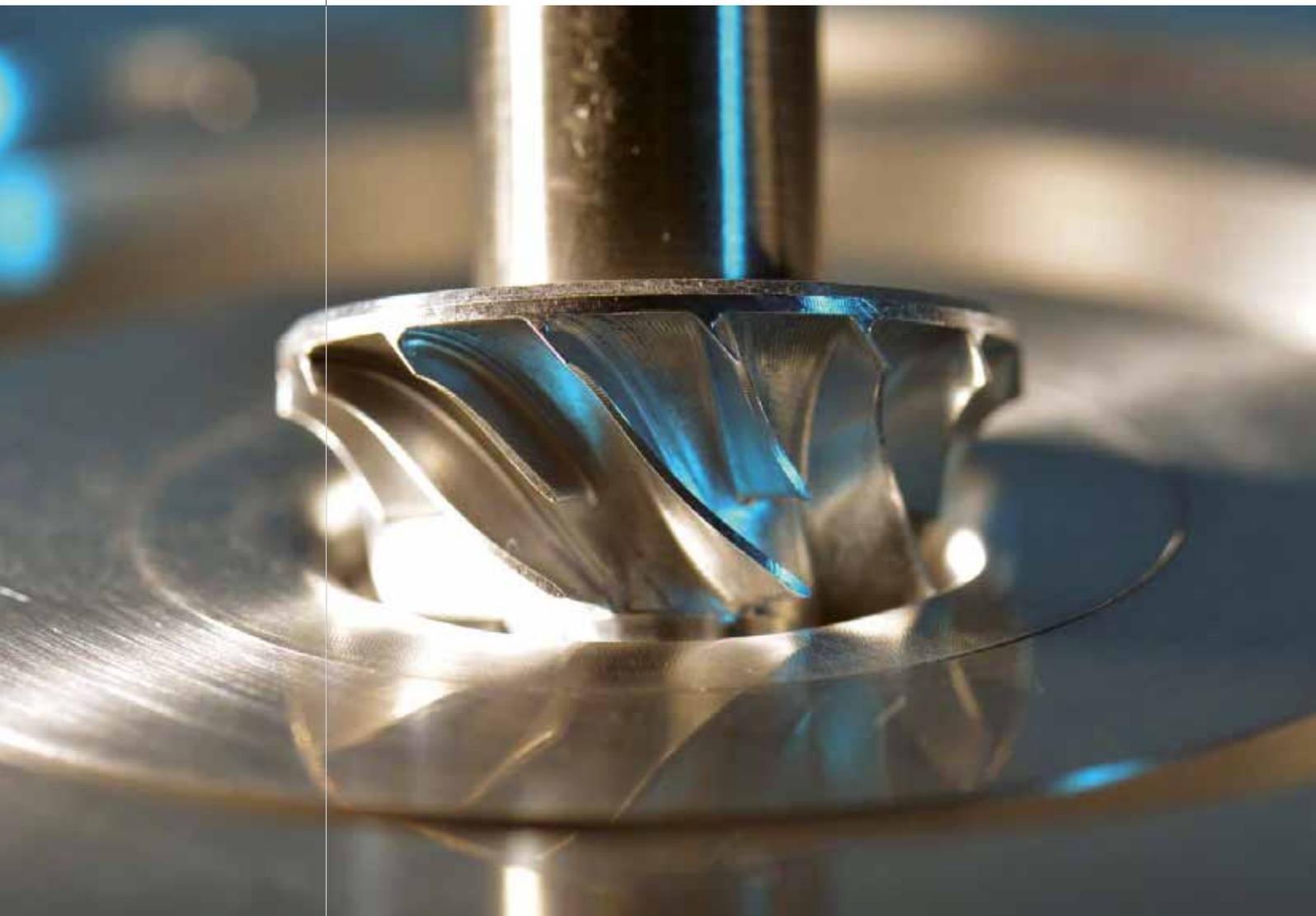


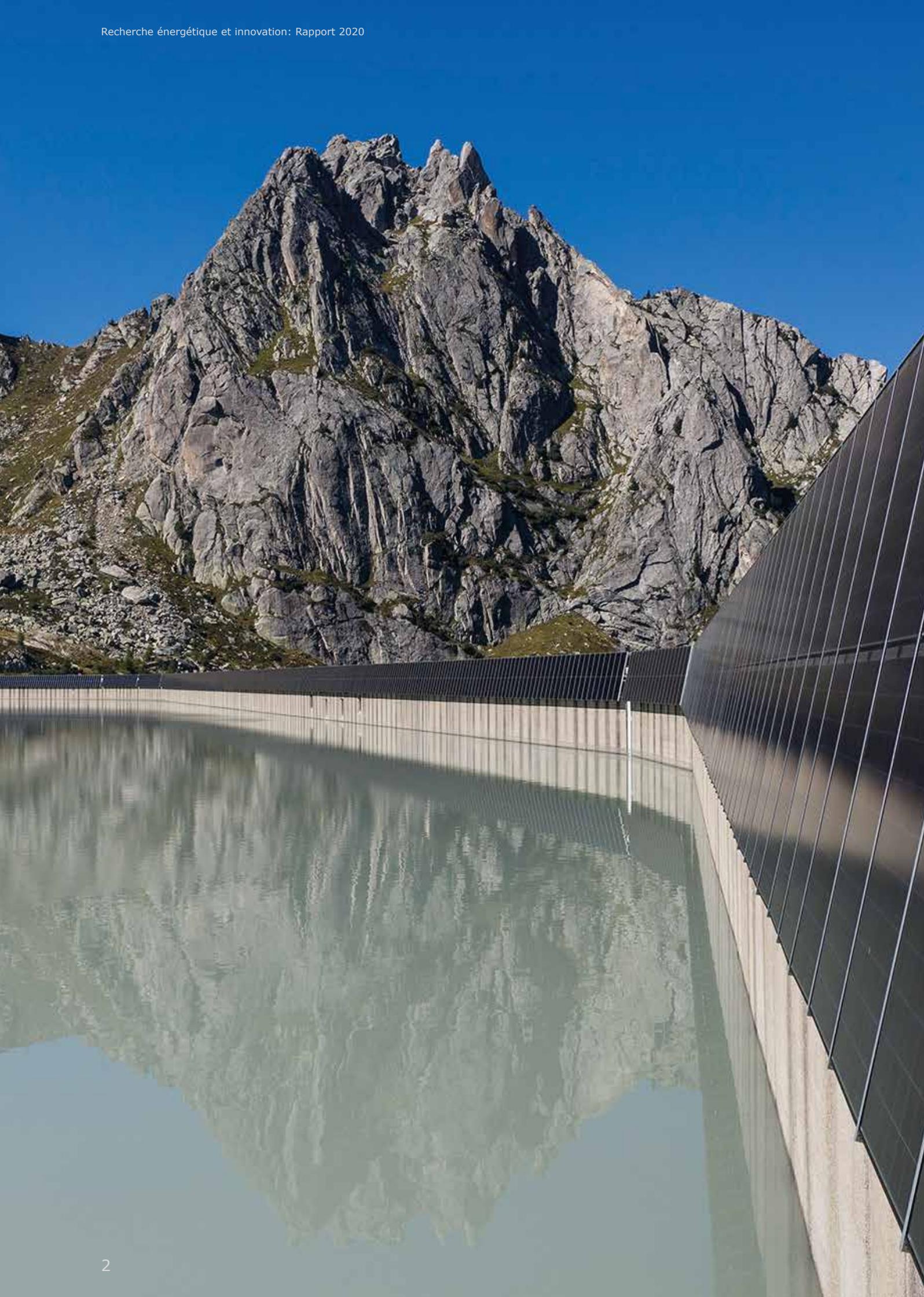
Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

# Recherche énergétique et innovation

## Rapport 2020





## Editorial

Les défis du changement climatique et de l’approvisionnement futur en énergie restent parmi les sujets les plus importants de la politique quotidienne. 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. Un premier appel d’offres (call for proposals) a été lancé l’année dernière. 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).

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

(Photo de couverture) Turbine d’un turbocompresseur de la société suisse Celeroton AG. Les turbocompresseurs compacts et efficaces, ainsi que l’électronique associée, jouent un rôle important dans les systèmes de piles à combustible pour les applications mobiles (source: Celeroton AG).



(À gauche) En 2020, le distributeur d’énergie zurichois ewz a mis en service une installation photovoltaïque de 410 kW en haute montagne au barrage d’Albigna, à 2165 m d’altitude. Du fait de son emplacement, cette installation est exposée à des conditions météorologiques extrêmes. L’analyse des données de rendement, la mesure périodique de la puissance des modules, la thermographie et l’examen de l’état général de l’installation permettent de déterminer la fiabilité à long terme des installations situées à des endroits comparables (source: ewz).



(Page suivante) Micrographie électronique à balayage de la surface d’une couche de titane poreux pour l’électrolyse PEM (source: Institut Paul Scherrer, CH-5232 Villigen).



# 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

Du SCCER au SWEET 6

Statistiques de la recherche énergétique suisse 8

## Efficacité énergétique

Les batteries – une clé pour la transition énergétique 13

Une mobilité plus efficace grâce à des semi-conducteurs efficaces 15

Le poulailler du futur: neutre en énergie, à faibles émissions, respectueux des animaux 17

Préparer les réseaux électriques pour demain 19

Diagnostic innovant des piles à combustible 19

Bilans dynamiques du cycle de vie des bâtiments 19

## Énergies renouvelables

Une autre façon d'aborder l'énergie éolienne 21

Les centrales flexibles au fil de l'eau 23

La statistique solaire vue du ciel 25

Le «Big Data» pour les prévisions solaires 27

Impact climatique des engrais issus des installations de biogaz 27

De nouveaux domaines pour le solaire thermique 27

## Socioéconomie

Le revirement du système de transport dans nos esprits 29

## Affaires internationales

Coopération internationale 31

Moins argenté – photovoltaïque moins cher 32

L'hydrogène aux émissions CO<sub>2</sub> négatives 33

Participation aux programmes de collaboration technologique de l'AIE 34

Participation aux ERA-NETs – European Research Area Networks 34

D'autres coopérations internationales 34

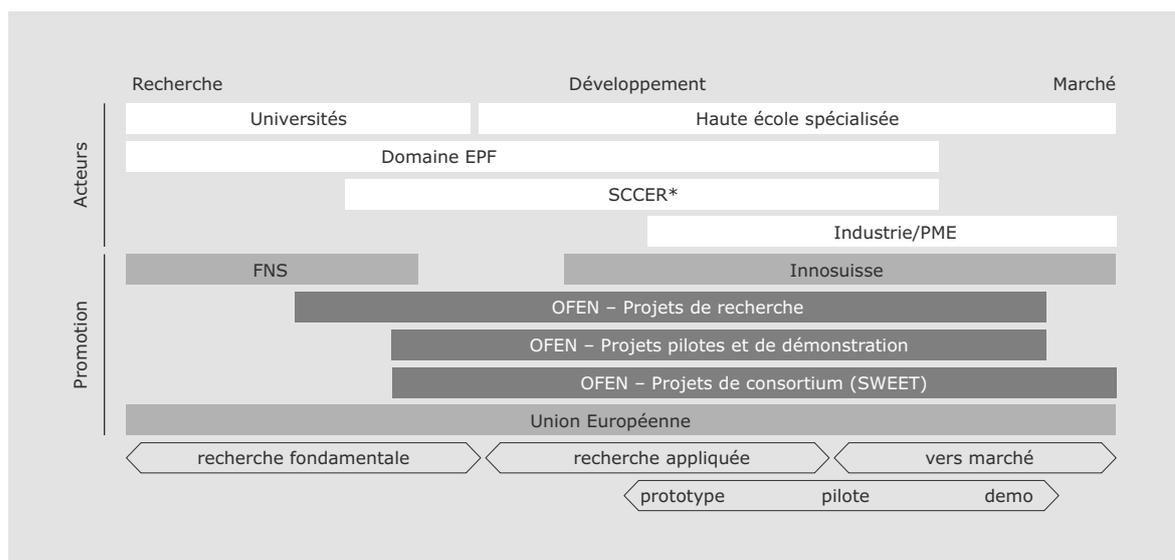
# Promotion de la technologie et de l'innovation par l'Office fédéral de l'énergie

Les électeurs suisses ont décidé en 2011 de transformer progressivement le système énergétique d'ici à 2050. En 2019, le Conseil fédéral a également décidé de réduire les émissions de gaz à effet de serre de la Suisse à un niveau net zéro d'ici 2050. Cela nécessitera également des technologies capables de compenser les émissions inévitables, provenant par exemple de l'agriculture, de la production industrielle ou du trafic aérien. Ces technologies dites «à émissions négatives» (NET) sont une condition indispensable à la réalisation de l'objectif. Dans le même temps, il convient toutefois d'accroître l'efficacité énergétique dans les bâtiments, la mobilité et l'industrie et d'accélérer massivement l'expansion des énergies renouvelables, tout en maintenant la stabilité du réseau.

La recherche énergétique revêt une importance particulière dans toutes ces tâches. Toutefois, les chercheurs doivent également être incités à s'intéresser aux questions importantes pour la stratégie énergétique 2050. Le moyen le plus efficace d'y parvenir est de faire appel à des instruments de financement appropriés. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) joue un rôle central à cet égard. Après la terminaison des Programmes nationaux de recherche (PNR) 70 et 71 sur la transition énergétique au début de 2020 et la fin des Centres suisses de compétence en recherche énergétique (SCCER) à la fin de 2020, l'OFEN est le plus important organe de financement suisse dans le secteur de l'énergie.

Avec ses programmes de recherche et de promotion, l'OFEN couvre pratiquement tout le spectre technologique. Le concept de recherche énergétique du gouvernement fédéral en est le fil conducteur. Le concept actuel pour la période 2021-2024 met un accent encore plus fort sur la recherche non technique (SSH: sciences sociales et humaines). Par conséquent, les sciences techniques et les sciences humaines devraient collaborer étroitement dès la conception des projets de recherche. C'est la seule façon de garantir que les connaissances acquises soient orientées vers les utilisateurs finaux à un stade précoce et que les méthodes et processus développés soient conçus de manière à être largement acceptés et à entrer rapidement sur le marché. L'OFEN poursuit cette approche depuis un certain temps: Traditionnellement, en plus des différents programmes de recherche technique, il gère également un programme sur la recherche socio-économique, qui est étroitement coordonné avec les autres programmes de recherche.

Avec son nouveau instrument d'encouragement de la recherche SWEET («Swiss energy research for the energy transition»), l'OFEN renforce encore la coopération entre les différentes disciplines. Les consortiums interdisciplinaires et transdisciplinaires peuvent postuler pour des projets de consortium à long terme sur des sujets sélectionnés. Un premier appel a été lancé en 2020 et les premiers projets de consortiums débiteront en 2021.



L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) 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). \*Les centres de compétences suisses en recherche énergétique (SCCER) ont été soutenus par le gouvernement fédéral de 2013 à fin 2020.

# 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 2021-2024», CORE (2020) et «Concept de recherche énergétique de l'Office fédéral de l'énergie 2021-2024», OFEN (2020).

## Du SCCER au SWEET

Le renforcement de la recherche énergétique en Suisse est un axe central de la Stratégie énergétique 2050. Après la catastrophe nucléaire de Fukushima en 2011, le Parlement suisse a notamment décidé de développer la recherche énergétique dans certains domaines de recherche. À cette fin, huit centres de compétences virtuels, appelés «Swiss Competence Centres for Energy Research» (SCCER), ont été créés dans des hautes écoles suisses dans les domaines de recherche des processus industriels, des bâtiments et des sites, de la mobilité, des réseaux, des technologies de stockage, de la biomasse, de l'approvisionnement en énergie (géothermie et hydroélectricité) et de la socio-économie. Ces centres ont

été financés par la Confédération à hauteur de plus de 250 millions de francs. Toujours en 2013, le Centre photovoltaïque a été créé au Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM). Entre 2013 et 2020, environ 800 capacités de recherche supplémentaires ont été créées au sein des SCCER. Ce renforcement des capacités s'est achevé à la fin de l'année 2020.

### SWEET – nouveau instrument de l'OFEN

En tant que successeur des SCCER, les activités d'environ 1500 chercheurs actifs dans les SCCER doivent désormais être axées sur des objectifs importants pour la

stratégie énergétique 2050. A cette fin, le Parlement a approuvé un nouveau programme de financement de recherche, SWEET, qui est rattaché à l'OFEN. SWEET est l'acronyme de «SWiss Energy research for the Energy Transition» et vise à promouvoir des consortiums travaillant sur des projets trans- et interdisciplinaires sur une période de six à dix ans par le biais d'appels à propositions réguliers. Les appels à propositions peuvent concerner l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, le stockage, les réseaux ou la sécurité des infrastructures énergétiques critiques. L'accent sera mis sur la recherche non technique, par exemple la recherche socio-économique ou socio-psychologique. Un total de 136 millions de francs suisses est disponible pour les appels à propositions de 2021 à 2028. Les travaux de recherche finaux seront achevés en 2032.

Les consortiums financés doivent généralement être composés d'instituts publics du domaine des EPF, d'universités et de hautes écoles spécialisées, mais aussi d'institutions de recherche privées, d'entreprises, d'organisations et du secteur public. Dans SWEET, aucun projet individuel n'est financé, mais exclusivement des portefeuilles de projets de recherche interconnectés.

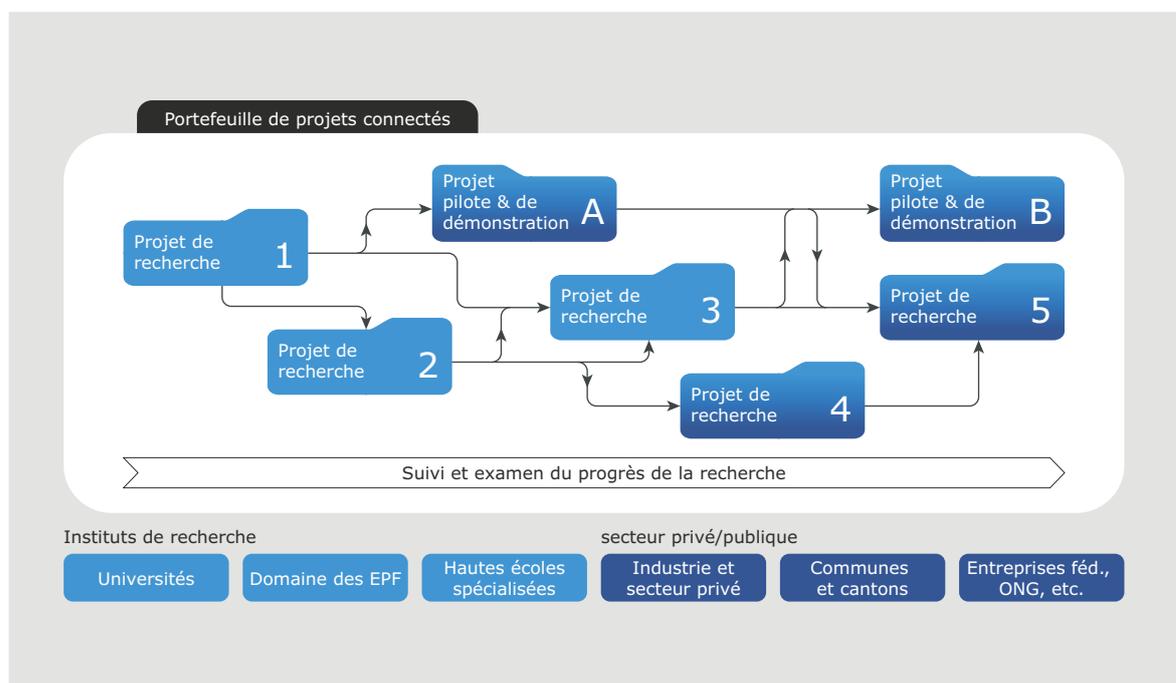
**Appels d'offres roulants SWEET**

Un premier appel à propositions SWEET a déjà été lancé en 2020 sur le thème «Intégration des énergies renouvelables dans un système énergétique suisse durable et

résilient». Cela permettra aux chercheurs de commencer leurs travaux de recherche dès 2021. Un deuxième appel à propositions SWEET intitulé «Living & Working» a été publié au printemps 2021. L'objectif est d'étudier comment l'approvisionnement et la distribution d'énergie peuvent être assurés de manière efficace et rentable et comment la consommation d'énergie peut être minimisée dans des zones géographiques (sub)urbaines clairement définies. De nouveaux potentiels d'économie d'énergie doivent être identifiés et quantifiés en reliant les secteurs du bâtiment et de la mobilité, ainsi que par l'adaptation des technologies et des comportements des consommateurs. Le troisième appel à propositions SWEET est déjà prévu pour l'automne 2021.

**«Changeur de jeu» recherché**

Afin d'expérimenter des approches de recherche totalement nouvelles, des appels dits SOUR sont prévus dans le cadre de SWEET. SOUR est l'acronyme de «SWEET Outside-the-box Rethinking» et finance des projets courts d'une durée de six à dix-huit mois maximum qui poursuivent des idées radicalement nouvelles et originales. SOUR vise à développer des approches, des concepts, des théories et des idées scientifiques prometteurs et non conventionnels et à stimuler ainsi la communauté des chercheurs. Les projets SOUR, petits et agiles, sont menés par un seul chercheur ou une petite équipe. Un premier appel à SOUR a été publié à la fin du mois de janvier 2021.



Les consortiums SWEET financés travaillent sur un portefeuille de projets de recherche interconnectés sur plusieurs années. Il s'agit aussi bien de projets de recherche financés par SWEET que de projets pilotes et de démonstration ou de projets de tiers.

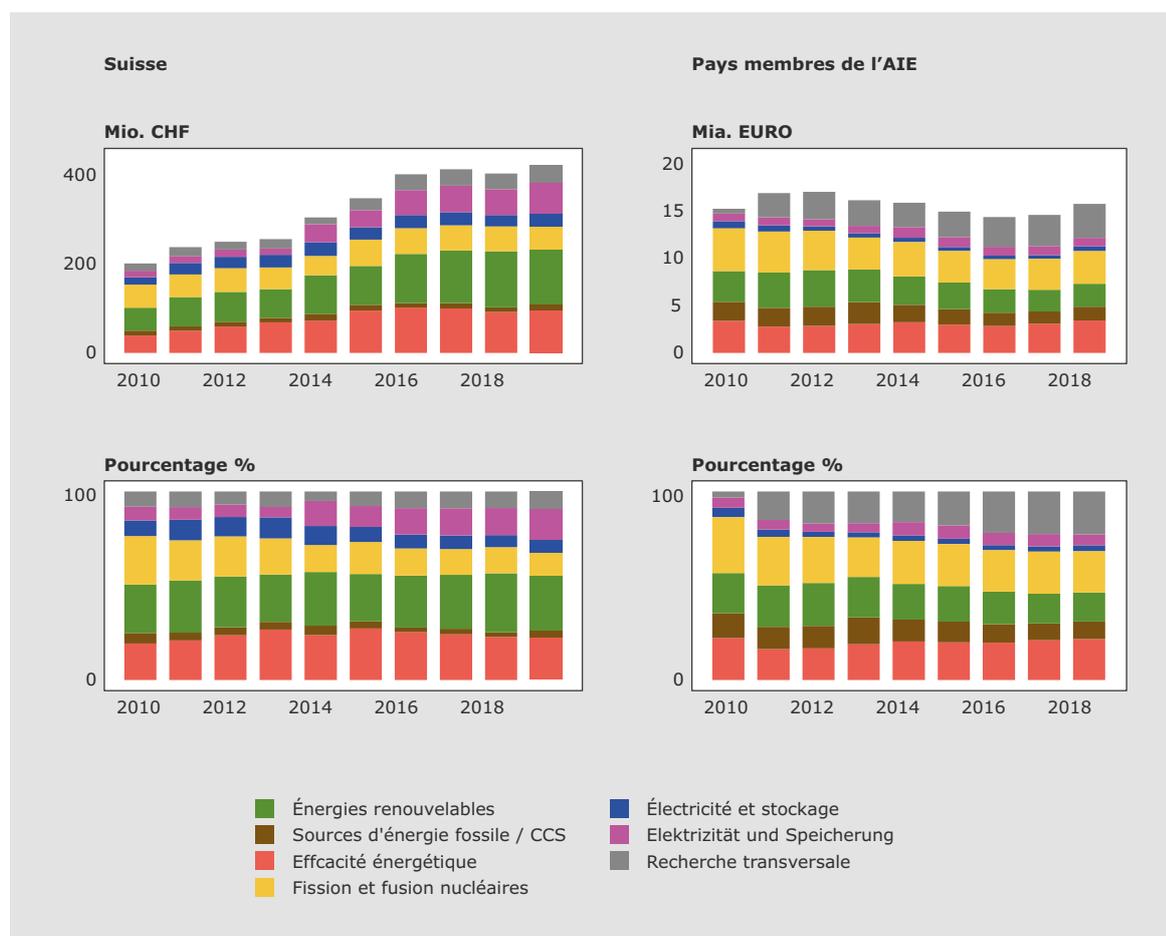
# Statistiques sur la recherche énergétique en Suisse

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.

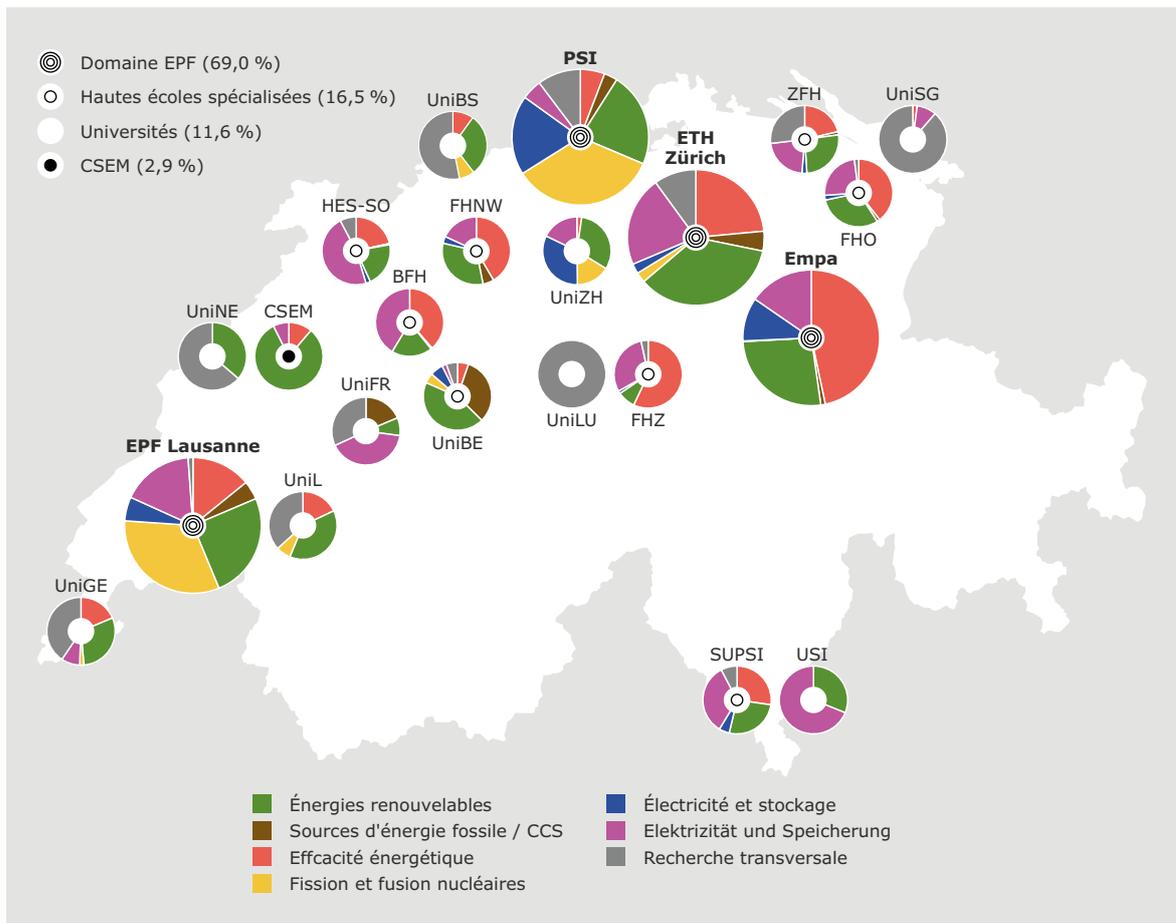
Le graphique ci-dessous montre les dépenses du secteur public pour la recherche énergétique en Suisse et dans les pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) depuis 1990 (en millions de francs suisses, cor-

rigés de l'inflation ou en milliards d'euros), ventilées selon la classification de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

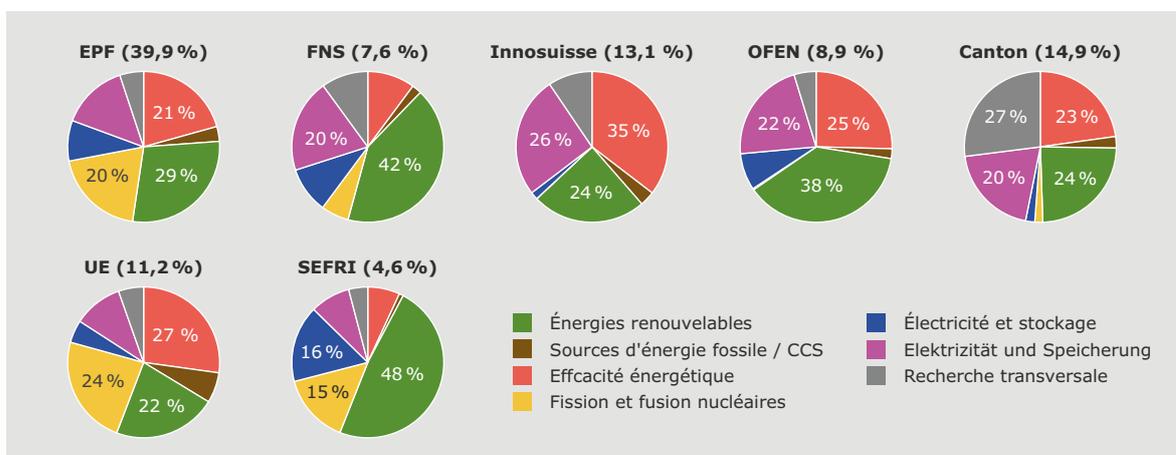
En 2019, le secteur public en Suisse aura dépensé 427 millions de francs suisses pour la recherche sur l'énergie. Le domaine des EPF y a contribué le plus largement, à hauteur de 40 % (voir le graphique de la page suivante). L'OFEN, avec le Fonds national suisse de la recherche scientifique, a été le troisième sponsor de la recherche après Innosuisse (13 %), avec une part de 9 et 8 % respectivement. Sur les 37 millions de francs dépensés par l'OFEN en 2019, environ 17 millions sont allés à des projets d'efficacité énergétique, environ 17.5 millions à des projets d'énergies renouvelables et environ 2.3 millions à des projets dans le domaine des sciences humaines et sociales.



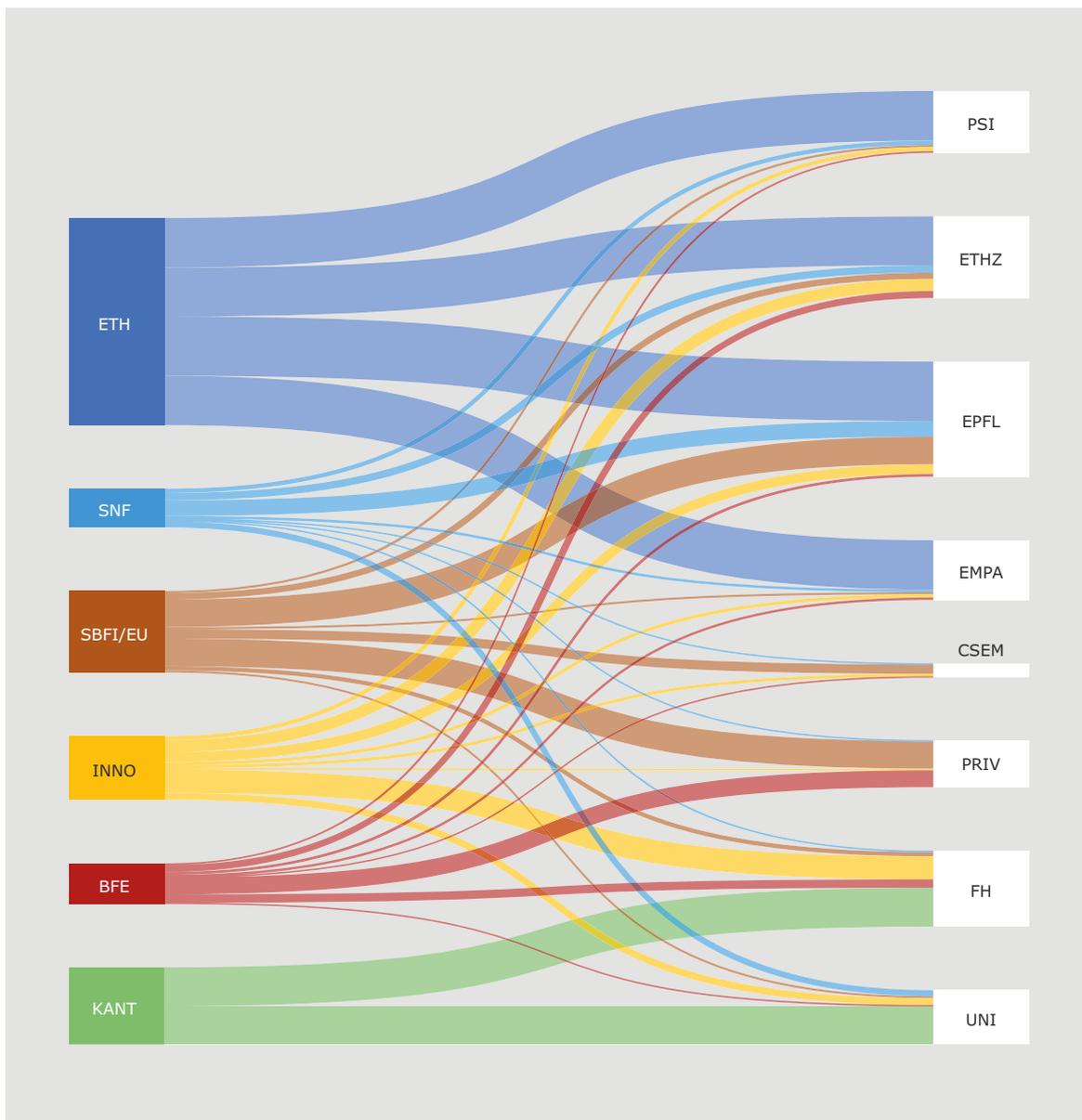
Aperçu des fonds publics consacrés à la recherche énergétique en Suisse et dans les pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Les valeurs réelles (corrigées de l'inflation) sont indiquées. Pour la Suisse, elles se situent entre 0,3 et 0,65 pour mille du produit intérieur brut. Les fonds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



Différents thèmes de recherche sur l'énergie dans les universités suisses (données 2019). Les thèmes sont répartis selon la classification de l'Agence internationale de l'énergie. La majeure partie de la recherche publique sur l'énergie (69 % des fonds publics utilisés) a lieu dans le domaine des EPF. BFH: Haute école spécialisée bernoise, CSEM: Centre suisse d'électronique et de microtechnique, EMPA: Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, EPFL: École polytechnique fédérale de Lausanne, ETHZ: École polytechnique fédérale de Zurich, FHNW: Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, FHO: Haute école spécialisée de la Suisse orientale, FHZ: Haute école spécialisée de Suisse centrale, HES-SO: Haute école spécialisée de Suisse occidentale, PSI: Institut Paul Scherrer, SUPSI: Haute école spécialisée de la Suisse italienne, UniBE: Université de Berne, UniBS: Université de Bâle, UniFR: Université de Fribourg, UniGE: Université de Genève, UniLS: Université de Lausanne, UniLU: Université de Lucerne, UniNE: Université de Neuchâtel, UniSG: Université de St. Gallen, UniZH: Université de Zurich, USI: Université de la Suisse italienne, ZFH: Université des sciences appliquées de Zurich.



Financement public de la recherche sur l'énergie (données 2019) par agence de financement et par domaine thématique. Environ 40 % du financement de la recherche énergétique en Suisse provient directement du domaine des EPF, et environ 15 % du financement cantonal des hautes écoles spécialisées et des universités. Le reste est un financement compétitif. EPF: Conseil des écoles polytechniques fédérales, FNS: Fonds national suisse de la recherche scientifique, Innosuisse: Agence suisse pour la promotion de l'innovation, OFEN: Office fédéral de l'énergie, UE: Union européenne, SEFRI: Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation.



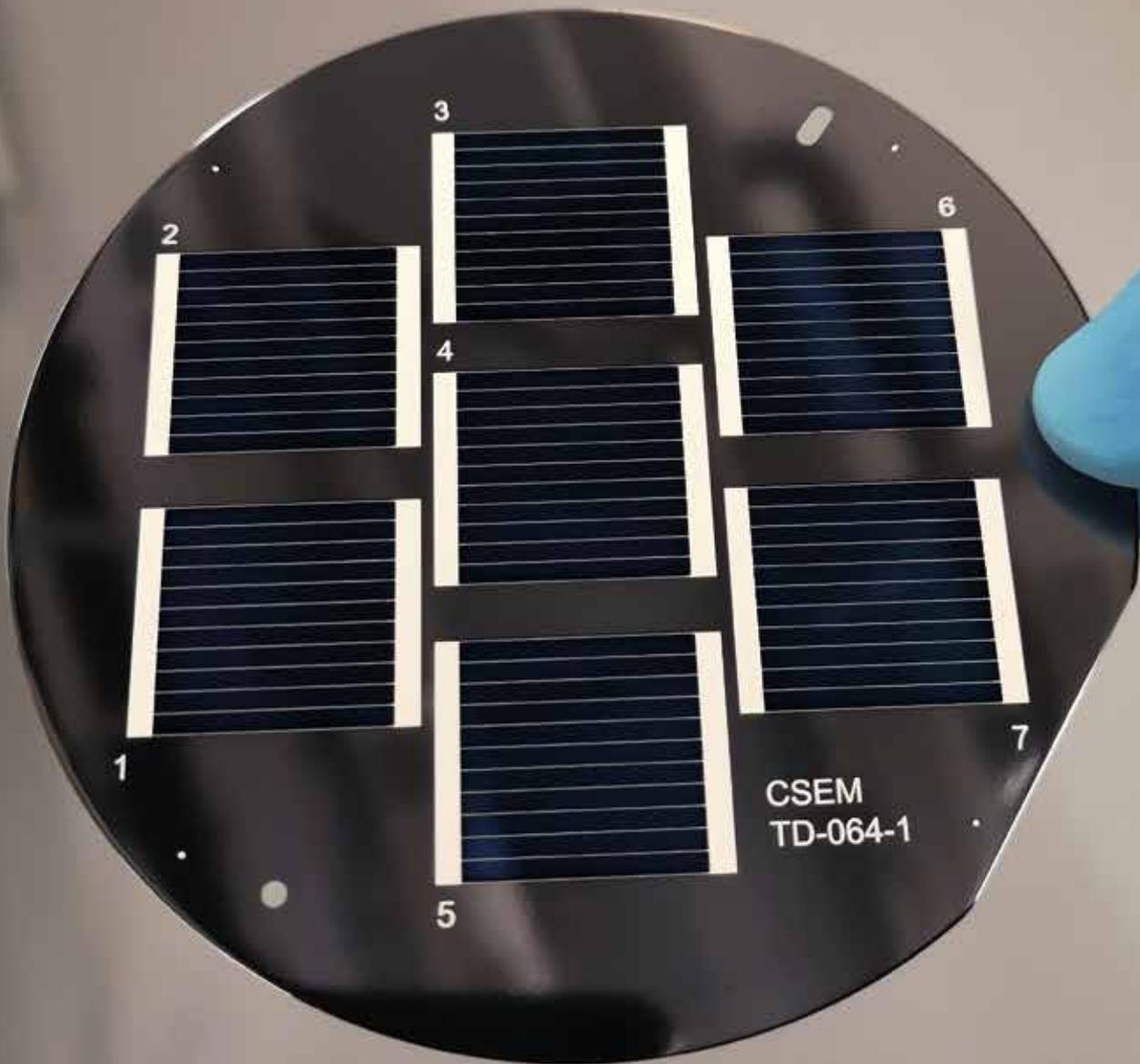
D'où vient le financement public pour la recherche énergétique en Suisse et où va-t-il? Une grande partie provient directement du domaine des EPF. Ne sont pas pris en compte les fonds provenant de sources privées, tels que les contributions propres aux projets Innosuisse ou aux projets pilotes et de démonstration de l'OFEN. Les flux de trésorerie inférieurs à 0,2 million de francs suisses ne sont pas indiqués.

Source des fonds: ETH: Conseil des EPF, FNS: Fonds national suisse de la recherche scientifique, SERI/EU: fonds provenant de projets européens ou du SERI (Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation), INNO: Innosuisse, OFEN: Office fédéral de l'énergie, KANT: cantons.

Utilisation des fonds: PSI: Institut Paul Scherrer, ETHZ: ETH Zurich, EPFL: ETH Lausanne, EMPA: Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, UNI: Universités, HES: Hautes écoles spécialisées, PRIV: Secteur privé, CSEM: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique.

(A gauche) Les cellules solaires en tandem, qui combinent des cellules solaires en pérovskite et en silicium, constituent une approche intéressante pour augmenter encore le rendement des cellules solaires. Le Centre photovoltaïque du Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) travaille avec succès dans ce domaine et développe des méthodes qui peuvent être mises en œuvre industriellement (source: CSEM, communication privée).





# Efficacité énergétique



## Les batteries – une clé pour la transition énergétique

Les batteries jouent un rôle central dans la politique énergétique et climatique, tant pour la décarbonisation des transports motorisés que pour le stockage à court terme des énergies renouvelables afin de réduire les pics de charge. Quelle est l'efficacité des systèmes de batteries déployés? Quelle contribution pourraient-ils apporter à l'équilibre des réseaux de distribution? Et comment les cellules des batteries des voitures électriques peuvent-elles être utilisées de manière économique pour le stockage «de seconde vie»?

L'année passée, 8 % de toutes les voitures neuves mises en circulation en Suisse étaient des véhicules électriques à batterie pure, ce qui représente un doublement du chiffre pour 2019. En outre, 6 % des véhicules hybrides rechargeables ont été enregistrés, soit 4 fois plus. Selon les constructeurs, les batteries lithium-ion utilisées dans ces véhicules ont une durée de vie d'au moins huit ans, ce qui correspond à une distance de conduite d'environ 160 000 km. Après cette période, la capacité de la batterie peut tomber en dessous de 80 % de la capacité d'origine, de sorte qu'elle n'est plus suffisante pour alimenter un véhicule. Cependant, ces capacités sont tout à fait suffisantes pour d'autres applications, par exemple comme stockage domestique pour les systèmes solaires.

L'entreprise suisse Libattion s'est spécialisée dans le fait de donner une seconde vie aux batteries usagées. Techniquement, ces dispositifs de stockage «de seconde vie» fonctionnent bien. Mais sont-ils aussi économiquement viables? L'un

des obstacles au recyclage à grande échelle est le test des cellules. Pour déterminer l'état exact des cellules individuelles d'un système de batterie, il faut effectuer un cycle complet de charge et de décharge, ce qui prend de trois à cinq heures – un temps bien trop long pour produire des systèmes de stockage de seconde vie compétitifs. Le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM), en collaboration avec Libattion, a donc recherché des méthodes de mesure alternatives permettant d'estimer de manière fiable l'état des cellules de batterie dans un délai utile. Les études montrent qu'il existe de bonnes corrélations entre les différentes variables mesurées et l'état de santé (SoH) des cellules. Cela signifie que les cellules adaptées aux applications de «seconde vie» peuvent être trouvées beaucoup plus rapidement. En fonction des exigences – précision de la mesure, robustesse de l'analyse pour différents types de batteries, durée de l'analyse ou simplicité du traitement par la machine – différentes méthodes de mesure sont adaptées.

Chaque année, environ 543 000 batteries de véhicules sont importées dans l'Union européenne à usage de traction (véhicules à batterie pure et hybrides rechargeables), ce qui correspond à un volume de stockage d'environ 27 GWh pour un pack de batteries standard de 50 kWh. On prévoit qu'en 2025, 27 % de ces batteries auront une seconde vie dans des applications stationnaires, tandis que les 73 % restants seront disponibles pour le recyclage. Grâce à des procédures de test efficaces des cellules de batterie vieilles, telles que celles développées par le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) en collaboration avec la société Libattion, les applications de «seconde vie» devraient devenir plus économiques.

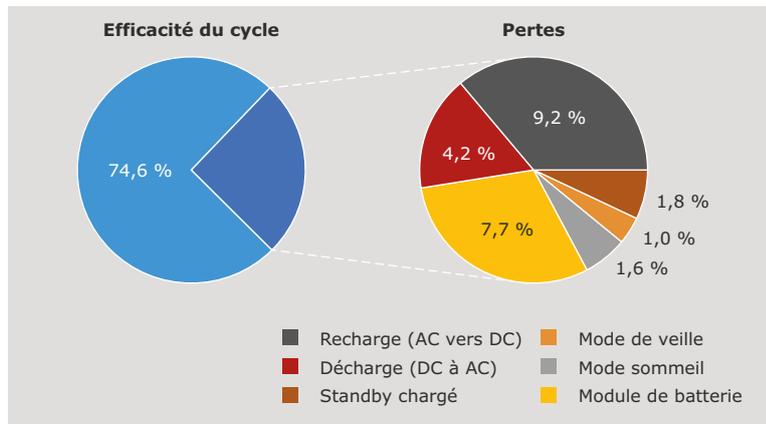


Dans le cadre d'un projet de recherche OFEN, des protocoles de test ont été mis au point qui permettent de déterminer l'état de vieillissement des cellules de batterie en quelques minutes, alors qu'un cycle complet de décharge/charge nécessite de trois à cinq heures (source: CSEM).

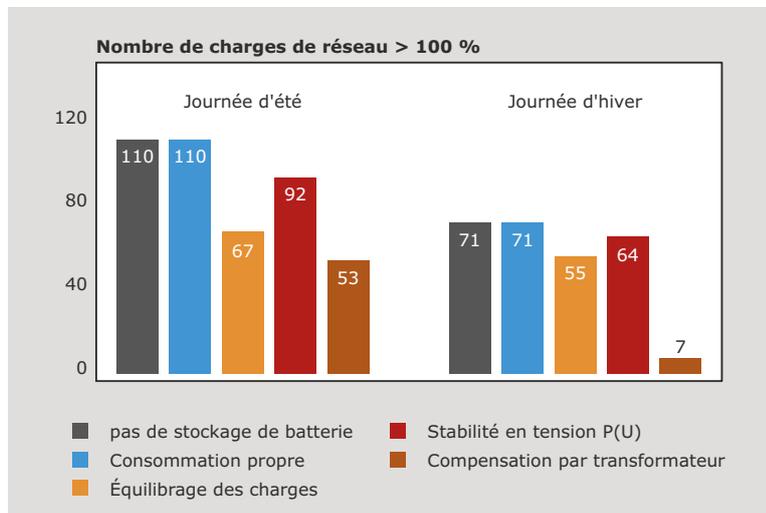
Non seulement le marché des batteries dans l'électromobilité est en forte croissance, mais aussi celui du stockage domestique en combinaison avec des systèmes photovoltaïques. De 2018 à 2019, la capacité de stockage installée a augmenté d'environ 70 %. Mais quelle est l'efficacité des systèmes de stockage sur batterie disponibles sur le marché? À ce jour, il n'existe pas de procédure d'essai standardisée décrivant un fonctionnement réaliste. L'Université des sciences appliquées OST a mis au point une telle procédure d'essai, qui détermine les chiffres clés pertinents en mode dynamique. L'ensemble du système de batterie est testé, y compris la batterie et l'onduleur photovoltaïque. La production et la consommation d'énergie photovoltaïque sont émulées.

Aujourd'hui, les systèmes de stockage à domicile sont surtout utili-

sés pour optimiser l'autoconsommation. Cela représente parfois une charge importante pour le réseau de distribution. Cependant, ces systèmes de stockage décentralisés ont le potentiel de stabiliser le réseau de distribution, à condition qu'ils soient contrôlés de manière à «servir le réseau»: Par exemple, les systèmes de stockage à domicile tirent de l'énergie lorsque la tension du réseau devient trop élevée et restituent l'énergie au réseau lorsque la tension baisse. Différentes stratégies de contrôle sont possibles. Dans le cadre d'un projet de recherche en cours, auquel participent des universités de sciences appliquées, des opérateurs de réseaux de distribution et des fabricants de batteries, les chercheurs étudient l'étendue des avantages d'une gestion «respectueuse du réseau» et les mécanismes d'incitation qui pourraient favoriser une telle gestion. Les premiers résultats montrent comment l'utilisation du réseau évolue en fonction des différentes stratégies de contrôle. L'étape suivante consistera à quantifier ces bénéfices.



Résultat du test d'un système de stockage domestique à batteries couplées en courant alternatif (CA). Une nouvelle procédure d'essai de l'université des sciences appliquées OST teste les batteries dans un profil d'essai de 3 jours qui couvre toutes les conditions de fonctionnement typiques de la batterie. Il fournit des chiffres clés reproductibles sur l'efficacité des systèmes selon différentes approches de contrôle telles que l'autoconsommation, le prix de l'électricité et l'utilisation du réseau, et indique les pertes (source: OST).



La simulation de la charge du réseau pour un réseau de distribution suburbain typique en 2035 montre l'avantage d'un contrôle du stockage décentralisé au service du réseau par rapport à un contrôle optimisé pour l'autoconsommation (bleu). On distingue trois algorithmes de contrôle du réseau: l'équilibrage de la charge (orange) et le maintien de la tension (rouge) pour les ménages avec stockage et l'équilibrage de la charge au poste de transformation (marron). La base est un scénario pour l'année 2035 sans extension du réseau, qui tient compte de l'expansion attendue du photovoltaïque, de l'électromobilité et du stockage par batterie. En été, la production photovoltaïque génère des pics de consommation, tandis qu'en hiver, ce sont les achats de grandes quantités d'électricité qui génèrent d'importants pics de charge (source de données: Centre pour le stockage de l'énergie de la BFH).





Pendant longtemps, le silicium a dominé le monde des transistors. Aujourd'hui, les semi-conducteurs composés de divers éléments jouent un rôle de plus en plus important. Les diodes électroluminescentes à base de composition de gallium ont remplacé les autres sources de lumière dans la vie quotidienne. Dans le domaine de l'électronique de puissance, l'application de transistors en nitrure de gallium (GaN) et en carbure de silicium (SiC) permet d'augmenter l'efficacité énergétique, ce qui est primordial pour l'électromobilité et la génération d'électricité avec les énergies renouvelables. La photo montre une plaquette contenant des diodes SiC (source de l'image: Bosch).

## Une mobilité plus efficace grâce à des semi-conducteurs efficaces

Qu'il s'agisse de centres de données, de systèmes d'énergie photovoltaïque et éolienne ou de véhicules électriques, toutes ces applications font appel à l'électronique de puissance qui repose sur des interrupteurs constitués de semi-conducteurs. Chaque opération de commutation entraîne des pertes. Ceux-ci peuvent être réduits de manière significative grâce à l'utilisation de matériaux semi-conducteurs à large bande interdite (band gap), les semi-conducteurs dits «Wide-Bandgap» (WBG).

Un groupe de travail créé au sein de l'Agence internationale de l'énergie en 2019 à l'initiative de la Suisse révèle les économies d'énergie possibles grâce aux composants semi-conducteurs à large bande interdite (WBG). Appliqué aux systèmes éoliens et photovoltaïques, aux centres de données, aux voitures électriques et aux appareils mobiles, environ 90TWh d'électricité pourraient être économisés chaque année au niveau mondial, soit environ une fois et demie la consommation annuelle d'électricité de la Suisse.

Les semi-conducteurs WBG les plus importants sont le carbure de silicium et le nitrure de gallium. Par rapport aux composants à base de silicium, les commutateurs de puissance (transistors) de WBG commutent plus rapidement, permettent une plus grande densité d'emballage et fonctionnent à des températures ambiantes plus élevées. Un avantage important est le gain d'efficacité: les pertes lors d'une opération de commutation sont considérablement réduites. Cela entre en jeu dans de nombreuses applications,

par exemple dans les convertisseurs des véhicules électriques. Ceux-ci convertissent le courant continu de la batterie en courant alternatif et alimentent le moteur d'entraînement. Pour contrôler la vitesse du moteur, les composants semi-conducteurs activent et désactivent la tension à de courts intervalles – plusieurs milliers de fois par seconde, selon le concept et l'application. Chaque opération de commutation implique des pertes. Plus ils sont bas, plus l'onduleur est efficace et plus la distance qui peut être couverte avec



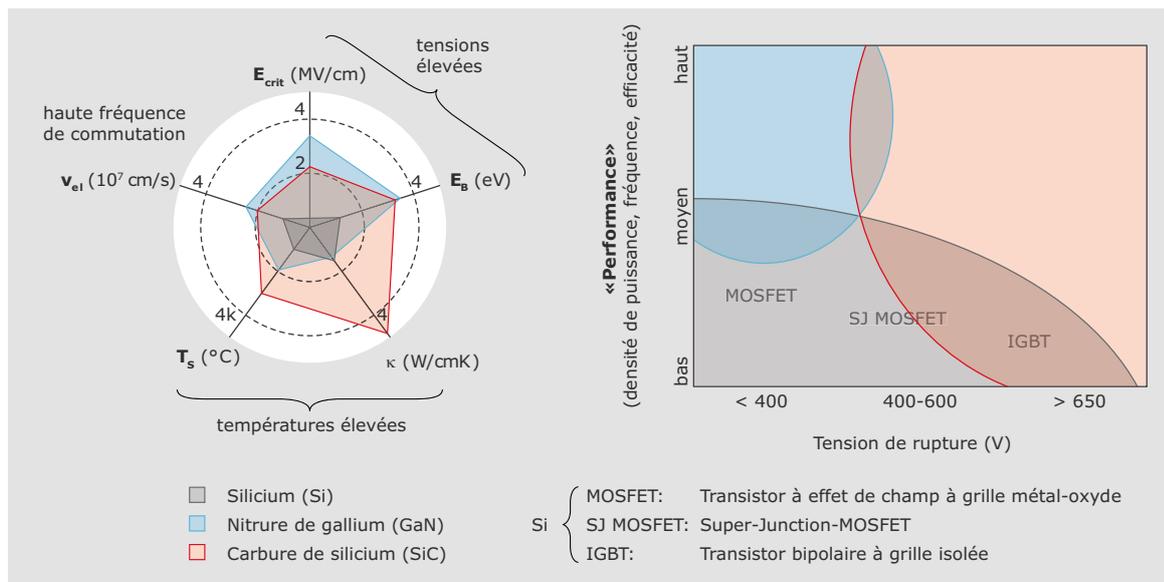
Le groupe motopropulseur et le système de stockage de l'énergie constituent des éléments de coût importants pour les autobus et les véhicules commerciaux à propulsion électrique. Dans le cadre d'un projet pilote, une flotte de bus électriques à batterie sera équipée d'un nouveau convertisseur de puissance basé sur des semi-conducteurs en carbure de silicium (SiC), qui sera intégré directement dans le moteur. L'efficacité du convertisseur de puissance a une influence directe sur la capacité requise de la batterie et donc indirectement sur les coûts du système (source: ABB).

une charge de batterie est grande. La densité de compactage plus élevée des semi-conducteurs WBG est également importante. Les convertisseurs peuvent être plus petits et plus légers, ce qui augmente encore l'autonomie des véhicules.

Le groupe ABB, spécialisé dans l'ingénierie de l'énergie, et le fabricant de bus Hess précisent l'importance du

potentiel d'économie de cette technologie dans ce type d'application. Ils développent tous les composants de la chaîne de traction d'un bus électrique, depuis le chip jusqu'au module semi-conducteur de puissance en passant par le convertisseur, et testent ces composants dans la pratique. À Baden, un bus électrique doté de cette nouvelle technologie circulera sur une ligne ordi-

naire opérée par l'autorité régionale des transports de Baden-Wettingen. L'objectif est de vérifier le potentiel d'économie d'énergie de la technologie dans la pratique. L'essai sur le terrain servira à recueillir des expériences, notamment pour une quantification précise des économies d'énergie potentielles. Cela permettra de faire une projection bien fondée du potentiel d'efficacité.



(Gauche) Par rapport au silicium, les semi-conducteurs composés que sont le nitrure de gallium (GaN) et le carbure de silicium (SiC) ont une bande interdite ( $E_b$ ) plus large et un champ critique ( $E_{crit}$ ) plus élevé, ce qui permet de fonctionner à des tensions plus élevées. Grâce à une mobilité électronique élevée ( $v_{el}$ ), les transistors commutent plus rapidement. Un haut point de fonte ( $T_s$ ) et une bonne conductivité thermique ( $\kappa$ ) permettent de fonctionner à des températures plus élevées, notamment pour le SiC. (Droite) Les composants semi-conducteurs basés sur le SiC et le GaN remplacent de plus en plus les composants en Si, car ils permettent des «performances» nettement supérieures.





Les poulaillers ont des besoins énergétiques relativement élevés afin de respecter les réglementations légales. Au cours d'un cycle d'engraissement, la courbe de température est précisément définie: d'un niveau initial de 33, elle descend progressivement jusqu'à 20 degrés Celsius. L'humidité relative ne doit jamais dépasser 60 %, sinon les maladies se multiplient. En outre, les valeurs limites pour les concentrations de CO<sub>2</sub> et d'ammoniac dans l'air doivent être respectées. Ces obligations exigent un taux de renouvellement de l'air élevé. Dans deux fermes pilotes, la technologie de récupération de la chaleur a permis de réduire considérablement les besoins en énergie (source de l'image: hiltifarm.ch).

## Le poulailler du futur: neutre en énergie, à faibles émissions, respectueux des animaux

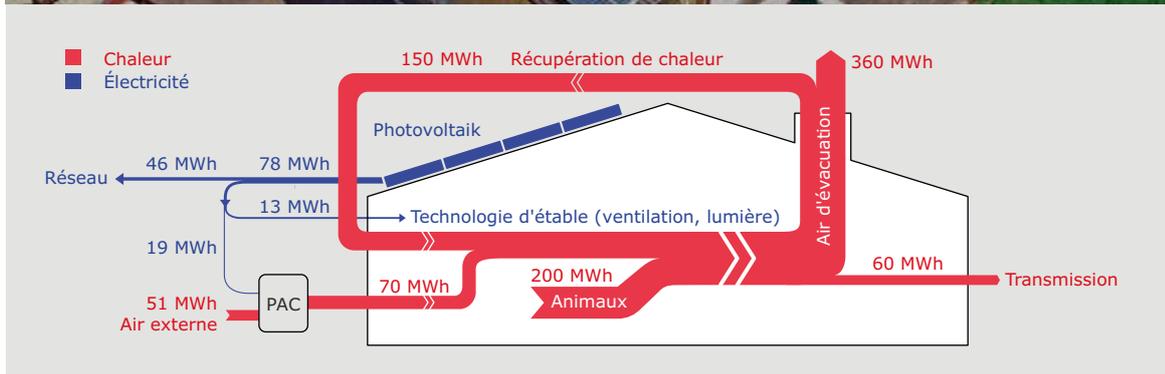
Les poulaillers consomment beaucoup d'énergie, car il faut chauffer les étables et assurer un renouvellement constant de l'air. Des projets de démonstration ont désormais montré que la récupération de chaleur et l'isolation de l'enveloppe du bâtiment peuvent réduire la demande en énergie de plus de 50 %.

Une exploitation avicole de 600 m<sup>2</sup> en Suisse consomme environ 160 MWh d'énergie électrique par an, ce qui correspond à peu près à la consommation de 40 ménages de quatre personnes. Les mesures d'isolation et de récupération de chaleur, telles que pratiquées dans d'autres bâtiments, n'ont guère été utilisées dans l'agriculture à ce jour. Il y avait une grande méfiance quant à savoir si les adaptations techniques valaient leurs coûts d'investissement et si elles fonctionneraient de manière fiable compte tenu des conditions poussiéreuses dans les exploi-

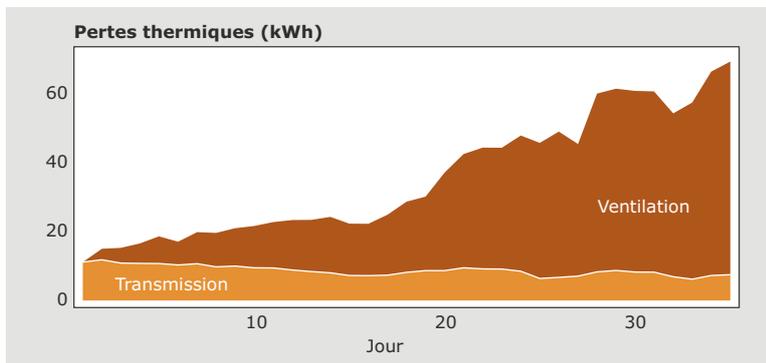
tations. Toutefois, au vu de la trentaine de nouvelles fermes d'engraissement qui sont construites chaque année en Suisse et des exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique et de bien-être animal, il convient d'examiner de plus près les mesures d'économie d'énergie pour ces fermes.

Dans le cadre de projets de démonstration, tous les paramètres pertinents relatifs au climat stable et à la consommation d'énergie ont été enregistrés pendant un an dans deux nouveaux bâtiments étables

à Hellsau et Zimmerwald. Le fabricant suisse Bell Food Group AG et l'entreprise de technologie des animaux et des étables Globogal AG ont développé indépendamment de nouveaux concepts d'étables qui seront adoptés par les éleveurs à l'avenir. Les deux concepts s'appuient sur une production propre d'énergie solaire sur les toits, l'isolation de l'enveloppe du bâtiment, la récupération de la chaleur de l'air évacué et des pompes à chaleur pour le chauffage. Ainsi, le besoin en énergie peut être réduit de plus de 50 % par rapport aux valeurs empiriques de sociétés



(En haut) Poultryer d'engraissement Leuenberger, Hellsau BE, 2019. (En bas) Diagramme de flux énergétique pour la chaleur et l'électricité dans un poulailler d'engraissement Minergie (selon le rapport final OFEN).



Seuls 25 % environ des pertes de chaleur sont dues à la transmission (dissipation de la chaleur par l'enveloppe du bâtiment), le reste se faisant au détriment de la ventilation constante. La technologie de récupération de la chaleur permet d'économiser davantage d'énergie que l'isolation de l'enveloppe du bâtiment.

comparables. Les trois quarts de ces économies sont dues à la récupération de chaleur.

Les projets démontrent que les nouveaux bâtiments destinés aux élevages de volailles peuvent répondre aux exigences du standard Minergie, et que la sécurité d'exploitation est garantie: les systèmes de récupération de chaleur des deux fabricants résistent à l'air évacué poussiéreux en fonctionnement continu. L'investissement supplémentaire dans le

projet d'Hellsau s'est élevé à environ 400 000 CHF, compensé par des économies de coûts énergétiques d'environ 21 000 CHF par an. D'autres optimisations sont possibles et le concept semble donc prometteur pour une exploitation économique à long terme. Les coûts d'investissement et de maintenance des échangeurs de chaleur devraient être amortis en quelques années.

Dans les deux fermes, le rendement des installations photovoltaïques

est plus de deux fois supérieur aux propres besoins. En plus de l'installation photovoltaïque d'une puissance de 70 kW, la grange d'Hellsau dispose d'un réservoir de stockage de chaleur de 20 000 litres pour la pompe à chaleur (PAC) et d'un réservoir de stockage d'électricité de 18,8 kWh. La ferme couvre ainsi elle-même 87 % de ses besoins en électricité et en chaleur tout au long de l'année. Avec des installations de stockage plus importantes, l'entreprise pourrait être presque entièrement autonome.

Outre l'amélioration de l'efficacité énergétique, ces mesures permettent également un meilleur climat dans le poulailler, ce qui est bénéfique pour la santé des animaux et aide les agriculteurs à obtenir un meilleur rendement et une meilleure qualité de viande. Les laveurs d'air de la ferme de Zimmerwald récupèrent également les nutriments de l'air évacué. Ceux-ci sont renvoyés dans les champs sous forme d'engrais, fermant ainsi le cycle des nutriments.



## Préparer les réseaux électriques pour demain

La décentralisation croissante de l'alimentation en énergie renouvelable, le stockage sur batterie, les véhicules électriques et les pompes à chaleur entraînent une utilisation de plus en plus intensive des réseaux de distribution. En outre, l'électronique de puissance moderne, telle que celle utilisée dans les onduleurs ou les chargeurs, influence la qualité de la tension. Pour étudier l'impact de ces facteurs sur la qualité du réseau, des chercheurs ont effectué des mesures dans différents réseaux de distribution et en laboratoire, ainsi que des simulations. Les données à long terme ne montrent pas de détérioration générale de la qualité de l'énergie. Toutefois, les mesures révèlent que les appareils dotés d'électronique de puissance peuvent influencer l'impédance du réseau et ainsi

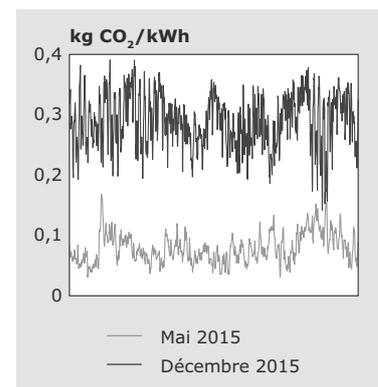


nuire à la communication par courant porteur, qui est notamment utilisée pour les systèmes de contrôle des ondulations.

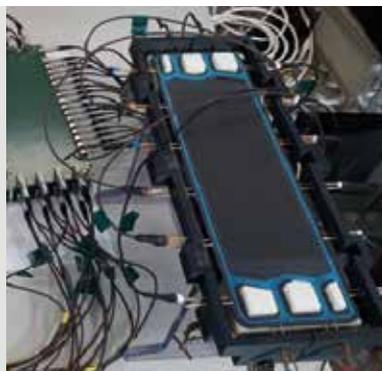
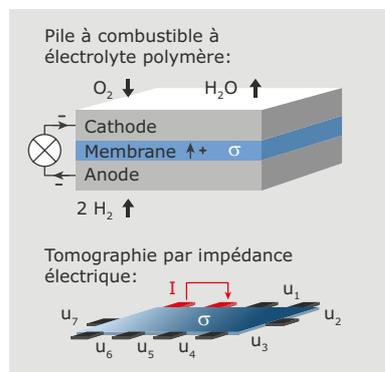


## Bilans dynamiques du cycle de vie des bâtiments

Dans les analyses du cycle de vie des bâtiments, le mix électrique suisse est utilisé pour calculer l'impact environnemental lié à la consommation d'électricité, que celle-ci ait été consommée en été ou en hiver, de jour ou de nuit. Cependant, selon le moment où l'électricité est consommée, l'origine de l'électricité varie et son impact environnemental aussi. Deux récentes études analysant l'origine de l'électricité pour différents profils de charge horaire montrent à quel point cela affecte l'évaluation du cycle de vie. Sur la base de ces données, une nouvelle procédure de calcul et une méthodologie pour l'évaluation du cycle de vie du parc immobilier suisse ont été développées.



Le mix électrique des consommateurs suisses a un impact sur les émissions de CO<sub>2</sub>, qui varie au cours de l'année et de la journée. En été, la part d'électricité provenant de sources renouvelables telles que l'hydroélectricité et le photovoltaïque est plus élevée. En hiver, lorsque la demande d'électricité des bâtiments est la plus élevée, les importations d'électricité, qui proviennent également de sources non renouvelables, représentent une part plus importante (source de données: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105509>).



(Gauche) Pour examiner la distribution de la conductivité  $\sigma$  dans les piles à combustible, la tomographie d'impédance électrique applique un courant alternatif  $I$  entre deux électrodes (rouge) et mesure les changements de potentiel de surface qui en résultent entre des paires d'électrodes. La répétition avec de nombreuses configurations différentes fournit des données à partir desquelles la distribution de la conductivité dans la membrane peut être calculée. (A droite) Configuration expérimentale à l'Institut Paul Scherrer.

## Diagnostic innovant des piles à combustible

Les piles à combustible à électrolyte polymère (PEFC) sont au cœur de l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur de la mobilité. La connaissance de la distribution de la conductivité à l'intérieur de la membrane PEFC est importante. Cette dernière dépend de l'humidité de la membrane, qui est influencée par

des paramètres de fonctionnement divers. La membrane ne doit pas sécher localement, ce qui entraînerait des dommages. En outre, il faut éviter que la pile à combustible ne soit partiellement inondée par une trop grande quantité d'eau du produit. Jusqu'à présent, il n'a été possible de déterminer la conductivité à l'intérieur d'une membrane PEFC qu'en utilisant des méthodes invasives qui ne peuvent pas être appliquées dans

la pratique. L'Institut Paul Scherrer développe une nouvelle méthode non invasive dans le cadre d'un projet de recherche OFEN. Elle est basée sur la tomographie par impédance électrique, qui analyse la relation entre la distribution de la conductivité d'un objet et la distribution du potentiel mesurée à la surface.



# Énergies renouvelables



## Une autre façon d'aborder l'énergie éolienne

Une structure volante se déplace à une altitude de 200 à 500 m le long d'une trajectoire circulaire. Ce qui ressemble à première vue à un gadget produit en fait de l'électricité à partir de l'énergie éolienne. Ces concepts alternatifs d'énergie éolienne, appelés «Airborne Wind Energy» (AWE), suscitent de plus en plus d'intérêt au niveau international et font également l'objet de projets de recherche actuels en Suisse.

Les systèmes «Airborne Wind Energy» (AWE) utilisent le vent d'une manière non conventionnelle: un appareil volant – un petit avion, un drone ou un cerf-volant – actionne un générateur au sol par le déroulement d'une corde. Grâce à une direction et une forme d'aile optimisées, la quantité d'électricité produite lorsque l'appareil volant s'élève dans le vent est supérieure à celle consommée pendant la récupération. En fonctionnement continu, le dispositif volant se déplace le long d'une trajectoire tridimensionnelle dans l'espace, où l'ascension et la descente alternent en permanence.

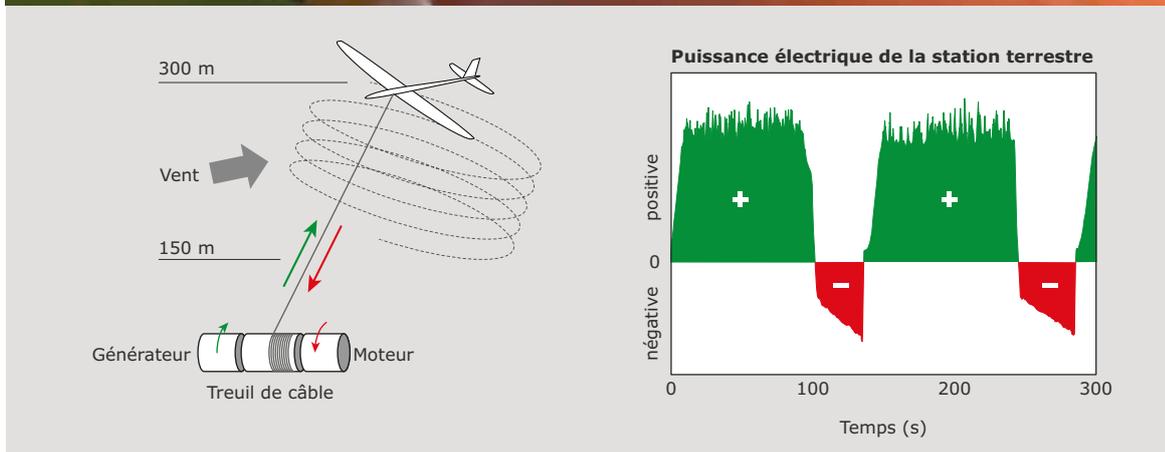
À une altitude de 200–500 m, les vents sont plus forts et plus réguliers que près du sol. Ces conditions de vent constant peuvent être exploitées par les systèmes AWE, puisque ceux-ci volent dans des zones situées bien au-dessus de la hauteur des plus grandes installations d'éoliennes conventionnelles. Les fluctuations de la production sont donc moins prononcées. Les systèmes AWE sont légers, nécessitent peu de

matériel et sont également mobiles et capables d'être déployés à différents endroits.

Reste à voir si cette technologie éolienne encore jeune va s'imposer sur le marché. Il y a dix ans, le scepticisme était grand, mais aujourd'hui les experts estiment que les chances de cette technologie sont intactes. En septembre 2020, par exemple, près de 100 spécialistes de la recherche et de l'industrie de 18 pays ont discuté des possibilités offertes par cette technologie lors d'une réunion de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Selon l'AIE, une soixantaine d'organisations dans le monde travaillent dans ce domaine. En Suisse, il existe deux jeunes entreprises actives dans ce secteur: TwingTec AG et Skypull SA. Toutes deux disposent de systèmes pilotes (voir illustration à gauche et page suivante) et sont actuellement en train de les développer jusqu'à la maturité commerciale. Les systèmes doivent être améliorés de telle sorte que les décollages, les atterrissages et le fonctionnement continu entièrement

Au sein de l'«Airborne Wind Energy» (AWE), la partie la plus efficace d'une éolienne classique, l'extrémité de la pale, est remplacée par un objet volant très efficace relié au sol par un câble. Le déroulement périodique du câble sur un treuil génère de l'électricité dans un générateur. Dans certains systèmes, l'électricité est également générée en vol par des turbines (générateurs) transportées, et l'électricité produite est transmise au sol par un câble.

L'image de gauche montre le système de la société tessinoise Skypull SA. L'appareil est un mix d'un appareil à voilure fixe normal et d'un drone multicoptère à quatre rotors. En tant que drone, cela permet à l'appareil de décoller et d'atterrir sur des terrains complexes, tandis qu'à des altitudes plus élevées, la levée est générée par les ailes. En phase de test, le système possède une envergure de 1,3 m, mais des dispositifs beaucoup plus grands sont envisageables à l'avenir (source: Skypull SA).



Principe de fonctionnement d'un système «Airborne Wind Energy» avec production d'électricité au sol: un appareil volant (drone, planeur ou cerf-volant) relié au sol par un câble exploite l'énergie cinétique du vent et tire ainsi le câble de la bobine, qui est reliée à un générateur d'électricité. Une fois une certaine altitude atteinte, l'avion est ramené à son altitude initiale. La production nette d'électricité dans un tel «cycle de pompage» correspond à la zone verte moins la zone rouge. (En haut) Appareil de vol de la société suisse TwinTec AG, qui consiste en un petit planeur qui peut être porté à l'altitude de vol initiale à l'aide d'hélices électriques. La zone survolée en mode «pompe», qui est définie par la longueur maximale du câble, ne peut être pénétrée en raison du risque de rupture du câble (Photo: TwinTec AG).

automatique se déroulent de manière stable, même dans des conditions météorologiques difficiles.

Parmi les autres défis, il y a la durabilité des matériaux et, en particulier, les exigences réglementaires relatives à l'exploitation. Que se passe-t-il, par exemple, si un hélicoptère s'approche et que le pilote ne peut pas voir l'appareil ou la corde? Comment rendre l'objet et la corde plus visibles? TwinTec et Skypull examinent ces questions dans le cadre d'un projet soutenu par l'OFEN. Les appareils des deux sociétés utilisent le sys-

tème d'avertissement de collision «FLARM», qui a été développé à l'origine pour le vol à voile. Il se compose d'un récepteur GPS et d'un module radio qui transmet sa position actuelle à courte distance (quelques kilomètres) à d'autres unités «FLARM». Skypull travaille également sur un système de caméras qui permettra à ses appareils de détecter l'approche d'hélicoptères, de parapentes ou de petits avions. Les deux entreprises cherchent également à déterminer la meilleure façon d'éclairer les avions afin qu'ils soient mieux vus par les pilotes d'avions ou de parapentes. Les

émissions de bruits sont également un problème, notamment lors du décollage et de l'atterrissage. À cette fin, Skypull et TwinTec effectuent des mesures à différents endroits.

Le champ d'application des systèmes AWE en Suisse pourrait se situer spécifiquement dans les dispositifs isolés, par exemple dans les refuges de montagne. Les systèmes sont également concevables en tant que supplément dans les parcs éoliens conventionnels ou – une idée encore visionnaire – comme installations offshore en pleine mer.





Galerie d'eau de la centrale de Gletsch-Oberwald. L'eau du Rhône s'écoule dans ce tunnel jusqu'aux turbines avec une chute d'environ 300 m. La puissance installée est de 14 MW. Avec une production annuelle de 41 GWh, la puissance moyenne de la centrale n'est que de 4,7 MW. La centrale a été conçue sous terre afin de limiter au maximum l'impact sur l'environnement. Seules quelques petites centrales hydroélectriques suisses utilisent le principe de ces centrales au fil de l'eau à haute pression. Cependant, elles représentent une grande partie de la production totale d'électricité des petites centrales hydroélectriques (source: FMV).

## Les centrales flexibles au fil de l'eau

En fonction du débit, une centrale hydroélectrique installée sur un cours d'eau produit plus ou moins d'électricité. Si le niveau de l'eau tombe en dessous d'une valeur minimale, une centrale électrique s'arrête complètement. La production peut être rendue plus flexible si les volumes existants dans les bassins et les galeries sont utilisés comme réservoirs d'eau. Cela permet de gagner une précieuse énergie de régulation et d'obtenir un meilleur rendement à des taux de décharge faibles.

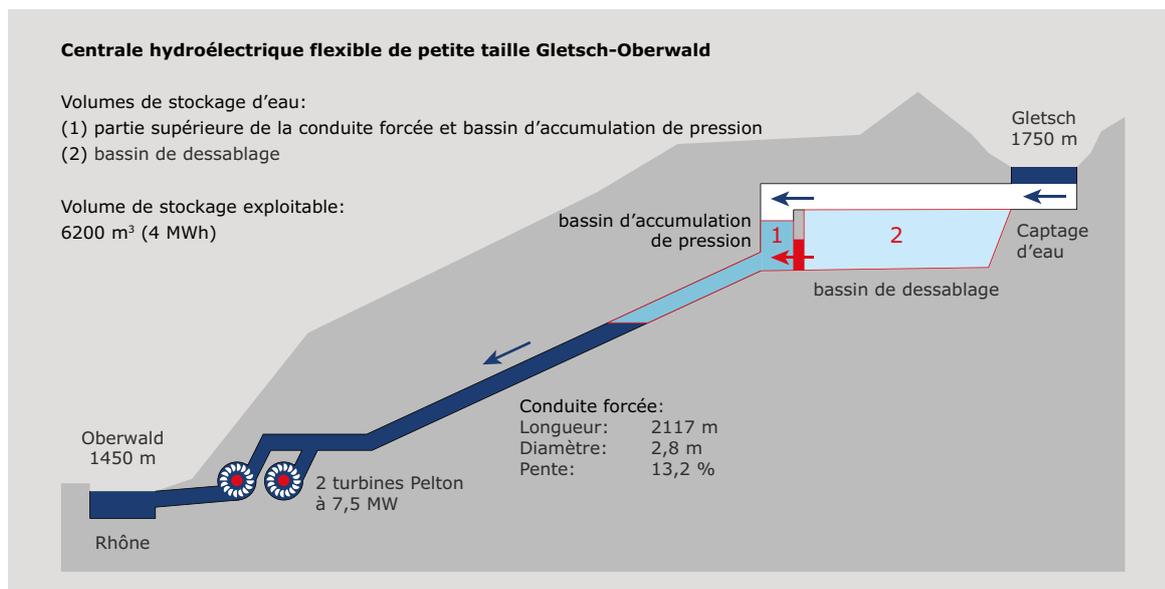
La centrale de Gletsch-Oberwald fournit de l'électricité à 9000 foyers depuis 2018. Il utilise la dénivellée du Rhône entre Gletsch (1750 m) et Oberwald (1450 m) pour générer de l'énergie. La quantité d'électricité produite dépend du débit du Rhône et ne peut être adaptée à la demande. En hiver notamment, le débit du Rhône est souvent insuffisant pour faire fonctionner les turbines à leur capacité minimale et l'eau est détournée au-delà de la centrale.

Des chercheurs de différents instituts dirigés par la Haute école spécialisée

de Suisse occidentale examinent la possibilité d'exploiter les centrales au fil de l'eau de manière plus souple afin de fournir une énergie d'équilibre lucrative. À cette fin, lorsque la demande d'électricité est élevée, les turbines sont alimentées par une quantité d'eau supérieure au débit effectif du Rhône. Cette opération permet de vider les bassins de sédimentation et une partie de la galerie d'amenée d'eau (voir le schéma de la page suivante). Lorsque la demande d'électricité est plus faible, ces volumes sont remplis d'eau et servent ainsi de stockage. Ces volumes de

stockage peuvent également être remplis à de faibles débits pendant que les turbines sont temporairement à l'arrêt. De cette manière, il est possible de produire de l'électricité de manière temporaire, même en hiver, lorsque le Rhône a effectivement un niveau d'eau trop faible.

Jusqu'à présent, une opération pilote a été couronnée de succès: la production en hiver a pu être doublée sans nécessiter d'ajustements structurels majeurs, simplement en utilisant les volumes de stockage existants dans le bassin de sédimen-



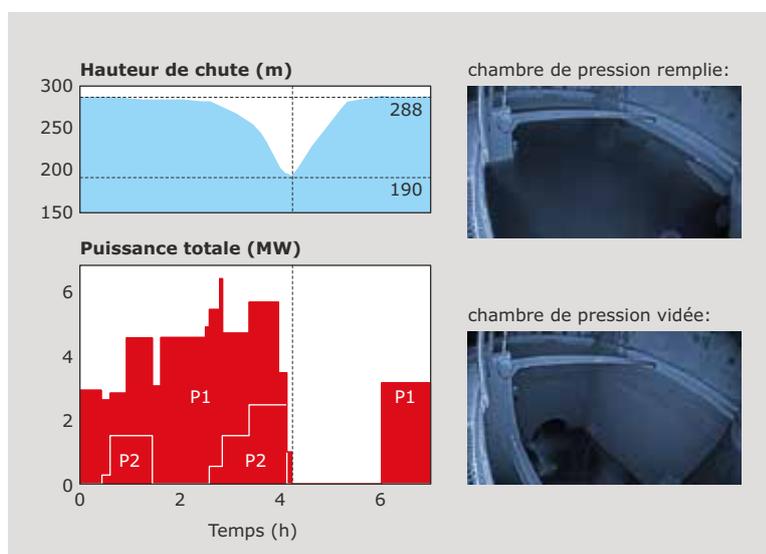
Dans la centrale de Gletsch-Oberwald, l'eau du Rhône est captée et introduite dans un bassin de dessablage (bassin de sédimentation pour les fines entraînées). Une fois le bassin rempli, l'eau s'écoule par-dessus une cloison jusqu'à la chambre de pression et de là, dans le tunnel qui mène aux turbines à Oberwald, 300 m plus bas. En fonctionnement normal, le bassin de dessablage, la chambre de pression et la galerie sont remplis d'eau. Pour un fonctionnement flexible, il est possible d'utiliser (1) les volumes d'une partie de la galerie d'eau sous pression et de la chambre de pression et (2) le volume du bassin de dessablage. La teneur en eau de ces volumes peut être contrôlée par le fonctionnement des turbines et par l'ouverture et la fermeture d'une vanne (rouge) dans la partition aval du bassin de dessablage. Le niveau d'eau dans le tunnel d'eau sous pression ne peut être abaissé que dans une certaine mesure, car si la pression de l'eau est trop réduite, la géométrie du jet d'eau frappant la turbine Pelton n'est plus correcte et la turbine perd de son efficacité et vieillit plus rapidement.

tation, la chambre de pression et une partie du tunnel du canal d'amenée. En outre, l'opérateur a pu proposer une énergie de régulation d'une capacité d'environ 1,5 MW tout au long de l'année. Avec de bonnes prévisions des débits sortants et de la demande d'électricité, l'exploitant de la centrale peut contrôler la production et ainsi obtenir de meilleurs

prix, ce qui augmente de manière décisive la rentabilité de la centrale.

Toutefois, en raison de cette utilisation flexible, il faut s'attendre à des fluctuations plus importantes du débit en aval de la centrale, dans le courant naturel du Rhône. Du point de vue de l'écologie de l'eau, cet «hydropeaking» peut être probléma-

tique. Cependant, les études écologiques d'accompagnement ont montré un impact mineur sur la vie aquatique. Afin de limiter au maximum l'impact sur l'écologie fluviale, la centrale sera contrôlée de manière à ce que les débits de pointe ne dépassent pas 1,5 fois le débit de base. En hiver, la décharge est même lissée en raison du nombre plus faible d'arrêts et de redémarrages. Néanmoins, pour chaque centrale devant être exploitée de cette manière, il faut clarifier au départ si la modification des volumes de rejet peut avoir un impact négatif sur l'écosystème.



En exploitant les réservoirs d'eau de la centrale, l'énergie de pointe a pu être produite pendant quatre heures. Pendant cette période, les réservoirs ont été vidés et le niveau d'eau dans le tunnel du canal d'amenée a été abaissé à 190 mètres. Au cours de la phase suivante de trois heures, les réservoirs se sont à nouveau remplis, sans produire d'électricité ou presque. L'objectif des tests était d'analyser les différents taux d'abaissement et de remplissage du niveau dans la conduite forcée et leurs effets sur les turbines Pelton. (P1 = turbine Pelton 1, P2 = turbine Pelton 2) (Source: selon le rapport final du projet OFEN «SmallFLEX»).





En utilisant l'apprentissage automatique, les centrales solaires peuvent être détectées à partir d'images aériennes. Ce résultat montre une section de la ville de Bâle avec des installations photovoltaïques marquées en rouge et des installations solaires thermiques marquées en jaune.

## La statistique solaire vue du ciel

En survolant la Suisse avec le logiciel «Google Earth», vous reconnaissez immédiatement les toits équipés d'installations solaires. Néanmoins, personne ne sait exactement où les systèmes sont installés. Il serait fascinant de parvenir à identifier systématiquement les surfaces de panneaux photovoltaïques et de capteurs solaires thermiques à partir de photographies aériennes. Des chercheurs de l'Université des sciences appliquées et des arts du Nord-Ouest de la Suisse (FHNW) ont osé le faire à l'aide de l'apprentissage automatique.

Combien de systèmes solaires sont installés en Suisse? Quelle quantité d'électricité et de chaleur produisent-ils? Ces chiffres sont estimés aujourd'hui sur la base d'études de marché et de rendements annuels moyens. Cependant, ils sont soumis à des incertitudes. Les chiffres de vente ne permettent pas de savoir, entre autres, où les modules photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques sont installés et avec quelle orientation et quelle inclinai-

son. Cela a une influence considérable sur la production annuelle.

Ces données pourraient-elles être relevées avec plus de précision au moyen de la digitalisation? Les chercheurs de la FHNW ont eu l'idée de détecter automatiquement les panneaux photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques sur les photographies aériennes et de calculer la surface à partir de ces données. Des approches similaires sont

poursuivies par d'autres institutions de recherche en Suisse et à l'étranger.

La détection automatique est uniquement possible grâce aux photographies aériennes à haute résolution de l'Office fédéral de topographie swisstopo. Les images, exemptes de distorsions (orthomages), couvrent l'ensemble de la Suisse avec une résolution au sol de 10 cm en plaine et de 25 cm dans les Alpes et sont mises à jour tous

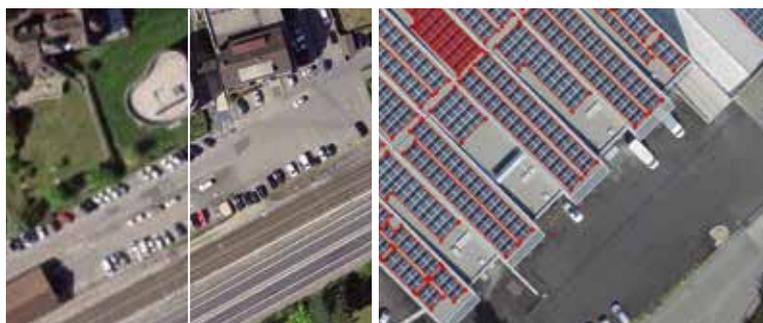
les trois ans. En outre, swisstopo dispose de modèles 3D de tous les bâtiments suisses. À partir de ces données, l'orientation et l'inclinaison des toits peuvent être déterminées afin de calculer la surface des installations solaires et, dans un deuxième temps, leur production.

Pour l'analyse des images aériennes, les chercheurs utilisent des méthodes d'apprentissage automatique. À l'aide d'images aériennes sur lesquelles les installations solaires ont été marquées et attribuées à la main, l'ordinateur «apprend» à reconnaître les zones solaires comme telles. Ce faisant, l'algorithme ne se contente pas de rechercher des images prédéfinies dans les photographies aériennes, mais dérive ses propres modèles et lois à partir des données d'entraînement.

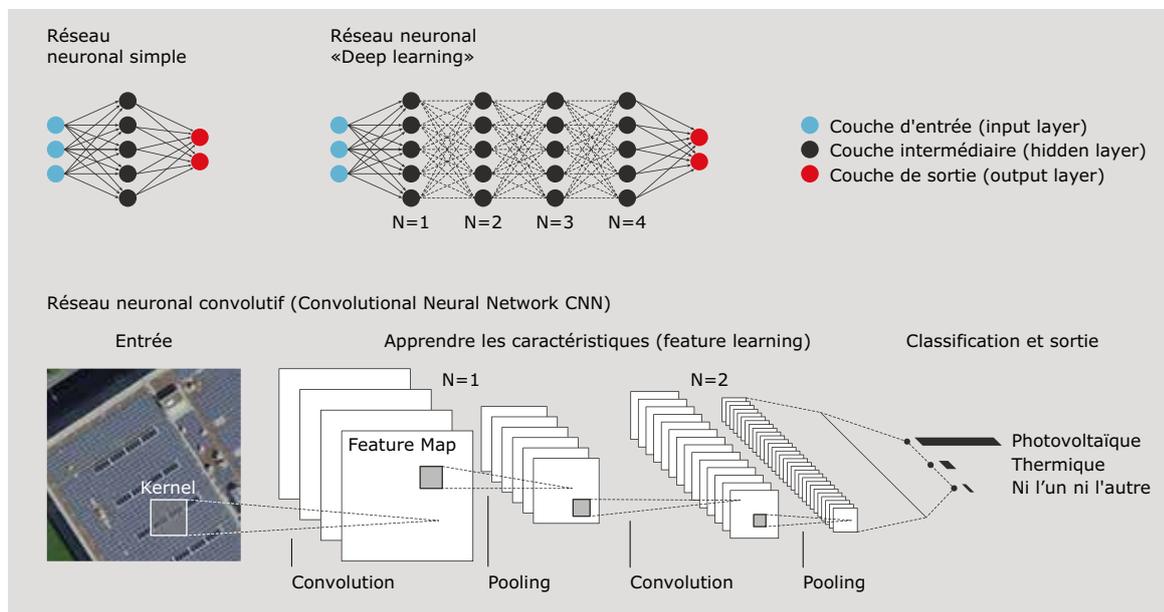
Plus l'algorithme reçoit de matériel d'apprentissage, plus il s'améliore. Le logiciel de la FHNW, qui a été alimen-

té par 30 000 données d'entraînement, atteint déjà une performance remarquable: 92 % des installations photovoltaïques détectées étaient réellement telles. L'algorithme a un peu plus de difficultés avec les capteurs solaires thermiques: 88 % sont correctement attribués. Cependant, l'algorithme ne reconnaît toujours pas toutes les surfaces solaires. Le taux se dégrade au fur et à mesure

que l'algorithme doit déterminer avec précision si les modules sont photovoltaïques ou solaires thermiques. La méthode ne permet donc pas encore d'obtenir des données absolues sur la superficie. Cependant, il est possible de faire des constats sur la répartition géographique des installations solaires ou sur leur évolution dans le temps si l'analyse est répétée régulièrement.



Une condition indispensable à la détection des installations solaires sur les photographies aériennes est une résolution élevée. L'Office fédéral de topographie swisstopo offre désormais des images d'une résolution de 10 cm. L'image à l'extrême gauche illustre par rapport à la résolution précédente de 25 cm (partie gauche de l'image). Afin d'entraîner le réseau neuronal, un total de 7839 images ont été préparées où les installations photovoltaïques et thermiques étaient marquées par des polygones (source: FHNW).



Les réseaux neuronaux artificiels sont utilisés pour détecter les centrales solaires sur les images aériennes. Ces réseaux sont constitués de différentes couches de neurones artificiels (nœuds) qui sont interconnectés. Ce que l'on appelle les poids définissent le degré de dépendance des neurones individuels les uns par rapport aux autres. Grâce à un «matériel d'apprentissage» prédéfini, les poids de la couche intermédiaire (couche cachée) sont ajustés de manière à ce que le résultat de la sortie corresponde le plus possible à l'entrée. S'il y a plusieurs couches intermédiaires, on parle de réseaux «deep learning».

Dans un réseau de neurones convolutifs (convolutional neural network, CNN), ces couches intermédiaires consistent en (1) une couche convolutive, où les mermaux sont balayés avec des filtres ( kernel ) et les informations sont mises en correspondance avec différentes cartes de caractéristiques, et (2) une couche de mise en pool, où les informations inutiles sont supprimées. À la fin, une classification est effectuée et une sortie est donnée, avec une probabilité qu'il s'agisse d'une certaine classe d'objets. Dans ce projet de recherche, une méthode relativement nouvelle (Faster R-CNN) a été utilisée. Dans un R-CNN, une image est d'abord recherchée pour des objets possibles en utilisant un algorithme de recherche, qui suggère ensuite des régions de l'image qui ont une certaine probabilité de contenir un objet. Le R signifie «region based». Faster R-CNN s'appuie sur ces principes et correspond à l'état actuel de la recherche.

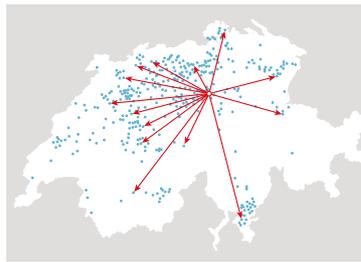
## Le «Big Data» pour les prévisions solaires

La quantité d'électricité générée par une installation photovoltaïque dépend des conditions météorologiques. En sens inverse, la situation météorologique actuelle à un endroit donné peut être déduite des données de production – les systèmes photovoltaïques pourraient donc servir de stations météorologiques décentralisées pour prévoir la production. À cette intention, des chercheurs du Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique ont développé un algorithme d'auto-apprentissage qui a été entraîné avec des données de production réelles et simulées. Les prévisions de production calculées avec cet algorithme sur trois heures étaient comparables ou même meilleures que celles basées sur les données météorologiques. L'algorithme s'est également révélé robuste face aux erreurs et aux lacunes dans les données de production transmises par les installations photovoltaïques.



## De nouveaux domaines pour le solaire thermique

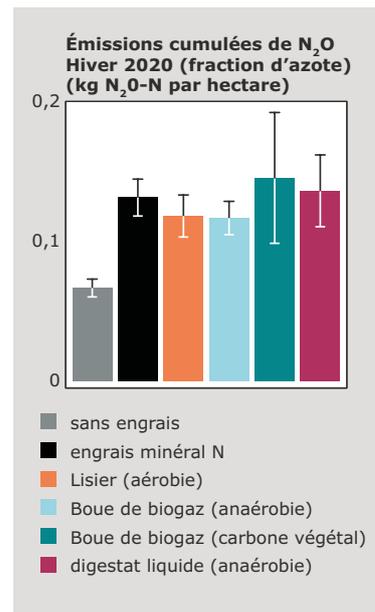
Comment stocker la chaleur solaire de manière saisonnière? Diverses approches sont étudiées dans le cadre de plusieurs projets pilotes et de démonstration. L'une des approches consiste à injecter la chaleur dans le sol par l'intermédiaire des sondes souterraines des systèmes de chauffage par pompe à chaleur. De cette façon, le sol se refroidit moins et la chaleur est à nouveau disponible en hiver. Grâce à de nouveaux matériaux pour les sondes géothermiques, le transfert de chaleur entre la sonde et le sol pourrait être amélioré, tant lors de l'extraction de la chaleur que lors de sa récupération. Outre le sol, les éléments de construction peuvent également être utilisés comme réservoirs de chaleur.



L'idée de base des prévisions solaires basées sur le «Big Data» est que les événements de la production photovoltaïque passée (par exemple, les nuages) sont riches en informations pour prévoir la production à d'autres endroits. La figure montre un exemple d'un ensemble de lieux de production photovoltaïque pour la prédiction d'une installation en Suisse centrale.

## Impact climatique des engrais issus des installations de biogaz

Le lisier et le digestat des installations de biogaz sont des engrais précieux. Récemment, l'utilisation du carbone végétal a également été mise en avant. Sa production par pyrolyse permet non seulement de produire de l'énergie renouvelable, mais le carbone végétal lui-même est censé améliorer les sols et fixer le CO<sub>2</sub> à long terme. Comment les engrais organiques issus des installations de biogaz et le carbone végétal se comportent-ils sur le terrain? Entraînent-ils des émissions de gaz à effet de serre



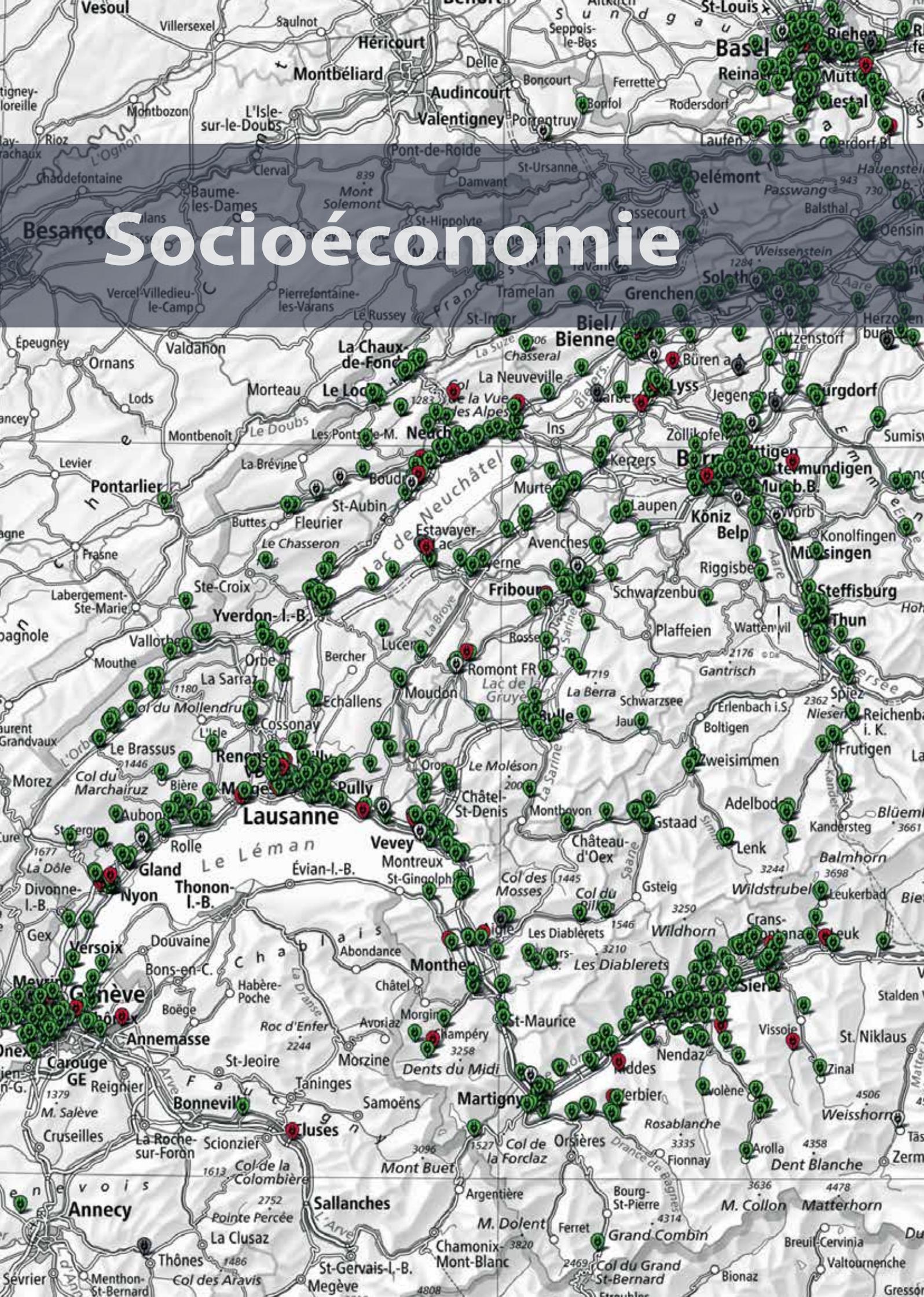
Émissions cumulées d'oxyde nitreux avec différentes applications d'engrais pour l'orge d'hiver. Le type d'engrais n'a pas d'influence significative sur les émissions. Au contraire, ils augmentent avec des précipitations plus importantes et des températures du sol plus élevées.

supérieures ou inférieures à celles des autres engrais? C'est l'un des facteurs décisifs pour déterminer si la production d'énergie à partir de la biomasse a un effet positif sur le climat à long terme. Cette question fait l'objet d'un projet de recherche commun aux offices fédéraux de l'agriculture, de l'environnement et de l'énergie.



Des modules hybrides (PVT) composés de panneaux photovoltaïques et de capteurs thermiques sont installés sur le bâtiment de l'entreprise Oblamatik à Coire. Le bâtiment dispose également d'une plaque de fondation thermiquement active. Pendant la période de chauffage, elle sert de source de chaleur pour la pompe à chaleur et est régénérée activement par le système PVT et passivement par le sol. En mode refroidissement, la dalle et le sol environnant absorbent la chaleur du bâtiment. Pendant la nuit, la dalle de béton est refroidie par le système PVT. La surface absorbante de 384 m<sup>2</sup> des modules PVT transfère la chaleur à l'air par convection et au ciel froid par échange de rayonnement (source: Oblamatik).

# Socioéconomie





# Le revirement du système de transport dans nos esprits

Les véhicules électriques sont en plein essor. Diverses études actuelles portent sur la manière de persuader encore plus de personnes d’acheter un véhicule électrique.

Le trafic routier est responsable d’environ un tiers des émissions de CO<sub>2</sub> en Suisse. Les véhicules électriques sont la clé pour réduire ces émissions. La popularité de ces véhicules ne cesse également de croître: depuis le début de la pandémie de Covid 19, les ventes de véhicules électriques et hybrides sont inférieures à la moyenne à long terme, mais les ventes de véhicules électriques et hybrides sont en nette augmentation. Pourtant, seulement 8 % environ des nouvelles immatriculations sont équipées d’un groupe motopropulseur entièrement électrique. Par où devez-vous commencer pour convaincre encore plus les clients des avantages de l’électromobilité?

Une étude de l’EPF Zurich s’est penchée sur la façon dont les personnes qui possèdent elles-mêmes un véhicule perçoivent l’électromobilité et les mesures d’incitation gouvernementales à cet égard. L’approbation et les éventuelles intentions d’achat ont augmenté de manière significative au cours de l’étude après que les participants aient acquis davantage de connaissances sur l’électromobilité et que certains aient pu tester des véhicules électriques. Les informations sur les bornes de recharge publiques déjà installées ainsi que les expériences personnelles avec une voiture électrique ont eu un effet positif sur les intentions d’achat.

Une autre étude de l’Université de Genève a également montré que de nombreux conducteurs sous-estimaient la proportion des trajets pouvant être effectués par une voiture électrique. Une information à ce sujet peut avoir un effet positif sur ce que l’on appelle l’angoisse de l’autonomie. Selon une autre étude de l’Université de Saint-Gall, les offres groupées de véhicules électriques et de services de recharge peuvent influencer positivement l’acceptation de l’électromobilité par les clients. Dans un autre rapport, l’Université de Saint-Gall a également étudié quelles mesures de marketing et de communication peuvent être utilisées pour influencer le processus d’achat afin de soutenir l’électromobilité. Ici, le rôle du vendeur de véhicules s’est avéré central, le mode de communication étant très important dans le processus de vente.



(A gauche) Le réseau de bornes de recharge pour l’électromobilité en Suisse est déjà relativement dense en comparaison internationale. Sur [www.ich-tanke-strom.ch](http://www.ich-tanke-strom.ch), il est possible de voir en temps réel si une borne de recharge est actuellement libre (source de l’image: [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch)).

# 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 page 34.

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, hydrogène), la Suisse entretient une étroite coopération multilatérale avec certains pays.

Sur la double page suivante, deux projets sont présentés à titre d'exemples où des acteurs suisses ont travaillé en étroite collaboration avec des partenaires européens dans le cadre de projets ERA-NET, une fois dans le domaine du captage, de l'utilisation et du stockage du CO<sub>2</sub> (CCUS) et une fois dans le domaine du photovoltaïque.

(A gauche) La mobilité hydrogène en Suisse s'accélère, avec une cinquantaine de camions à pile à combustible circulant actuellement sur les routes suisses. Le réseau de stations-service est également en constante expansion sur la base d'initiatives privées. La logistique de l'hydrogène est assurée par des conteneurs où l'hydrogène est stocké sous pression. Les acteurs suisses jouent un rôle de pionnier au niveau international dans l'utilisation de l'hydrogène pour le transport lourd de marchandises, et leurs activités attirent une grande attention internationale (source photo: Hydros spider AG).

# Moins argenté – photovoltaïque moins cher

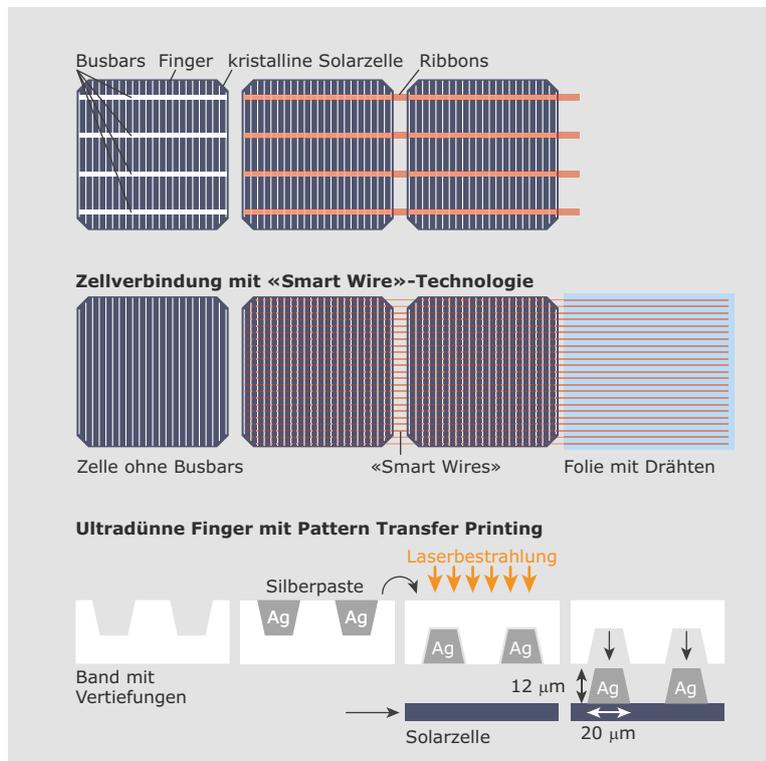
Le prix du photovoltaïque est en baisse depuis des années. Il s'agit d'accroître l'efficacité et de réduire les coûts de fabrication. Dans un projet européen, l'accent a été mis sur la réduction des coûts obtenue en économisant des composants coûteux (argent) grâce à une technologie de contact et de connexion innovante pour les cellules solaires.

Grâce au développement rapide du marché, les prix du photovoltaïque ont chuté de 80 % au cours des dernières années. Aujourd'hui, l'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les moins chères. Un point de départ pour réduire davantage les coûts est de diminuer la quantité d'argent dans les conducteurs qui recueillent et transportent le courant des cellules: Des doigts fins recueillent le courant dans les cellules et le conduisent aux barres omnibus. Les cellules solaires individuelles sont reliées entre elles par des rubans. Ces dernières années, de nouvelles

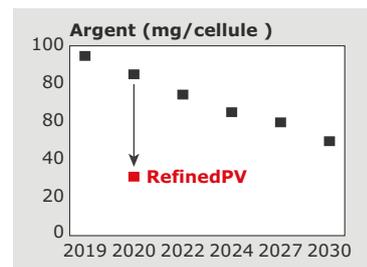
approches ont été développées, qui nécessitent moins de matériaux et où les pertes conductrices sont plus faibles. L'entreprise suisse Meyer Burger utilise à cet égard sa «Smart Wire Connection Technology» (SWCT), qui consiste à fixer de nombreux fils fins sur la cellule à travers les doigts de contact et à connecter les cellules adjacentes les unes aux autres. Pour réduire la consommation d'argent dans les doigts de contact, la société israélienne Utilight a mis au point une nouvelle technologie permettant de déposer des fils ultrafins (20 µm) sur les cellules solaires, ce

qui n'est guère possible avec les procédés de sérigraphie standard.

Dans un projet commun dans le cadre du réseau européen SOLAR-ERA.NET, ces deux entreprises ont combiné leurs technologies avec le centre de recherche allemand ISC Konstanz. Du côté des cellules, il a été possible de réduire la consommation d'argent à 28 mg par cellule, une valeur qui a des années d'avance en termes de développement technologique. Meyer Burger a fabriqué des modules solaires à partir des cellules métallisées de haute qualité en utilisant la technologie d'interconnexion SWCT et des fils sans indium, et les a testés conformément aux normes standard. La puissance maximale du module obtenue avec ces cellules est de 310 W (module de 60 cellules) et dépasse donc de plus de 15 W les modules commerciaux à trois barres omnibus.



Afin d'établir le contact avec les cellules solaires en silicium cristallin, des doigts et des barres métalliques sont imprimés sur les cellules comme barres de courant. Ces dernières années, des technologies ont été développées pour connecter des cellules sans barres omnibus et pour réduire la largeur des doigts de contact. Ces deux éléments contribuent à améliorer les performances, car la cellule est moins ombragée et les pertes ohmiques sont plus faibles. En outre, l'argent est massivement économisé, ce qui constitue un facteur de coût pertinent.



Consommation d'argent pour les cellules solaires en silicium (monofacial, de type p) selon la feuille de route technologique internationale pour le photovoltaïque (ITRPV, 2020).

SOLAR ERA-NET  
**Projet «RefinedPV»**  
 (Reduction of Power Losses by Ultra-fine Metallization and Interconnection of Solar Cells)  
 Durée du projet: 2017-2020  
 Participation suisse:  
 Meyer Burger Technology AG



## L'hydrogène aux émissions CO<sub>2</sub> négatives

Zéro émission de gaz à effet de serre d'ici 2050: l'hydrogène et la fixation et le stockage du CO<sub>2</sub> jouent un rôle décisif dans la réussite de cet objectif. Dans le cadre d'un vaste projet de recherche européen auquel participe la Suisse, des chercheurs ont étudié les possibilités de cette voie.

Les pompes à chaleur ne sont pas adaptées aux températures élevées des processus, et les véhicules à batterie atteignent leurs limites lorsqu'ils transportent des charges lourdes. L'hydrogène doit être utilisé pour décarboniser ces secteurs. Mais comment mettre à disposition de l'hydrogène qui a été produit avec de faibles émissions de CO<sub>2</sub>? Dans le cadre du projet européen «Elegancy», qui réunit 22 partenaires, l'extraction de l'hydrogène du gaz naturel avec captage et stockage simultanés du CO<sub>2</sub> libéré au cours du processus a été étudiée.

Les chercheurs voient un grand potentiel dans la production d'hydrogène à partir de la biomasse. De

cette manière, des «émissions négatives de CO<sub>2</sub>» peuvent être réalisées pour compenser les émissions d'autres secteurs tels que l'agriculture ou le trafic aérien. L'hydrogène est obtenu à partir de la biomasse, soit par reformage à la vapeur du biogaz produit à partir de biodéchets. Ou bien le bois est transformé en méthane ou en hydrogène synthétique par gazéification. Dans les deux cas, le CO<sub>2</sub> peut être capté et stocké de façon permanente dans le sous-sol. Le CO<sub>2</sub> extrait de l'atmosphère par les plantes pendant leur croissance n'est pas libéré à nouveau et le bilan de CO<sub>2</sub> est négatif.

Une attention particulière a été accordée au stockage souterrain du

CO<sub>2</sub>. Existe-t-il en Suisse des sites de stockage appropriés, d'une capacité suffisante et étanches aux fuites de gaz? Les chercheurs ont mis au point une méthode de dépistage pour identifier les sites de stockage potentiels. L'objectif est de quantifier les propriétés géologiques les plus importantes requises pour l'injection de CO<sub>2</sub> et d'évaluer leurs incertitudes. Trois sites ont été étudiés pour leur potentiel, dont un dans l'Entlebuch, où du gaz naturel était autrefois produit. Ces anciens gisements de gaz, qui sont nombreux en mer du Nord, sont particulièrement adaptés pour servir de puits. Parce que là où le gaz naturel s'est accumulé, on peut supposer que le sous-sol est dense.



Sur le site de Werdhölzli de Biogas Zürich AG, le biogaz est produit à partir de déchets organiques et injecté dans le réseau de gaz. À l'avenir, de l'hydrogène pourrait également être produit à partir de ce biogaz. Si le CO<sub>2</sub> était capté et stocké dans le sol à long terme, les émissions seraient même négatives (Source: Energie 360° AG / Daniel Hager Photography).

ERA-NET ACT

**Projet «Elegancy»**  
(Enabling a Low-Carbon Economy via Hydrogen and CCS)

Durée du projet: 2017–2020

Participation suisse:  
ETH Zürich,  
Paul Scherrer Institut PSI,  
Climeworks AG



## 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)
	User-Centred Energy Systems (userstcp.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)		Materials (https://m-era.net/)

## D'autres coopérations internationales

	International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy		Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
	DACH-Kooperation Smart cities and communities		DACH-Kooperation Smart grids
	International Partnership for Geothermal Technology		

(A droite) Drone de la société TwingTec AG pour un concept alternatif d'énergie éolienne, voir rapport page 21 (Source: TwingTec AG).



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

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

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