



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

Recherche énergétique et innovation

Rapport 2022





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) Le photovoltaïque sur les surfaces agricoles, appelé agri-photovoltaïque (agri-PV), peut apporter une contribution supplémentaire à l'approvisionnement en électricité du pays. Toutefois, selon la législation actuelle, de telles installations en Suisse doivent présenter un avantage pour la production agricole. Dans le cadre d'un projet pilote soutenu par l'OFEN, trois systèmes agri-PV différents sont testés et comparés dans la production de baies de l'entreprise Bioschmid GmbH, afin d'évaluer l'impact de la protection et de l'ombrage des trois systèmes différents sur le développement du rendement agronomique (source: Insolight SA).



(A gauche) Un projet de la Haute école spécialisée du Nord-Ouest de la Suisse, de Bioburn AG et de Kaskad-E a étudié quels types de biomasses, outre le bois, pouvaient être utilisés à des fins énergétiques. La pyrolyse (carbonisation) permet de produire de l'énergie thermique et du charbon végétal à partir de la biomasse. Trente-deux types de biomasses ont été étudiés, et trois des substrats se sont révélés particulièrement prometteurs: L'écorce de bois de forêt, le son de blé et les déchets de torréfaction du café. Ils ont ensuite été soumis à des mesures supplémentaires dans deux installations de pyrolyse commerciales à Bâle et à Stettlen (BE). L'écorce de bois de forêt a été jugée appropriée pour la production d'énergie et de charbon (photo en haut à gauche, source: Léonard Marchand/FHNW). Elle présente le plus grand potentiel énergétique supplémentaire utilisable parmi les substrats étudiés. En bas à gauche, on peut voir l'installation de pyrolyse du fournisseur d'énergie IWB, qui est en service depuis 2021 (source: IWB). La valorisation des matériaux d'entretien du paysage permet de produire du chauffage à distance pour 170 ménages ainsi que 550 tonnes de charbon végétal.



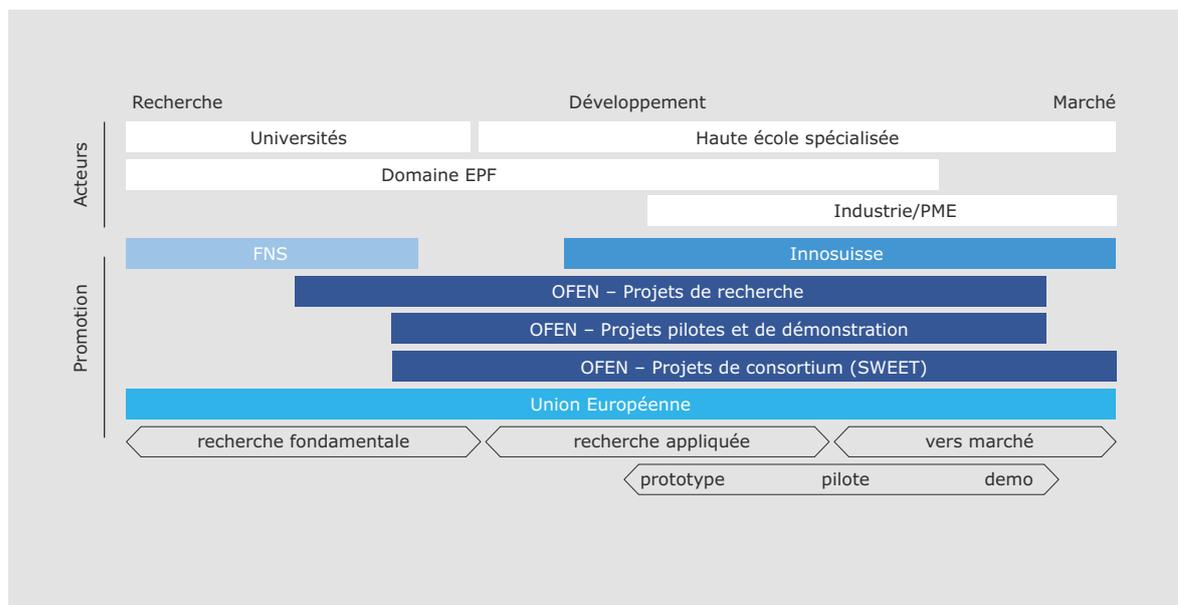
Sommaire

Editorial	3
Sommaire	4
Vue d'ensemble	
Promotion de la technologie et de l'innovation	5
Programmes de recherche énergétique thématiques	6
Encouragement de recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire avec SWEET	6
Statistiques de la recherche énergétique en Suisse	8
Highlights	
Rendre l'énergie hydraulique encore plus précieuse	12
Des solutions innovantes et efficaces pour le captage du CO ₂	14
Comment un «moteur magnétique» produit de l'électricité	18
Le système de chauffage au cœur de glace	20
Plus d'énergie éolienne grâce à des modèles optimisés	24
Comment les tarifs flexibles stabilisent le système électrique	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

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).

Programmes de recherche énergétique thématiques



Avec ses programmes de recherche thématiques, l'Office fédéral de l'énergie (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.

Encouragement de recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire avec SWEET

En septembre 2020, le Parlement fédéral a approuvé le programme d'encouragement SWEET – «SWiss Energy research for the Energy Transition», qui s'inscrit dans la continuité des précédents SCCER «Swiss Competence Centers in Energy Research». SWEET dispose d'un financement de 136,4 millions de francs jusqu'en 2032. Contrairement au SCCER, SWEET est un programme compétitif, c'est-à-dire que des appels d'offres sont publiés en continu auxquels des consortiums peuvent soumettre leur proposition. SWEET encourage, par le biais d'appels d'offres, des consortiums inter- et transdisciplinaires composés de différentes hautes écoles, universités et partenaires du secteur privé et public.

Les quatre consortiums DeCarbCH, EDGE, PATHFNDR et SURE du premier appel d'offres sur le thème «Intégration des énergies renouvelables dans un système énergétique suisse durable et résilient» ont commencé leurs

travaux de recherche en 2021. Les consortiums se penchent sur des thèmes tels que la décarbonisation du chauffage et du refroidissement, la décentralisation du système énergétique grâce aux énergies renouvelables, le couplage des secteurs et le développement durable et la résilience du système énergétique.

Outre les consortiums SWEET, l'instrument SOUR («SWEET Outside-the-box Rethinking») soutient des projets délibérément non conventionnels, mis en œuvre par des chercheurs individuels ou de petites équipes. Quatre projets ont été retenus dans le cadre du premier appel d'offres SOUR, qui portait sur le même thème que le premier appel d'offres SWEET.

Les consortiums LANTERN et SWICE, issus de l'appel d'offres «Living & Working», ont commencé leurs travaux en 2022. Les deux consortiums étudient des questions

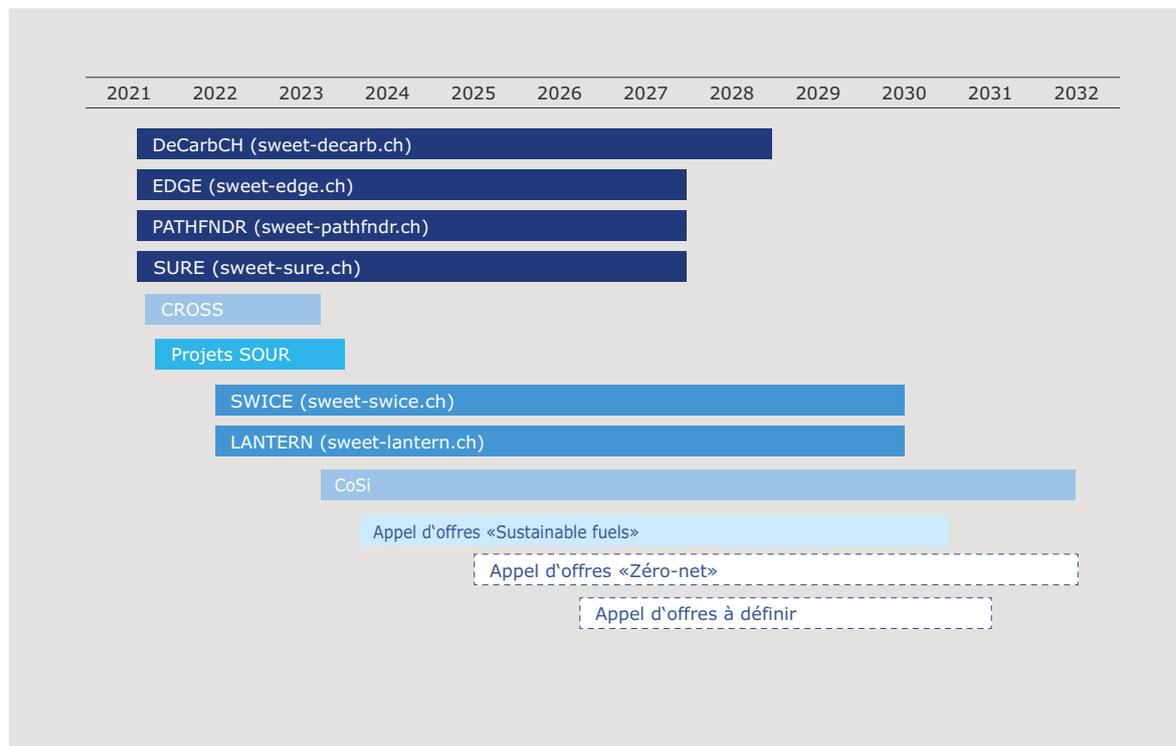


dans le cadre de ce que l'on appelle des «Living Labs». LANTERN les utilise pour développer, tester, valider et mettre à l'échelle des mesures pour une Suisse décarbonisée et efficace dans l'utilisation des ressources. SWICE vise à identifier et à quantifier le potentiel d'économie d'énergie et les possibilités d'amélioration de la qualité de vie qui pourraient résulter de nouveaux modes de vie, de travail et de mobilité.

Le consortium CoSi a remporté l'appel d'offres «Co-évolution du système énergétique et de la société suisse et sa représentation dans des simulations coordonnées». Il mettra en place une plateforme d'échange entre les sciences naturelles et l'ingénierie, d'une part, et les sciences sociales et humaines, d'autre part, afin de développer des scénarios et des modèles permettant de mieux représenter les interactions entre le système énergétique et la société. Afin de permettre une mise en place durable, le consortium CoSi sera exceptionnellement soutenu pendant 10 ans. CoSi poursuivra l'activité CROSS des quatre premiers consortiums.

Les chercheurs doivent se pencher sur la question de savoir comment la Suisse peut couvrir ses besoins futurs en carburants et combustibles durables ainsi qu'en produits chimiques de plateforme dans le cadre de l'appel d'offres «Sustainable Fuels and Platform Chemicals». Celui-ci a été lancé à l'automne 2022 en collaboration avec l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) et arma-suisse. Il s'agit ainsi de développer les technologies de production, de transport, de distribution, de stockage et d'utilisation. Il s'agit en outre de montrer comment le potentiel supplémentaire des engrais de ferme suisses peut être utilisé de manière rentable pour la production de carburants et de combustibles ainsi que de produits chimiques de plateforme.

Un appel d'offres en collaboration avec l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sur le thème du «Zéro net» est prévu pour 2024.



Aperçu des consortiums des appels d'offres terminés, en cours et prévus du programme d'encouragement SWEET.

DeCarbCH



EDGE



PATHFNR



SURE



SWICE



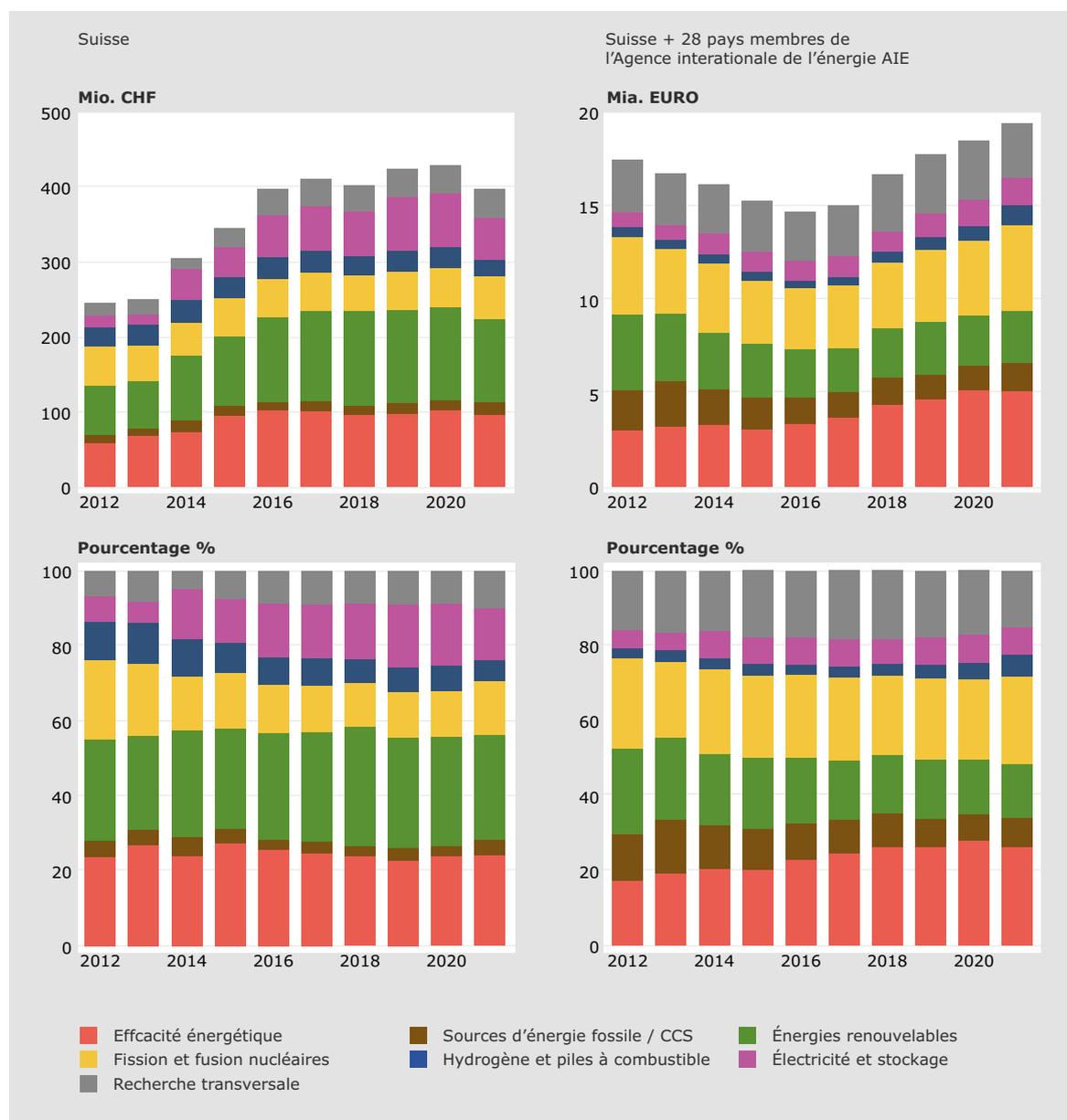
LANTERN



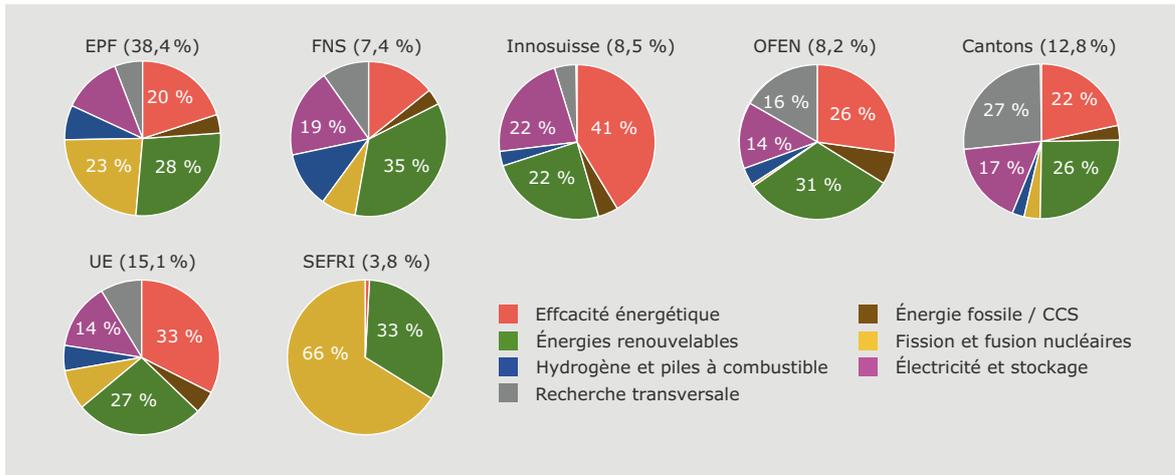
Statistiques de la recherche énergétique en Suisse

Depuis 1977, l'Office fédéral de l'énergie (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), du FNS (data.snf.ch)

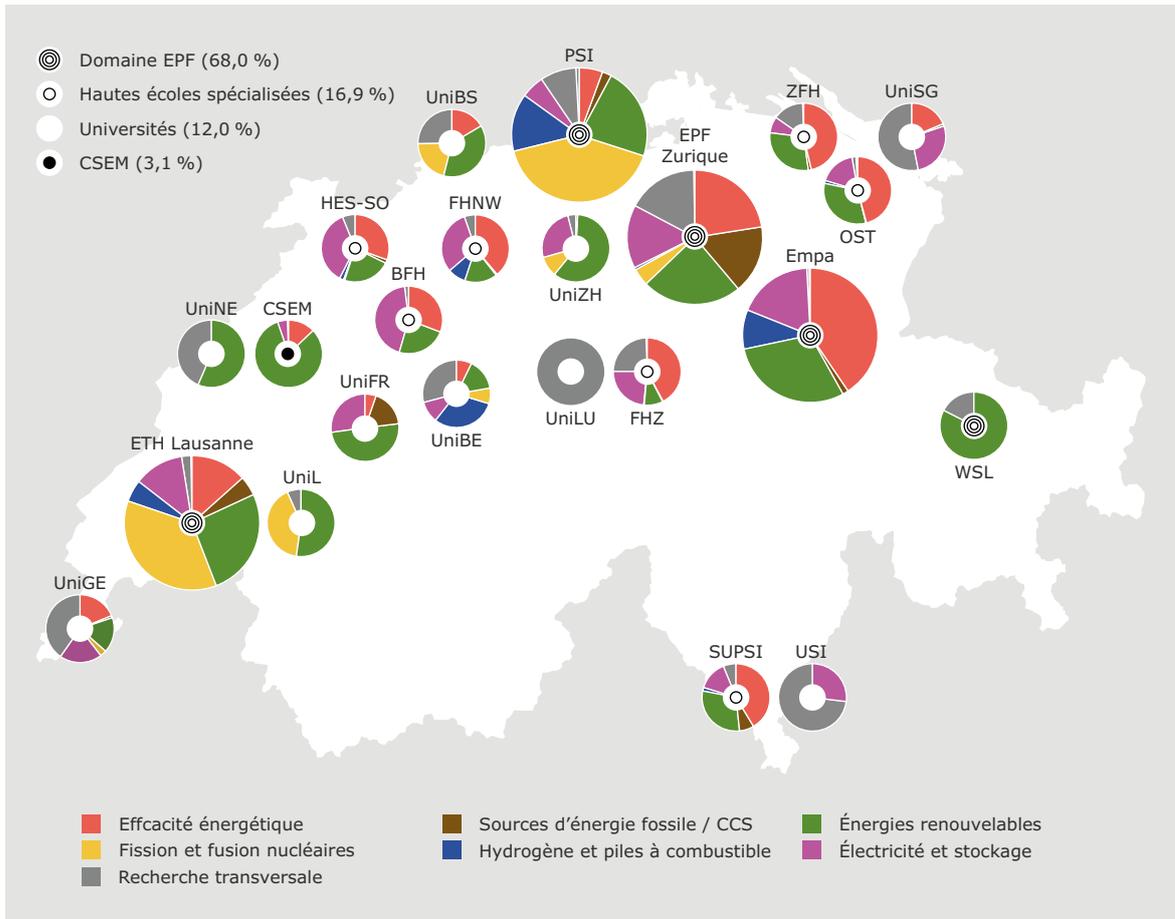
et de l'UE (cordis.europa.eu), ainsi que sur le site Internet des institutions concernées. En 2021, les dépenses publiques pour la recherche énergétique en Suisse se sont élevées à 400 millions de francs, soit 170 % des dépenses de 2011. A titre de comparaison, les dépenses de 29 pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (y compris la Suisse) s'élèvent ensemble à environ 19 milliards d'euros et sont restées à peu près constantes au cours des dix dernières années.



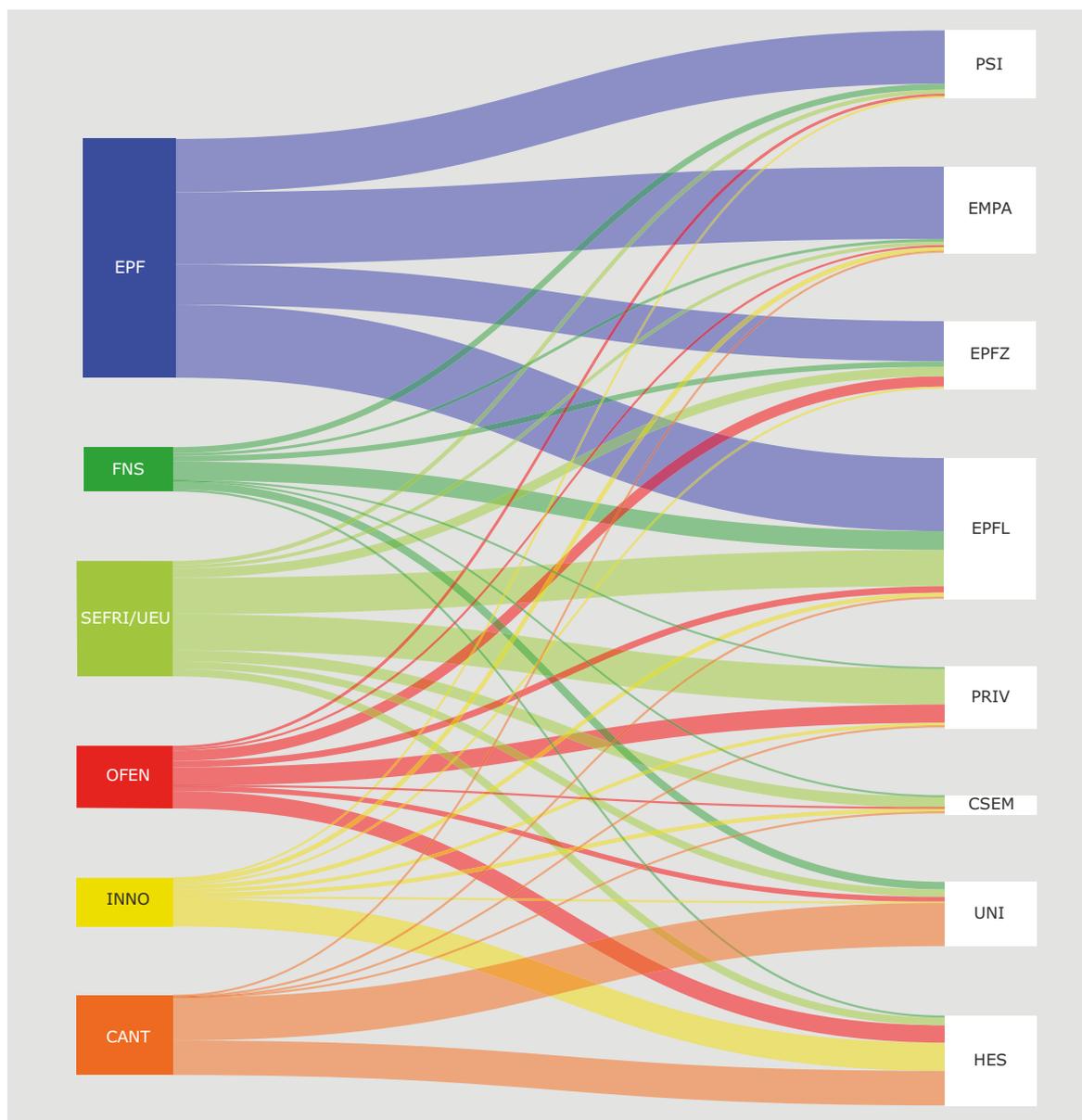
Fonds publics consacrés à la recherche énergétique en Suisse (à gauche) et dans 29 pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (à droite). Pour la Suisse, ces dépenses se situent dans une fourchette de 0,3 à 0,65 pour mille du produit intérieur brut. Les fonds sont répartis selon la classification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



Financement public de la recherche sur l'énergie (données 2021) par agence de financement et par domaine thématique. Environ 38 % du financement de la recherche énergétique en Suisse provient directement du domaine des EPF, et environ 13 % 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 2021). 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), OFEN: Office fédéral de l'énergie, INNO: Innosuisse, CANT: cantons.

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

(A droite) Grâce à une batterie lithium-ion couplée à la centrale, la centrale hydroélectrique au fil de l'eau à haute pression d'Ernen dans le Haut-Valais peut également compenser les fluctuations à court terme du réseau électrique sans devoir adapter la puissance des turbines. Cela augmente la durée de vie des composants mécaniques (source: FMV).



Rendre l'énergie hydraulique encore plus précieuse

Massivement plus de puissance, plus de flexibilité pour la stabilisation du réseau et moins d'impact sur l'environnement: telles sont les exigences posées à l'énergie hydraulique dans les années à venir. Le projet «HydroLEAP» étudie comment les exploitants de centrales électriques peuvent répondre au mieux à toutes ces exigences.

L'énergie hydraulique est le pilier central de l'approvisionnement en électricité de la Suisse : elle contribue de manière décisive à la sécurité de l'approvisionnement et à la stabilité du réseau. Son importance croît avec l'utilisation croissante de l'électricité irrégulière produite par les nouvelles énergies renouvelables. Pour atteindre les objectifs de la Stratégie énergétique 2050, l'énergie hydraulique doit être développée de manière significative sans trop nuire à l'environnement. Parallèlement, de nombreuses centrales doivent faire l'objet de travaux de rénovation et de modernisation à court ou moyen terme dans le cadre du renouvellement de leur concession.

Dans le cadre du projet «HydroLEAP» des chercheurs de l'EPFL, de l'ETHZ et de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) étudient, en collaboration avec des exploitants de centrales, comment réussir les transformations et les extensions nécessaires. Ils cherchent des mesures permettant d'augmenter la puissance du parc hydroélectrique tout en minimisant les coûts d'exploitation et l'impact sur l'environnement. Pour ce faire, ils examinent différentes questions de manière pratique sur une sélection représentative de trois centrales.

Les centrales de pompage-turbinage sont indispensables à la stabilité du réseau électrique, car elles

permettent de stocker les excédents de production et de compenser les goulets d'étranglement dans la production. Cette flexibilité sera de plus en plus importante à l'avenir. Dans les centrales de pompage-turbinage de Veytaux I et II, sur les bords du lac Léman, les chercheurs testent désormais de nouveaux modes d'exploitation afin d'augmenter la flexibilité. Un autre objectif est de développer une méthode de maintenance prédictive des centrales. Pour ce faire, des algorithmes analysent en temps réel les données d'exploitation pertinentes de la centrale et déterminent quand certains composants doivent être remplacés ou entretenus. Cela permet d'éviter des arrêts coûteux de la centrale et des trajets à vide



La centrale au fil de l'eau de Massongex-Bex-Rhône devrait être mise en service en 2028 et produire environ 80 GWh d'électricité par an. Afin de réduire au maximum l'impact du barrage sur le lit du Rhône, différentes mesures compensatoires sont prévues. Pour la protection des poissons, les chercheurs de l'ETH Zurich développent un nouveau type de guide à poisson amenant ceux qui migrent vers l'aval dans la passe à poisson prévue leur permettant de contourner la centrale (source: MBR SA).



Les centrales de pompage-turbinage peuvent compenser les fluctuations du réseau électrique. Pour ce faire, elles utilisent l'électricité excédentaire pour pomper de l'eau dans le lac de retenue ou combler les goulets d'étranglement en turbinant l'eau stockée. La centrale de Veytaux étudie actuellement comment optimiser cette compensation. (Source : Forces Motrices Hongrin-Léman SA (FMHL)/ David Picard AG)

coûteux pour le personnel de service. Les travaux de maintenance sont également plus faciles à planifier et les coûts d'exploitation diminuent.

Sur le deuxième site pilote, la centrale au fil de l'eau à haute pression d'Ernen, la flexibilité de l'exploitation de l'énergie hydraulique est également au centre des préoccupations. En cas d'exploitation flexible, la centrale doit adapter sa puissance rapidement, souvent en quelques secondes. Cela accélère l'usure des turbines et raccourcit leur durée de vie. Les batteries peuvent atténuer cet effet en compensant les fluctuations à court terme du réseau. Les premiers essais sont en cours dans le monde entier. La batterie installée dans le Haut-Valais doit permettre d'acquérir

des expériences approfondies en Suisse également.

Un deuxième projet partiel à Ernen cherche la meilleure variante pour la rénovation prochaine de la centrale. Le remplacement d'une turbine Francis par une turbine Pelton, plus chère mais plus flexible, est à l'étude. Cela doit permettre de tirer des enseignements pour des mesures de rééquipement appropriées dans d'autres centrales hydroélectriques suisses.

La troisième installation étudiée est la nouvelle construction prévue de la centrale au fil de l'eau sur le Rhône entre Massongex VS et Bex VD. Ici, l'objectif est de réduire au maximum l'impact environnemental. Pour ce faire, les chercheurs recherchent, à

l'aide de simulations en laboratoire, les solutions les plus efficaces pour la migration des poissons dans les deux sens et ils déterminent la conception des turbines et la stratégie d'exploitation les plus appropriées en ce qui concerne les sédiments fins. De fortes concentrations de ces particules dans l'eau peuvent endommager les turbines.

Les méthodes développées dans le cadre de ce projet seront vérifiées par des tests pratiques, de sorte qu'elles pourront être appliquées à une grande partie du parc de centrales suisses. L'énergie hydraulique pourra ainsi apporter une contribution encore plus durable à la transition énergétique.





L'industrie du ciment est le deuxième plus grand émetteur de CO₂ au monde, après l'industrie de l'acier. La combustion des combustibles en particulier, mais aussi la décomposition du calcaire, génèrent chaque année environ 2,2 gigatonnes de CO₂. Le procédé Oxyfuel, qui consiste à introduire de l'oxygène pur dans le processus de combustion au lieu de l'air ambiant, devrait permettre à l'avenir de rejeter moins de CO₂ dans l'atmosphère. Le projet «Accelerating Carbon Capture using Oxyfuel technology in Cement production» (AC2OCem) étudie son effet dans les cimenteries nouvelles et existantes dans le but de décarboniser l'industrie du ciment le plus rapidement possible (source: Holcim).

Des solutions innovantes et efficaces pour le captage du CO₂

Le captage, l'utilisation et le stockage du CO₂ jouent un rôle crucial dans la décarbonisation de l'approvisionnement énergétique et de l'industrie. Pour atteindre les objectifs globaux de réduction des émissions, des solutions innovantes sont nécessaires. L'Office fédéral de l'énergie soutient deux projets pilotes qui font avancer le développement de telles solutions.

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre est l'un des plus grands défis mondiaux. Pour minimiser les émissions de CO₂ provenant de différentes sources, il est

possible soit de capter le CO₂ et de l'utiliser comme ressource pour les carburants ou l'industrie chimique, soit de le stocker durablement. C'est à cette tâche que se consacre

le projet pilote international PRISMa («Process-Informed design of tailor-made Sorbent Materials for energy-efficient carbon capture»). Les États-Unis, la Norvège, la Suisse et

le Royaume-Uni y participent. Il vise à accélérer la transition des secteurs de l'énergie et de l'industrie vers une économie neutre en carbone en accélérant la mise sur le marché de technologies de séparation compétitives et respectueuses de l'environnement pour le captage, l'utilisation et le stockage du carbone (Carbon Capture, Utilization and Storage CCUS).

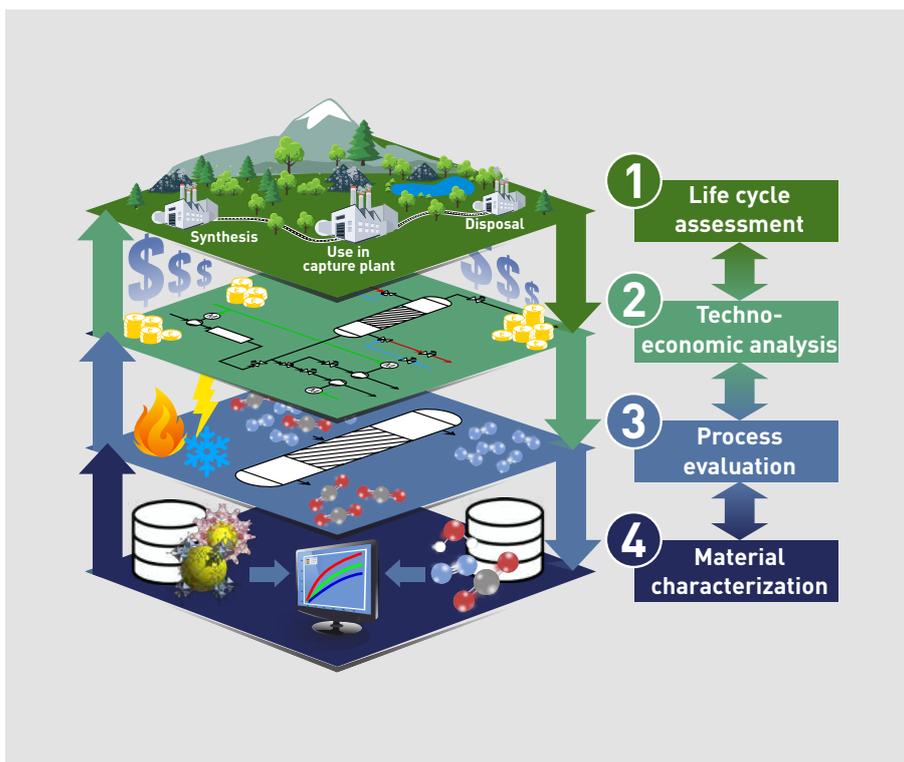
Pour décarboniser les différents secteurs industriels, il existe un besoin important de technologies de captage spécifiquement adaptées à la source de CO₂ concernée. De même, le CO₂ capté devra à l'avenir être utilisé dans différentes applications. Dans ce contexte, des équipes de recherche de premier plan à l'échelle mondiale développent, en étroite collaboration avec des partenaires du secteur privé et des organisations non gouvernementales, une plateforme technologique qui réunit des

solutions pour le captage du CO₂ provenant de différentes sources ainsi que pour son utilisation et son stockage.

Alors que les méthodes actuelles de capture du CO₂ doivent être développées spécifiquement pour chaque combinaison de source et de puits de CO₂, PrISMa vise à développer des solutions sur mesure et économiquement viables dans un cadre efficace. Il s'agit notamment d'exploiter systématiquement la diversité pratiquement illimitée des matériaux chimiques. L'adaptation des technologies de captage à une combinaison spécifique d'une source de CO₂ (par exemple l'incinération des déchets, la combustion du charbon ou la production de ciment) et d'un puits (par exemple le stockage géologique) permet d'augmenter l'efficacité et la rentabilité. Dans ce contexte, le projet PrISMa développe pour la première fois des méthodes

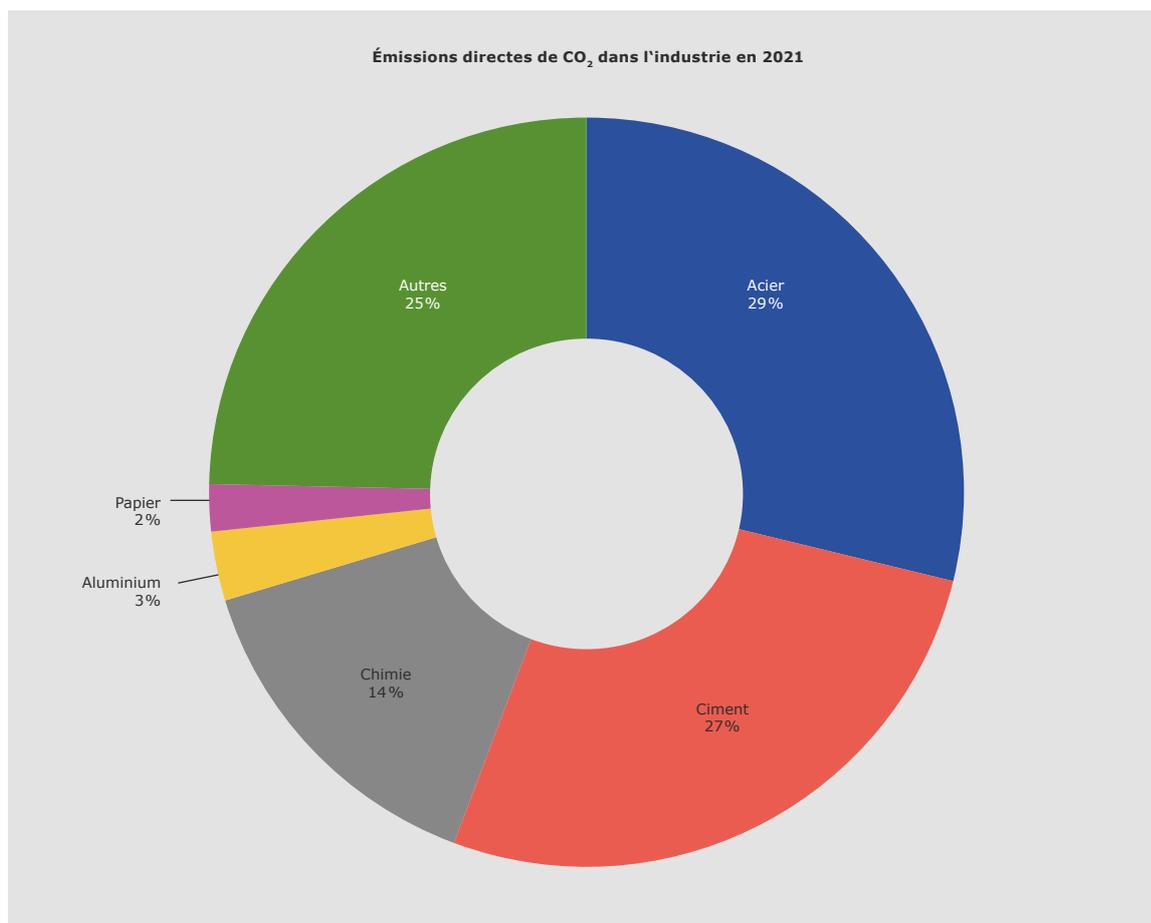
de capture du CO₂ de manière systématique en tant que maillon clé de la chaîne globale, de la formation du CO₂ à son utilisation en tant que matière première, respectivement au stockage final, afin de mieux exploiter à l'avenir le potentiel de réduction du CO₂.

Les chercheurs ont élaboré plus de 50 études de cas en Grande-Bretagne, aux États-Unis, en Chine et en Suisse, les sources de CO₂ couvrant un large spectre - du gaz naturel et du charbon au ciment et à l'air. Ils ont notamment étudié le potentiel de nouveaux matériaux de sorption qui conviennent parfaitement à un processus de capture donné et qui contribuent au maximum à la réduction du CO₂. Même pour les nouveaux matériaux qui n'existent pour l'instant que sur ordinateur, la plateforme permet d'évaluer à la fois leurs coûts futurs et leur impact sur l'environnement grâce à des modè-



La figure de gauche représente schématiquement la plateforme PrISMa pour le développement de technologies de capture du CO₂. Celle-ci combine de nouveaux matériaux innovants avec le développement de processus et les évalue sur la base de critères technico-économiques et écologiques (graphique: ETHZ).





En 2021, l'industrie était directement responsable de l'émission de 9,4 gigatonnes de CO₂. Cela correspond à un quart des émissions mondiales (sans compter les émissions indirectes dues à l'électricité utilisée dans les processus industriels). La production de ciment est responsable de 27 % de ces émissions. Le scénario «zéro émission nette d'ici 2050» prévoit de réduire les émissions industrielles à environ 7 gigatonnes de CO₂ d'ici 2030, malgré la croissance attendue de la production industrielle. Des améliorations ont déjà été réalisées en matière d'efficacité énergétique et d'utilisation des énergies renouvelables. Les conditions importantes pour atteindre les objectifs sont une meilleure efficacité des matériaux et de l'énergie, une diffusion plus rapide des combustibles renouvelables et une accélération du développement et de l'introduction de procédés de production à faible émission de carbone ainsi que du captage et du stockage du CO₂ (source: AIE).

les prédictifs et des écobilans. Cela permet d'identifier les matériaux les plus prometteurs pour la fabrication et d'évaluer les performances des matériaux existants.

La plateforme technologique créée au cours des trois années de recherche est désormais opérationnelle. Elle sera étendue à l'avenir afin de permettre aux chercheurs de mieux prédire l'effet de réduction du CO₂ des matériaux. Parallèlement, l'accent sera mis sur la synthèse de certains des matériaux les plus performants. Le projet PrISMa est une étape importante dans le dévelop-

pement de technologies avancées de capture du CO₂ et dans la création des conditions nécessaires à une économie respectueuse du climat.

Un autre projet du domaine CCUS est AC2OCem («Accelerating Carbon Capture using Oxyfuel technology in Cement production»). Il a pour objectif de décarboniser l'industrie du ciment le plus rapidement possible. L'industrie du ciment est la deuxième source industrielle d'émissions de CO₂ et libère 2,2 gigatonnes de CO₂ par an. Cela correspond à 27 % des émissions totales de CO₂ du secteur industriel. La production de

ciment libère une grande quantité de CO₂, d'une part par la combustion de combustibles dans la chambre de combustion, d'autre part par la décomposition du calcaire. Le projet pilote européen étudie l'utilisation du procédé Oxyfuel aussi bien dans les cimenteries existantes que dans les nouvelles. Celui-ci est considéré comme l'une des solutions les plus rentables pour la capture du carbone dans le processus de fabrication du ciment. Le procédé Oxyfuel consiste à injecter de l'oxygène pur dans le processus de combustion au lieu de l'air ambiant. Il en résulte un flux de gaz d'échappement de CO₂. Le CO₂

est séparé et par exemple transformé par synthèse en méthanol ou mis à la disposition d'autres industries comme matière première pour une utilisation ultérieure.

Dans le cadre du projet AC2OCem, la technologie Oxyfuel de première génération, déjà avancée et destinée à être utilisée dans les cimenteries existantes, a été perfectionnée. En outre, la technologie Oxyfuel de deuxième génération sans recyclage des gaz d'échappement, qui doit notamment être utilisée dans les nouveaux fours, a fait l'objet d'études analytiques et expérimentales. Une série de tests a été réalisée avec le prototype d'un nouveau brûleur de four, en ajoutant

jusqu'à 100 % d'oxygène et en utilisant jusqu'à 100 % de combustibles alternatifs avec une forte proportion de biomasse (par exemple, des boues d'épuration). Ces tests permettent notamment de savoir comment concevoir de manière optimale les cimenteries mises à niveau et les nouvelles cimenteries.

Les simulations contribuent à améliorer encore l'efficacité du concept Oxyfuel en termes de consommation d'énergie. Des données ont également été collectées afin d'établir un bilan écologique sur l'ensemble du cycle de vie des cimenteries neuves et modernisées et d'évaluer le potentiel de cette nouvelle solution tech-

nique de capture et de stockage du carbone.

Les essais pilotes réalisés avec succès rapprochent la technologie Oxyfuel d'une application à grande échelle dans l'industrie du ciment et contribuent largement à la maturité commerciale de la première génération de la technologie Oxyfuel. Le projet vise notamment à sensibiliser le public et à faire accepter l'utilisation du CCUS dans les industries à forte consommation d'énergie et à rendre les connaissances acquises accessibles à d'autres.



L'une des approches pour réduire les émissions de CO₂ dans la production de ciment est l'utilisation de combustibles alternatifs, dont la biomasse. Celle-ci joue un rôle clé dans la décarbonisation de la production de ciment. Selon Cemsuisse, l'utilisation de combustibles biogènes permet d'ores et déjà d'économiser 400 000 tonnes de CO₂ par an. En 2020, la part des combustibles alternatifs en Suisse était de 69,1 %, dont 43,3 % pour la biomasse. Selon la feuille de route de Cemsuisse, l'objectif est d'augmenter la part des combustibles alternatifs à 100 % d'ici 2050, celle de la biomasse à 60 % (source: Université de Stuttgart).





Swiss Blue Energy étudie depuis 2012 le développement d'un moteur thermomagnétique. L'entreprise de Bad Zurzach (AG) se concentre sur le développement de méthodes de production d'électricité sans émissions qui utilisent la chaleur résiduelle à une température comprise entre 20 et 80 °C (source: Swiss Blue Energy).

Comment un «moteur magnétique» produit de l'électricité

Une entreprise suisse a mis au point un moteur thermo-magnétique capable de produire de l'électricité directement à partir de la chaleur résiduelle à un faible niveau de température. L'idée n'est pas encore commercialisable, mais il a récemment été possible de prouver que le concept fonctionne.

Que faire de la chaleur résiduelle qui s'accumule dans les installations industrielles ou les centrales électriques? Dans la plage de température inférieure à 100 °C, elle est aujourd'hui principalement utilisée - si tant est qu'elle le soit - pour le chauffage et l'eau chaude. L'entreprise argovienne «Swiss Blue Energy» est toutefois convaincue qu'elle peut faire un meilleur usage de cette chaleur résiduelle à basse température: elle veut produire de l'électricité à partir de celle-ci. Les turbines à vapeur, qui sont généralement utilisées pour produire de l'électricité à partir de la chaleur perdue, sont

hors de question pour des températures de chaleur perdue inférieures à 100 °C. Swiss Blue Energy mise donc sur une technologie innovante. Swiss Blue Energy mise donc sur un développement interne innovant: le moteur thermo-magnétique (TMM).

Le concept du TMM repose sur le fait que certains matériaux ne sont magnétiques que dans une certaine plage de température. L'un de ces matériaux est le gadolinium (voir l'image à droite). Il est magnétique tant qu'il fait moins de 19,3 °C. S'il est chauffé, il perd son pouvoir magnétique. S'il est chauffé, il perd son

magnétisme. S'il est chauffé, il perd ses propriétés magnétiques. Le TMM utilise ce phénomène en refroidissant alternativement le gadolinium avec de l'eau froide et en le chauffant avec de l'eau chaude. L'eau chaude nécessaire, d'une température d'environ 60 °C, peut être fournie par de la chaleur résiduelle à basse température provenant de l'industrie ou de centrales électriques, car cette chaleur résiduelle de faible qualité reste généralement inutilisée. La disponibilité de l'eau froide peut être assurée en choisissant un emplacement près d'une rivière ou d'un lac. Le TMM n'a besoin d'éner-

gie supplémentaire que pour faire fonctionner les pompes qui transportent l'eau froide ou chaude dans le système.

Pour produire de l'électricité à partir des propriétés magnétiques du gadolinium, Swiss Blue Energy l'a monté sur un rotor horizontal entouré d'un boîtier contenant des aimants permanents. Lorsque le gadolinium est alternativement refroidi et réchauffé, il se crée un flux magnétique qui est converti en un mouvement circulaire par les aimants permanents (voir graphique ci-dessous). L'énergie mécanique issue du mouvement de rotation du rotor est ensuite convertie en électricité via un générateur classique. De cette manière, une électricité précieuse est générée à partir de chaleur résiduelle à basse température, souvent inutilisée jusqu'à présent.

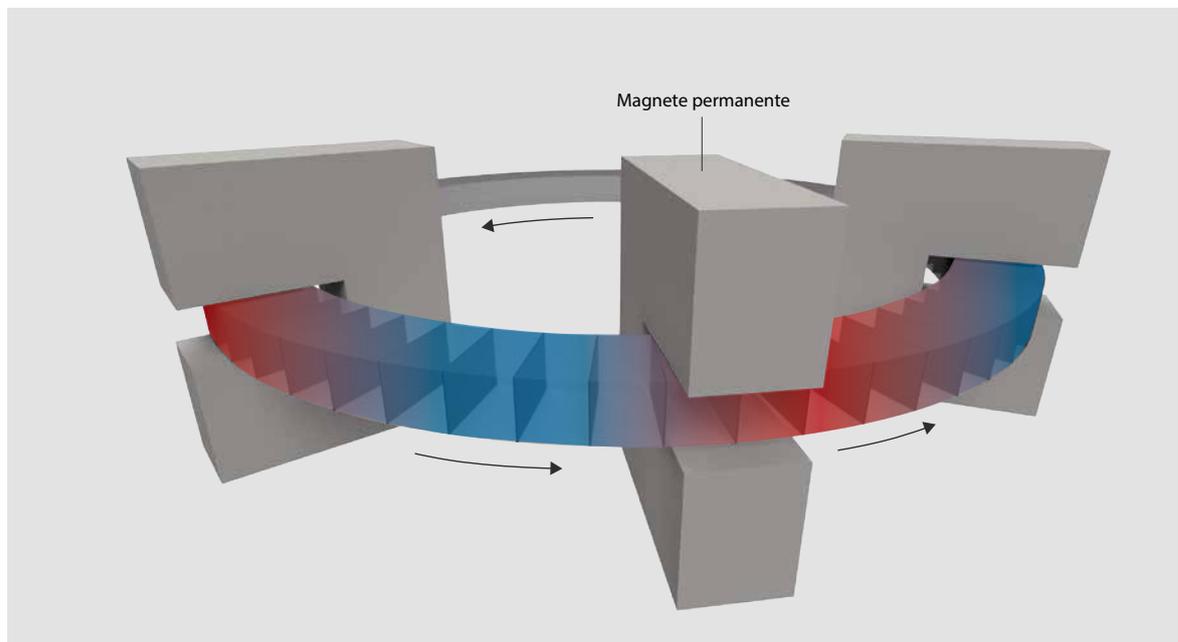
Cependant, le TMM est encore loin d'être prêt pour le marché. Dans le cadre d'un projet de deux ans, Swiss Blue Energy a réussi à produire plus

Le gadolinium (Gd) fait partie des métaux de la famille des terres rares. Il est magnétique dans la mesure où sa température est inférieure à 19,3 °C. Ce seuil est appelé température de Curie. Le gadolinium n'est pas un matériau optimal pour le moteur thermo-magnétique, notamment en raison de sa toxicité, et des recherches sont donc menées activement pour trouver des alternatives appropriées (source: Wikimedia Commons).



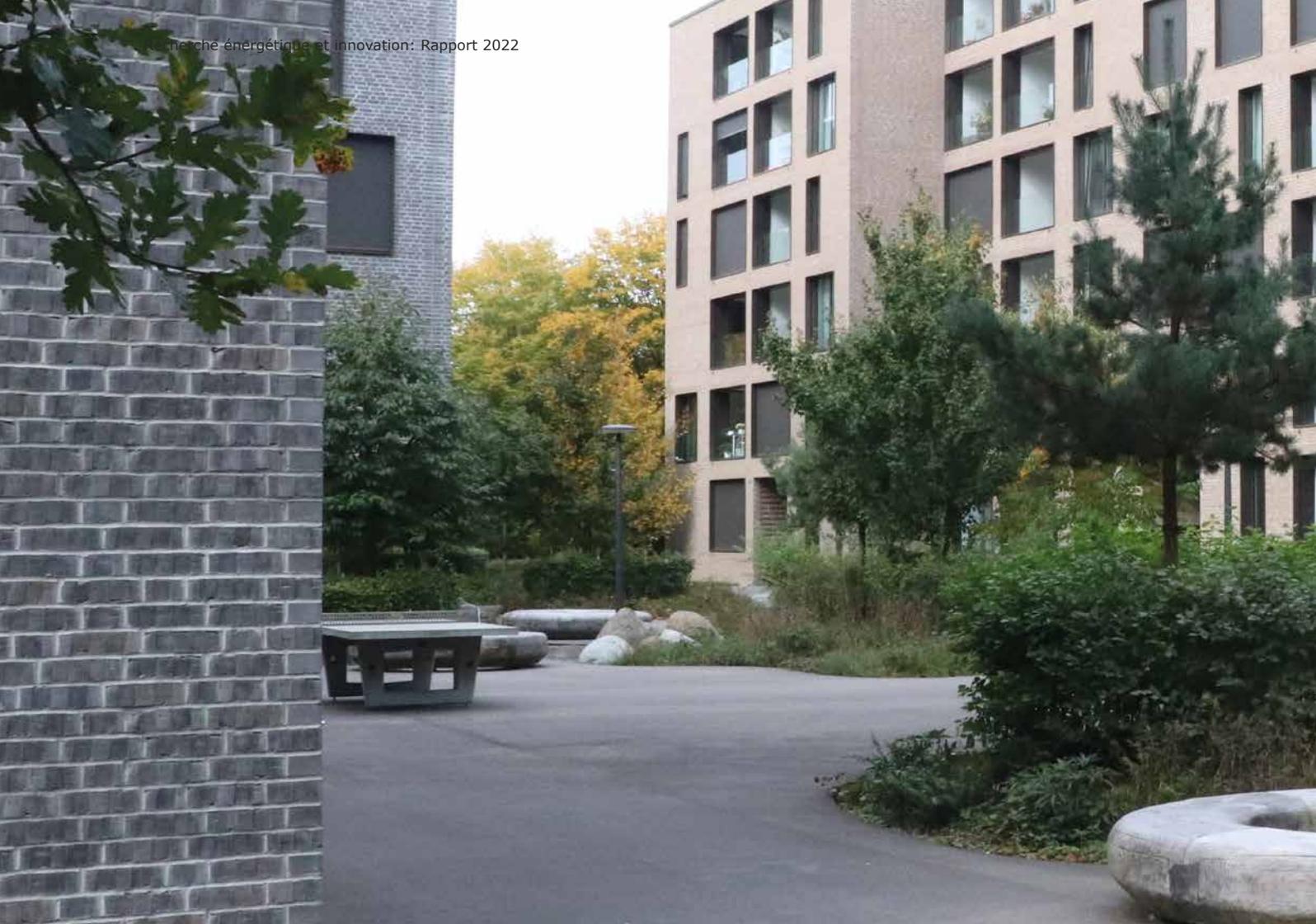
d'électricité que les pompes et les systèmes auxiliaires n'en consomment eux-mêmes. Les 531 watts d'énergie électrique générés par le générateur pourraient par exemple alimenter un e-scooter. Le concept doit encore être largement optimisé pour être commercialisé. Il faut pour cela trouver une alternative au gadolinium, qui n'est pas assez efficace, trop cher et pas assez respectueux de l'environnement. De telles alternatives font l'objet de recherches

au niveau international; Swiss Blue Energy travaille en collaboration avec l'Université technologique de Delft (Pays-Bas). Ils tentent de développer un alliage plus efficace, plus respectueux de l'environnement et moins cher que le gadolinium. Dès que ces travaux auront abouti, Swiss Blue Energy souhaite commencer à optimiser le TMM et à développer une version prête à être commercialisée.



Fonctionnement d'un moteur thermo-magnétique: Dans le boîtier horizontal circulaire se trouve un rotor sur lequel est monté du gadolinium. Des aimants permanents sont placés à intervalles réguliers sur le carter - reconnaissables aux blocs gris verticaux sur le schéma. Entre chacun de ces aimants, le gadolinium du rotor est refroidi par un courant d'eau froide (bleu). Cela le rend magnétique et l'attire vers l'aimant permanent suivant, ce qui le fait tourner vers la droite. Lorsque le gadolinium atteint l'aimant permanent, il est réchauffé par de l'eau chaude (rouge). À partir de 19,3 °C, il perd sa propriété magnétique et peut traverser l'aimant permanent sans encombre. Il est alors à nouveau refroidi (bleu), attiré par l'aimant permanent suivant et déplacé plus loin vers la droite (graphique: Swiss Blue Energy).





Le système de chauffage au cœur de glace

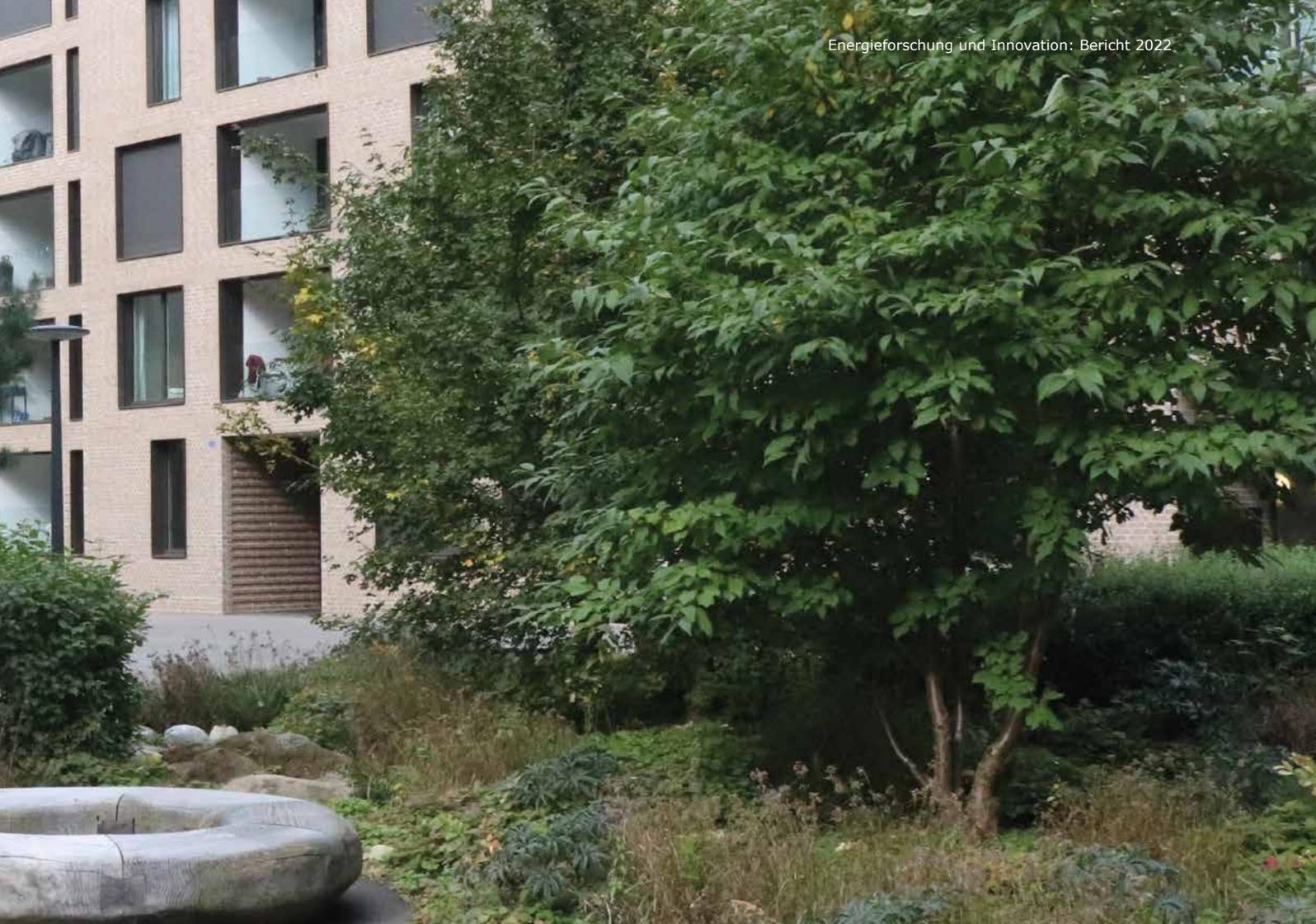
Faute d'alternatives, un lotissement de Berne est chauffé par une combinaison de pompe à chaleur et d'accumulateur de glace. Le concept, à première vue étonnant, fonctionne et atteint une grande efficacité, comme le prouve un suivi sur deux ans.

Dans ce lotissement de trois bâtiments, le maître d'ouvrage a exigé que les 170 appartements atteignent les exigences de Minergie-Eco et que l'ensemble du lotissement atteigne celles du label «Site 2000 watts». Il fallait donc un approvisionnement en chaleur basé sur des sources renouvelables. Les clarifications des planificateurs énergétiques ont montré qu'une pompe à chaleur avec une sonde géothermique ou d'eau souterraine n'était pas possible pour des raisons géologiques. On a renoncé à une pompe à chaleur air-eau en raison des besoins élevés en électricité et des oppositions possibles en raison des émissions sonores. De plus, il n'existait pas

de réseau de chaleur dans le quartier et rien n'était prévu pour en réaliser un dans un avenir proche. Enfin, un chauffage au bois n'entrait pas en ligne de compte, car il aurait pollué l'air plus que ne le permettait le plan directeur de l'énergie. En bref, aucun des systèmes de chauffage renouvelables courants n'était réalisable sur ce site.

Afin de répondre aux exigences du maître d'ouvrage en matière de durabilité, les planificateurs énergétiques ont cherché des alternatives. Après avoir évalué différentes options, ils ont finalement trouvé une solution adaptée: la combinaison d'une pompe à chaleur et d'un

accumulateur de glace. Des capteurs solaires et un système de récupération de la chaleur des eaux usées devaient servir de source de chaleur. Mais comment l'accumulateur de glace et l'approvisionnement en chaleur s'accordent-ils ? Le concept de l'accumulateur de glace repose sur une propriété particulière de l'eau: lorsqu'elle est refroidie à 0 °C, elle commence à geler. Ce processus, appelé cristallisation, libère de l'énergie - et beaucoup d'énergie. Prenons un exemple: Lorsqu'un litre d'eau gèle, la même quantité d'énergie que celle nécessaire pour chauffer la même quantité d'eau de 0 à 80 °C est produite.



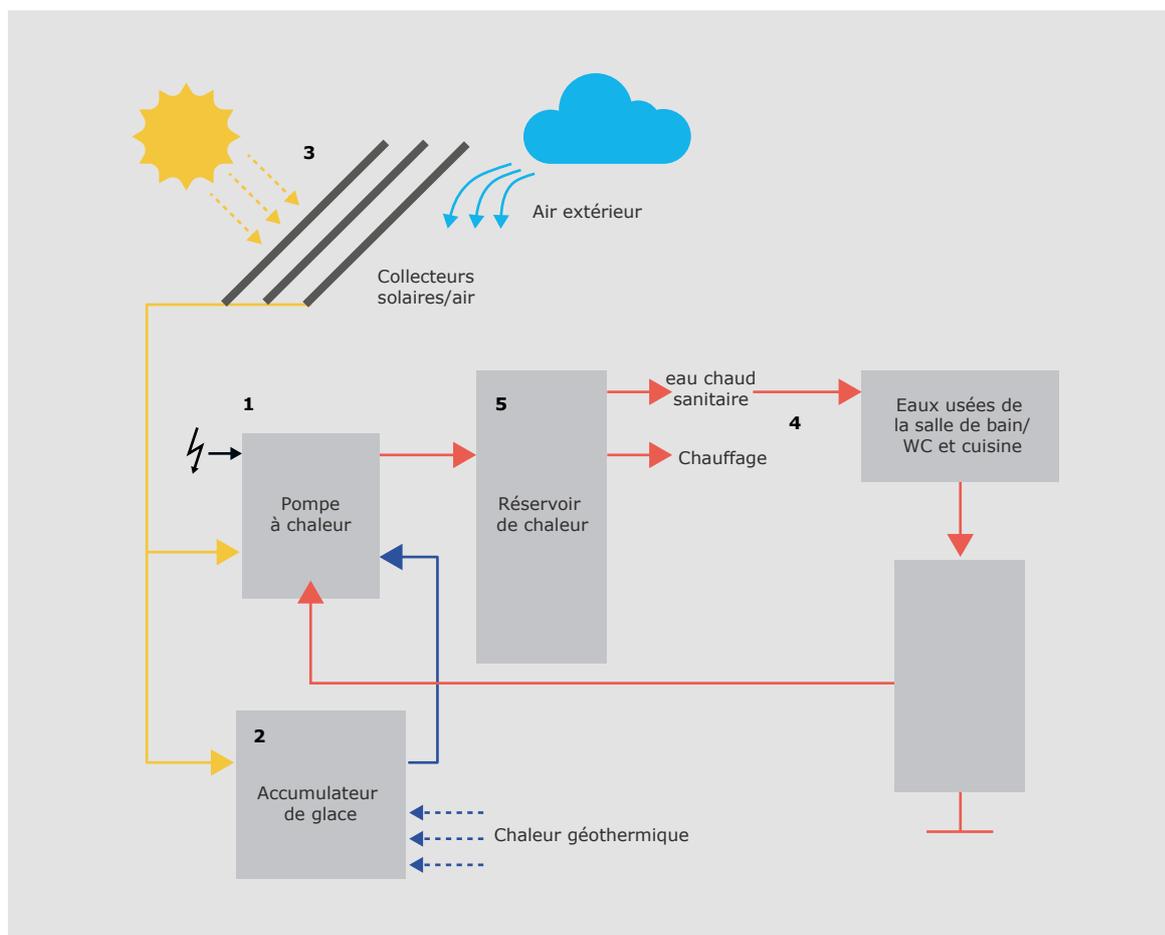
Le Weltpostpark, situé à l'est de la ville de Berne, comprend trois bâtiments construits selon les normes Minergie-Eco. Le lotissement dans son ensemble remplit en outre les critères du label «Site 2000 watts» (source: B. Vogel).

Dans un accumulateur de glace, une pompe à chaleur extrait l'énergie thermique de l'eau et assure ainsi la cristallisation. Lorsque le réservoir atteint un certain degré de givrage, la glace est dégelée par l'apport de chaleur issue de l'énergie solaire, ce que l'on appelle la régénération. Le processus de congélation et de décongélation peut être répété à volonté et ne nécessite pratiquement aucun entretien.

Un accumulateur de glace peut être utilisé non seulement pour le chauffage en hiver, mais aussi pour le refroidissement en été. Pour cela, on laisse volontairement se former une grande quantité de glace dans le réservoir vers la fin de la période de chauffage. Lors des chaudes journées d'été, le froid accumulé est utilisé en refroidissant l'eau du circuit de chauffage dans l'accumulateur de glace. Lorsque l'eau



Vue de l'intérieur d'un accumulateur de glace avant qu'il ne soit rempli d'eau. Les tuyaux disposés en anneau extraient la chaleur de l'eau en fonctionnement, ce qui fait qu'elle commence finalement à geler de bas en haut. Tout à l'extérieur, un espace a été volontairement laissé libre afin d'éviter la formation de glace qui pourrait endommager le mur. L'accumulateur de glace est dégivré par un deuxième système de tuyaux qui a été installé sur les murs. L'accumulateur de glace dégèle donc de l'extérieur vers l'intérieur (source: Viessmann Suisse SA).



Voici comment fonctionne l'approvisionnement en chaleur du Weltpostpark: la pompe à chaleur (1) alimente les appartements en eau chaude sanitaire (ECS) et en énergie de chauffage via un accumulateur de chaleur (5). Les sources d'énergie sont des capteurs solaires (3), l'accumulateur de glace (2) ainsi que la récupération de chaleur des eaux usées (4) (graphique: Weisskopf und Partner et FEKA AG).

circule à nouveau dans les conduites des appartements, elle y absorbe de la chaleur et refroidit ainsi la pièce. Inversement, l'accumulateur de glace est réchauffé et la glace dégèle peu à peu. Au début de la période de chauffage, l'accumulateur est à nouveau constitué d'eau liquide - le cycle peut recommencer.

Dans le cadre du projet Weltpostpark, chacun des trois bâtiments a reçu un approvisionnement énergétique autonome: des panneaux solaires sur le toit, une pompe à chaleur et un accumulateur de glace. Un système de récupération de la chaleur des eaux usées a également été mis en place. Les accumulateurs ont été construits à l'extérieur des bâti-

ments, dans le sol - ce ne sont en fait rien d'autre que des citernes souterraines en béton. Deux bâtiments disposent d'un réservoir de glace rond d'un diamètre d'environ 11 m, le troisième est alimenté par deux réservoirs rectangulaires plus petits pour des raisons de place. L'intérieur des accumulateurs de glace contient deux conduites séparées, disposées en spirale, qui servent d'échangeurs de chaleur. L'une des conduites extrait la chaleur de l'accumulateur et assure ainsi la cristallisation, l'autre régénère l'accumulateur de glace en y apportant de la chaleur.

Au départ, il était prévu d'utiliser uniquement des capteurs solaires pour régénérer l'accumulateur

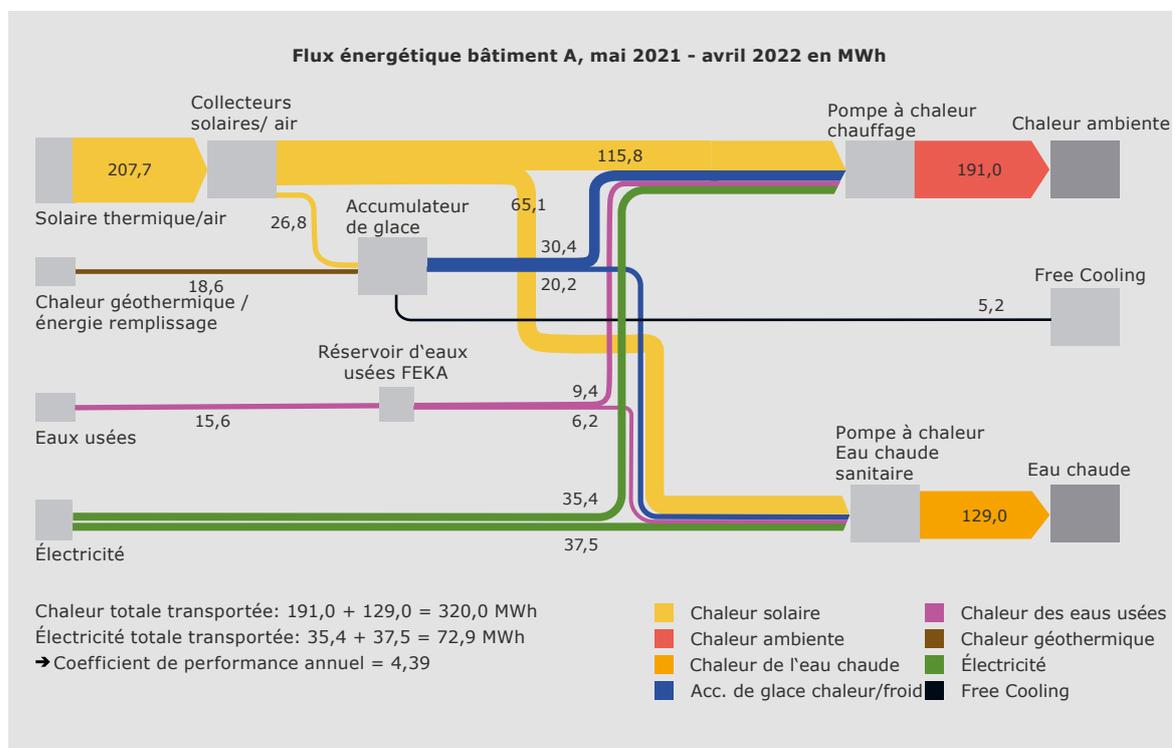
de glace. Une simulation a toutefois révélé que l'approvisionnement n'était pas garanti, car le rayonnement solaire est souvent insuffisant en hiver. Il fallait donc une autre source de chaleur. Il n'était pas question de couvrir les pics de consommation par une chaudière à gaz ou à mazout. Le choix s'est donc finalement porté sur la récupération de la chaleur des eaux usées. Ce concept est assez nouveau, mais il devrait être utilisé plus souvent à l'avenir. Cela s'explique par le fait que dans les bâtiments de haute qualité énergétique (par exemple les constructions Minergie), la production d'eau chaude représente une part importante des besoins énergétiques totaux. Pour éviter que l'éner-

gie thermique contenue dans les eaux usées de l'évier, des toilettes, du lavabo et de la douche ne s'évapore inutilement dans les égouts, il est possible de la prélever à l'aide d'un échangeur de chaleur. Une pompe à chaleur utilise la chaleur récupérée pour chauffer le bâtiment - ou, dans le cas du parc postal mondial, pour régénérer l'accumulateur de glace. Pour que la récupération de chaleur soit rentable, il faut toutefois un volume d'eaux usées suffisamment important. Ce système n'est donc pas adapté aux maisons individuelles ou aux immeubles, mais il convient parfaitement aux grands ensembles résidentiels comme le Weltpostpark.

L'approvisionnement énergétique innovant du Weltpostpark peut être une source d'inspiration pour d'aut-

res sites présentant une situation de départ similaire. L'Office fédéral de l'énergie a donc soutenu le monitoring de l'installation pendant deux ans afin de vérifier si le système avait un potentiel pour d'autres applications. Les mesures ont montré qu'une installation combinant le solaire thermique, l'accumulateur de glace et la pompe à chaleur peut être exploitée efficacement. Le coefficient de performance annuel moyen de la pompe à chaleur (COP) de 4,5 le prouve, ce qui signifie qu'un kWh d'électricité a permis de produire 4,5 kWh de chaleur - une très bonne valeur. En termes de coûts, la solution avec pompe à chaleur et accumulateur de glace est à peu près au même niveau qu'une pompe à chaleur à sonde géothermique.

Les résultats des mesures ont également mis en évidence que la récupération de la chaleur des eaux usées est un élément important du concept: avec une source d'énergie principale variable dans le temps comme l'énergie solaire, il faut impérativement une autre qui prenne le relais lorsque le soleil est trop faible ou absent. L'alimentation en énergie du parc postal mondial, née de la nécessité, s'est donc révélée être un système fiable et efficace, qui devrait tout à fait être réutilisé dans des situations de départ similaires.



Le diagramme des flux énergétiques de la maison A pour une période de chauffage montre que seuls 15 % de l'énergie solaire obtenue ont dû être utilisés pour la régénération de l'accumulateur de glace - 85 % ont été directement affectés au fonctionnement de la pompe à chaleur. Autre point intéressant: on estime que 8 % de l'énergie absorbée par l'accumulateur de glace provenait du sol environnant (graphique: eicher+pauli).





Cette image du parc éolien offshore «Horns Rev 1» au large des côtes danoises montre les circulations d'air (tourbillons) qui peuvent se produire derrière une éolienne (source: Horns Rev 1 owned by Vattenfall, photographe Christian Steiness).

Plus d'énergie éolienne grâce à des modèles optimisés

Pour qu'un parc éolien génère un maximum d'électricité, il faut tenir compte, lors de la planification, des conditions locales ainsi que des interactions entre les différentes éoliennes du parc. Une bibliothèque open source contenant des données d'entreprises suisses doit contribuer à réduire les efforts de planification et à fournir des résultats plus précis.

Les personnes qui planifient un projet d'énergie éolienne dans notre pays doivent surmonter des défis très différents. Parmi ceux-ci figurent notamment la complexité du terrain et les conditions météorologiques particulières qui caractérisent la Suisse. L'interaction entre

les effets thermiques et le terrain entraîne par exemple des vents diurnes. Pour la conception précise d'un parc éolien, on ne peut pas simplement s'appuyer sur des méthodes de calcul conventionnelles, mais il faut prendre en compte de tels facteurs d'influence. Il en résulte que

des modèles spécifiques sont utilisés pour chaque projet éolien et que l'échange d'expériences entre différents projets n'est possible que dans une certaine mesure.

L'important travail de planification va à l'encontre de l'objectif inscrit

dans la stratégie énergétique suisse: en 2050, l'énergie éolienne doit atteindre une production annuelle d'environ 4000 GWh d'électricité. Pour y parvenir, il faut mettre en service chaque année environ 40 éoliennes d'une puissance de l'ordre du mégawatt. Ce chiffre montre clairement qu'il faut réduire les efforts de planification des projets d'énergie éolienne afin de permettre une mise en œuvre plus rapide et moins coûteuse.

Grâce à la numérisation, il est aujourd'hui possible de collecter de nombreuses données relatives à l'exploitation des éoliennes. L'une des méthodes utilisées à cet effet s'appelle «Supervisory Control and Data Acquisition» (SCADA). Parmi les données collectées par SCADA, on trouve par exemple la vitesse et la direction du vent, la vitesse de rotation et la température du générateur ou la position de la nacelle, c'est-à-dire du boîtier contenant les équipements mécaniques. L'utilisation de ces nombreuses données avec

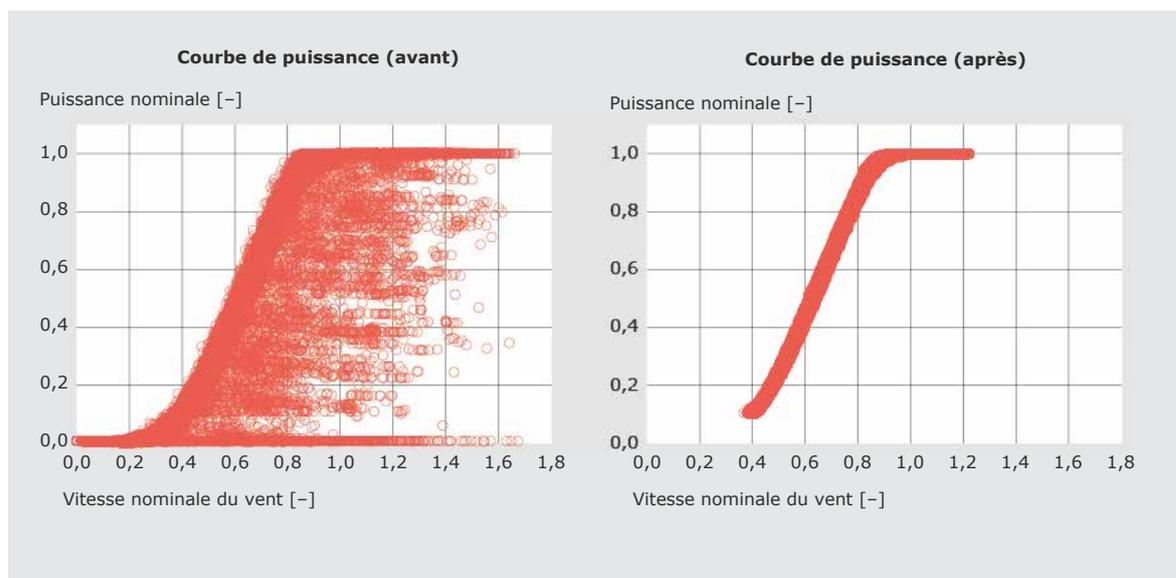
des méthodes d'apprentissage automatique permet de prédire plus précisément l'évolution des performances d'une éolienne. Cela permet à l'exploitant de mieux contrôler et piloter l'installation.

Au niveau du parc éolien, les différentes éoliennes peuvent s'influencer mutuellement en fonction de la direction du vent, car des circulations d'air se forment derrière elles - comme d'ailleurs pour les avions (voir image à gauche). Ces «tourbillons de sillage» perturbent le fonctionnement des autres éoliennes. Des dispositifs techniques permettent de les diriger dans une certaine mesure, de sorte que la puissance totale du parc éolien soit moins influencée. Ces interactions complexes sont aujourd'hui simulées par des modèles pilotés par des données afin d'obtenir des connaissances sur la planification et l'exploitation optimales des parcs éoliens.

Dans le cadre du projet «OpenIMPACT» soutenu par l' Office fédéral

de l'énergie, un groupe de recherche suisse - le département «Wind Energy Innovation» de la Haute école spécialisée de Suisse orientale dirigé par le Dr Sarah Barber - rassemble ces modèles pilotés par les données dans une bibliothèque open source. Il sera ainsi plus facile pour les propriétaires et les exploitants d'optimiser la production d'énergie de leurs parcs éoliens. Les modèles sont adaptés aux défis des sites suisses, car ils tiennent compte des effets complexes du terrain, de la météo et des tourbillons de sillage. Les données nécessaires à cet effet sont collectées à l'aide de deux cas d'utilisation (voir graphique ci-dessous).

Sur la base des résultats d'études antérieures, les chercheurs estiment que l'utilisation de modèles issus de leur bibliothèque open source permettrait d'augmenter d'au moins 10 % la production d'électricité des parcs éoliens. Ainsi, la bibliothèque contribuerait largement à atteindre les objectifs



Le graphique montre comment les données de puissance (Power Curve) d'une éolienne sont traitées afin de pouvoir développer un modèle de prévision. Le graphique de gauche (a) montre les données collectées entre mars 2020 et mars 2022. Chaque point vert correspond à la valeur moyenne de la production d'électricité sur un intervalle de temps de dix minutes. Ces données contiennent toutefois des valeurs aberrantes, c'est-à-dire des écarts par rapport à la situation idéale attendue, ainsi que, dans certains cas, des distorsions des résultats dues à des travaux de maintenance, des défauts, des erreurs de mesure, des stratégies de commande visant à réduire la charge des turbines ou à les arrêter en cas de vents violents. Les valeurs aberrantes ont été éliminées afin de pouvoir finalement déterminer l'état idéal d'une éolienne à l'aide de la courbe de puissance corrigée (b) (graphique: OST).





La régulation de la demande par des tarifs d'électricité dynamiques peut réduire le besoin d'extension des réseaux électriques. Ces modèles de tarification incitent les clients finaux à n'acheter de l'électricité pour certaines applications que lorsque le réseau n'est pas fortement sollicité. Une autre possibilité consiste à autoriser l'exploitant du réseau à déconnecter certains appareils du réseau pendant un certain temps en cas de pénurie d'électricité (source: Eniwa AG).

Comment les tarifs flexibles stabilisent le système électrique

La décarbonisation de notre système énergétique modifie également les exigences posées au réseau électrique. La part croissante de l'électromobilité, des pompes à chaleur et de l'énergie renouvelable irrégulière pèse sur les réseaux de distribution et rend nécessaire leur extension. La numérisation peut contribuer à maintenir les investissements à un bas niveau. Une solution possible est la gestion de la consommation via différents types de commande de charge et des modèles tarifaires correspondants.

Le tournant énergétique et l'électrification croissante entraînent des pics de charge plus fréquents et plus élevés, c'est-à-dire des demandes de puissance importantes et de courte durée sur le réseau électrique. Pour assurer son fonctionnement stable et efficace, il doit être modernisé et développé. Parallèlement, des solutions sont recherchées pour briser les pics de charge et réduire ainsi les coûts d'investissement. Une possibilité est de motiver les clients finaux à flexibiliser leur consommation par des incitations tarifaires. Dans le cadre du projet «Efficient Network Tariffs for Flexible Consumers» (NET-FLEX), une équipe de recherche de la haute école zurichoise de sciences appliquées ZHAW a étudié, en collaboration avec le fournisseur d'énergie régional Eniwa, quels étaient les

tarifs les plus incitatifs et les plus efficaces à cet effet.

Pour déterminer les coûts et l'acceptation des différents modèles tarifaires, les chercheurs ont interrogé un échantillon représentatif de clients privés et commerciaux. Les participants devaient répondre à sept questions, pour lesquelles ils devaient choisir un modèle tarifaire parmi trois. Les modèles proposés dans les différentes questions se distinguaient par le type d'appareil à déconnecter du réseau en cas de pénurie d'électricité, par la durée et la fréquence de cette déconnexion et par le montant de l'indemnisation. Les enquêtes ont montré que les deux groupes de clients sont en principe prêts à flexibiliser leur consommation au profit de la stabilité du

réseau moyennant une rémunération correspondante.

Parmi les clients privés, le déplacement de la charge, c'est-à-dire le décalage de la consommation d'électricité dans le temps, est le mieux accepté pour les stations de recharge pour véhicules électriques, suivi par les pompes à chaleur. Cela se reflète également dans les coûts: pour un report de charge d'une heure par semaine, les personnes interrogées ont demandé une indemnisation annuelle d'environ 60 francs pour les pompes à chaleur et de 36 francs pour les stations de recharge pour voitures électriques.

D'autres sondages ont révélé que la majorité des clients résidentiels interrogés étaient fortement



opposés aux tarifs variables, liés par exemple au moment de l'utilisation (haut et bas tarif) ou à la charge du réseau. Près de 72 % des personnes interrogées opteraient plutôt pour un tarif unique avec gestion directe de la charge que pour un tarif variable avec ou sans gestion directe de la charge.

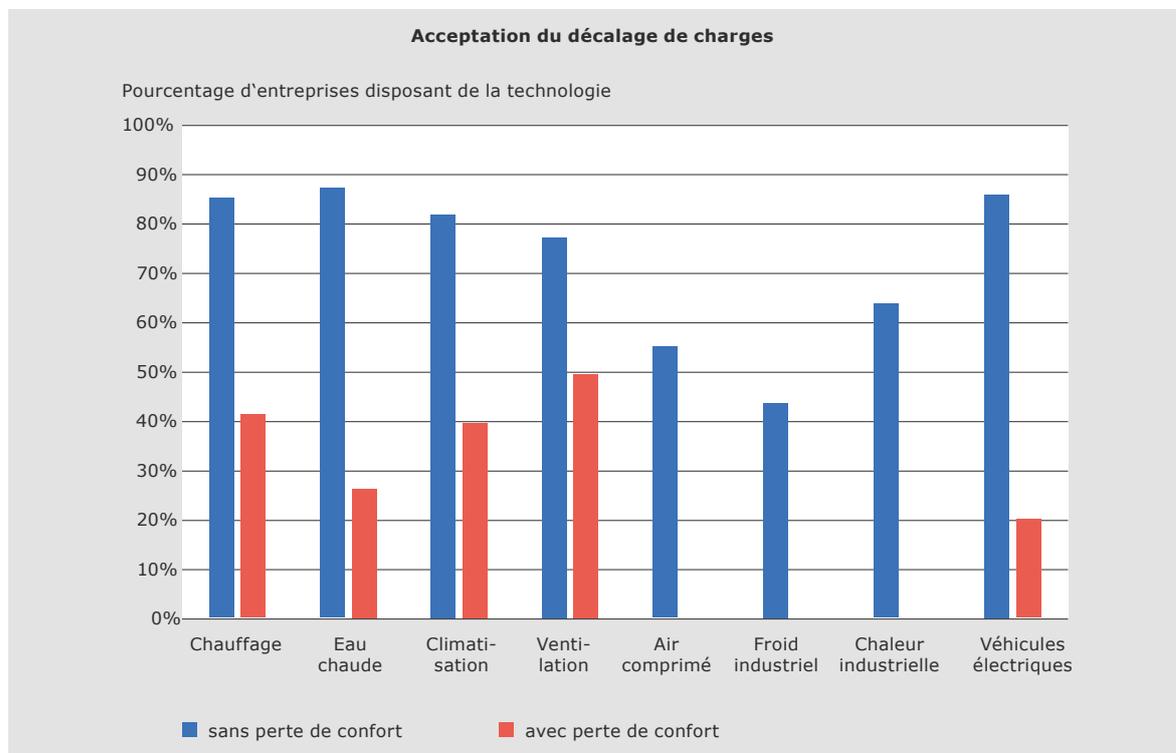
En prenant l'exemple de la zone d'approvisionnement d'Eniwa, les chercheurs ont comparé les coûts de l'extension nécessaire avec et sans incitations à la commande de certains consommateurs comme les pompes à chaleur, le stockage par batterie ou les véhicules électriques. Il s'est avéré que de telles mesures sont rentables: Aujourd'hui déjà, les économies réalisées sur l'extension du réseau grâce à la consommation flexibilisée sont similaires aux dédommagements exigés par les clients finaux. Avec la généralisation des pompes à chaleur et des voitu-

res électriques, les économies vont encore augmenter.

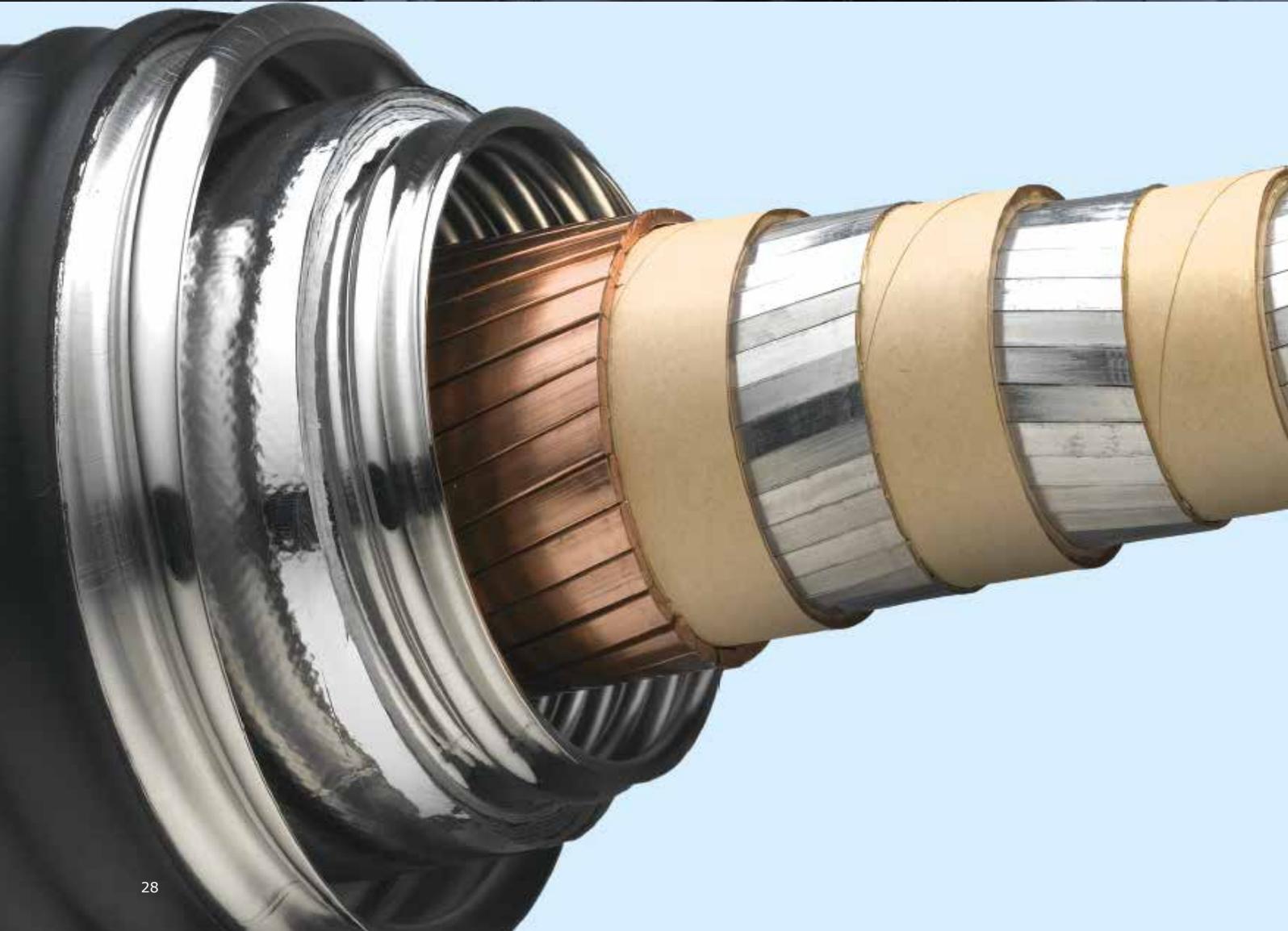
Autre conclusion importante du projet de recherche: environ deux tiers des coûts de réseau sont déterminés par la structure du réseau, c'est-à-dire par le nombre et l'emplacement des points de raccordement au réseau. Un tiers provient des pics de charge, c'est-à-dire qu'il est lié au dimensionnement des composants du réseau. C'est pourquoi les chercheurs recommandent de facturer les coûts dépendant de la structure par le biais d'une taxe de base par point de raccordement, différente selon les régions. En revanche, les coûts dépendant de la charge doivent être répartis via les prix de travail. Un prix variable est ainsi facturé aux fournisseurs d'énergie ou aux clients finaux qui gèrent eux-mêmes leurs charges. Les clients finaux qui font gérer leurs charges par le fournisseur d'énergie paient un prix de

travail constant. En outre, les clients finaux devraient pouvoir choisir différents niveaux de qualité du service de réseau.

Le pilotage par le fournisseur d'énergie plutôt que par le gestionnaire de réseau présente l'avantage de pouvoir utiliser le pilotage de la charge à d'autres fins, comme la réduction des coûts d'approvisionnement en électricité, pendant les périodes où la capacité du réseau est suffisante. Afin d'exploiter encore mieux les possibilités de commande souvent spécifiques aux fabricants et aux appareils, il pourrait en outre être efficace que certaines charges, telles que les stations de charge, les pompes à chaleur ou les chauffe-eau, soient approvisionnées et commandées par des fournisseurs d'énergie distincts, spécialisés dans cette catégorie d'appareils, ce qui n'est toutefois pas autorisé dans le cadre juridique actuel.



Dans le secteur commercial, ce sont surtout les processus de fabrication à forte consommation d'énergie qui se prêtent à un report de charge. Toutefois, de nombreuses entreprises craignent une influence négative sur la qualité des produits et le déroulement de l'exploitation. C'est pourquoi elles n'acceptent pas les reports de charge pour les installations importantes pour la production - alors qu'elles les acceptent pour les installations techniques des bâtiments. Plus de 85 % des personnes interrogées ont indiqué qu'elles accepteraient des transferts de charge pour le chauffage des locaux, l'eau chaude et les véhicules électriques sans que leur confort en soit affecté. La disponibilité est un peu plus faible pour la ventilation (77 %) et la climatisation (82 %). Avec une restriction de confort, 40 % des personnes interrogées sont encore prêtes à accepter un report de charge pour le chauffage des locaux, la ventilation et la climatisation, et seulement 20 % des personnes interrogées pour l'eau chaude et les véhicules électriques. Sans perte de confort, les entreprises interrogées attendent au moins 10 % des coûts annuels d'électricité en compensation. Avec des pertes de confort, les exigences augmentent jusqu'à 20 %, ce qui réduit nettement le potentiel ici (source: rapport intermédiaire de l'OFEN).



Coopération internationale

La coopération internationale dans la recherche énergétique occupe une place privilégiée en Suisse. Au plan institutionnel, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) coordonne ses programmes de recherche avec les activités internationales afin d'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.



Les supraconducteurs conduisent l'électricité sans pertes électriques notables, mais pour cela, un refroidissement important est nécessaire. Pour les applications commerciales, les supraconducteurs à haute température (HTS) sont au premier plan. Dans le cadre du programme de coopération technologique «High-Temperature Super Conductivity» de l'AIE, auquel la Suisse participe également (voir p. 30), un comité d'experts a évalué le niveau de développement des applications HTS pour le réseau électrique et les a rassemblées dans un «Application Readiness Map». Parmi les domaines dans lesquels la technologie HTS présente déjà un degré de maturité élevé, on trouve notamment les câbles moyenne tension performants pour l'alimentation des centres urbains, comme ceux qui ont été utilisés à Essen de 2014 à 2021 (cf. photo en haut à gauche, source: Westenergie AG). Le câble du projet AmpaCity a permis de transporter 39 000 MWh d'électricité par an. Dans le même temps, le refroidissement a nécessité 45 MWh d'énergie, ce qui correspond à un peu plus d'un pour mille de l'énergie transportée.

L'illustration en bas à gauche montre un câble HTS tel qu'il a été utilisé à Essen. On peut voir à gauche le blindage en cuivre. Les trois couches supraconductrices argentées sont séparées les unes des autres par trois isolations brunes. L'azote circule à l'intérieur et à l'extérieur du tube, qui est ainsi refroidi à -200 °C (source: Westenergie AG).



Participation aux programmes de collaboration technologique de l'AIE

	Energy Conservation through Energy Storage (iea-ecses.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 (iea-wind.org)		Greenhouse Gas (ieaghg.org)
	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)
	Accelerating CCS Technologies (act-ccs.eu)		Geothermica (geothermica.eu)
	Concentrated Solar Power (csp-eranet.eu)		Materials (https://m-era.net/)
	Smart Energy Systems (eranet-smartenergysystems.eu)		

D'autres coopérations internationales

	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking		DACH-Kooperation Smart grids
	International Partnership for Geothermal Technology		Clean Energy Transition Partnership
	Driving Urban Transitions		

(À droite) Pour que les installations photovoltaïques (PV) produisent un maximum d'électricité solaire, elles sont équipées de trackers appelés Maximum Power Point (MPP). Si les trackers MPP sont montés de manière décentralisée sur les différents modules PV, ils sont appelés «Optimizer» (optimiseurs de puissance). Des scientifiques de la haute école zurichoise de sciences appliquées (ZHAW) à Winterthur ont élaboré des recommandations sur les cas dans lesquels l'installation d'optimiseurs dans les installations PV apporte un surplus de rendement énergétique. Si l'ombre est légère ou inexistante, il est indiqué d'installer un tracker MPP central sur l'onduleur de l'installation PV. En cas d'ombrage moyen, il vaut la peine d'utiliser des optimiseurs sur des modules sélectionnés. En cas d'ombrage important, une solution All-Optimizer est judicieuse (source: Tigo Energy).



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



Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne

www.recherche-energetique.ch