



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

Recherche énergétique et innovation

Rapport 2021





Editorial

Les défis du changement climatique et la sécurité de l'approvisionnement énergétique font partie des sujets les plus importants en Suisse et dans le monde. Outre la mise en œuvre de mesures d'efficacité et l'application de technologies énergétiques renouvelables, la recherche énergétique joue un rôle important. Elle aide à étudier le système énergétique de plus en plus complexe, avec différentes interactions entre des acteurs très divers et différents secteurs énergétiques, ainsi qu'à développer des solutions techniques et non techniques.

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) encourage et coordonne la recherche énergétique suisse dans une approche programmatique depuis de nombreuses années et soutient la recherche orientée vers les applications, les projets pilotes et de démonstration ainsi que les grands consortiums de recherche interdisciplinaires. Trois instruments de promotion différents, mais complémentaires, sont utilisés à cet égard. La présente brochure présente à titre d'exemple des projets que l'OFEN soutient et accompagne étroitement, ceci à titre représentatif pour un grand nombre d'autres projets de recherche, projets pilotes et projets de démonstration. Les codes QR indiqués permettent d'accéder à des informations détaillées.

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech

(Photo de couverture) La météo a un impact important sur la quantité d'électricité générée par les installations photovoltaïques. Même un ciel légèrement nuageux peut réduire de moitié la production d'électricité solaire par rapport à une journée d'été claire, et une journée pluvieuse en novembre peut même la diviser par dix. Les événements météorologiques exceptionnels ont également leur importance: plusieurs fois par an, des courants d'air transportent de la poussière du Sahara jusqu'en Suisse. De telles situations météorologiques, avec une forte concentration d'aérosols dans l'atmosphère, réduisent la production solaire jusqu'à 10 % (source: Jan Remund, Meteotest AG).



(A gauche) L'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) à Neuchâtel a récemment présenté une cellule solaire en tandem avec un rendement certifié de 29,2 %. Cette performance est rendue possible par la combinaison d'une cellule solaire en pérovskite et d'une cellule solaire en silicium texturé. Le défi consiste notamment à déposer uniformément la cellule en pérovskite mince sous forme de film sur la surface en silicium intentionnellement texturée. Le rendement de cette cellule tandem est nettement supérieur au rendement maximal envisageable pour une cellule solaire au silicium seule (source: Christian Wolff/EPFL).

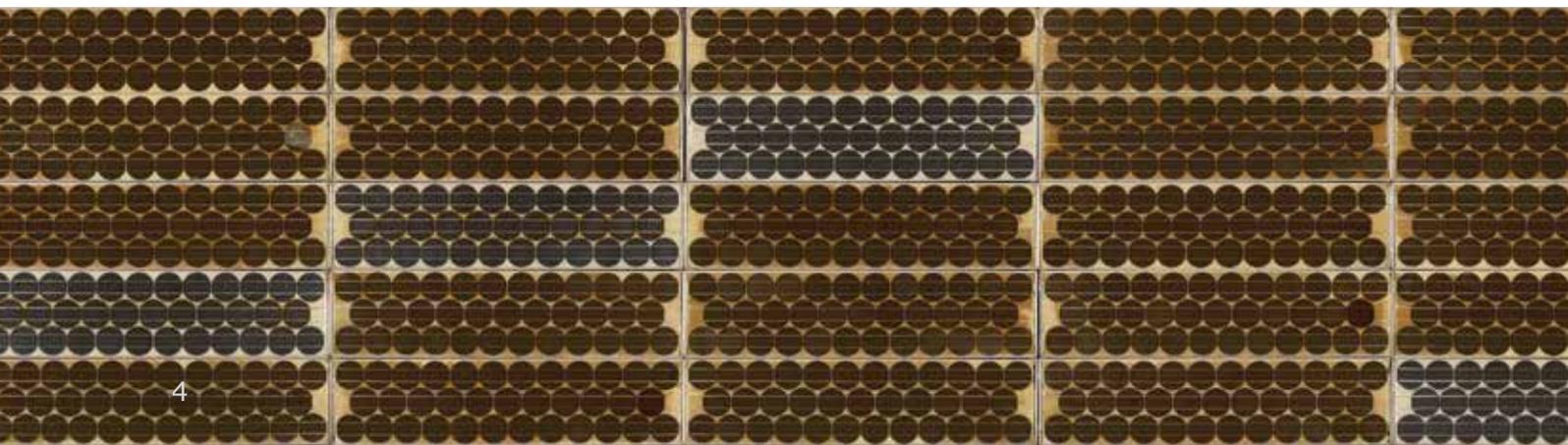


Sommaire

Editorial	3
Sommaire	4
Vue d'ensemble	
Promotion de la technologie et de l'innovation	5
Programmes de recherche énergétique thématiques	6
Promotion de la recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire avec SWEET	6
Statistiques de la recherche énergétique en Suisse	8
Highlights	
Des batteries pour la transition énergétique	12
Processus de sorption à haute efficacité énergétique dans le génie des procédés	16
Bénéfices additionnels des onduleurs photovoltaïques dans l'industrie	18
Une électricité solaire fiable grâce à de bonnes prévisions de rayonnement	20
Chaleur issue de grandes profondeurs	24
Double récolte avec le photovoltaïque dans l'agriculture	26
Affaires internationales	
Coopération internationale	29
Participation aux programmes de collaboration technologique de l'AIE	30
Participation aux ERA-NETs – European Research Area Networks	30
D'autres coopérations internationales	30



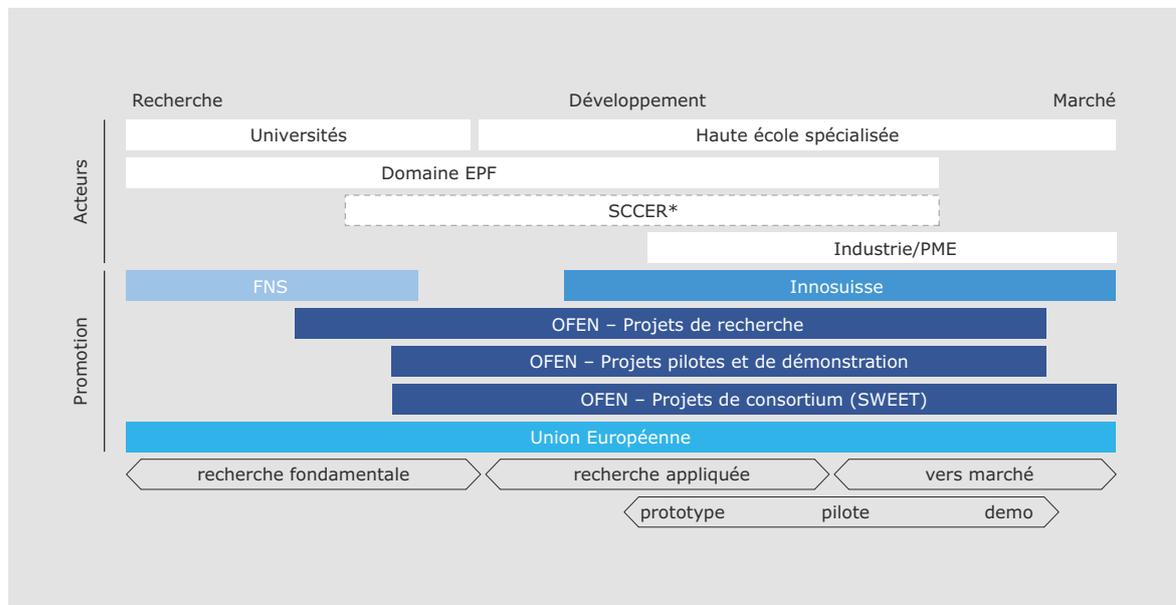
«Auguri di buon compleanno Ticino Solare»: près de Lugano, la «TISO-10» a été raccordée au réseau électrique en mai 1982 en tant que première installation photovoltaïque d'Europe. «TISO» signifie «Ticino Solare» et «10» correspond à la puissance installée en kW. En 1982, la puissance photovoltaïque installée dans le monde se chiffrait à 9 MW et le coût de l'installation TISO était de 28'500 francs par kW installé. Pour le 35e anniversaire, les 288 modules ont été examinés en détail. L'analyse a montré que 56 % des modules atteignaient encore plus de 80 % de leur puissance nominale après 35 ans et qu'ils répondaient donc à une garantie de perte de puissance maximale de 20 % (source: SUSPI).



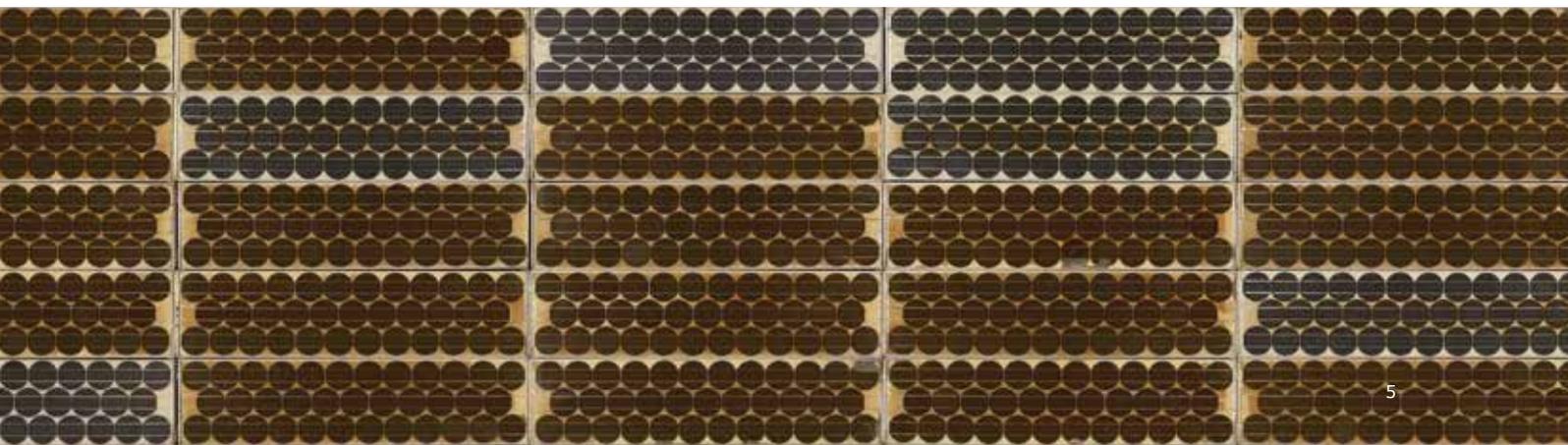
Promotion de la technologie et de l'innovation

Avec trois instruments complémentaires de promotion de la recherche et de l'innovation dans le domaine de l'énergie, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) couvre quasiment tout l'éventail de technologies énergétiques. A cet égard, il se base sur son propre concept de recherche énergétique 2021–2024, lui-même basé sur le concept de recherche énergétique de la Confédération. Pour la période actuelle 2021–2024, l'accent est davantage mis sur la recherche non technique (angl. SSH: social sciences and humanities). Les sciences techniques et les SSH devront collaborer étroitement dès la conception de projets de recherche afin d'orienter les résultats de la recherche vers une application ultérieure à un stade précoce.

Les fonds de l'OFEN pour la recherche énergétique sont utilisés à titre de soutien pour remplir les lacunes dans le paysage de promotion et pour coordonner ainsi la recherche énergétique suisse. Actuellement, environ 50 millions de francs suisses sont mis à disposition chaque année et environ 300 projets en cours sont suivis de près chaque année.



L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) coordonne la recherche et l'innovation dans le domaine 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 énergétique 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.

 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)
 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)
 Energie – économie – société		

Programmes de recherche énergétique de l'OFEN. Les chiffres entre parenthèses indiquent le degré de maturité technologique des projets soutenus par le programme correspondant.

Promotion de recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire avec SWEET

Fin 2020, le Parlement fédéral a approuvé le programme de promotion de recherche SWEET – «SWiss Energy research for the Energy Transition», qui s'inscrit dans la continuité des précédents SCCER «Swiss Competence Centers in Energy Research». Les fonds disponibles pour SWEET s'élèvent à 136,4 millions de francs jusqu'en 2028. Contrairement aux SCCER, SWEET en tant que programme a une structure plus compétitive, c'est-à-dire que des appels d'offres sont publiés en continu auxquels des consortiums peuvent soumettre leur proposition. SWEET n'impose pas non plus de directives fixes concernant les «matching funds», c'est-à-dire la part de fonds propres ou de fonds de tiers qui doivent être mobilisés pour un projet. SWEET encourage, par le biais d'appels d'offres, des consortiums plus importants composés de différen-



tes hautes écoles, universités et partenaires de l'économie et des pouvoirs publics.

Une première mise au concours sur le thème «Intégration des énergies renouvelables dans un système énergétique suisse durable et résilient» s'est achevée début 2021. Les quatre consortiums retenus, DeCarbCH, EDGE, PATHFNDR et SURE, ont entamé leurs travaux de recherche en 2021. Le consortium DeCarbCH («Decarbonization of Switzerland») se focalise sur la décarbonisation des systèmes de chauffage et de refroidissement et a pour objectif de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables aussi bien dans le secteur du bâtiment que dans celui de l'industrie et des services. EDGE («Integrating very high shares of decentralized renewable ener-

gy into the Swiss energy system») a pour objectif principal de montrer comment atteindre en Suisse une part élevée d'énergie renouvelable décentralisée, en mettant l'accent sur le secteur de l'électricité. Le consortium PATHFNDR («Pathways to an efficient future energy system through flexibility and sector coupling») étudie quant à lui comment transformer le système énergétique suisse pour qu'il puisse accueillir une plus grande part d'énergie renouvelable. Le quatrième consortium du premier appel SURE («Sustainable and REsilient Energy for Switzerland») vise à démontrer comment la sécurité de l'approvisionnement énergétique peut être garantie dans un système énergétique qui sera décarbonisé à l'avenir et développe à cet égard de nouveaux scénarios.

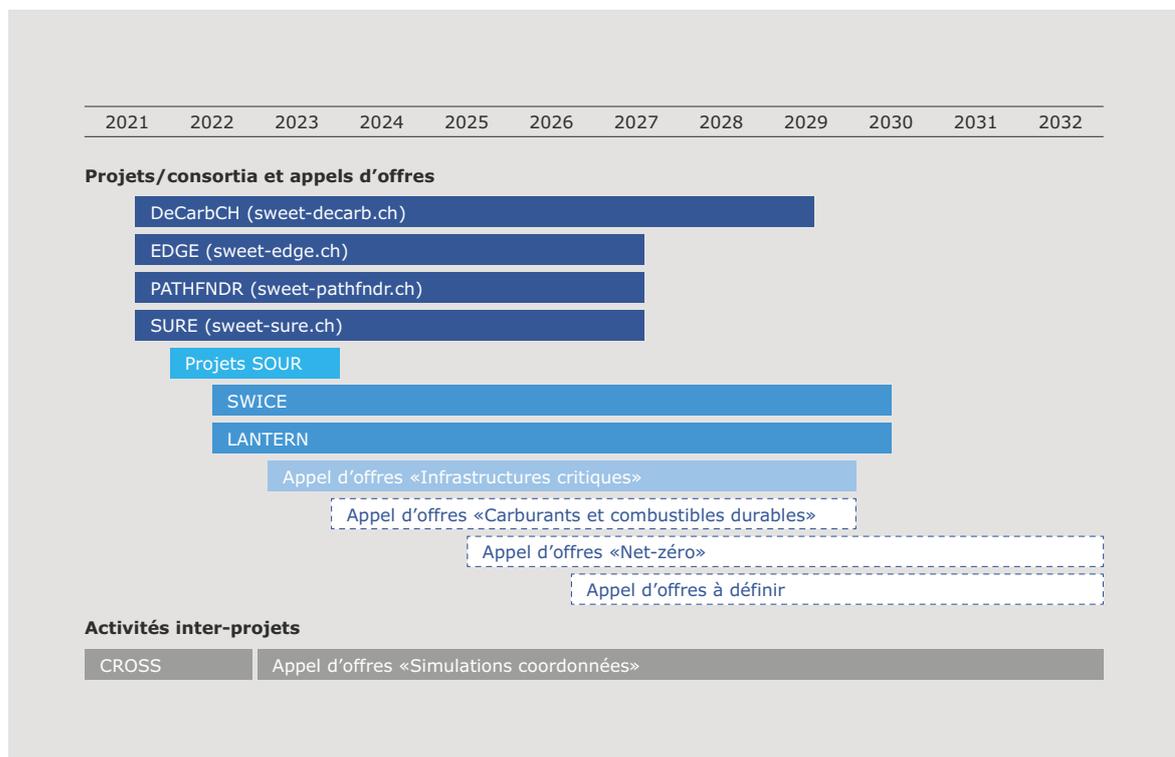
Outre les consortiums SWEET, l'instrument SOUR («SWEET Outside-the-box Rethinking») encourage délibérément des projets non conventionnels. Lors d'un premier appel d'offres SOUR – portant sur le même thème directeur que le premier appel d'offres SWEET – quatre projets sélectionnés ont été retenus.

Le second appel d'offres SWEET, intitulé «Living & Working», a été publié au printemps 2021. Il s'agit d'étudier, dans des zones (sub)urbaines géographiquement bien définies, de quelle façon la mise à disposition et la distribution d'énergie peuvent être assurées de manière efficace et économique et comment la demande en énergie peut être minimisée. Le couplage des sec-

teurs «bâtiment» et «mobilité» ainsi que l'adaptation des technologies et des comportements des consommateurs permettront de mettre en évidence et de quantifier de nouveaux potentiels d'économie d'énergie. Les consortiums LANTERN («Living Labs Interfaces for Energy Transition») et SWICE («Sustainable Wellbeing for the individual and the Collectivity in the Energy transition») démarreront leurs travaux à ce sujet en 2022.

En automne 2021, le troisième appel d'offres SWEET a été lancé avec pour thème principal «Infrastructures critiques, changement climatique et résilience du système énergétique suisse». Dans le cadre de cet appel d'offres, il est prévu d'analyser l'influence de la transformation de l'approvisionnement énergétique sur les infrastructures critiques et d'étudier la vulnérabilité du système énergétique face aux dangers techniques, naturels et sociaux.

Actuellement, un autre consortium est recherché pour coordonner de manière transversale différentes simulations des différents consortiums SWEET. Outre les aspects techniques et économiques, les sciences humaines et sociales doivent également être prises en compte. Les activités du consortium qui résultera de cet appel d'offres s'inscriront dans la continuité des activités de CROSS («CooRdination Of Scenarios for SWEET»). Ce dernier est une activité commune aux quatre premiers consortiums DeCarbCH, EDGE, PATHFNDR et SURE et se poursuivra jusqu'à fin 2022.



DeCarbCH



EDGE



PATHFNDR



SURE



Aperçu des projets/consortia du programme SWEET et des appels d'offres actuels et prévus.

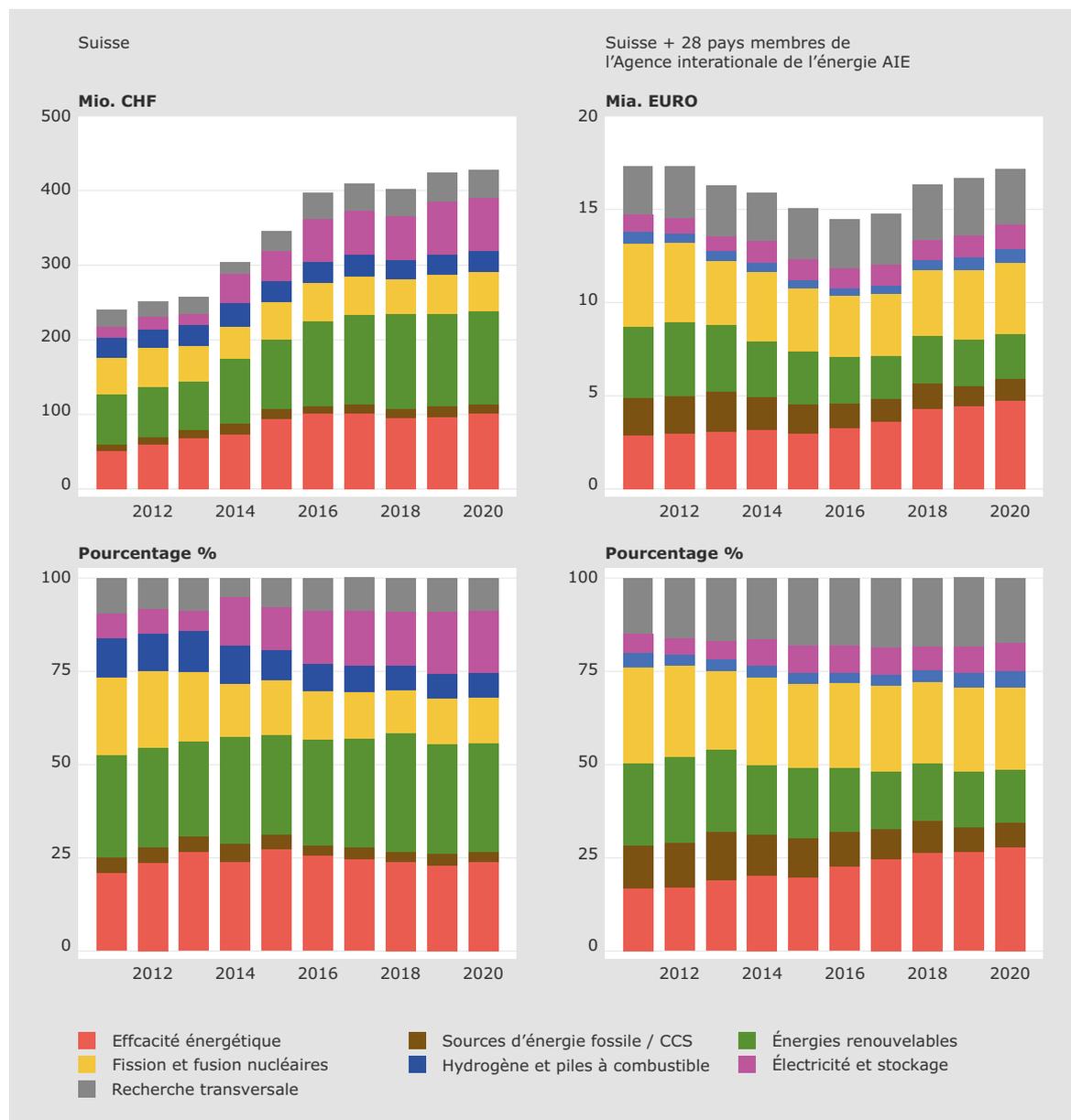
Statistiques de la recherche énergétique en Suisse

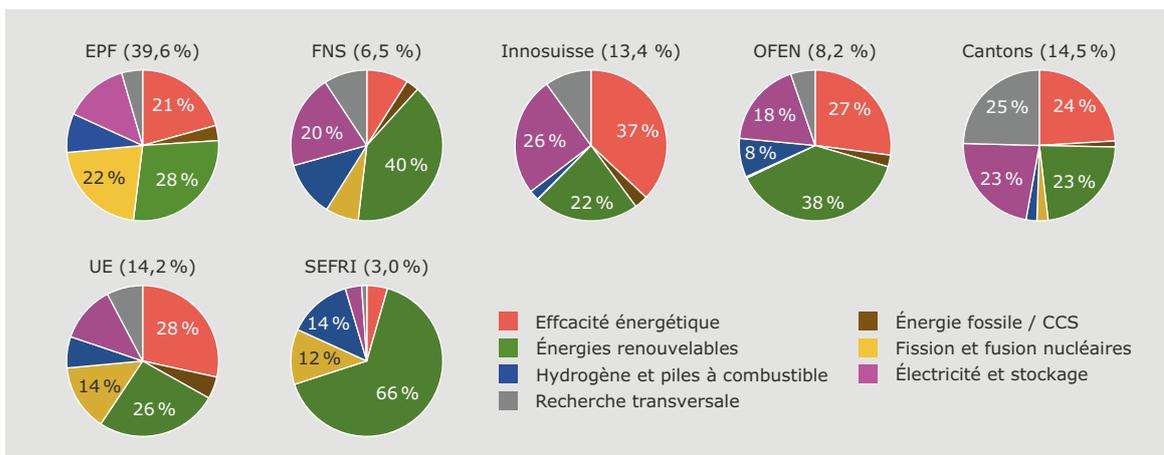
Depuis 1977, l'OFEN recense des données relatives aux projets de recherche et développement et aux projets pilotes et de démonstration. Ce relevé ne concerne que les projets financés – totalement ou en partie – par les pouvoirs publics (Confédération et cantons), le Fonds national suisse de la recherche 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.ad-](http://www.aramis.ad-min.ch)

[min.ch](http://www.aramis.ad-min.ch)), du FNS (data.snf.ch) et de l'UE (cordis.europa.eu), ainsi que sur le site Internet des institutions concernées. En 2020, les dépenses publiques pour la recherche énergétique en Suisse se sont élevées à 432 millions de francs, soit 180 % des dépenses de 2011. A titre de comparaison, les dépenses de 29 pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (y compris la Suisse) s'élèvent ensemble à environ 17 milliards d'euros et sont restées à peu près constantes au cours des dix dernières années.

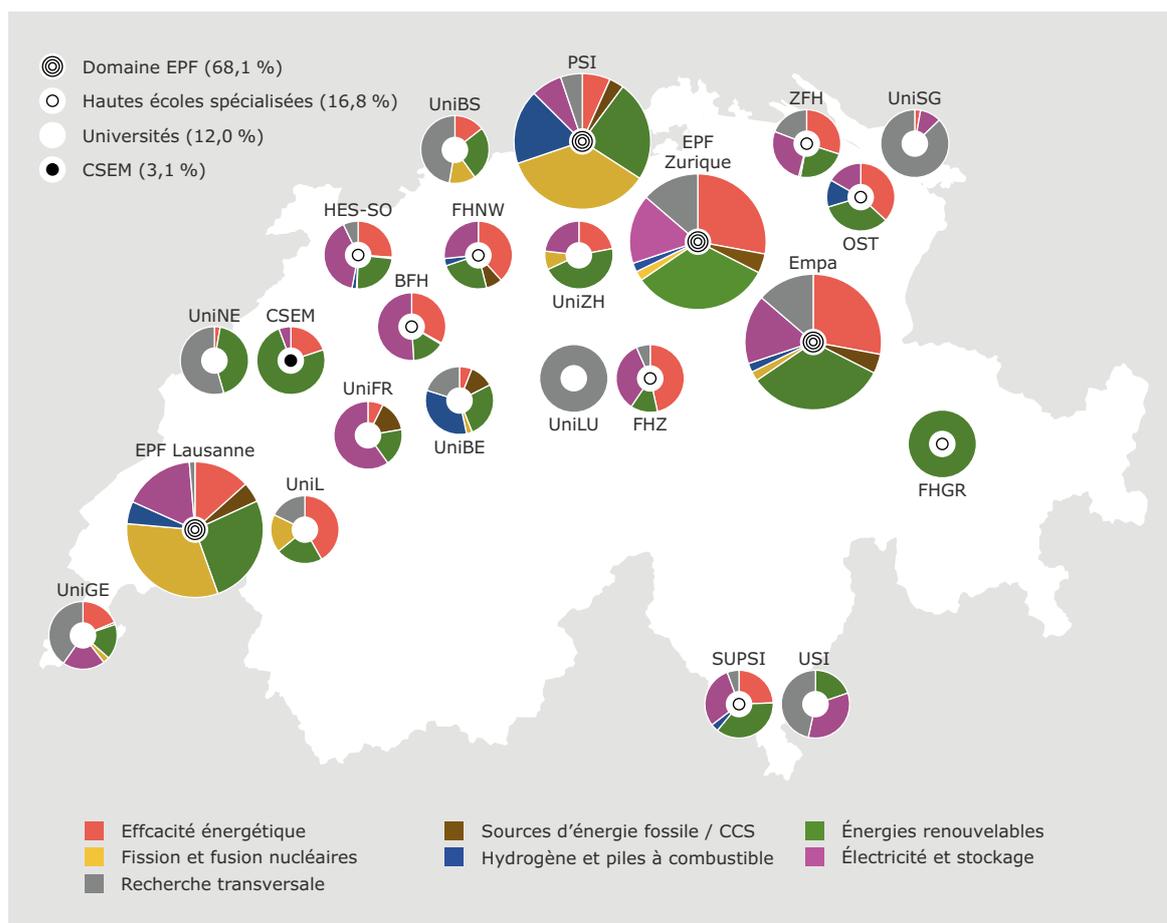


Fonds publics consacrés à la recherche énergétique en Suisse (à gauche) et dans 29 pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (à droite). Pour la Suisse, ces dépenses se situent dans une fourchette de 0,3 à 0,65 pour mille du produit intérieur brut. Les fonds sont répartis selon la classification de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (source: OFEN).

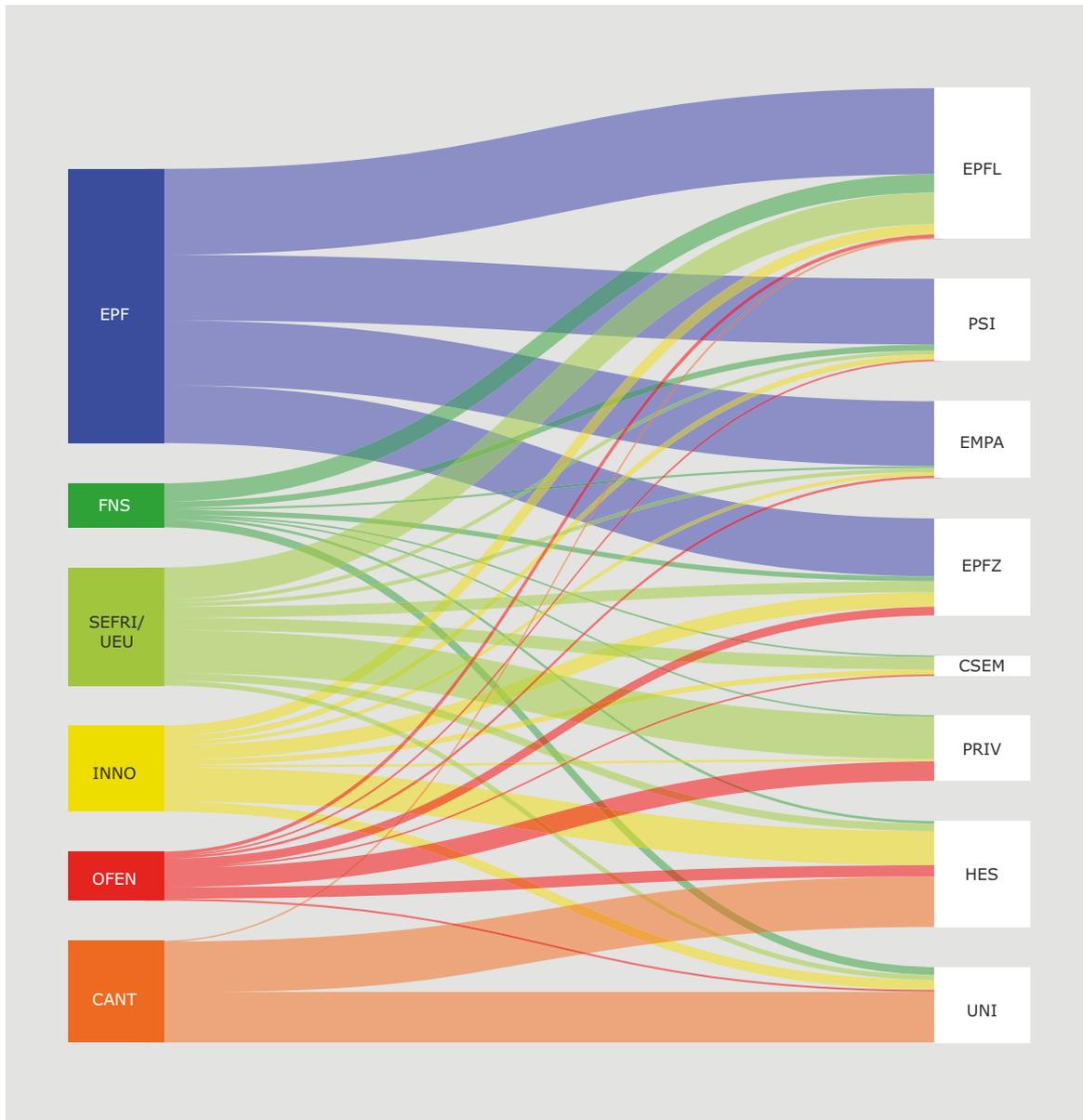




Financement public de la recherche sur l'énergie (données 2020) par agence de financement et par domaine thématique. Environ 40 % du financement de la recherche énergétique en Suisse provient directement du domaine des EPF, et environ 15 % du financement cantonal des hautes écoles spécialisées et des 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 (source: OFEN).



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 (68 % 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 (source: OFEN).



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

Utilisation des fonds: PSI: Institut Paul Scherrer, EPFZ: EPF de Zurich, EPFL: EPF de 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.

(À gauche) Bobine secondaire pour un transfert de puissance par induction, afin de transférer l'énergie d'un module photovoltaïque sans contact/sans fil («Wireless Power Transfer» WPT). Grâce à ce nouveau concept, le montage mécanique d'un tel module photovoltaïque WPT s'accompagne d'une connexion électrique sans connecteur classique, ce qui peut augmenter la fiabilité de la technologie des systèmes photovoltaïques. La bobine représentée se compose de 280 spires, réparties uniformément sur sept couches, et permet le raccordement à un string de système photovoltaïque avec une tension du string supérieure à 1400 V. Contrairement à aujourd'hui, l'électronique de puissance est laminée dans le module. Dans le cadre d'un projet de l'OFEN, un rendement de $97,9\% \pm 0,83\%$ (coefficient de couplage $k=1$) a pu être vérifié pour le système de bobines. En tenant compte des pertes modélisées de l'électronique de puissance sur la base du convertisseur de résonance et du redresseur, un rendement global de 95,7 % serait envisageable (source: ZHAW).





Des batteries pour la transition énergétique

La pénétration de l'électromobilité sur les routes suisses dépend de batteries performantes. Par ailleurs, les batteries sont un outil important pour décaler l'électricité solaire des heures ensoleillées de la journée vers le soir, période de forte consommation. Ces applications le montrent clairement: les batteries et autres accumulateurs électrochimiques sont une technologie clé pour la transformation du système énergétique vers la durabilité.

En 2017, l'Union européenne (UE) a lancé l'«Alliance européenne pour les batteries», qui vise à mettre en place une chaîne de création de valeur autonome, compétitive et durable pour les technologies de batteries en Europe, soulignant ainsi l'importance centrale de cette technologie pour la transition énergétique. A cet effet, un total de 20 milliards d'euros d'aides d'Etat a été accordé par la Commission européenne en 2019 et 2021 pour les «projets importants d'intérêt européen commun» (Important Projects of Common European Interest, IPCEI), qui ont été notifiés par différents Etats membres de l'UE. De plus, quelque 925 millions d'euros provenant directement du budget de l'UE seront mis à disposition jusqu'en 2027 pour des projets de recherche dans le domaine des batteries. Un soutien indirect est également apporté au niveau européen par le biais du paquet législatif «Fit-for-55», qui renforce les normes d'émission de CO₂ pour les véhicules et introduit des prescriptions pour le déploiement d'une infrastructure de recharge sur l'ensemble du territoire.

En Suisse, la recherche sur les batteries prend également une place de plus en plus importante. Ainsi,

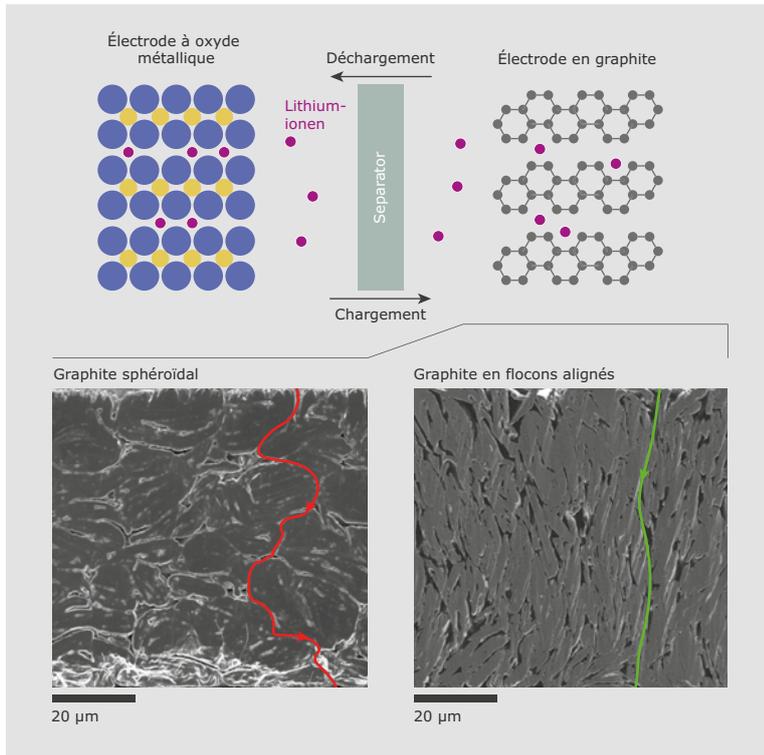
en 2020, différents instituts de recherche et entreprises industrielles se sont associés pour former la plateforme d'innovation iBAT. La compétitivité de la Suisse dans cette technologie clé doit être encore renforcée par cette collaboration entre la science et l'industrie. La Suisse ne compte pas de très grands fabricants de batteries, mais la recherche et la sous-traitance de produits semi-finis et de machines y revêtent une grande importance.

Les activités de recherche sur les batteries en Suisse visent par exemple à améliorer l'accumulateur lithium-ion. Ce type de batterie rechargeable a été développé à la fin des années 1970 et se répand de plus en plus depuis les années 1990. Aujourd'hui, cette technologie de batterie est utilisée sous différentes formes dans les voitures électriques, les téléphones portables et de nombreuses autres applications. Les ions lithium, qui ont donné leur nom à la batterie, jouent un rôle central dans son fonctionnement: les porteurs de charge positive se déplacent de l'électrode positive vers l'électrode négative lors de la charge de la batterie et dans le sens inverse lors de la décharge. L'entreprise suisse Batttrion, issue de l'École polytech-

Installation de fabrication «roll-to-roll» de l'entreprise suisse Batttrion pour la production industrielle de nouvelles électrodes en graphite (carbone) qui devraient réduire de manière significative les temps de charge des batteries lithium-ion (source: Batttrion AG).



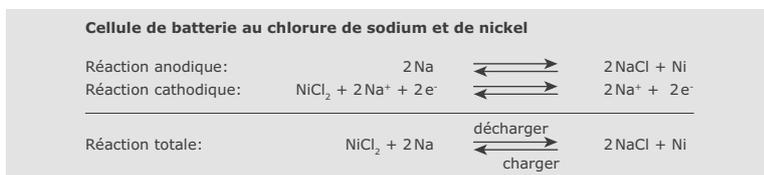
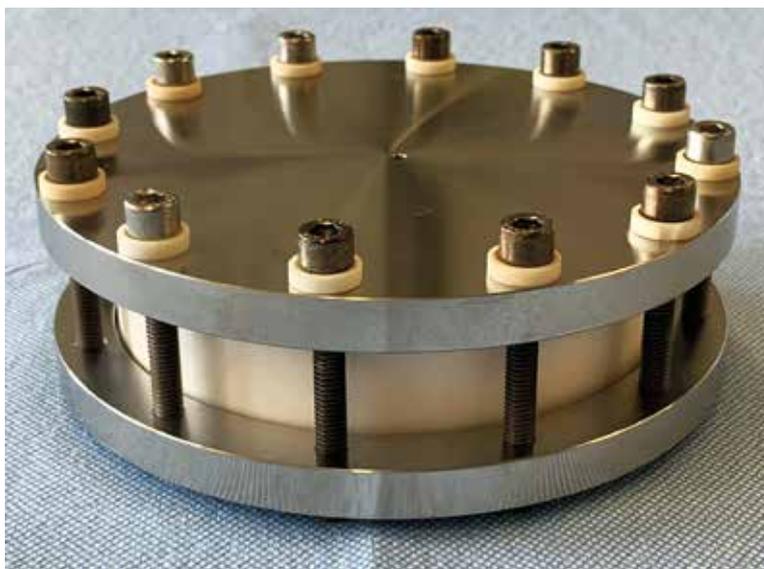




(En haut) Dans les piles au lithium-ion, des ions de lithium sont échangés entre les électrodes lors de la charge et de la décharge. (En bas) Images en microscopie électronique des électrodes en graphite avec (à gauche) du graphite sphérique conventionnel et avec (à droite) des particules de graphite alignées, préparées par un procédé mis au point par l'entreprise suisse Battrion. À droite, les chemins de diffusion des ions lithium sont nettement plus courts (source: Battrion).

Le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa) développe des cellules de batteries à haute température à base de chlorure de sodium et de nickel à géométrie plate, plus faciles à fabriquer par rapport aux géométries tubulaires traditionnelles. Les composants passifs de la cellule, l'électrolyte solide ainsi que l'électrode négative en sodium-métal fondu tolèrent des taux élevés pour les courants de charge et de décharge (source: Empa).

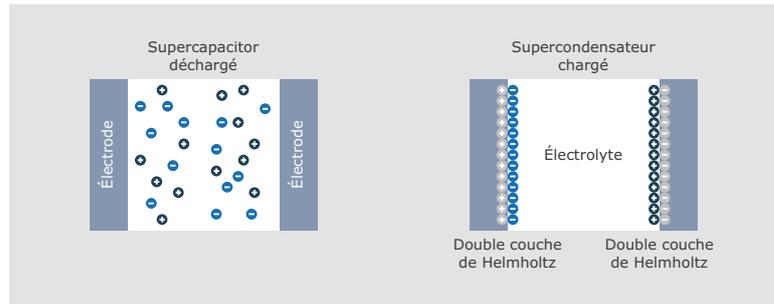
Le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa) développe des cellules de batteries à haute température à base de chlorure de sodium et de nickel à géométrie plate, plus faciles à fabriquer par rapport aux géométries tubulaires traditionnelles. Les composants passifs de la cellule, l'électrolyte solide ainsi que l'électrode négative en sodium-métal fondu tolèrent des taux élevés pour les courants de charge et de décharge (source: Empa).



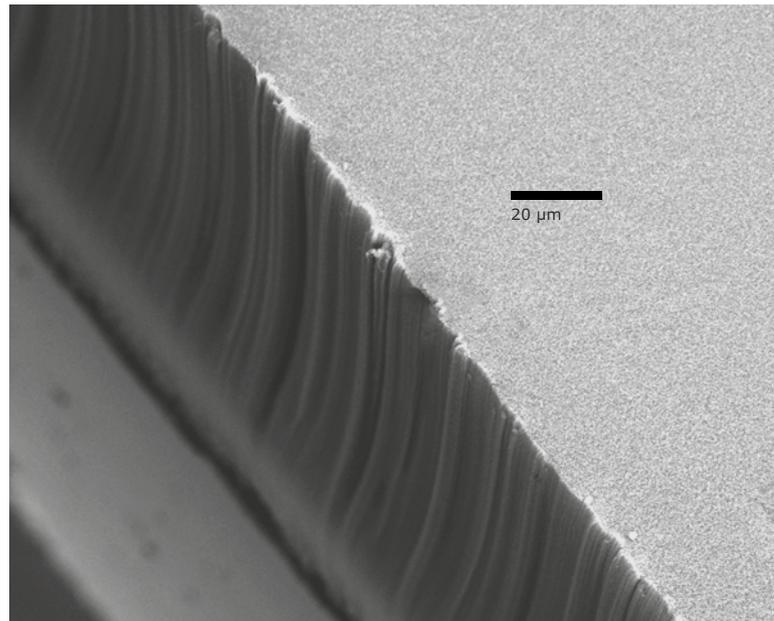
Le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa) développe des cellules de batteries à haute température à base de chlorure de sodium et de nickel à géométrie plate, plus faciles à fabriquer par rapport aux géométries tubulaires traditionnelles. Les composants passifs de la cellule, l'électrolyte solide ainsi que l'électrode négative en sodium-métal fondu tolèrent des taux élevés pour les courants de charge et de décharge (source: Empa).

Les batteries à cellules de chlorure de sodium et de nickel représentent une technologie plutôt peu répandue jusqu'à présent. La fascination pour ce type d'accumulateur vient notamment du fait qu'il fonctionne à base de sel commun (chlorure de sodium). Toutes les matières premières nécessaires à la construction des cellules de batterie sont disponibles en quantité abondante et relativement bon marché. Toutefois, ces cellules de batterie fonctionnent à des températures d'environ 300 °C et doivent donc être isolées thermiquement. Actuellement, cette technologie demandant peu d'entretien et fonctionnant de manière fiable même à de basses températures extérieures est surtout utilisée dans des applications de niche telles que l'alimentation en électricité des installations de communication mobile et de secours. À l'avenir, elle pourrait également servir à équilibrer la production et la demande d'électricité, par exemple dans les batteries stationnaires dans le réseau.

(En haut) Schéma de principe simplifié d'un supercondensateur (condensateur à double couche) avec stockage d'énergie dans des doubles couches de Helmholtz d'ions négatifs et positifs, disposés en miroir sur les électrodes. (En bas) Image au microscope électronique à balayage d'une électrode avec une multitude de nanotubes de carbone alignés verticalement (source: EPFL).



Dans le cadre d'un projet soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa) travaille à l'optimisation de composants des cellules au chlorure de sodium et de nickel. Des cellules à géométrie plate, différentes des cellules tubulaires classiques, ont été spécialement développées. La forme tubulaire des cellules actuelles au chlorure de sodium et de nickel implique une complexité au niveau de la fabrication, de l'assemblage et du contrôle de la qualité, qui sera simplifiée grâce aux cellules plates. Les résultats de la recherche sont mis en œuvre par l'entreprise tessinoise FZSoNick.



Dans un autre projet soutenu par l'OFEN et mené à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), il est également question d'améliorer une technologie de stockage existante. Ce projet vise les «supercondensateurs». Les électrodes de ces accumulateurs sont reliées entre elles par un électrolyte avec des ions chargés positivement et négativement. En appliquant une tension externe, le stockage de l'énergie électrique se fait dans des couches dites doubles de Helmholtz d'ions négatifs et positifs, qui sont placées de manière symétrique sur les électrodes. Contrairement aux batteries, il n'y a pas de modification chimique de la matière. Les supercondensateurs se caractérisent par des rendements élevés et des densités de puissance importantes et jouent un rôle dans l'électromobilité pour couvrir les pointes de puissance. Les su-

percondensateurs traditionnels sont toutefois moins adaptés au stockage d'énergie. Le projet de l'EPFL vise à augmenter la densité énergétique des supercondensateurs afin d'ouvrir la voie à de nouveaux domaines d'application. Il s'agit par exemple de l'alimentation électrique de capteurs, tels qu'ils sont de plus en plus utilisés dans les appareils intelligents interconnectés («Smart Devices»). Les électrodes des supercondensateurs étudiés à l'EPFL consistent en des structures tubulaires en atomes de carbone, appelées «nanotubes de carbone», d'un diamètre de quelques nanomètres. Les électrodes sont revêtues de matériaux électrochimiquement actifs, ce qui permet d'augmenter la densité de stockage de l'énergie.

La Haute école spécialisée bernoise s'est penchée sur la question du meilleur moyen d'intégrer les batteries solaires dans l'approvisionnement en électricité. Dans le cadre d'un projet récemment achevé, elle a étudié les possibilités pour les exploitants d'installations solaires équipées de batteries d'utiliser ces dernières de manière à «servir le réseau», c'est-à-dire de manière à ce que les réseaux de distribution d'électricité soient le moins possible affectés. L'utilisation d'algorithmes d'équilibrage de charge adaptés au réseau permet de réduire considérablement et, dans de nombreux cas, d'éviter complètement les surcharges des lignes électriques et des transformateurs.





Les processus de sorption jouent un rôle important dans l'industrie depuis un bon moment. Un exemple d'application plus récent est le principe de captage direct du dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère de l'entreprise suisse Climeworks. Dans une première installation à Hinwil, mise en service en 2017, 2,5 tonnes de CO₂ sont captées par jour. L'industrialisation et la mise à l'échelle se poursuivent, par exemple avec une plus grande installation en Islande, où le CO₂ est capté puis stocké dans le sous-sol (source: Climeworks).

Processus de sorption à haute efficacité énergétique dans le génie des procédés

Dans de nombreuses entreprises industrielles, des adsorbants sont utilisés, par exemple pour éliminer des substances colorées, odorantes ou toxiques indésirables dans les gaz et les liquides. De tels systèmes techniques sont souvent surdimensionnés et consomment donc trop d'énergie. Un bon dimensionnement permet d'économiser de l'énergie et des matériaux.

En génie des procédés, le terme «absorption» de substances désigne le processus d'absorption d'atomes, de molécules ou d'ions dans une phase distincte, par exemple l'absorption de molécules de gaz dans un solide ou dans un liquide. Par opposition, l'«adsorption» désigne le processus de dépôt uniquement à la surface. «Désorption» fait référence au processus inverse, où les molécules de gaz quittent un solide ou un li-

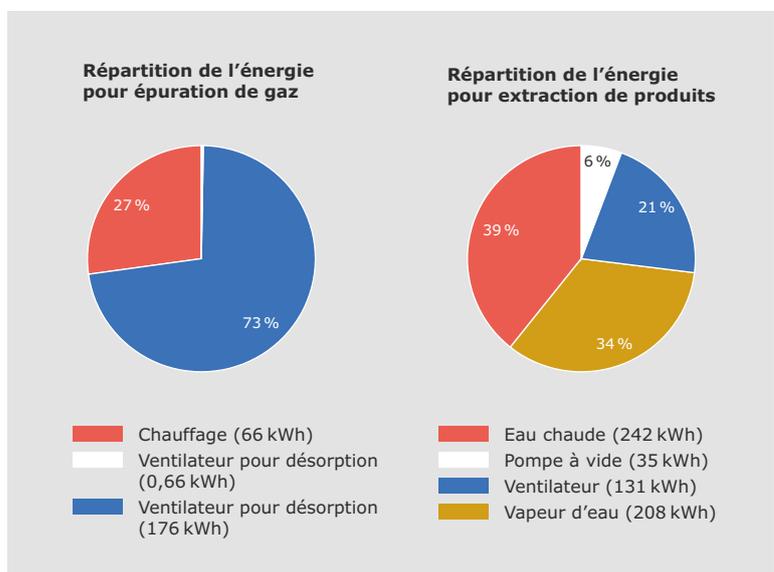
quide pour passer en phase gazeuse. Les processus de sorption, c'est-à-dire les séquences d'absorption/adsorption et de désorption, jouent un rôle important dans l'industrie, par exemple pour purifier l'air d'une usine de production de peinture des solvants. Les entreprises alimentaires ou chimiques font également appel à ces procédés pour séparer les mélanges de gaz. Les processus de sorption sont également

d'une grande importance dans les techniques environnementales et énergétiques.

D'un point de vue énergétique, les systèmes d'adsorption dans l'industrie représentent un grand potentiel d'optimisation. En effet, ces systèmes sont souvent surdimensionnés avec des marges de sécurité élevées. Cela entraîne une augmentation de la consommation d'éner-



gie et de matériaux ainsi que des coûts élevés. Ces dernières années, la Haute École de Lucerne a étudié les possibilités d'optimisation dans le cadre de plusieurs projets soutenus par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Le potentiel d'économie d'énergie des processus de sorption a été systématiquement analysé et des méthodes appropriées ont été recherchées afin de l'exploiter. Ces travaux ont débouché sur un document guide permettant de mieux planifier et dimensionner les installations d'adsorption. Une étape essentielle réside dans l'élaboration d'un modèle mathématique et physique qui décrit quantitativement le processus d'adsorption en question. Après validation, un tel modèle peut être utilisé pour l'analyse de sensibilité et l'optimisation. Un dimensionnement optimisé et adapté aux besoins, par exemple pour les installations d'épuration des gaz, permet d'économiser 25 à 30 % d'énergie.



Dans le domaine de la purification des gaz ou de l'extraction d'une substance d'un mélange gazeux, les processus de sorption sont essentiels. Dans le cas de l'épuration des gaz (à gauche), environ trois quarts de l'énergie nécessaire sont consacrés à l'alimentation électrique du ventilateur qui transporte le mélange de gaz à travers l'adsorbent. Un quart de la consommation d'énergie est consacré à la chaleur nécessaire à l'air de désorption qui libère les molécules de substances adhérant à l'adsorbent. Les besoins énergétiques se répartissent différemment dans le cas d'application de la production (à droite). Dans ce cas, une grande quantité de chaleur est nécessaire pour la génération d'eau de chauffage et de vapeur, et à peine un quart pour l'entraînement électrique du ventilateur. Des analyses détaillées de la Haute École Spécialisée de Lucerne à ce sujet ont révélé différents moyens d'optimisation énergétique selon l'objectif de l'application des processus de sorption (source: Haute École Spécialisée de Lucerne, rapport final de l'OFEN «Recommandations pour une utilisation énergétiquement efficace des processus d'adsorption en phase gazeuse», 2021).



Bénéfices additionnels des onduleurs photovoltaïques dans l'industrie

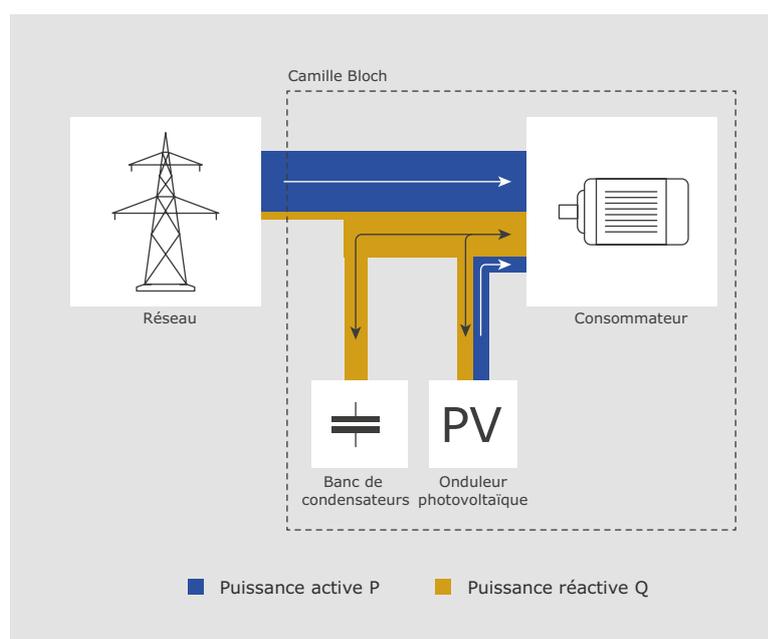
Les installations photovoltaïques dans l'environnement industriel sont particulièrement intéressantes, car une grande partie de l'électricité solaire produite peut être consommée sur place. Les onduleurs employés peuvent en outre être utilisés pour compenser la puissance réactive générée par exemple par le fonctionnement des moteurs électriques. Si cette compensation est effectuée avant le point de raccordement au réseau, les coûts peuvent ainsi être réduits, en évitant de payer pour la puissance réactive absorbée par le réseau électrique. Cette application innovante des onduleurs photovoltaïques a été testée avec succès auprès de la chocolaterie Camille Bloch dans le Jura bernois.

Les consommateurs d'électricité dans les installations industrielles, tels que les moteurs électriques, nécessitent à la fois de la puissance active et de la puissance réactive. La puissance active (P) correspond à la partie utilisée pour le travail effectif, tandis que la puissance réactive (Q) ne peut pas être utilisée directement et est générée par des charges inductives et capacitives. La consommation de puissance réactive à partir du réseau n'est tolérée par le fournisseur d'électricité que jusqu'à une valeur maximale. Pour les grandes quantités d'énergie réactive, celle-ci est facturée, puisque le réseau

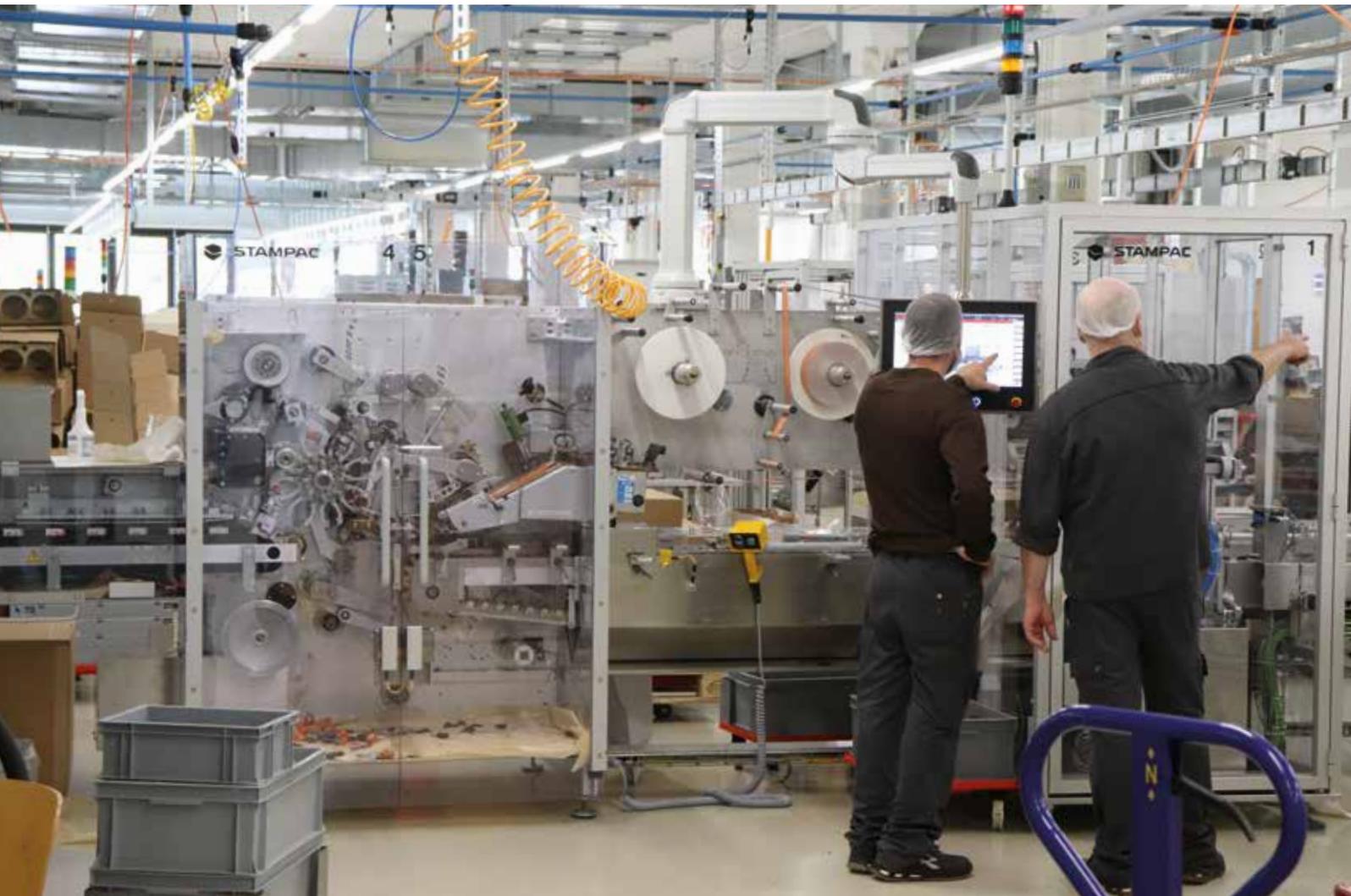
électrique est alors plus fortement sollicité. Par conséquent, des installations permettant d'éviter (de compenser) la puissance réactive sont souvent installées dans l'industrie.

La puissance réactive inductive est généralement compensée dans les entreprises par des bancs de condensateurs. Toutefois, il est également possible d'utiliser à cet égard des onduleurs photovoltaïques, qui transforment le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif pour l'injection dans le réseau. Dans le cadre d'un projet soutenu par l'Office fédéral de

l'énergie (OFEN), une telle compensation de puissance réactive a été testée à la chocolaterie de Camille Bloch à Courtelary (BE). Une installation photovoltaïque d'une puissance de 260 kW est installée sur le toit de la fabrication et couvre dix pour cent des besoins en électricité de l'entreprise. Dans le cadre de ce projet, les onduleurs ont été utilisés pour compenser la puissance réactive. Selon les besoins, ils ont compensé la puissance réactive jusqu'à 200 kvar (kilovoltampères réactifs). Le système de compensation de puissance réactive existant, composé de condensateurs, a une capacité de 720 kvar.



Les consommateurs industriels d'électricité tels que les moteurs électriques génèrent un déphasage entre le courant et la tension, ce qui sollicite le réseau électrique. Outre les condensateurs, les onduleurs photovoltaïques modernes peuvent être utilisés pour compenser cette puissance réactive. Dans le cadre d'un projet soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), cette possibilité a été démontrée avec succès à la chocolaterie de Camille Bloch.



(En haut) Installation photovoltaïque sur le toit de la chocolaterie de Camille Bloch à Courtelary. (En bas) Vue de la fabrication de chocolat. Les machines à entraînement électrique génèrent des courants réactifs qui sont habituellement compensés par des bancs de condensateurs (sources des photos: B. Vogel).

Les essais ont démontré que les onduleurs photovoltaïques sont aussi bien adaptés à la compensation de la puissance réactive que les bancs de condensateurs traditionnels. Les onduleurs photovoltaïques peuvent

également être activés en dehors des heures de fonctionnement de l'installation photovoltaïque, du fait qu'ils peuvent compenser la puissance réactive indépendamment de la génération d'électricité solaire.



Une électricité solaire fiable grâce à de bonnes prévisions de rayonnement

La quantité d'électricité générée par les installations photovoltaïques est soumise à des fluctuations. Outre l'heure de la journée, la météo est un facteur déterminant pour la production d'électricité. Aujourd'hui déjà, il est possible de prévoir le rendement sur plusieurs jours avec une bonne précision. Des prévisions de rendement précises deviennent de plus en plus importantes afin de pouvoir garantir un approvisionnement en électricité sûr au fil de l'expansion du photovoltaïque.

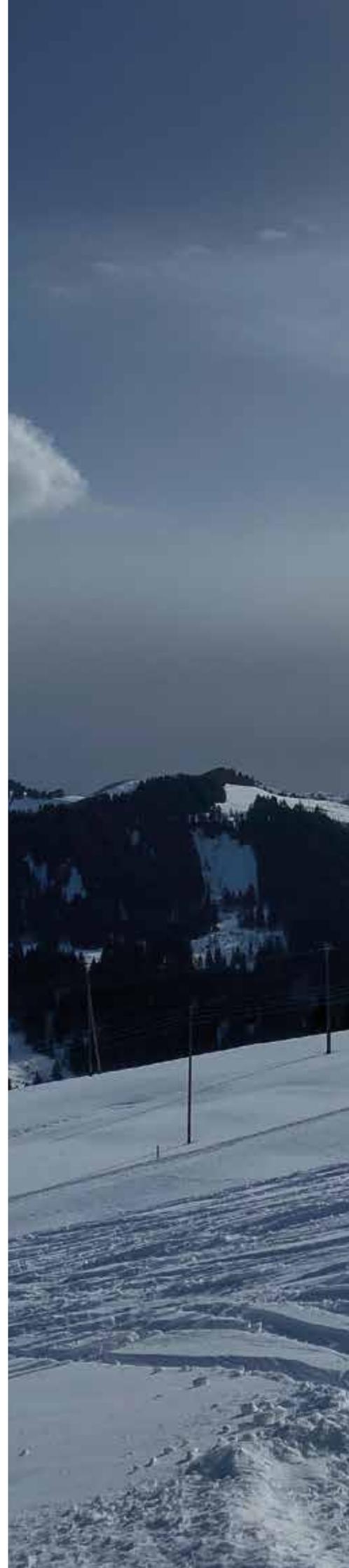
Le moment idéal pour générer de l'électricité solaire est une journée de printemps bien ensoleillée: le soleil est à son zénith, le ciel est dépourvu de nuages ou de brume et les rayons du soleil atteignent la terre sans entrave. Une légère brise refroidit les modules photovoltaïques et favorise ainsi leur efficacité lors de la conversion de l'énergie. Dans de telles conditions, le soleil du Plateau suisse fournit environ 1000 watts par mètre carré. Une installation solaire en transforme environ un cinquième en électricité.

Cependant, la météo n'est pas toujours aussi favorable à la génération d'électricité solaire. Un ciel légèrement nuageux fait chuter le rendement de moitié environ, et un jour de pluie en novembre le fait chuter à un dixième. Aussi capricieuse que la météo, la production d'électricité peut être étonnamment élevée pendant quelques brefs instants dans des conditions très particulières. Ainsi, des situations isolées peuvent se présenter où le rayonnement incident sur une installation photovoltaïque est plus important que le rayonnement à la périphérie supé-

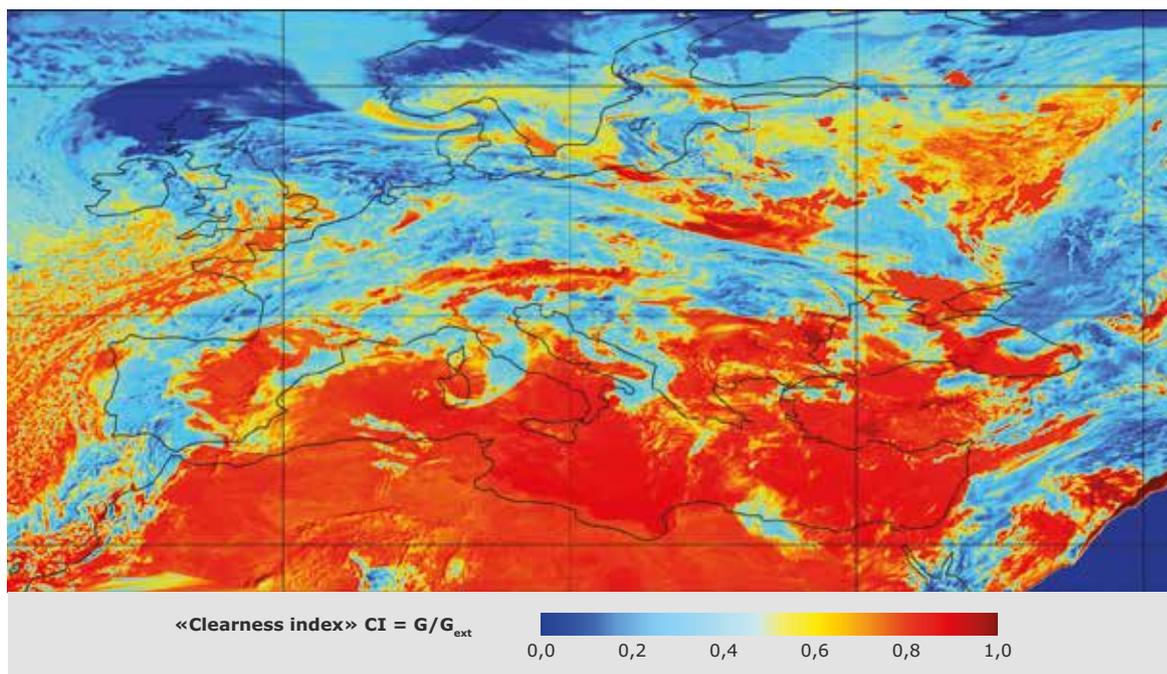
rieure de l'atmosphère terrestre, à savoir lorsque des réflexions – par exemple sur un nuage blanc d'orage – provoquent un rayonnement supplémentaire sur une installation photovoltaïque.

Tout producteur d'électricité solaire doit s'attendre à des rendements qui varient fortement dans le temps. La météorologie ne peut pas influencer ces variations, mais permet de prévoir comment la production peut évoluer dans les heures et les jours à venir. Les prévisions de rendement créent une prévisibilité pour l'exploitation des installations solaires et constituent en même temps la base d'un approvisionnement en électricité sûr. Si les gestionnaires de réseaux électriques connaissent la quantité d'électricité attendue grâce aux prévisions ou savent quelle quantité doit être acquise auprès d'autres sources, ils sont en position de prévenir les problèmes de réseau par des mesures proactives. Il s'agit notamment de l'utilisation de batteries de stockage et de la commande de pompes à chaleur et d'autres consommateurs électriques. La société nationale pour la gestion du réseau Swissgrid utilise

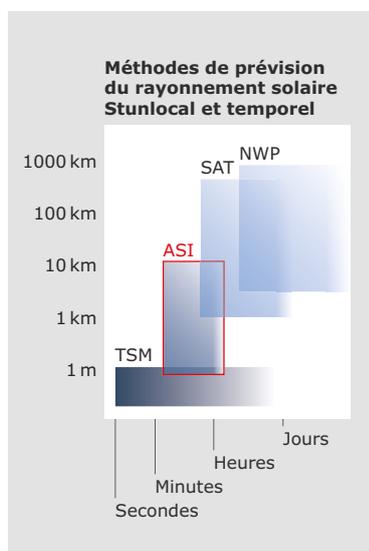
Plusieurs fois par an, des courants d'air à haute altitude peuvent transporter de la poussière du Sahara jusqu'en Suisse. Dans de telles conditions météorologiques, le rendement des installations photovoltaïques peut diminuer de près de 10 %. (Source: Jan Remund, Meteotest)







«Clearness Index» CI au-dessus de l'Europe: le «Clearness Index» est défini comme le ratio entre l'irradiation solaire globale G mesurée au sol et l'irradiation solaire G_{ext} estimée en haut de l'atmosphère. Celui-ci est utilisé pour la prévision du rayonnement solaire. L'illustration date du 5 février 2021, il s'agit d'une prévision à trois heures, et provient du système Cloudmove basé sur les satellites (source: Meteotest AG).



Différentes méthodes de prévision du rayonnement solaire, au niveau local et au niveau temporel, se basent sur des modèles statistiques avec différentes données d'entrée. ASI = All sky imagers: caméras pour la modélisation des mouvements des nuages. SAT: Images satellites pour la modélisation des mouvements des nuages. NWP = Numerical Weather Prediction: modélisation détaillée de l'évolution dans l'atmosphère sur la base de données au sol, aériennes et satellitaires. TSM = time-series models: la prévision se base uniquement sur des données de mesure locales (rayonnement ou puissance électrique) sans modèles physiques (source: d'après IEA PVPS Task 16, Solar Resources Handbook, 2021).

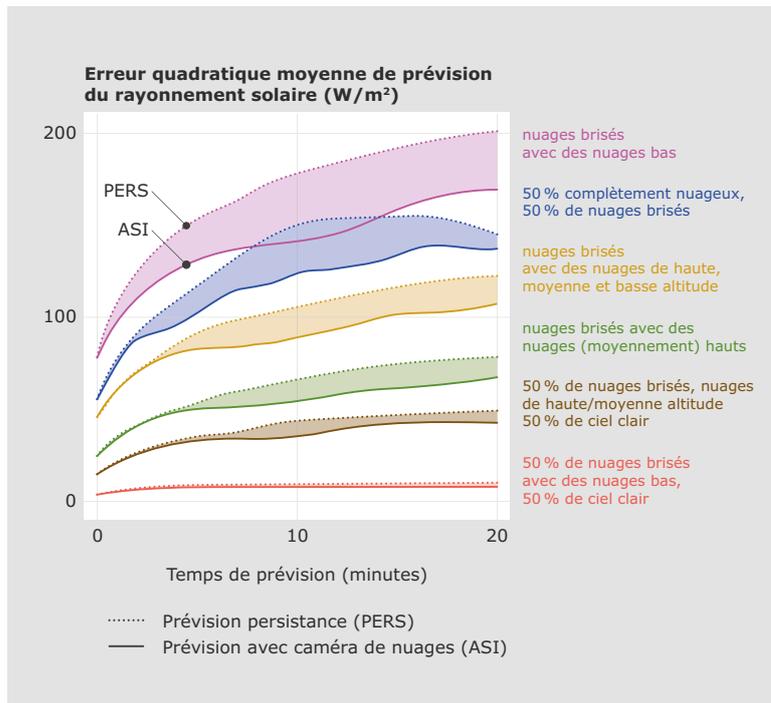
désormais des données de prévision, tout comme les grandes entreprises d'électricité suisses. Les prévisions de rendement sont également importantes dans le commerce de l'électricité, car elles permettent de mieux estimer l'évolution des prix sur les bourses de l'électricité.

La production d'électricité photovoltaïque est aujourd'hui déjà prévisible avec une grande fiabilité. Ainsi, il est possible de prévoir la totalité de l'électricité solaire produite en Allemagne pour le lendemain avec une précision d'environ 5% en moyenne horaire: par exemple, si une production solaire de 20 GWh est prévue à l'échelle nationale pour le lendemain entre 11 et 12 heures, la production réelle se situe entre 19 et 21 GWh. Une telle prévision se réfère à l'ensemble du pays; pour une installation solaire individuelle, la précision de la prévision est moins bonne. En Suisse, les erreurs de prévision ont tendance à être plus importantes que chez notre voisin du nord, en raison de la surface plus petite du pays et de la diversité de sa topographie.

En 2017, un groupe d'experts «Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications» s'est constitué sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Il réunit des spécialistes de 21 pays et a pour objectif d'améliorer la fiabilité des prévisions météorologiques pour les applications photovoltaïques et les centrales solaires à concentration. Un projet récemment achevé de ce groupe d'experts a examiné la qualité des prévisions de rayonnement basées sur des caméras de nuages («All Sky Imager» ASI) dans une comparaison transversale de différents systèmes. Cette méthode consiste à photographier le ciel à de brefs intervalles et à analyser les images des nuages à l'aide d'un logiciel pour en déduire un pronostic de rayonnement solaire à partir de l'évolutions des nuages. De telles prévisions à court terme peuvent par exemple servir à réguler automatiquement les générateurs diesel des installations hybrides photovoltaïques, lorsque l'on s'attend à une forte production d'énergie solaire dans un avenir proche.

La comparaison transversale de six systèmes ASI différents – tous des prototypes – sur un site d’essai à Almería, au sud de l’Espagne, a permis de démontrer qu’il est possible de prédire de manière précise le rayonnement solaire sur une période de quelques minutes. Pour tous les systèmes, l’erreur dans la prévision était toujours plus petite par rapport à la prévision de persistance («le rayonnement solaire reste le même»). Deux des systèmes impliqués dans ce test ont été développés en Suisse, l’un par le spécialiste en services météorologiques Meteotest en collaboration avec le Centre Suisse d’Electronique et de Microtechnique CSEM, l’autre par l’École polytechnique fédérale de Lausanne.

Le groupe d’experts de l’AIE étudie également les prévisions pour des périodes de plusieurs jours. Pour cela, des modèles plus détaillés de prévision numérique du temps (en anglais «Numerical Weather Prediction» NWP) sont employés. Ceux-ci modélisent les variations temporelles du rayonnement dans l’atmosphère terrestre sur la base des données mesurées par de nombreuses stations météorologiques au sol, par des ballons et par des satellites météorologiques. Récemment, différents modèles NWP ont été examinés pour estimer les rendements régionaux de l’électricité solaire, avec des cas concrets d’application sur une région en Italie et une autre aux Pays-Bas, chacune de la taille du canton de Zurich. Les modèles utilisant le machine learning ont été comparés aux prévisions dites analogiques, qui établissent des prévisions à partir d’une comparaison entre la situation météorologique actuelle et des situations similaires dans le passé. Les modèles basés sur le machine learning ont tendance à fournir des prévisions plus précises. Toutefois, les meilleures prévisions sont obtenues en combinant différents modèles.



(En haut) Installation SkyCam au CSEM Neuchâtel (source: CSEM). (En bas) Les modèles de prévision du rayonnement solaire basés sur les images des nuages (All Sky Imager ASI) fournissent des prévisions à court terme à haute résolution temporelle et spatiale pour les 15 à 20 minutes à venir. De telles prévisions sont utiles, par exemple pour identifier les rampes de puissance abruptes de la production photovoltaïque et la possibilité d’exploiter en douceur les systèmes de stockage par batterie, pour la régulation des réseaux électriques et pour la commande d’exploitation des centrales hybrides (photovoltaïque plus générateurs diesel, photovoltaïque plus stockage par pompage). Comme le montre la figure de droite, l’erreur quadratique moyenne de la prévision du rayonnement solaire est plus faible pour les modèles ASI par rapport à la prévision de persistance (PERS: «le rayonnement solaire reste le même») (source: d’après IEA PVPS Task 16, Solar Resources Handbook, 2021).





Dans le laboratoire de roches de Bedretto de l'EPF de Zurich, une foreuse enfonce un trou de plusieurs centaines de mètres de long et de 22 cm de diamètre dans le granit du massif du Gothard. De tels forages permettent de tester une nouvelle méthode de stimulation douce pour l'extraction de la géothermie profonde, qui minimise le risque de tremblements de terre involontaires lors des forages en profondeur. Le projet a également comporté des mesures acoustiques très sensibles, pour lesquelles l'ETH Zurich dispose d'une grande expérience. Les installations de mesure de l'EPF de Zurich peuvent enregistrer des secousses dix millions de fois plus petites qu'un séisme perceptible (source: Service sismologique suisse de l'ETH Zurich, 2019).

Chaleur issue de grandes profondeurs

Une réserve d'énergie presque inépuisable sommeille sous nos pieds: l'énergie géothermique est pratiquement omniprésente et disponible à tout moment. Aujourd'hui déjà, elle est exploitée de manière intensive avec des pompes à chaleur dans les couches proches de la surface de la terre. Des efforts de recherche sont nécessaires pour utiliser en toute sécurité l'énergie géothermique dans les zones profondes du sol. Le laboratoire des roches de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich), situé dans la vallée de Bedretto au Tessin, contribue à cette recherche.

À une profondeur de cinq kilomètres, la température de la roche du sol atteint jusqu'à 160 °C. En remontant à la surface, cette chaleur peut contribuer de manière significative à l'approvisionnement en énergie

renouvelable exempte des émissions de CO₂ –soit sous forme de chaleur soit sous forme d'électricité. En Suisse, la méthode la plus répandue est la géothermie dite pétrothermale. Elle consiste à injecter

de l'eau à haute pression dans la roche par le biais d'un forage. L'eau pénètre dans les fissures existantes de la roche et les élargit. Cette stimulation crée des cavités dans la roche, dans lesquelles l'eau en circula-

tion peut absorber la chaleur de la roche environnante. Cette chaleur géothermique remonte à la surface sous forme de vapeur chaude par un deuxième forage et peut être utilisée comme chaleur ou, le cas échéant, pour produire de l'électricité.

En 2005, plusieurs tremblements de terre perceptibles se sont produits lors d'un tel forage géothermique à Bâle et le projet a ensuite dû être abandonné. Afin d'éviter de telles secousses, un procédé de stimulation plus doux a été développé depuis et breveté pour la Suisse en 2012. Avec ce nouveau système, l'injection d'eau ne met plus toute la partie inférieure du forage sous pression, comme à l'époque à Bâle. Au contraire, le forage est divisé en plusieurs sections à l'aide de manchons en

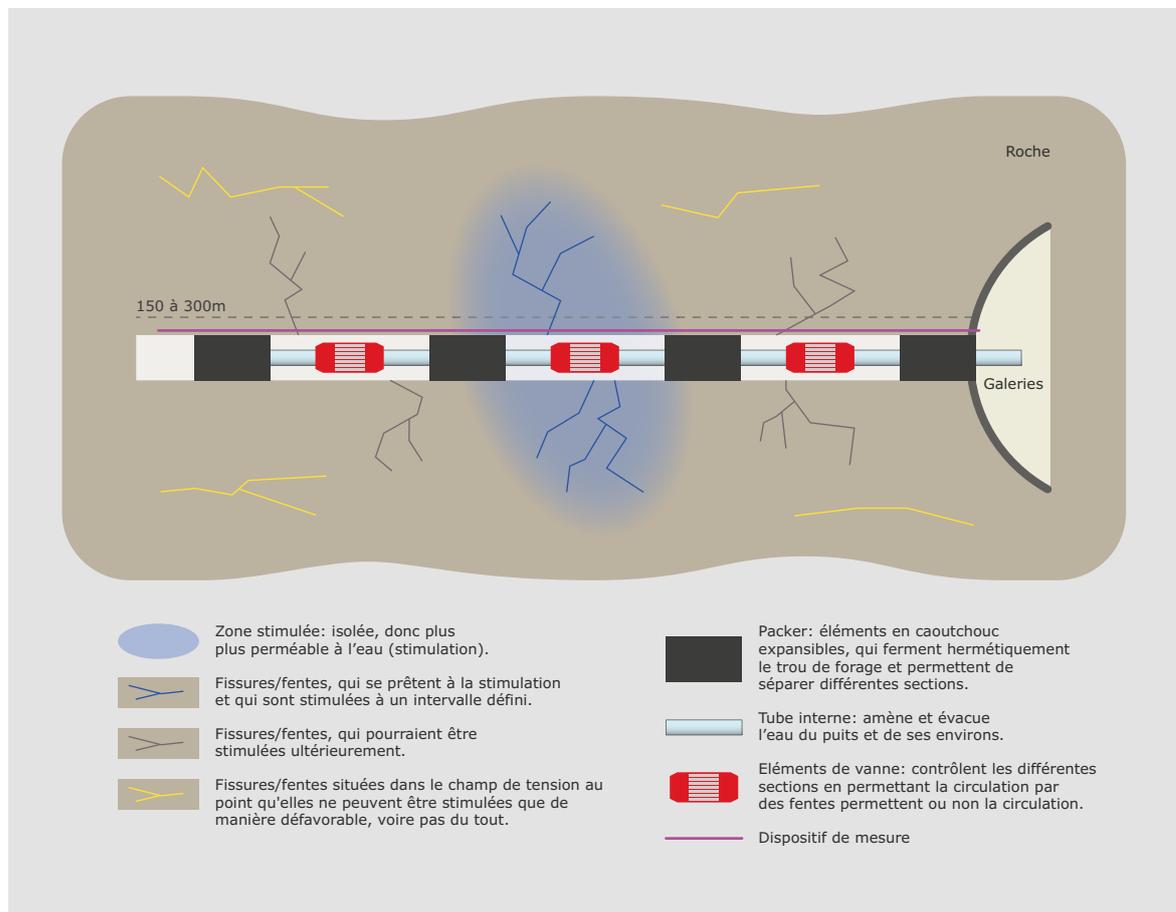
caoutchouc. L'eau peut ainsi être injectée de manière échelonnée dans l'espace et dans le temps. Cela permet d'éviter les tremblements de terre incontrôlés.

La démonstration a été faite dans le cadre d'un projet soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) dans le laboratoire souterrain de Bedretto de l'EPF de Zurich, avec de nombreux tests. Les résultats montrent que ce procédé permet d'augmenter la perméabilité à l'eau de la roche autant que nécessaire pour une utilisation rentable de la chaleur. Parallèlement, le risque de tremblement de terre lors de forages géothermiques profonds peut être réduit au minimum. Certes, les stimulations effectuées dans le laboratoire de Bedretto ont également entraîné des secousses

de la roche, mais celles-ci ont été environ cent mille fois plus faibles que lors du plus fort séisme enregistré dans le cadre du projet de géothermie de Bâle.

Les résultats de recherche du laboratoire souterrain de Bedretto constituent une base importante pour un projet pilote de géothermie prévu dans la Haute-Sorne jurassienne. Dans les années à venir, il est prévu d'y construire en plusieurs étapes une centrale qui puisera l'énergie géothermique jusqu'à une profondeur de 5000 mètres et l'utilisera directement ou tout au plus pour la production d'électricité. Si ce projet pilote est mené à bien, une technologie sera prête à être utilisée dans de nombreuses régions de Suisse pour promouvoir la géothermie profonde.

Système «Packer» dans le laboratoire de terrain Bedretto de l'EPF Zurich, avec lequel un nouveau procédé de stimulation douce est testé pour l'exploitation de la chaleur du sous-sol avec la géothermie profonde (graphique: OFEN, d'après Info EPF Zurich).





Installation pilote photovoltaïque sur le site de recherche Agroscope à Conthey (VS), où des modules à transparence modulable sont installés au-dessus d'une culture de framboises, afin que les plantes poussant en dessous soient plus ou moins ombragées. Les modules solaires ont été spécialement conçus pour de telles applications par l'entreprise suisse Insolight (source: Agroscope).

Double récolte avec le photovoltaïque dans l'agriculture

La Suisse poursuit des objectifs ambitieux pour le développement du photovoltaïque. Outre l'électricité photovoltaïque produite par des installations sur les toits et les façades des maisons, celle-ci pourrait également être récoltée à l'avenir sur des surfaces agricoles. Actuellement, le potentiel est évalué et les avantages et inconvénients sont étudiés. Ces bases servent également à des adaptations réglementaires afin que les surfaces agricoles puissent être utilisées pour la génération d'électricité solaire.

La Suisse prévoit de développer considérablement la production d'électricité solaire. En 2050, au moins 40 % des besoins du pays devraient être couverts par le photovoltaïque. Les surfaces pour les installations solaires ne manquent pas. Les toits et les façades des bâtiments offrent encore beaucoup de place, car seule une petite partie est occupée par des modules photovoltaïques aujourd'hui. En outre, les surfaces d'infrastructure telles que les parkings ou les stations d'épuration des eaux usées pourraient également être utilisées de manière accrue.

Lorsque des surfaces agricoles sont utilisées pour la production d'électricité solaire, le terme «agri-photovoltaïque» (agri-PV) est employé. Pendant que des baies, des légumes ou des fruits poussent sur le sol, des modules photovoltaïques installés au-dessus ou à côté génèrent de l'électricité. L'agri-PV existe sous différentes formes. Ainsi, les modules peuvent être installés à une distance suffisante au-dessus des surfaces agricoles ou être placés entre les surfaces agricoles. Les modules peuvent alors être posés à la verticale. Dans ce dernier cas, le

rayonnement solaire est utilisé des deux côtés dans des modules dits bifaciaux.

Au cours de la dernière décennie, la production d'électricité solaire à partir de surfaces agricoles s'est établie dans le monde entier. Selon des informations de l'institut Fraunhofer en Allemagne, des installations agri-PV d'une puissance totale de plus de 14 GW sont en service au niveau global, soit environ cinq fois la puissance photovoltaïque installée en Suisse. La plupart de ces installations se trouvent en Asie, dont une



installation agri-PV chinoise au-dessus d'une culture de baies en périphérie du désert de Gobi, d'une puissance totale de 700 MW.

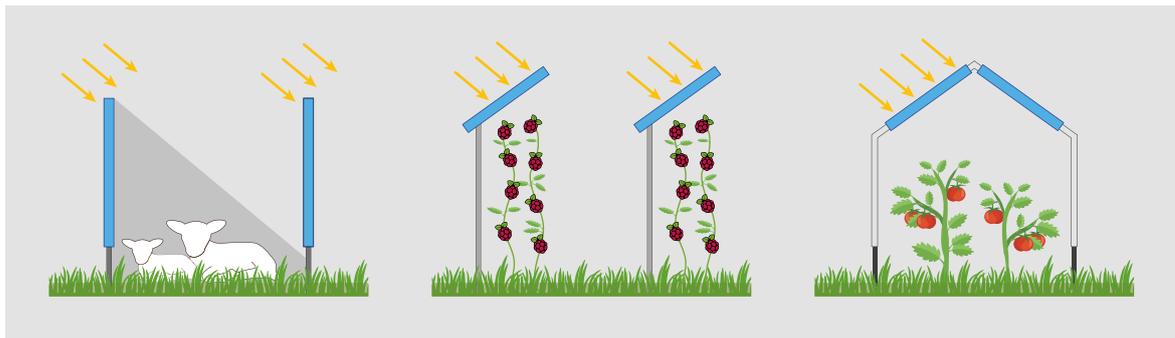
En Suisse aussi, un intérêt croissant se manifeste pour une agriculture qui récolte de l'électricité solaire en plus des fruits et légumes. Sur le site expérimental du centre suisse de compétences pour la recherche agricole Agroscope à Conthey (VS), une installation agri-PV de 165 mètres carrés a été réalisée et mise en service en tant que pilote par l'entreprise énergétique Romande Energie à la mi-2021. Des modules photovoltaïques de l'entreprise suisse Insolight ont été installés sur cette installation, qui est placée au-des-

sus d'une plantation de framboises. Les modules ont été spécialement développés pour une telle application et leur transparence peut être réglée entre 30 et 80 %. Cela permet d'ombrager plus ou moins les plantes qui poussent en dessous et d'utiliser la lumière du soleil soit davantage pour la croissance des plantes, soit davantage pour la production d'électricité. Cette installation agri-PV remplace les tunnels en plastique traditionnels utilisés pour protéger les cultures de baies.

Le sujet de l'agri-PV fait également l'objet d'un projet de la Haute école des sciences appliquées de Zurich. Les aspects agronomiques, d'aménagement du territoire, juri-

diques et technologiques y sont étudiés. Selon une estimation provisoire, il existe en Suisse un potentiel agri-PV de 10 à 18 GWh par an. Outre la production d'électricité, des raisons écologiques sont également invoquées en faveur de l'agri-PV. Plus les conséquences du changement climatique se font sentir sous forme de chaleur ou de fortes pluies, plus les installations agri-PV pourraient faire valoir leurs avantages, par exemple en réduisant les besoins en irrigation grâce à l'ombrage des modules solaires. L'agri-PV peut également améliorer la biodiversité et la protection des ressources dans l'agriculture en réduisant l'utilisation de produits agrochimiques et les pertes de nutriments dues au lessivage des nitrates.

Les installations photovoltaïques peuvent utiliser les surfaces agricoles pour générer de l'électricité sous différentes formes, (à gauche) en montage vertical avec des modules bifaciaux qui exploitent la lumière du soleil aussi bien par l'avant que par l'arrière, (centre) comme élément de protection pour des cultures vulnérables ou (à droite) intégrés dans des serres.





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), voir 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, 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 CO₂ (CCUS) et une fois dans le domaine du photovoltaïque.

Végétaliser les toits tout en les utilisant pour le photovoltaïque entraîne des conflits d'objectifs. Un projet pilote interdisciplinaire soutenu par l'Office fédéral de l'énergie se consacre à ce sujet à Winterthur, où la biodiversité et le potentiel de rétention d'eau sont étudiés en détail avec des modules photovoltaïques montés verticalement et des couches de substrat spéciales (source: ZHAW).



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/)

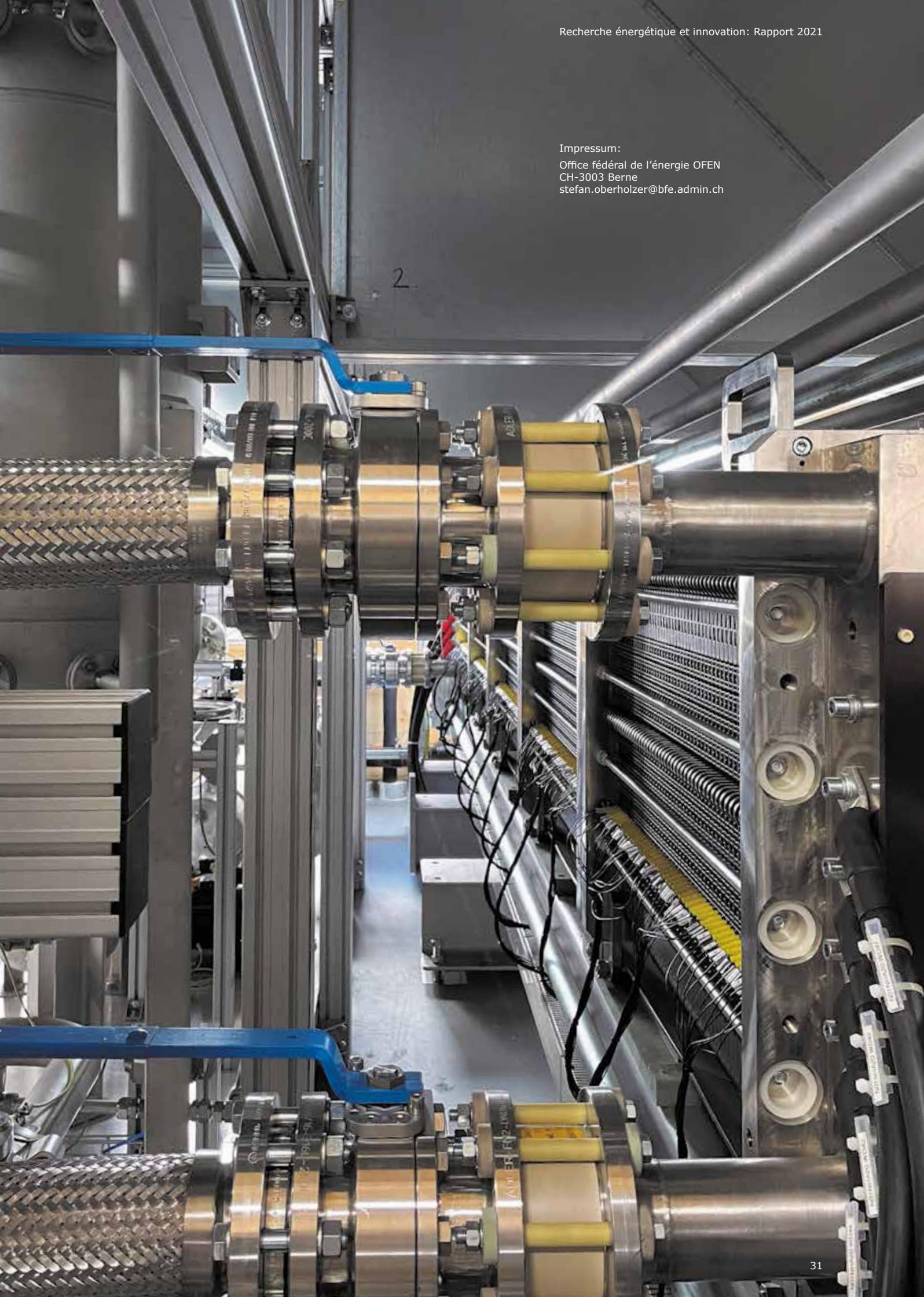
D'autres coopérations internationales

	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) L'entreprise Limeco, active dans le domaine de la gestion des déchets et de l'épuration des eaux usées, exploite sur son site de Dietikon une installation Power-to-Gas avec méthanisation en continu (powertogas.ch), unique à cette échelle en Suisse. L'installation a été co-initiée par Swisspower SA et bénéficie du soutien de plusieurs services municipaux suisses. L'électricité produite par l'usine de traitement des ordures permet de produire de l'hydrogène, qui est méthanisé dans un réacteur biologique avec du CO₂ provenant du gaz d'épuration émis par une station d'épuration des eaux usées, puis injecté dans le réseau de gaz naturel. La photo montre l'une des deux unités d'électrolyse, un électrolyseur à membrane d'échange de protons (PEM) de Siemens (SILYZER 200) d'une puissance nominale de 1,25 MW et d'une pression de sortie d'hydrogène de 35 bars (source de la photo: S. Oberholzer).



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