



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC

**Commission fédérale de la recherche énergétique CORE**

# Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2021–2024

Élaboré par la  
Commission fédérale de la recherche énergétique CORE

## Impressum

État.....septembre 2020  
Éditeur .....Commission fédérale pour la recherche énergétique CORE  
Direction.....Katja Maus

### Auteurs

Partie générale.....Katja Maus, OFEN  
Économie, société et mesures politiques .....Anne-Kathrin Faust, OFEN  
Travail et habitat .....Andreas Eckmanns, OFEN  
Mobilité .....Men Wirz, OFEN  
Systèmes énergétiques.....Stefan Nowak, NET Nowak Energie & Technologie SA  
Processus industriels .....Carina Alles, OFEN

Avec le concours et la participation des pôles de compétence (Swiss Competence Centers for Energy Research, SCCER) et d'autres experts

Secrétariat de la CORE  
c/o Office fédéral de l'énergie (OFEN)  
3003 Berne  
Tél. +41 58 462 39 78

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

# Sommaire

<b>VISION</b> .....	4
<b>RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE SUISSE</b> .....	5
<b>RECOMMANDATIONS</b> .....	11
<b>ÉCONOMIE, SOCIÉTÉ ET MESURES POLITIQUES</b> .....	14
<b>TRAVAIL ET HABITAT</b> .....	17
<b>MOBILITÉ</b> .....	23
<b>SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES</b> .....	27
<b>PROCESSUS INDUSTRIELS</b> .....	32
<b>ANNEXE: SUJETS DE RECHERCHE</b> .....	37

# Vision

La recherche énergétique suisse apporte une contribution décisive à des modes de transformation, de fourniture, de stockage et d'utilisation de l'énergie à la fois performants et neutres en matière d'émissions. Elle vise un approvisionnement énergétique sûr, économique et respectueux de l'environnement, et soutient ainsi une politique de l'énergie efficace.

# Recherche pour un brillant avenir énergétique

Le Conseil fédéral et le Parlement ont décidé que la Suisse sortirait du nucléaire à moyen terme; la nouvelle loi sur l'énergie est en vigueur depuis le 1er janvier 2018. L'Office fédéral de l'énergie a élaboré dans ce contexte la *Stratégie énergétique 2050*, dans laquelle la Suisse s'est fixé des objectifs d'efficacité ambitieux tant pour l'utilisation de l'énergie fossile que pour la consommation d'électricité. La production d'électricité issue de sources renouvelables – photovoltaïque, éolien, biomasse et géothermie – doit augmenter fortement de façon à compenser l'électricité qui ne sera plus produite par les centrales nucléaires. Par rapport à aujourd'hui, la *Stratégie énergétique 2050* prévoit de presque doubler l'efficacité énergétique et de diminuer la consommation d'électricité par habitant d'environ 10 à 20 %.

Selon le Groupe d'experts sur le climat (GIEC<sup>1</sup>), il est particulièrement urgent pour la planète dans son ensemble de gérer l'énergie de manière efficace, écologique et faible en émissions. En vertu de l'Accord de Paris sur le climat de 2015, la plupart des États se sont engagés à mettre en œuvre des mesures afin de protéger le climat de façon à maintenir l'augmentation des températures sensiblement en dessous de 2 °C et de

1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. À la suite de cet accord, le GIEC a rédigé un rapport spécial sur l'objectif de 1,5 °C. Les programmes actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne suffiront pas. Une diminution drastique des émissions sur le plan mondial, surtout jusqu'en 2030, est nécessaire pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C au plus.

Les scénarios du GIEC prévoient des améliorations plus rapides de l'efficacité énergétique et la multiplication par trois ou quatre de la part que représente l'approvisionnement énergétique décarboné ou faiblement carboné, en recourant aux énergies renouvelables, à l'énergie nucléaire et aux énergies fossiles couplées au captage et au stockage du carbone (CSC). La Suisse a ratifié l'Accord de Paris sur le climat. Sa politique climatique prévoit une réduction de 50 % des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici à 2030 par rapport à leur niveau de 1990. Inscrit dans la loi sur le CO<sub>2</sub>, l'objectif climatique<sup>2</sup> prévoyant une diminution des émissions de 20 % d'ici à 2020 n'a pas été atteint. Des efforts supplémentaires sont donc nécessaires pour réduire les gaz nocifs pour le climat. Pour permettre la réalisation des objectifs climatiques prévus par l'Accord de Paris sur le climat, le

## Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération

Le Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération présente une vision commune des milieux suisses de la recherche. Il énonce des recommandations en ce qui concerne la recherche énergétique financée par des fonds publics en Suisse. Il décrit aussi des objectifs de recherche importants pour soutenir la Stratégie énergétique 2050 et l'Agenda 2030 pour le développement durable.

Le plan directeur est un instrument de planification au service de toutes les instances de promotion de la Confédération. Il sert également de lignes directrices pour les organes cantonaux ou communaux qui disposent de leurs propres instruments d'encouragement de la recherche énergétique.

Le présent plan directeur concerne la période de recherche de 2021 à 2024. Il a été élaboré par la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE), avec le concours d'importants acteurs du domaine de la recherche énergétique. Il se fonde sur les connaissances scientifiques récentes reconnues sur le plan international et prend en considération les objectifs de la politique énergétique de la Suisse.

<sup>1</sup> Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat — <sup>2</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/politique-climatique-suisse.html>

Conseil fédéral a décidé à l'été 2019 de viser la neutralité carbone (zéro émission nette) à partir de 2050.

La Suisse s'est également engagée dans le cadre de l'Agenda 2030 pour le développement durable, mis en place par l'Organisation des Nations unies (ONU). Depuis 2016, l'Agenda 2030 encadre les efforts déployés conjointement aux niveaux national et international pour relever les grands défis de la planète, comme l'extrême pauvreté, les changements climatiques, la destruction de l'environnement et les crises sanitaires. La recherche énergétique doit notamment contribuer aux objectifs suivants:

- «Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable» (objectif no 7)
- «Établir des modes de consommation et de production durables» (objectif no 12)
- «Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions» (objectif no 13)

La CORE énonce comme principal objectif le développement interdisciplinaire de technologies énergétiques nouvelles, réalisables et acceptées. L'importance croissante des technologies transversales implique une collaboration sensiblement accrue entre les domaines de recherche techniques ainsi qu'entre les disciplines techniques et les sciences humaines et sociales (SHS).

### **Die Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE)**

La CORE a été instituée en 1986 par le Conseil fédéral à titre d'organe consultatif dans le domaine de la recherche énergétique suisse. Ses tâches englobent notamment l'élaboration, tous les quatre ans, du Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération, la supervision de la recherche énergétique menée en Suisse et l'émission d'avis sur la recherche énergétique de l'administration fédérale. La CORE comprend quinze membres représentant la recherche et la science ainsi que les petites et moyennes entreprises (PME) et les grandes industries du secteur de l'énergie. La liste actuelle des membres est disponible sur [www.recherche-energetique.ch](http://www.recherche-energetique.ch).

### **Recherche énergétique et innovation**

La Suisse fait partie des pays les plus innovants au monde et occupe une position de pointe depuis plusieurs années selon différentes études comparatives. Elle se hisse même à la première place en Europe dans l'Indice mondial 2019 de l'innovation (Global Innovation Index 2019) et dans le tableau de bord de l'innovation 2019 (Innovation Union Scoreboard 2019) de l'Union européenne (UE). De nombreux paramètres sont mesurés et comparés pour déterminer la capacité d'innovation d'un État, notamment les activités et les résultats des entreprises, les ressources humaines, l'ouverture, l'excellence et l'attractivité des systèmes de recherche ainsi que le financement et l'encouragement de la recherche. Il faut poursuivre les efforts pour maintenir la position de la Suisse en tant que pôle de recherche, et donc aussi la recherche énergétique, à son haut niveau actuel.

### **Recherche énergétique**

Dans le présent plan directeur, on entend par **recherche énergétique** le développement des connaissances scientifiques et techniques qui sont nécessaires pour couvrir les besoins en énergie de manière économe, efficace et respectueuse de l'environnement. La recherche énergétique englobe la recherche fondamentale, dès lors que ses objectifs se réfèrent aux secteurs énergétiques, la recherche appliquée, le comblement des lacunes destiné à résoudre des problèmes pratiques spécifiques et le développement permettant d'évaluer les connaissances disponibles pour créer de nouveaux produits et processus commercialisables.

### **Transfert des connaissances et des technologies**

La Suisse a besoin de «systèmes symbiotiques» ouverts pour la recherche et le développement afin de conserver sa force d'innovation. Il convient d'encourager la collaboration entre le domaine des écoles polytechniques fédérales (EPF), les hautes écoles spécialisées et les universités ainsi qu'avec d'autres acteurs et de maintenir et développer les réseaux, car tout cela soutient le transfert de savoir entre la recherche et ses applications.

Le transfert mutuel des connaissances et des technologies entre les hautes écoles et la pratique est essentiel pour que les résultats obtenus dans la recherche apportent une valeur ajoutée sur le marché. Il peut être assuré par des installations pilotes et de démonstration, qui devraient être planifiées à un stade précoce avec les milieux économiques et d'autres acteurs éventuels. Ces installations permettent d'évaluer la faisabilité technique des projets et les possibilités de réalisation à plus grande échelle, l'objectif étant de réduire le risque pour les investisseurs privés.

Les connaissances doivent être transmises et appliquées, d'où l'importance de la formation des scientifiques et des techniciens.

### **Intégration internationale**

La collaboration internationale en matière de recherche favorise la qualité de cette dernière et l'efficacité des ressources allouées à la recherche. Pour que cette coopération soit fructueuse, il faut que la Suisse participe activement aux programmes internationaux, notamment en tant que pays associé aux programmes-cadres de recherche de l'UE, et que sa contribution soit de haute qualité et reconnue.

La participation de chercheurs suisses aux activités de recherche de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et de l'UE doit être la première des priorités. Toutefois, la collaboration internationale et l'échange de chercheurs doivent également s'étendre au-delà de l'UE et des pays industrialisés et inclure les pays en développement.

Il y a lieu d'assurer et de renforcer cette coopération par l'intermédiaire des services fédéraux responsables, à savoir le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) et l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Fondée sur le savoir, l'économie suisse est également tributaire des étudiants venus de l'étranger qui poursuivent leurs études en Suisse. La relève des professions académiques, chez les dirigeants ou les cadres supérieurs ainsi que chez les collaborateurs employés dans le domaine des prestations basées sur le savoir ne peut pas être assurée sans eux.

## Les priorités de la recherche mises en contexte

La recherche énergétique doit s'appuyer sur une approche globale et s'inscrire dans une perspective de développement durable. Le Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération prend en considération l'ensemble de la chaîne de création de valeur «Recherche – Innovation – Marché» et, par la recherche énergétique financée par les pouvoirs publics, vise une utilité pour l'économie du pays en plus de résultats de haute qualité.

### **Technique**

Pour autant que cela soit faisable économiquement, il faut tirer le meilleur parti du potentiel technique que recèle chacune des applications techniques destinées à fournir, à transformer, à stocker et à utiliser l'énergie. Les possibilités offertes par la numérisation constituent un thème transversal à prendre en compte dans toutes les priorités thématiques.

### **Ressources**

Selon la CORE, la recherche énergétique doit miser avant tout sur la mise au point de technologies nouvelles et sur l'amélioration des technologies et l'approfondissement des connaissances permettant d'augmenter l'efficacité énergétique, l'utilisation rationnelle des ressources et un recours accru aux énergies renouvelables. Il convient de fermer autant que possible les cycles de production, d'éviter les émissions polluantes et de promouvoir l'économie circulaire.

### **Création de valeur et économie nationale**

Le plan directeur vise à améliorer et à assurer à long terme la sécurité de l'approvisionnement de la Suisse, à assurer au pays une création de valeur sous la forme d'emplois, de savoir-faire ou de nouveaux produits commercialisables, à accroître la compétitivité de la Suisse sur la scène internationale et à préserver son attrait en tant que partenaire de collaboration.

### **Société**

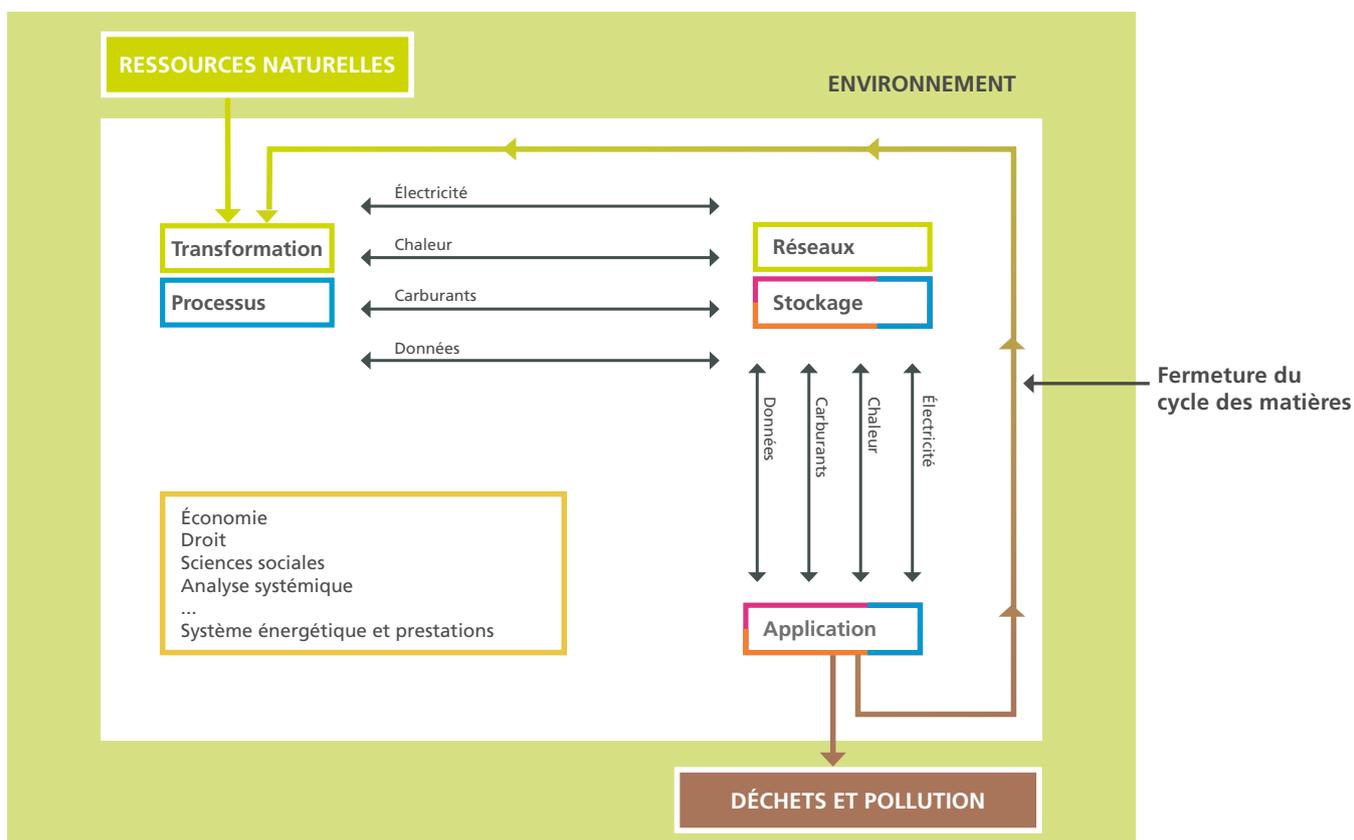
Des questions se posent à propos des besoins de la société et des mesures politiques qui permettent une

mutation du secteur de l'énergie. Pour ce faire, on étudiera la fourniture, la transformation, le stockage et l'utilisation de l'énergie dans leurs aspects sociologiques, psychologiques et sous l'angle des sciences politiques notamment. Enfin, la recherche énergétique doit contribuer à faire comprendre que les mesures techniques ne suffisent pas, à elles seules, à mettre en œuvre une politique énergétique nationale ou une politique climatique mondiale. Des changements de comportement sont indispensables pour une utilisation durable de l'énergie.

Dans le présent plan directeur, certaines questions de recherche concernant la création de valeur et l'économie nationale ainsi que la société sont examinées sous l'angle des sciences humaines et sociales et des sciences économiques, et sont par conséquent traitées dans le chapitre «Économie, société et mesures politiques». Celles qui présentent un lien fort avec la technique sont, quant à elles, exposées dans les chapitres consacrés aux priorités correspondantes.

### Vue d'ensemble du système énergétique

Dans ce plan directeur, le «système énergétique» désigne la transformation, le stockage, la fourniture et l'utilisation d'énergie issue de ressources naturelles au sein du cycle des matières et dans le cadre de la société. L'illustration présente le système énergétique de manière très simplifiée. Les ressources naturelles (eau, soleil, vent, richesses du sous-sol, etc.) présentes dans l'environnement sont prélevées et, par le biais de la transformation et des processus, mises à disposition sous forme d'agents énergétiques (électricité, chaleur, carburants et combustibles) et de produits. Ceux-ci sont distribués, stockés, puis à nouveau transformés ou consommés. Les rapports d'interdépendance et les interactions sont nombreux entre les multiples acteurs, les conditions-cadres et les processus très variables. La recherche énergétique vise à comprendre cette complexité et, sur cette base, à trouver les meilleures possibilités de développement pour l'ensemble du système et de ses composantes, notamment par le biais du couplage des secteurs.



La CORE a subdivisé le système énergétique de manière à en tirer cinq priorités thématiques (page 10) qui recouvrent tous les principaux domaines de la recherche énergétique.

Ces cinq thèmes, qui reflètent la vie quotidienne et les aspects de la production et de l'utilisation de l'énergie s'y rapportant, sont représentés dans le schéma conformément au code de couleurs suivant: l'encadré jaune (Figure 1, priorité thématique «**ÉCONOMIE, SOCIÉTÉ ET MESURES POLITIQUES**») comprend les éléments du système énergétique en lien avec la société et présente le cadre juridique et économique. La couleur rose correspond à la priorité thématique «**TRAVAIL ET HABITAT**». La plupart des bâtiments et des sites de production font partie des consommateurs, mais certains participent aussi au stockage (p. ex. de la chaleur ou du froid) ou à la transformation (p. ex. de l'énergie photovoltaïque). Sous l'angle économique, on désigne ce cumul des rôles de producteur et de consommateur par le terme de «prosommateur». On trouve également des prosommateurs dans le cadre de la priorité thématique «**MOBILITÉ**», un secteur traditionnellement consommateur d'énergie, mais qui, sous forme de mobilité électrique, qui peut faire l'objet d'une gestion et peut contribuer, en tant qu'agent de stockage, à stabiliser le réseau électrique.

La priorité thématique «**SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES**» englobe la transformation et la distribution de l'énergie sous toutes ses formes. Enfin, les «**PROCESSUS INDUSTRIELS**», dernière priorité thématique, rassemblent la fabrication de biens, mais aussi de combustibles et de carburants; ils sont dès lors indiqués en bleu au niveau tant des applications que des processus. Cette priorité thématique doit contribuer fortement à l'objectif de fermeture du cycle des matières en évitant autant que possible le rejet de déchets et de polluants (représentés en brun) dans l'environnement et en réduisant la consommation des ressources naturelles.

Le système énergétique comprend donc, en tant que tel, les différents secteurs et leur couplage dans le domaine de l'électricité, de la chaleur, des carburants et des données, mais il s'étend bien au-delà de ces aspects. Même lorsqu'ils examinent des questions spécifiques, les chercheurs devraient s'efforcer d'adopter une perspective globale et d'évaluer leurs solutions à l'aune de la contribution qu'elles apportent au système énergétique dans son ensemble.

Les objectifs de recherche découlant de ces priorités thématiques doivent permettre d'esquisser les grands axes de la recherche selon une approche du haut vers le bas (top-down), de renforcer la pensée systémique et de promouvoir la recherche interdisciplinaire.

## Priorités thématiques

### **ÉCONOMIE, SOCIÉTÉ ET MESURES POLITIQUES**

Pour permettre la transition vers un système énergétique sûr, efficace et renouvelable, il faut des marchés, des mesures politiques et des institutions organisés de manière à promouvoir l'efficacité énergétique et le passage aux énergies renouvelables, bénéficiant d'une large acceptation et contribuant au bien-être de chacune et chacun. Les travaux de recherche axés sur l'économie, la société et les mesures politiques fournissent des connaissances étayées, qui sont nécessaires à la compréhension et à l'organisation de ces marchés, ces mesures politiques et ces institutions.

### **TRAVAIL ET HABITAT**

À l'avenir, le parc immobilier sera exploité conformément aux principes de la neutralité climatique et de l'efficacité énergétique et contribuera, sous une forme décentralisée, à maintenir un équilibre entre l'offre et la demande sur les réseaux énergétiques (électricité, chaleur, froid). Pour ce faire, la recherche identifie des approches technologiques qui soient socialement supportables.

### **MOBILITÉ**

«Une mobilité exempte d'émissions qui répond aux exigences et aux besoins de la société et de l'économie.»

Eu égard à la demande croissante, la recherche sur la mobilité permet de mettre en œuvre les technologies, les solutions et les connaissances permettant de proposer une mobilité qui soit à la fois rentable, performante et adaptée.

### **SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES**

«Une énergie propre et fiable, à prix avantageux, disponible en quantité suffisante et en temps opportun.»

Le futur système énergétique sera, dans une large mesure, décentralisé et reposera sur des sources d'énergie renouvelables. De nouvelles formes d'intégration dans le réseau deviendront nécessaires et seront facilitées par la numérisation et par de nouveaux modèles commerciaux. Des travaux de recherche approfondis sur toutes les composantes du système énergétique, sur l'intégration dans le réseau et sur la résilience face aux facteurs externes constituent la base d'une stratégie énergétique à la fois sûre et financièrement abordable.

### **PROCESSUS INDUSTRIELS**

Les processus industriels constituent le pilier d'une économie circulaire dans laquelle l'empreinte énergétique, les matériaux et les émissions produites sur l'ensemble du cycle de vie des produits et des services sont réduits au strict minimum.

La recherche permet de développer des procédés technologiques novateurs et des pratiques de gestion intelligentes, qui font progresser l'efficacité des ressources dans l'industrie, qui réduisent au minimum la consommation des matériaux et assurent un approvisionnement en énergie provenant de sources d'origine renouvelable.

### **HORIZONS TEMPORELS DES OBJECTIFS DE RECHERCHE RECOMMANDÉS**

Dans les chapitres suivants, des priorités et des objectifs sont définis pour chacune des cinq priorités thématiques, avec deux horizons temporels distincts:

- priorités de recherche à moyen et long termes (horizon 2030 à 2050);
- objectifs à court terme pour la période couverte par le présent Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2021–2024.

## Recommandations

**La CORE recommande aux instances de promotion des pouvoirs publics de prendre appui sur le présent Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération afin d'assurer un usage ciblé et coordonné des fonds publics.**

### **Contexte de la politique en matière de recherche**

Dans le cadre de la *Stratégie énergétique 2050*, de nouveaux groupes de recherche ont été mis en place dans huit pôles de compétence (Swiss Competence Centers for Energy Research, SCCER) pendant les périodes FRI<sup>3</sup> 2013 à 2016 et 2017 à 2020, dans le cadre du plan d'action *Recherche énergétique suisse coordonnée*. Le développement des capacités visé par le plan d'action a été mené à bien. Il est prévu que le soutien aux SCCER prenne fin lorsque commence la période de recherche 2021 à 2024. Les hautes écoles sont dès lors les garantes de la préservation de la capacité de recherche et des demandes doivent être soumises pour tous les moyens consacrés à la recherche. Les deux programmes nationaux de recherche (PNR) «Virage énergétique» (PNR 70) et «Gérer la consommation d'énergie» (PNR 71) du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) ont également pris fin avec succès. Durant la période examinée, il convient de continuer à répondre aux besoins de recherche actuels en vue d'une mise en œuvre réussie de la Stratégie énergétique 2050 et des objectifs de CO<sub>2</sub>, de mettre à profit les connaissances acquises et les groupes de recherche créés, de poursuivre leur développement et de permettre des innovations.

### **Principes régissant l'encouragement**

Dans le domaine de l'énergie, il convient en premier lieu d'encourager la recherche appliquée. La priorité doit être donnée aux domaines de recherche qui créent une importante valeur ajoutée pour la Suisse et laissent présager un apport durable à la sécurité de l'approvisionnement du pays. Ainsi, la recherche énergétique fournira une contribution essentielle à la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 et de la Stratégie pour le développement durable ainsi qu'au respect des objectifs climatiques de la Suisse. Le présent plan directeur comprend également des recommandations pour la recherche énergétique qui n'est pas en lien direct avec ces objectifs, à condition qu'elle présente une qualité

élevée, soit compétitive et s'inscrive dans des réseaux internationaux.

L'engagement soutenu des pouvoirs publics en faveur de la mise en réseau des établissements de recherche, de l'identification des domaines technologiques porteurs d'avenir, de l'encouragement de la collaboration scientifique internationale et de la coopération entre les hautes écoles et les milieux économiques est indispensable pour valoriser les résultats de la recherche et doit se poursuivre. Une mise en œuvre efficace et ciblée doit s'accompagner d'une réglementation favorable à l'économie pour les éléments de propriété intellectuelle développés avec des aides publiques (p. ex. brevets ou licences).

### **Renforcement de la recherche énergétique**

La collaboration interdisciplinaire et impliquant les différentes hautes écoles s'est solidement établie dans les huit SCCER créés entre 2013 et 2020 et soutenus par la Commission pour la technologie et l'innovation (CTI, aujourd'hui l'Agence suisse pour l'encouragement de l'innovation Innosuisse). Les réseaux et les capacités de recherche mis en place doivent être maintenus à l'avenir. Les hautes écoles se sont engagées à maintenir les centres de recherche. La fin de soutien destiné aux SCCER ainsi que l'achèvement des programmes nationaux de recherche PNR 70 et PNR 71 financés par le FNS se traduisent par un recul considérable des subventions destinées à la recherche énergétique.

Ce manque pourra être en partie comblé par le nouveau programme d'encouragement SWEET (Swiss Energy Research for the Energy Transition), qui est rattaché à l'OFEN. SWEET promeut, via des appels d'offres publics portant sur différents thèmes, des partenariats interdisciplinaires regroupant plusieurs types de hautes écoles et exige explicitement la participation de partenaires de mise en œuvre (p. ex. milieux industriels, communes). Les résultats de recherche doivent être présentés à l'aide de projets de démonstration en vue de la mise en œuvre. Cela permet de continuer à encourager les meilleurs chercheurs et groupes de chercheurs, tout en soutenant de manière ciblée la Stratégie énergétique 2050.

### **Recherche sectorielle de la Confédération**

La recherche sectorielle de l'OFEN joue un rôle import-

<sup>3</sup> FRI: formation, recherche et innovation

ant dans l'encouragement de la recherche énergétique suisse. Ses moyens financiers lui permettent de soutenir des technologies et des projets porteurs dont la maturité technologique se situe entre la recherche fondamentale et la proximité du marché; elle complète ainsi judicieusement l'aide du FNS et d'Innosuisse. Cela englobe notamment l'élaboration de modèles validés applicables dans la pratique.

L'OFEN est par ailleurs chargé par le Conseil fédéral d'assurer la participation des chercheurs suisses aux programmes de recherche (Technology Collaboration Programmes, TCP) de l'AIE. Outre les contributions dont s'acquittent les différents pays, l'OFEN finance en partie les frais auxquels doivent faire face les chercheurs suisses dans le cadre des différents programmes.

La Suisse participe activement aux programmes de recherche du réseau ERA-NET (European Research Area Network) dans le cadre des programmes-cadres de recherche européens. Dans ce contexte, la recherche sectorielle de l'OFEN occupe également une place particulière, car le financement des appels d'offres dans le domaine de l'énergie est assuré, ou du moins coordonné, par l'OFEN.

La CORE recommande de maintenir un volume de recherche au moins équivalent à celui des années précédentes, notamment de manière à garantir l'engagement international de la Suisse – en particulier dans les programmes de recherche de l'AIE et de l'UE.

### **Projets pilotes et de démonstration**

Les moyens alloués aux projets pilotes et de démonstration dans le domaine de l'énergie permettent de soutenir la politique énergétique grâce à l'introduction accélérée de technologies innovantes sur le marché. Les projets de démonstration à l'échelle 1:1 montrent comment la Stratégie énergétique 2050 peut être mise en œuvre. On peut ainsi gagner la confiance de la population tout en soumettant les nouvelles technologies et solutions à un test pratique, ce qui les rend tangibles. Dans le même temps, le rayonnement des innovations suisses au-delà des frontières s'en trouve renforcé. La CORE recommande de maintenir ces ressources financières à leur niveau actuel (env. 30 millions de francs), de continuer à évaluer de manière exigeante les demandes de projet et de prendre notamment en considération les principes de la Stratégie énergétique 2050.

Dans la mesure de ce qui est acceptable sur le plan éthique, il convient de mettre en place les possibilités juridiques permettant de tester et d'expérimenter sur le terrain les technologies et procédés nouveaux ainsi que les processus novateurs.

### **Préservation du savoir-faire dans le domaine de l'énergie nucléaire**

La question des spécialistes de l'énergie nucléaire doit faire l'objet d'une attention particulière. La Suisse a besoin d'une relève non seulement pour la durée d'exploitation restante de ses centrales nucléaires, mais également pour les phases de post-exploitation et de démantèlement ainsi que pour le stockage prévu des éléments radioactifs – qui se poursuivront largement dans le siècle à venir. Il est en outre nécessaire de conserver des compétences spécifiques afin de pouvoir évaluer les développements dans le domaine de la technique nucléaire. Si l'on veut former ces spécialistes et bénéficier de leurs compétences sur le long terme, il importe de continuer à mener et à encourager la recherche correspondante dans le domaine du nucléaire.

### **Accès illimité aux publications et aux données**

Les efforts fournis jusqu'à présent visant à rendre librement accessibles toutes les publications entièrement ou partiellement financées par des fonds publics doivent être renforcés. La stratégie exemplaire de libre accès mise en place par le FNS peut servir de fil conducteur aux autres organes d'encouragement, car elle garantit également l'accès aux articles parus dans des revues spécialisées.

Le libre accès des chercheurs aux données est bien plus difficile à concrétiser que l'accès aux publications. En l'espèce, la CORE suggère un débat entre les organismes de collecte de données et les chercheurs pour trouver le meilleur compromis possible entre la protection nécessaire de ces dernières et leur mise à disposition souhaitable.

De manière générale, la CORE recommande de soutenir la collecte de données de bonne qualité qui n'étaient pas systématiquement recensées jusqu'à présent. Les longues séries chronologiques sur plus de 30 ans revêtent une importance particulière.

### **Nouvelles tendances dans la période de recherche allant de 2021 à 2024**

Dans le domaine de la recherche énergétique de 2021 à 2024, la CORE met l'accent sur une approche globale du système énergétique tenant particulièrement compte de la perspective des sciences humaines et sociales. Cela doit permettre un couplage efficace des secteurs et une transition du système énergétique en direction des énergies renouvelables. La recherche énergétique doit également tirer profit de l'amélioration des possibilités d'analyse des données pour encourager, par exemple, l'apprentissage autonome ou une planification optimisée, axée sur les besoins des utilisateurs, dans le domaine de l'énergie.

**Économie, société et mesures politiques:** la priorité est donnée à la baisse de la demande d'énergie à long terme et à sa flexibilisation. De plus, de nouvelles approches concernent l'intégration optimale des énergies renouvelables dans le système énergétique ainsi que les structures du marché et la coordination des acteurs dans un système énergétique décentralisé. L'accent est mis sur les analyses systémiques qui permettent également d'examiner les facteurs d'influence de la transition énergétique au sein de la société.

**Travail et habitat:** dans le périmètre d'observation et d'optimisation, l'angle d'analyse a été agrandi, passant des relations entre le secteur de la construction et le réseau électrique aux interactions avec tous les réseaux énergétiques. Cette prise en compte de la perméabilité des réseaux (couplage des secteurs) se traduit, dans le domaine du travail et de l'habitat, par un changement de perspective, les sujets ne portant plus sur les seuls bâtiments, mais sur les zones et les quartiers. De nouvelles conditions sont dès lors posées pour l'optimisation du parc immobilier en tant que système technique. La recherche est aussi davantage centrée sur les personnes en tant qu'utilisateurs, propriétaires et exploitants des bâtiments, donnant ainsi naissance à de nouvelles approches et à de nouvelles méthodes pour leur validation (living labs).

**Mobilité:** cette priorité thématique s'appuie davantage sur les analyses et la compréhension du système de mobilité dans son ensemble et sur le rôle que joue le comportement humain. Au niveau technique, le défi posé par la décarbonisation du transport de marchandises et du transport aérien est examiné de manière plus approfondie.

**Systèmes énergétiques:** la recherche systémique porte davantage sur la mise en réseau de tous les agents et réseaux énergétiques, avec une part aussi élevée que possible d'énergies renouvelables. Le stockage de l'énergie, en particulier le stockage de longue durée, reste un sujet majeur, tout comme la recherche sur la sécurité nucléaire.

**Processus industriels:** la fermeture du cycle des matières et des énergies constitue clairement l'objectif à long terme de cette priorité thématique. L'accent est donc davantage mis sur les matériaux renouvelables et sur la fourniture d'énergies renouvelables pour les processus industriels.

**La CORE recommande d'encourager la recherche énergétique principalement dans ces différents domaines.**

# Économie, société et mesures politiques

La transition vers un système énergétique sûr, efficace et renouvelable requiert des marchés, des mesures politiques et des institutions qui sont organisés de manière à promouvoir activement l'efficacité énergétique et le passage aux énergies renouvelables, qui bénéficient d'une vaste acceptation et qui contribuent au bien-être individuel. Les travaux de recherche axés sur l'économie, la société et les mesures politiques fournissent les solides connaissances qui sont nécessaires à la compréhension et à l'organisation de ces marchés, mesures politiques et institutions.

La Stratégie énergétique 2050 prévoit une sortie progressive du nucléaire combinée au respect des objectifs climatiques et au maintien du haut niveau de sécurité d'approvisionnement en Suisse. Cela nécessite d'améliorer l'efficacité énergétique et d'accroître la production d'énergie d'origine renouvelable. Pour ce faire, il faut développer de nouvelles technologies, mais le progrès technique ne suffit pas à lui seul. Il faut des investissements privés majeurs et de profonds changements dans le mode de consommation d'énergie. Ces deux éléments requièrent une modification des comportements, de nouvelles incitations et, dans la mesure du possible, des adaptations au niveau de la gouvernance et des mesures politiques. Cette transformation du système énergétique doit être réalisée de façon à bénéficier d'une vaste acceptation par la population et à assurer une qualité de vie et un bien-être individuel élevés.

La recherche énergétique axée sur les sciences humaines et sociales vise principalement à mieux comprendre le comportement des acteurs, leur réaction face aux mesures politiques et le fonctionnement des marchés. Le potentiel et les coûts relatifs des différentes mesures peuvent être évalués sur cette base et leur conception peut être optimisée. Cette recherche fournit en outre une vision globale de la transformation du système énergétique et une meilleure compréhension des interconnexions et des interactions entre les mesures et les processus. Les analyses systémiques soutiennent cette transformation du système énergétique suisse en donnant des renseignements détaillés sur l'évolution de la production et de l'utilisation de l'énergie, sur son lien avec les développements sociétaux et économiques ainsi que sur son impact environnemental. De fait, beaucoup d'instruments et de mesures politiques doivent être examinés dans un contexte plus

vaste, car leurs effets ne se limitent pas à quelques secteurs, domaines ou régions.

Non seulement la recherche énergétique axée sur les sciences humaines et sociales traite les problématiques propres à ce domaine, mais elle contribue également au développement et à la mise en œuvre de nouvelles technologies. Les progrès techniques et les avancées sociales vont de pair et sont indissociables. Les solutions techniques concourent davantage à une utilisation durable de l'énergie lorsque leur développement intègre de manière adéquate le contexte social, économique et politique. Dans le présent plan directeur, les aspects socio-économiques sont donc traités directement dans les priorités techniques lorsque ceux-ci découlent de la technologie ou revêtent une importance majeure en la matière.

La recherche en SHS dépend très fortement de la qualité des données. La collecte des données et l'accès à celles-ci ne représentent pas en soi une priorité de la recherche, mais ils constituent une condition préalable pour un travail de recherche de premier ordre dans de nombreux domaines. Cela englobe notamment la possibilité d'effectuer des tests sur le terrain et des expériences, comme cela est précisé au chapitre «Recommandations».

La transformation du système énergétique nécessite une modification des comportements des acteurs en matière d'investissement et d'utilisation de l'énergie ainsi que des mesures politiques, une structure du marché et des institutions qui permettent cette mutation. Il convient d'élaborer des instruments politiques et réglementaires et de créer des conditions-cadres favorisant cette transformation. La recherche en SHS y contribue principalement en fournissant les connais-

sances requises. Pour ce faire, des travaux de recherche sont nécessaires, notamment dans les domaines «Entreprises et ménages», «Marchés, réglementation et mesures politiques» et «Modélisation, analyses systémiques et processus de transformation».

## Priorités à moyen et long termes

### **Entreprises et ménages**

Pour mettre en œuvre avec succès la transformation du système énergétique, les ménages et les entreprises doivent modifier leurs habitudes de consommation et leur comportement en matière d'investissement dans le domaine de l'énergie. La première priorité à moyen et long termes est axée sur l'analyse des comportements grâce à des approches tirées de la psychologie, des sciences sociales et de la microéconomie et sur la formulation de recommandations d'action. La recherche doit permettre de mieux comprendre les motivations des différents acteurs et les effets d'instruments spécifiques de politique énergétique. L'objectif de réduction de la consommation d'énergie et le passage à un système reposant sur les énergies renouvelables vont de pair avec une baisse et une flexibilisation de la demande d'énergie. Dans ce contexte, l'analyse des facteurs psychologiques, économiques et sociaux, qui déterminent aussi bien cette demande que les processus individuels de décision, les processus dynamiques de groupe et les stratégies des entreprises, constitue un élément essentiel de la recherche. Celle-ci facilite l'élaboration de mesures contribuant à réduire la consommation d'énergie ainsi qu'à augmenter et à exploiter la flexibilité de la demande. Au niveau des ménages, des travaux de recherche supplémentaires sont par exemple nécessaires sur les interactions entre les déterminants socio-économiques et les principaux facteurs émotionnels, normatifs et cognitifs en matière de consommation d'énergie. Des mesures politiques susceptibles de faire reculer durablement la demande d'énergie pourraient ainsi être définies. Les entreprises sont, quant à elles, des acteurs importants de la transformation du système énergétique. Leurs stratégies ont des effets sur le comportement des consommateurs et sont influencées par celui-ci. De plus, les décisions des entreprises en matière d'investissement ont un impact considérable sur le développement de nouvelles infrastructures. La recherche dans ce domaine

doit porter sur les mesures d'adaptation propres aux entreprises et sur la mise en place de conditions-cadres favorisant l'innovation et les changements technologiques en vue d'une meilleure efficacité énergétique et d'un recours accru aux énergies renouvelables. Enfin, la stratégie énergétique implique fondamentalement des investissements dans de nouvelles infrastructures énergétiques. Un facteur de réussite déterminant consiste à identifier les obstacles et à formuler des recommandations permettant de définir des conditions-cadres propres à encourager les investissements de ce type.

### **Marchés, réglementation et mesures politiques**

Ce domaine de recherche s'intéresse au fonctionnement et à la réglementation des marchés de l'énergie ainsi qu'à la définition de mesures politiques en vue d'un système énergétique sûr et efficace, fondé sur les énergies issues de sources renouvelables. Les marchés de l'énergie coordonnent les décisions d'investissement et de consommation des acteurs au sein d'un système énergétique. Ils jouent donc un rôle important dans la réussite d'une stratégie énergétique. À l'avenir, des défis majeurs se poseront dans le domaine des marchés de l'énergie et de leur réglementation en raison du développement de nouvelles technologies permettant de renforcer l'intégration de différents agents énergétiques, de la décentralisation du système énergétique et de l'intégration des énergies renouvelables à grande échelle. Des travaux de recherche portant sur l'organisation et la réglementation du marché sont donc nécessaires pour que la transformation du système énergétique soit une réussite. Par exemple, l'élaboration et l'analyse de conceptions efficaces des marchés, qui permettent d'investir dans les énergies renouvelables et de les intégrer dans le système énergétique, revêtent une grande importance. La recherche doit développer des solutions permettant l'intégration de parts importantes d'énergies d'origine renouvelable et facilitant le passage à un système énergétique décentralisé. Cela englobe également de nouvelles approches visant à assurer la sécurité de l'approvisionnement et à coordonner les décisions des acteurs du système (p. ex. sites de production, producteurs, communautés de consommation propre, gestionnaires de réseau). Les nouvelles possibilités offertes par la numérisation présentent également de l'intérêt. Par ailleurs, une stratégie énergétique efficiente, qui jouit

d'une bonne acceptation par la société, requiert une combinaison équilibrée de mesures politiques et une évaluation détaillée de leurs effets. Il convient à cet égard de tenir compte des aspects juridiques, y compris au niveau international, ainsi que des interactions avec d'autres mesures (ne relevant pas de la politique énergétique), notamment en matière d'aménagement du territoire, de politique climatique et de politique des transports sur le plan tant national qu'international. La politique climatique et énergétique mondiale a un impact décisif sur les marchés de l'énergie à l'intérieur du pays. Il est donc important d'effectuer des recherches sur son influence et sur la manière dont elle interagit avec les mesures politiques nationales. Il en va de même pour le positionnement de la Suisse sur le marché international de l'énergie.

### **Modélisation, analyses systémiques et processus de transformation**

Une meilleure compréhension du processus de transformation ainsi que des effets qu'ont les mesures réglementaires et de politique énergétique tant sur le système énergétique que sur l'économie suisse est nécessaire à la mise en place de conditions-cadres appropriées en vue d'une stratégie énergétique couronnée de succès. C'est l'objectif de la recherche dans ce domaine. À cette fin, il convient d'élaborer et d'améliorer les modèles et les scénarios qui présentent les évolutions possibles et les facteurs-clés de la transformation du système énergétique. Les scénarios techniques revêtent eux aussi de l'intérêt; ils sont abordés dans le chapitre «Systèmes énergétiques». Une meilleure prise en compte de l'incertitude et la représentation d'aspects comportementaux et sociétaux dans les modèles et les scénarios représentent un objectif de recherche important. Les conditions-cadres politiques, économiques et sociétales des scénarios et les interactions entre les mesures politiques doivent également être mieux comprises, car la stratégie énergétique est à la fois une question technique et une question de société. Les moteurs de cette évolution au sein de la société et les interactions entre le changement technique, sociétal, politique et individuel doivent être étudiés pour permettre une meilleure compréhension des facteurs menant à la réussite de la stratégie énergétique. Par exemple, les dynamiques qui ont cours dans la société et dans le domaine technique, comme la numérisation, influent sur la transformation du système énergétique de différentes façons et à plusieurs niveaux. Il faut comprendre l'interaction dynamique et complexe qui prévaut entre les différents facteurs d'influence. Une autre priorité consiste en l'analyse des mesures et instruments de politique énergétique p. ex. à l'aide d'outils macroéconomiques, de la future offre et demande d'énergie ainsi que des conditions-cadres grâce à des scénarios, des modèles énergétiques et d'autres méthodes.

*La recherche propose des solutions pour une intégration accrue des énergies renouvelables dans le système énergétique. De nouvelles approches sont notamment développées pour gérer de nombreux acteurs hétérogènes dans un système décentralisé. © Shutterstock*



# Travail et habitat

À l'avenir, le parc immobilier sera exploité selon les principes de neutralité climatique et d'efficacité énergétique et contribuera manière décentralisée au maintien d'un équilibre entre l'offre et la demande dans les réseaux énergétiques (électricité, chaleur, froid). La recherche met en évidence des pistes socialement acceptables impliquant des moyens technologiques.

Conformément à cette vision, des recherches sont menées, dans la priorité thématique «Travail et habitat», sur des technologies et des concepts propres à diminuer les besoins énergétiques, à augmenter l'efficacité lors de la transformation et de l'utilisation de l'énergie et à renforcer sa valorisation (exergie). À l'avenir, les besoins humains dans les domaines du travail et de l'habitat doivent être satisfaits en ménageant les ressources et dans une démarche socialement supportable.

Pour mieux prendre en compte la fonction de «pro-sommeur» du parc immobilier, la recherche porte sur le stockage décentralisé de l'énergie, la production locale d'énergie renouvelable dans les bâtiments, les sites, les quartiers et les villes ainsi que sur la combinaison de la consommation d'énergie, de la production et du stockage décentralisés et des infrastructures énergétiques. Les systèmes énergétiques décentralisés doivent être intégrés de manière judicieuse dans le futur système énergétique de la Suisse afin d'assurer un approvisionnement énergétique sûr, efficace, économe et respectueux de l'environnement.

Les stratégies visant à augmenter l'efficacité et à passer de manière cohérente à des sources d'énergie renouvelables sont essentielles pour parvenir à la neutralité climatique dans la gestion des bâtiments. Il convient de définir la proportion optimale de gains d'efficacité en considérant le rapport coûts-bénéfices sur l'ensemble du cycle de vie. La pertinence de mesures d'efficacité supplémentaires est évaluée dans le cadre d'une comparaison avec le bilan de l'utilisation accrue des énergies renouvelables. En outre, l'exploitation énergétiquement efficace des bâtiments dépend non seulement des conditions-cadres politiques et réglementaires, mais également du comportement des propriétaires, des gestionnaires et des utilisateurs. Le fait que les possibilités de réduction et d'amélioration de l'efficacité énergétique soient pleinement exploitées

de même que la réalisation des objectifs visés relèvent en grande partie de leur influence. Des concepts correspondants doivent être élaborés, validés (y c. living labs) et leur pertinence démontrée dans la pratique.

L'exploitation de nouveaux bâtiments ne doit générer aucune émission polluante et offrir un confort élevé en ce qui concerne le climat ambiant, le bruit et l'acoustique, la lumière et l'hygiène. Les bâtiments et les matériaux utilisés doivent être conçus de manière à préserver les ressources, à rejeter peu d'émissions et à être efficaces sur le plan énergétique. À long terme, une économie circulaire est à privilégier.

Pour ce faire, il faut développer des technologies et des concepts permettant une production, une transformation, une utilisation et un stockage intelligents de l'énergie dans le secteur du bâtiment, qui intègrent des possibilités d'interconnexion et d'interopérabilité avec les réseaux d'approvisionnement (électricité, chauffage, gaz). La recherche correspondante doit englober tant l'approche technologique que les sciences humaines et sociales pour prendre également en considération le comportement et les besoins des utilisateurs. Pour être diffusé efficacement sur le marché, le savoir obtenu doit être mis à disposition sous une forme appropriée, en vue de la conception de produits et d'instruments de planification, de conseil et d'exécution et, si nécessaire, de programmes et d'instruments de politique énergétique.

Les interfaces avec les autres priorités thématiques du présent plan directeur doivent être prises en considération, p. ex. aspects du couplage des secteurs, de la mobilité et de l'infrastructure énergétique, influence des technologies de l'information et de la communication (TIC) et des technologies de monitoring sur l'utilisation de l'énergie issue de sources renouvelables produite de manière décentralisée.

## Objectifs

Les bâtiments occasionnent environ 42 % de la consommation énergétique finale<sup>4</sup> et 26 % du total des émissions de CO<sub>2</sub> en Suisse<sup>5</sup>. Ils sont donc au cœur de la Stratégie énergétique 2050. D'une part, le taux de rénovation énergétique<sup>6</sup>, qui n'est actuellement que de 1 %, doit augmenter sensiblement, et ce de manière urgente; selon l'AIE, ce chiffre doit être multiplié par deux dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)<sup>7</sup>. Dans le même temps, l'accroissement de l'efficacité énergétique – grâce à des mesures techniques et non techniques – constitue un autre levier important pour atteindre les objectifs.

La recherche a pour tâche de montrer des pistes technologiques socialement acceptables, qui s'inscrivent dans la vision exposée en prélude au présent plan directeur. Dans un premier temps, les objectifs de la Stratégie énergétique 2050 doivent être atteints, mais la recherche doit toujours garder à l'esprit les objectifs à long terme de la société à 2000 watts, qui sont bien plus ambitieux. Un objectif intermédiaire mesurable à l'horizon 2050 dans le secteur du bâtiment figure dans le cahier technique *La voie SIA vers l'efficacité énergétique*<sup>8</sup>. *Le Concept pour l'établissement du bilan de la société à 2000 watts*<sup>9</sup> pose des exigences analogues pour les sites. Les deux objectifs formulés, qui constituent un ordre de grandeur, devraient être

## Refroidissement des bâtiments

Compte tenu de la hausse des températures en été et des exigences accrues en matière de confort, le besoin de froid devrait progresser à l'avenir dans les bâtiments. Pendant la période quadriennale qui commence, des progrès significatifs devront être réalisés dans l'élaboration de concepts et de technologies destinés à un refroidissement passif ou actif des pièces, dans un souci d'optimisation des coûts, d'utilisation efficace de l'énergie et de préservation des ressources.



Mesures sur un banc d'essai visant à définir la capacité de refroidissement de trois absorbeurs solaires dans le cadre du projet «Heizen und Kühlen über thermisch aktivierte Aussenflächen», attribué à la FHNW et qui traite de l'utilisation de surfaces extérieures thermiquement activées pour le chauffage et le refroidissement. Ces absorbeurs solaires vitrés fonctionnent comme des échangeurs de chaleur à l'extérieur: lorsqu'ils sont en mode chauffage, ils peuvent absorber la chaleur de l'air ambiant en absorbant le rayonnement solaire et, une fois en mode refroidissement durant la nuit, restituer celle-ci dans l'environnement. © FHNW IEBau

<sup>4</sup> OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2018 — <sup>5</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/en-bref.html> — <sup>6</sup> Martin Jakob et al., 2014, Energetische Erneuerungsraten im Gebäudebereich. Synthesebericht zu Gebäudehülle und Heizanlagen — <sup>7</sup> IEA, 2013, Technology Roadmap - Energy Efficient Building Envelopes — <sup>8</sup> Cahier technique SIA 2040, édition 2017. Les exigences qui y sont définies visent une puissance moyenne d'énergie primaire non renouvelable de 2000 watts et l'émission de l'équivalent de deux tonnes de CO<sub>2</sub> par personne et par an d'ici à 2050, dont la moitié revient au secteur du bâtiment. Afin de replacer dans un contexte plus global l'énergie nécessaire à l'exploitation des bâtiments, le cahier technique prend également en considération l'«énergie grise» liée aux matériaux de construction et aux composants techniques du bâtiment ainsi que l'énergie consommée à des fins de mobilité en raison de la localisation des bâtiments. — <sup>9</sup> <https://www.2000watt.swiss/fr/>, Concept pour l'établissement du bilan de la société à 2000 watts. État: septembre 2014

sensiblement dépassés dans les projets pilotes et de démonstration.

Outre l'utilisation efficiente de l'énergie, plusieurs facteurs contribuent de manière déterminante à la réalisation des objectifs: une fourniture d'énergie décarbonisée, une fabrication des matériaux de construction qui soit respectueuse des ressources, pauvre en émissions et énergétiquement efficace, le but étant de mettre en place une économie circulaire, et une évolution au sein de la société conduisant à privilégier la valeur ajoutée qualitative à la croissance matérielle quantitative. Sans anticiper de ces évolutions, il convient de créer dans le secteur du bâtiment les meilleures conditions possibles pour atteindre les objectifs susmentionnés.

## Priorités à moyen et long termes

### **Sites et quartiers**

Des approches globales sont nécessaires pour, à l'avenir, couvrir le plus possible les besoins en énergie électrique et thermique de la Suisse avec des sources d'énergie locales et renouvelables. Des systèmes énergétiques décentralisés et interconnectés peuvent être aménagés dans des quartiers ou sur des sites afin de fournir des services dans les domaines de la fourniture, de la transformation, de la gestion, du stockage et de la distribution d'énergie, soit au quartier ou au site en question (y c. la mobilité électrique), soit à la région environnante. Ces systèmes ne sont pas autarciques, mais doivent s'intégrer activement dans le système énergétique suisse et européen en tant que sous-systèmes du système énergétique de demain.

Les thèmes de recherche portent sur la flexibilité au niveau de la charge et de la fourniture qu'offrent un site et chacun des bâtiments qui le composent pour le réseau électrique ou thermique, ainsi que sur l'utilisation de ces flexibilités (temps et lieu) et sur les possibilités d'appliquer des approches innovantes dans le domaine des TIC.

Il convient de poursuivre les recherches pour assurer une interaction fiable et optimale entre les réseaux

d'électricité, de chauffage et de gaz ainsi que dans la production et l'injection d'énergie, le stockage et la distribution au niveau local. Il convient également de développer des instruments novateurs pour la planification intégrale ainsi que pour l'évaluation et l'optimisation des solutions. Il peut notamment s'agir de plateformes numériques destinées à une planification intégrative, multidisciplinaire et collaborative qui tient compte des aspects énergétiques et, le cas échéant, tire parti des possibilités qu'offre le géoréférencement des données.

Les stratégies de développement durable existantes, telles que les «sites 2000 watts» ou les villes et communautés intelligentes (smart cities, smart communities), sont appelées à évoluer pour viser l'objectif d'une neutralité climatique au niveau du quartier. Des aspects importants sont la définition de la contribution apportée à la stabilité du réseau à l'échelle des sites et des quartiers et les principes qui peuvent en être déduits, qui contribueront à apporter des améliorations dans la pratique et à concrétiser les apports du débat sur les quartiers à énergie positive («Positive Energy Districts<sup>10</sup>»). Des concepts, des processus, des mesures et des conditions-cadres doivent être analysés, développés et testés dans ce cadre.

En outre, des concepts d'adaptation au changement climatique sont nécessaires pour intégrer l'aspect de la résilience dans la conception des bâtiments, des sites et des quartiers en relation avec l'évolution mondiale du climat et avec les microclimats locaux qui se forment dans l'environnement urbain (p. ex. effet d'îlot de chaleur urbain).

### **Bâtiments**

La baisse conséquente de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> des immeubles existants est un grand défi économique majeur; pour le relever, il faut recourir à toutes les mesures d'optimisation possibles dans le domaine du bâtiment. En cas de rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment, à partir d'un certain degré d'amélioration, les coûts augmentent progressivement avec le nombre d'unités d'énergie supplémentaires épargnées (pour l'heure, les

<sup>10</sup> Objectif 3.2 du Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (PLAN SET)

modèles de prise en compte des coûts externes ne revêtent pas un caractère obligatoire). Si d'autres mesures respectueuses de l'environnement permettent d'obtenir un même gain d'efficacité et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> qui en résulte, la logique économique veut que l'on investisse dans des mesures ayant des coûts marginaux plus bas.

Pour pouvoir tirer parti de ces potentiels, il faut développer des systèmes de rénovation des bâtiments qui soient à la fois financièrement abordables et énergétiquement efficaces, des instruments de conseil et de planification simples et efficaces ainsi que des processus de construction efficaces. Des concepts à prix avantageux et affichant une solide performance sont également requis pour la ventilation des logements et les autres installations techniques du bâtiment. De plus, il convient d'examiner et de démontrer le potentiel d'une modélisation numérique des bâtiments, basée sur des données, à l'échelle de toute la chaîne de création de valeur.

Pour la construction de nouveaux bâtiments, la recherche porte en priorité sur les besoins énergétiques ainsi que sur les émissions de polluants et de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie du bâtiment, y compris les besoins dans le domaine de l'énergie grise et les émissions grises de gaz à effet de serre qui en découlent. La modélisation des données du bâtiment (Building Information Modeling, BIM) permet un calcul efficace et précis de ces indicateurs, lesquels servent de base à l'optimisation économique et technique.

La diminution de la consommation d'énergie liée à l'exploitation nécessite des technologies et des systèmes permettant une réduction substantielle des déperditions énergétiques en même temps que la production d'énergie au moyen de l'enveloppe du bâtiment, tout en préservant la diversité architectonique. Des concepts destinés à une exploitation optimale sont par ailleurs indispensables pour éviter un écart de performance énergétique et pour faciliter cette exploitation.

La convivialité de la domotique représente un élément central et nécessite de nouvelles approches permettant de tenir compte du comportement et des besoins des utilisateurs dans le cadre de l'exploitation du bâtiment. Les possibilités offertes par la modélisation des données du bâtiment pour la gestion des installations restent à démontrer, tandis que le recours à l'intelligence artificielle (IA) et à l'apprentissage automatique (machine learning) pour optimiser l'exploitation doit encore être étudié sur le plan scientifique. Il convient d'examiner si les enseignements qu'on peut en tirer permettront d'élaborer de nouvelles approches destinées à la rénovation des bâtiments.

De manière générale, les bâtiments doivent être adaptés aux futurs besoins en matière de confort et d'espace, autrement concilier flexibilité d'utilisation et efficacité des ressources. Des technologies et processus novateurs peuvent y contribuer. Pour réduire autant que possible les flux de matériaux, il faut élaborer des indicateurs, des stratégies et des instruments appropriés et privilégier les cycles fermés dans la gestion des matériaux.

La recherche doit porter, pour tous les types de bâtiments, sur des concepts innovants de vitrage, de fenêtres et d'éléments de façade qui présentent des propriétés améliorées et modifiables, notamment en ce qui concerne les propriétés de transmission de la lumière, l'apport et le stockage de la chaleur et les gains d'énergie, et qui permettent en hiver comme en été d'obtenir un climat ambiant optimal en réduisant au minimum les besoins énergétiques. De même, la recherche devrait fournir de nouvelles solutions d'isolation thermique compactes, financièrement abordables, énergétiquement efficaces et respectueuses de l'environnement qui répondent aux exigences esthétiques et architectoniques.

### **Technique du bâtiment**

De nos jours, les bâtiments non seulement consomment de l'énergie, mais ils en produisent également à partir de sources renouvelables. Ils assument donc un nouveau rôle au sein du système énergétique. L'intégration d'accumulateurs thermiques et électriques au

niveau local gagne en importance afin que les bâtiments puissent contribuer à la stabilité du réseau. Un accumulateur électrique dans le secteur du bâtiment sert principalement à stocker à court terme de l'énergie renouvelable produite localement, tandis qu'un accumulateur thermique permet de stocker de l'énergie sur différentes échelles de temps. Grâce au couplage de plusieurs secteurs, les accumulateurs thermiques saisonniers peuvent contribuer à soulager le réseau électrique en hiver notamment.

À l'avenir, la forme d'énergie et la technologie de stockage utilisées dans les bâtiments seront déterminées indépendamment du secteur; elles dépendent néanmoins fortement de l'application spécifique et de l'exergie. Dans tous les cas, l'analyse du cycle de vie doit s'appuyer non seulement sur des technologies prometteuses, mais également sur des concepts d'intégration et d'exploitation efficaces, fiables et financièrement abordables.

Les technologies visant à produire de l'énergie (thermique, électrique) à partir de sources renouvelables en mettant à profit le bâtiment et à utiliser les rejets de chaleur doivent être perfectionnées pour devenir plus rentables. L'intégration architectonique, le développement d'éléments actifs multifonctionnels dans l'enveloppe du bâtiment et la réduction des coûts revêtent une importance particulière en la matière. De façon plus générale, il convient d'améliorer la standardisation, les processus de construction correspondants et la fiabilité de ces technologies.

Les installations locales de fourniture d'énergie doivent devenir «plus intelligentes»: il faudrait généraliser le recours aux solutions qui vont du monitoring local à l'intégration dans des systèmes supérieurs de gestion de l'énergie au niveau du bâtiment, du quartier, du site, de la ville et de la région en passant par une surveillance du fonctionnement, des diagnostics automatisés et standardisés et des alertes aux gestionnaires. Il faut en particulier optimiser la consommation propre (avec ou sans intégration de l'électromobilité) en tenant compte des besoins du réseau<sup>11</sup>.

Des technologies performantes de pompes à chaleur destinées au chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire soutiennent la transition écologique qui a cours dans la fourniture d'énergie pour les bâtiments. Elles sont souvent l'une des conditions pour couvrir par des sources renouvelables la consommation d'énergie des bâtiments énergétiquement efficaces. En l'espèce, les défis concernent surtout leur utilisation dans les bâtiments existants dans le cadre d'une rénovation énergétique. Des études approfondies sont également nécessaires pour déterminer les opportunités et les risques liés à l'exploitation du sous-sol (notamment dans les zones de protection des eaux souterraines) avec différentes technologies de production d'énergie telles que des systèmes de sondes géothermiques, des puits dans la nappe phréatique, les eaux thermales, etc. pour chauffer ou refroidir à différentes échelles (bâtiments, quartier, ville).

Les installations de couplage chaleur-force (installations CCF) comme les piles à combustible pourraient être utilisées de plus en plus fréquemment pour tendre vers un parc immobilier climatiquement neutre. Des solutions financièrement abordables et neutres en termes d'émissions contribuant à cet objectif doivent être identifiées.

Les installations de préparation de l'eau chaude sanitaire doivent désormais répondre à des exigences accrues afin de prévenir tout risque de légionellose. Les systèmes doivent être novateurs et énergétiquement efficaces et, en plus, permettre de répondre à cette exigence. Les systèmes innovants appelés à voir le jour devront remplir ces deux conditions.

La fréquence des périodes caniculaires tendant à augmenter, le besoin en froid devrait progresser à l'avenir dans le secteur du bâtiment. Un réglage plus fin des installations de refroidissement sera nécessaire, ce qui pose des exigences supplémentaires pour assurer une exploitation efficace en charge partielle. Par ailleurs, les immeubles d'habitation en zone urbaine présentent un besoin de froid accru en raison du climat local et des îlots de chaleur ponctuels. Pour éviter l'utilisation incontrôlée d'appareils inefficaces affectant l'espace

<sup>11</sup> Cf. également la notion de contribution à la stabilité du réseau à la section «Sites et quartiers».

extérieur (p. ex. climatiseurs bibloc), il convient d'examiner les potentiels, les concepts et les technologies permettant un refroidissement passif et actif énergétiquement efficace, respectueux des ressources et optimisé en termes de coûts, y compris le raccordement d'accumulateurs thermiques (chaud/froid) et le recours à des installations de protection solaire.

Les recherches doivent porter sur des solutions innovantes utilisant les technologies du domaine des TIC et de l'automatisation, du comptage, du pilotage et du réglage, permettant de surveiller et de réguler la consommation d'énergie du bâtiment, c'est-à-dire de coordonner la consommation interne de l'énergie produite dans et sur le bâtiment, le stockage technique et structurel spécifique au bâtiment ainsi que la mise en réseau de ce dernier. La disponibilité de capteurs et d'éléments de pilotage à prix abordables constitue un puissant moteur de l'innovation.

### **Être humain, marché, politique**

Dans le cadre de la priorité thématique «Travail et habitat», il convient d'examiner les possibilités d'accroître la transformation du parc immobilier et d'accroître le taux de rénovation. Il faut étudier l'acceptation des nouvelles technologies, des nouveaux concepts, processus et modèles par les investisseurs et les utilisateurs, ainsi que la façon de surmonter d'éventuels obstacles.

De plus, il convient d'analyser les motivations et les incitations qui peuvent encourager les propriétaires fonciers et d'autres acteurs<sup>12</sup> à se mettre en réseau (électricité, chauffage, gaz), tous secteurs confondus. Il est également nécessaire d'observer comment les avantages et les bénéfices tirés de la mise en réseau sont répartis et de réfléchir aux critères de répartition.

Les pouvoirs publics devraient examiner l'élaboration d'approches régionales destinées à approvisionner les bâtiments en énergie en utilisant des biens publics, par

exemple en cas de géothermie de faible profondeur (nappe phréatique, sondes géothermiques à une profondeur inférieure à 500 mètres) et de rejets de chaleur (installations d'incinération des ordures ménagères, installations de traitement des eaux usées, zones industrielles, etc.).

L'interaction entre les comportements des utilisateurs et les technologies utilisées devrait être optimisée, la technique devant encourager un comportement judicieux de la part des utilisateurs. Dans ce domaine, l'accent est mis sur les solutions de domotique bénéficiant d'une grande acceptation grâce à de nouvelles approches qui tiennent compte de la sphère privée et des exigences de sécurité, sur de nouveaux concepts permettant une utilisation flexible et sur des interfaces appropriées entre le bâtiment et les utilisateurs.

La réalisation de solutions énergétiques en réseau, décentralisées et fondées sur des sources renouvelables, pour des sites ou des quartiers comprenant plusieurs propriétaires et acteurs, est un défi complexe à relever. Il convient d'étudier et d'évaluer des modèles prometteurs pour la définition des organismes responsables aussi bien que pour les processus (participatifs) destinés au développement de l'acceptation, aux démarches et à la prise des décisions pendant la phase de conception et pendant l'exploitation. Les résultats permettront de définir les conditions-cadres des processus de planification et de conseil.

À cela s'ajoutent des considérations socio-économiques, à savoir qui, des gestionnaires de réseau, des propriétaires fonciers ou des producteurs d'énergie, est le plus à même d'utiliser et d'exploiter les infrastructures énergétiques critiques. Les recherches devraient porter en particulier sur les approches et les concepts généraux qui s'inscrivent dans un monde numérique<sup>13</sup> pour en déduire des recommandations d'action à l'intention notamment des milieux politiques, et permettre l'élaboration de modèles commerciaux.

# Mobilité

«Une mobilité exempte d'émissions qui répond aux exigences et aux besoins de la société et de l'économie.»

Eu égard à la demande croissante, la recherche sur la mobilité permet de mettre en œuvre les technologies, les solutions et les connaissances requises pour proposer une mobilité économe, très efficace et appropriée.

La mobilité désigne le déplacement physique de personnes et de biens grâce à un système de transport cohérent par voie terrestre, par bateau ou par avion. Notre société influe fortement sur le moment et la manière dont nous nous déplaçons ainsi que sur les endroits où nous nous rendons. Le défi consiste donc à proposer un système de transport qui réponde aux besoins de la société tout en respectant les objectifs de la politique climatique et énergétique. De plus, nous sommes confrontés à une demande croissante, car la société exige que toutes les franges de la population et de l'économie puissent accéder à un système de transport étendu et financièrement abordable. Cela engendre indéniablement des conflits d'intérêts. Par exemple, si l'on vise une mobilité énergétiquement efficace et exempte d'émissions, le transport aérien doit également contribuer à la réduction des émissions polluantes sans restreindre son accès à une large population.

Rien qu'au niveau national, la mobilité constitue un système très complexe d'offre et de demande. Pour concrétiser la vision d'une mobilité exempte d'émissions qui satisfait les besoins et les exigences de la société, il faut comprendre dans le moindre détail les interactions en présence. En plus des travaux entrepris pour améliorer les composants et les sous-systèmes sur le plan technique, la recherche sur la mobilité a besoin d'une approche systémique qui prend en compte les intérêts divergents des groupes de participants. Une stratégie équilibrée est capitale pour organiser le futur système de mobilité. Cela requiert aussi une interdisciplinarité, car la mobilité est liée non seulement à l'énergie, mais également aux questions climatiques, à l'aménagement du territoire et des zones urbaines ainsi qu'à d'autres domaines de recherche. En outre, les aspects non techniques doivent davantage être considérés (sciences humaines et sociales), notamment pour mieux comprendre le comportement des utilisateurs.

Les émissions de CO<sub>2</sub> et les autres rejets dans l'atmosphère peuvent être réduits par l'abaissement et l'optimisation de leur intensité énergétique en tenant compte d'aspects tant techniques que sociaux et humains. L'offre est typiquement abordée sous l'angle technique, comme par exemple la diminution de la consommation d'énergies fossiles dans le trafic lourd de marchandises et le transport aérien, tandis que les mesures relatives aux sciences humaines et sociales influent sur la demande, notamment en proposant aux utilisateurs un choix modal judicieux. Dans tous les cas, ces options doivent être mises en pratique du côté de l'offre et de la demande (aspect systémique). Les trois priorités suivantes ont été identifiées pour la recherche sur la mobilité de demain: une approche systémique, une meilleure prise en compte des aspects sociaux et humains ainsi que le développement continu des solutions techniques.

## **Approche systémique de la mobilité**

La mobilité doit être appréhendée de manière interdisciplinaire sous l'angle de domaines de recherche différents. Par exemple, son étude dans le contexte de la civilisation moderne tiendra compte de priorités telles que la politique climatique, l'aménagement du territoire et les avancées numériques dans la société et dans l'économie. Contrairement à l'optimisation distincte de ces domaines, une perspective globale pourra donner naissance à des solutions entièrement nouvelles, qui sont nécessaires pour atteindre les ambitieux objectifs énergétiques et climatiques dans le secteur de la mobilité. Par exemple, une approche combinée pour le transport de personnes et de marchandises pourrait être plus efficace que l'optimisation séparée de ces deux domaines. Cette perspective systémique permet d'identifier les risques et les effets indésirables (p. ex. effets de rebond et émissions grises) qui découlent de l'interaction entre les aspects techniques, d'une part, et les aspects sociaux et humains, d'autre part. La coordination internationale ainsi que le dia-

logue avec l'économie et les pouvoirs publics doivent être intensifiés lors de l'élaboration, l'expérimentation et la mise en œuvre de nouvelles solutions pour maximiser l'impact de la recherche sur la mobilité. Concrètement, l'approche systémique dans la recherche devrait bénéficier en premier lieu à l'économie nationale afin que les solutions définies répondent aux besoins de la Suisse et du système de mobilité dans son ensemble. Un échange accru avec les milieux économiques et les autorités locales permettra à ces interlocuteurs de mieux comprendre les effets et les avantages de technologies et solutions potentiellement disruptives telles que l'électromobilité, la conduite autonome et «Mobility as a Service» (MaaS).

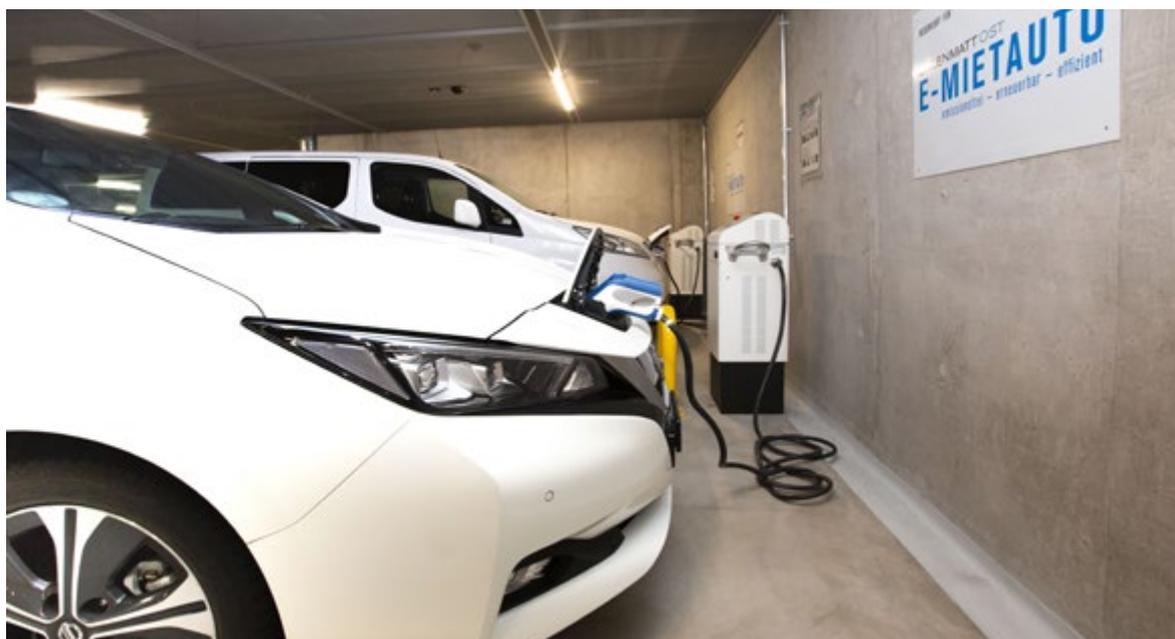
#### **Importance des aspects sociaux et humains**

Les aspects liés à la demande en mobilité présentent un important potentiel encore inexploité d'accroître l'efficacité des ressources (p. ex. comportement social et attitude par rapport à la mobilité). Les aspects sociaux et humains liés à la mobilité devraient donc être davantage pris en compte lors de la définition des sujets de recherche. Par exemple, l'accès élargi à une plus grande quantité de données peut contribuer à comprendre des facteurs microéconomiques tels que le comportement des utilisateurs et la manière d'influen-

cer les décisions de mobilité sans engendrer un effet de rebond. À partir de ces données, des stratégies et des modèles commerciaux destinés à des offres de mobilité alternatives (p. ex. MaaS) peuvent être définies tout en prenant en compte les exigences techniques, humaines et sociales appropriées pour leur mise en œuvre. En outre, les chercheurs en sciences humaines et sociales sont invités à consulter le chapitre «Économie, société et mesures politiques», dont de nombreux éléments sont pertinents pour la mobilité.

#### **Progrès technique continu**

Des solutions techniques appropriées sont nécessaires pour pouvoir implémenter les nouveaux concepts de mobilité qui résultent de l'approche systémique et des travaux relatifs aux sciences humaines et sociales. Leur élaboration devra être de plus en plus interdisciplinaire. Ainsi, il faudra définir des concepts pour le couplage des secteurs et les systèmes de stockage très performants afin de concilier la demande croissante de mobilité et la transition du système énergétique suisse, cette dernière passant notamment par la décarbonisation de la production d'énergie et de l'industrie manufacturière. La mise en œuvre d'offres de mobilité et de modèles commerciaux alternatifs requerra des TIC qui exploitent les atouts de la numérisation croissante. Il



faudra trouver des solutions au niveau des véhicules et des infrastructures qui permettent une large utilisation des carburants d'origine renouvelable, tant dans les piles à combustible que dans les moteurs à combustion classiques, et ce tant dans le trafic lourd de marchandises que dans le transport par bateau ou par avion. Eu égard à son grand potentiel de réplification, l'amélioration de l'efficacité des moteurs reste un levier essentiel pour réduire les émissions polluantes. Cela vaut également pour les véhicules proprement dits et les progrès concernant les structures plus légères, les matériaux, l'aérodynamisme et la résistance au roulement contribuent à diminuer sensiblement la consommation d'énergie. De plus, les questions techniques résultant de nouveaux concepts de véhicules (p. ex. drones) doivent être examinées.

### Priorités à moyen et long termes

Les domaines qui jouent un rôle important dans la recherche sur la mobilité peuvent être définis sur la base des trois priorités susmentionnées (approches plus systémiques, prise en compte des aspects sociaux et humains ainsi que développement technique continu).

#### **La mobilité en tant que système global**

L'accent doit être davantage mis sur la mobilité en tant que système global et sur ses interactions avec plusieurs autres domaines économiques et sociaux. La mobilité englobe tous les modes de transport de personnes ou de marchandises sur la route, le rail, l'eau et dans les airs. Ces modes de transport ne doivent pas être considérés isolément, mais comme les éléments d'un système global interconnecté. Il faut donc tenir compte des interfaces pertinentes, par exemple avec le système électrique et le secteur du bâtiment ou avec l'aménagement du territoire. À cet égard, il convient d'exploiter le potentiel énergétique du couplage des secteurs et d'élaborer des solutions techniques et des modèles commerciaux (p. ex. MaaS) appropriés. Cette approche globale peut donner naissance à de nouveaux concepts de mobilité améliorés qui associent, par exemple, des solutions pour le transport de personnes et de marchandises. Il est primordial de comprendre comment les nouvelles technologies (p. ex. véhicules autonomes) interagissent avec les technolo-

gies existantes ou de savoir quelle infrastructure est nécessaire et sous quelle forme, notamment pour mettre en place un système national intelligent de recharge rapide des véhicules électriques. La transformation du système de mobilité requiert un cadre réglementaire adapté. La recherche doit donc également fournir les bases théoriques et pratiques nécessaires pour définir des instruments politiques opportuns (p. ex. mesures fiscales et incitatives). Ces informations comprennent, par exemple, l'évaluation des avantages écologiques et économiques d'une innovation au niveau du système ou d'un composant.

#### **Élaboration de nouveaux concepts de mobilité intelligents grâce aux TIC**

Les TIC modernes et, en particulier, la numérisation peuvent être des moteurs décisifs pour élaborer des concepts de mobilité innovants et intelligents, notamment lorsque ceux-ci dépendent du progrès technique. Les véhicules routiers autonomes, par exemple, pourraient révolutionner le secteur de la mobilité. La recherche devrait dès lors se concentrer sur l'élaboration des solutions techniques nécessaires et examiner l'impact potentiel de ces véhicules sur des modèles commerciaux viables, les effets de rebond éventuels ou la réglementation requise. La numérisation peut aussi engendrer de nouveaux systèmes de mobilité centrés sur le comportement des utilisateurs et la gestion du trafic. Les TIC sont nécessaires pour traiter des volumes de données importants, définir des modèles et effectuer des prévisions ainsi qu'obtenir des renseignements détaillés sur l'utilisation des ressources. En outre, des analyses approfondies permettent d'identifier les problèmes découlant des nouveaux systèmes de mobilité fonctionnant à grande échelle, qui représentent une catégorie à part entière, et de fixer les priorités pour leur organisation future. Dans ce contexte, l'importance des aspects juridiques de la collecte et de la détention de données ira croissant dans les années à venir.

#### **Comportement des utilisateurs, changement sociétal, aménagement du territoire, économie et réglementation**

La mise en œuvre réussie de nouveaux systèmes de mobilité globaux implique non seulement de nouvelles possibilités techniques, mais également une meilleure compréhension du comportement des utilisateurs. La

réalisation d'innovations techniques devrait donc s'accompagner d'un suivi approfondi de la mobilité sur un échantillon représentatif de la population. Les données ainsi récoltées permettent de prévoir les besoins et les comportements des utilisateurs et de leur proposer les modes de transport de personne ou de marchandises les plus adaptés. Des informations sur le choix adopté peuvent, quant à elles, aussi être générées. Concernant les transports publics, il faudra étudier les possibilités de répartir équitablement le flux des passagers, notamment en reportant ces flux des heures de pointe aux heures creuses, et définir de nouveaux concepts de «porte à porte». Ces études devront également tenir compte des aspects liés à l'aménagement du territoire, car ils sont décisifs pour le secteur de la mobilité et sont liés à d'autres domaines pertinents comme l'environnement architectural (y c. les bâtiments et l'infrastructure).

#### **Stockage de l'énergie et remplacement des combustibles fossiles**

Pour décarboniser substantiellement la mobilité, son intégration réussie dans le paysage énergétique suisse en pleine mutation, qui affiche un couplage croissant des secteurs, est essentielle. Il s'agit de trouver des solutions techniques et économiquement réalisables, d'une part, pour le stockage de l'énergie à court et à long termes, en particulier pour compenser les fluctuations de la production d'électricité d'origine renouvelable, et, d'autre part, pour le remplacement des carburants fossiles par des agents énergétiques renouvelables. L'électromobilité requiert des solutions financièrement abordables et performantes pour stocker l'électricité à bord du véhicule et probablement également au niveau de l'infrastructure. Il est important d'accroître la densité d'énergie et de puissance ainsi que la durée de vie des batteries, tout en réduisant les coûts. À cela s'ajoutent des mesures destinées à évaluer et à diminuer l'impact environnemental des batteries (p. ex. analyses des cycles de vie et des concepts de réutilisation). La recherche peut, en collaboration avec l'industrie, contribuer à atteindre ces objectifs. En outre, il faudra définir des concepts

appropriés pour les agents énergétiques chimiques d'origine renouvelable. Des carburants gazeux ou liquides d'origine renouvelable seront nécessaires dans un avenir proche au niveau du transport de marchandises (par voie terrestre, par bateau ou par avion) et du trafic aérien en général. Il convient de développer et de réaliser des solutions pour la production, la distribution et l'utilisation énergétiquement et écologiquement pertinentes de ces carburants.

#### **Efficacité des véhicules**

Les efforts visant à obtenir des véhicules plus efficaces (voitures, bateaux, avions, véhicules autonomes, etc.) – en ce qui concerne tant le véhicule proprement dit que sa propulsion et ses équipements supplémentaires – restent prioritaires. L'effet multiplicateur lors de la commercialisation de nouvelles générations de véhicules, qui ont été améliorés sur le plan technique et intègrent des innovations, permet de réduire à grande échelle la consommation de carburant. À court et à long termes, ces efforts continueront de porter principalement sur des solutions entièrement électriques destinées à tous les types de véhicules. Lorsqu'une électrification complète semble difficilement réalisable (p. ex. transport par bateau ou par avion), des approches hybrides devraient être examinées, tout en poursuivant une plus grande efficacité énergétique ainsi que la baisse des émissions polluantes. Quelle que soit la technique de propulsion, il conviendrait également d'étudier des solutions basées sur des véhicules plus légers et sur l'utilisation de nouveaux matériaux respectueux de l'environnement. Les améliorations techniques se concrétisent généralement dans les véhicules neufs, mais des mesures appropriées visant à diminuer la consommation d'énergie et les émissions polluantes devraient aussi être recherchées pour le vaste parc de véhicules qui est déjà en circulation et qui le restera encore pendant quelques années.

# Systemes énergétiques

«Une énergie propre et fiable, à prix avantageux, disponible en quantité suffisante et en temps opportun.»<sup>14</sup>

Le futur système énergétique sera rapidement et dans une large mesure décentralisé. Il reposera sur des sources d'énergie renouvelables. De nouvelles formes d'intégration des systèmes deviendront nécessaires et seront facilitées par la numérisation et par de nouveaux modèles commerciaux. Des travaux de recherche approfondis sur toutes les composantes du système énergétique, sur l'intégration des systèmes et sur la résilience face aux facteurs externes constituent la base d'une transition énergétique à la fois sûre et financièrement abordable.

Les systèmes énergétiques modernes sont actuellement soumis à de profonds changements, car les infrastructures énergétiques doivent respecter des exigences contradictoires. Ils doivent, en effet, proposer des prestations sûres et fiables à un nombre croissant de clients, tout en respectant les principes d'une utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que ceux de la protection du climat et de l'environnement. Cette dernière exigence entraîne des modifications importantes dans les systèmes énergétiques, qui doivent utiliser de manière déterminante des sources d'énergie renouvelable. Il est généralement admis que les énergies renouvelables devront être disponibles en grande quantité et être diversifiées pour couvrir la majeure partie du besoin en énergie et que leur intégration dans l'infrastructure d'approvisionnement existante dépendra de l'association réussie de processus spécifiques, de nouvelles technologies et de solutions appropriées. Plusieurs communautés de chercheurs travaillent actuellement d'arrache-pied pour élaborer, étudier et valider de nouvelles méthodes de planification, d'exploitation et de pilotage des systèmes énergétiques de demain.

Il est également essentiel d'identifier les principaux moteurs du développement des systèmes énergétiques modernes: une participation accrue de la société, les incitations politiques en vue d'une réduction des rejets de CO<sub>2</sub>, la vaste intégration des énergies renouvelables dans les réseaux d'énergie, les infrastructures énergétiques vieillissantes et, tout simplement, le progrès technique (y c. l'information et la communication).

Bien que l'expression «système énergétique» désigne de manière générale l'ensemble du système, nombre de ses composants (y c. les bâtiments, la mobilité et l'industrie) sont présentés ci-après. Le présent chapitre est consacré à l'offre, aux technologies correspondantes, aux interactions entre les différents agents énergétiques, aux techniques de transformation et aux réseaux d'énergie.

Par définition, le contenu de ce chapitre est étroitement lié à celui des autres chapitres, en particulier ceux concernant la demande (bâtiments et mobilité) ainsi que les aspects socio-économiques, réglementaires et politiques.

## Objectifs

La Stratégie énergétique 2050 fixe des valeurs indicatives claires pour le secteur de l'électricité: d'ici à 2035, l'objectif actuel prévoit une production annuelle de 11,4 térawattheures (TWh) pour les agents énergétiques renouvelables (hors force hydraulique) et de 37,4 TWh pour la force hydraulique. La valeur indicative à court terme (2020) relative aux énergies renouvelables (hors force hydraulique), à savoir 4,4 TWh, sera vraisemblablement dépassée, mais la valeur à moyen terme (2035) est près de trois fois plus élevée pour une période de 15 ans seulement. Le photovoltaïque devra donc contribuer sensiblement à la réalisation de cet objectif en utilisant les technologies qui sont aujourd'hui largement disponibles.

<sup>14</sup>NREL, Energy System Integration Facility (ESIF), <https://www.nrel.gov/esif/>

Les travaux de recherche exposés dans ce chapitre jettent les fondements de l'augmentation substantielle de la part des sources d'énergie propres. Dans la mesure du possible, ils contribueront à long terme à un système énergétique totalement exempt d'agents fossiles et à la réalisation des objectifs de l'Accord de Paris conclu en 2015 en vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

Enfin, la recherche énergétique systémique ne saurait se limiter à la seule échelle nationale. La recherche approfondie sur les systèmes énergétiques doit traditionnellement respecter des normes de recherche internationales et contribuer ainsi à la prééminence mondiale de la Suisse en tant que pôle de recherche et d'innovation. Cela renforce l'économie helvétique, celle-ci exportant des biens et des services à grande valeur ajoutée.

## Priorités à moyen et long termes

### **Intégration des systèmes énergétiques**

Pendant longtemps, la recherche sur les systèmes énergétiques s'est concentrée sur certaines technologies afin d'augmenter l'efficacité de la transformation et de réduire les coûts de production de l'électricité, de la chaleur ou des carburants. Les technologies de transformation les plus récentes ayant enregistré des progrès majeurs au cours de la dernière décennie, il convient de nous intéresser également à d'autres indicateurs que l'efficacité et les coûts. La disponibilité, la souplesse d'utilisation et la durabilité font désormais aussi partie des principaux indicateurs technologiques. Il convient de souligner que la mutation en cours du système énergétique dans son ensemble est beaucoup plus complexe et exigeante que le simple remplacement de certaines technologies de production. En particulier, la variabilité temporelle et locale de l'offre et de la demande sera sensiblement plus pertinente à l'avenir, lorsque les sources décentralisées d'énergie renouvelable auront considérablement gagné en importance et représenteront à long terme l'épine dorsale de ce système.

particulier en ce qui concerne leurs synergies, toutes les formes de stockage, leur dimension temporelle et leur volume. La production et le stockage de plus en plus diversifiés et variables de l'énergie sont synonymes de chances et de défis pour la planification, l'exploitation, la flexibilité et les services supplémentaires. La différence jour/nuit de l'offre et de la demande peut être appréhendée grâce à des accumulateurs à court terme et à une gestion de la demande, tandis que les fluctuations saisonnières sont plus complexes et requièrent le couplage de plusieurs secteurs, notamment l'électricité, la chaleur et le gaz (y c. l'hydrogène). Le passage progressif à l'électromobilité accentuera encore plus ces défis.

Par conséquent, le besoin de recherche sur les réseaux d'électricité et les réseaux de chaleur à distance, sur le couplage des secteurs et sur le stockage augmente fortement. Il faudra privilégier une approche systémique au lieu de se concentrer sur des technologies spécifiques. Nombre de solutions devront être développées plus avant et évaluées au moyen d'une analyse systémique appropriée.

### **Numérisation**

Les systèmes énergétiques intelligents ne sont en soi pas nouveaux. Les technologies numériques et leur vaste utilisation confèrent cependant de nombreux atouts et s'accompagnent aussi parfois de défis dans l'élaboration, l'exploitation et la gestion des systèmes et réseaux d'énergie de demain.

L'un des principaux atouts de la numérisation dans le secteur de l'énergie devrait se concrétiser au niveau de la gestion de l'efficacité et de la sécurité d'exploitation des différents futurs systèmes énergétiques, qui seront fortement décentralisés, tant au niveau de la production, du stockage, de la transformation que de la consommation.

Nombre de tendances numériques actuelles (big data, modèles et formes de gestion basés sur des données, plateformes numériques, intelligence artificielle, machine learning, etc.) offrent aux systèmes énergétiques et à leurs acteurs de nouvelles opportunités techniques, entrepreneuriales et commerciales.

Les solutions concrètes et les effets des avancées numériques actuelles sur la planification, l'élaboration,

l'exploitation et la gestion des futurs systèmes énergétiques sont toutefois si vastes que de nombreux sujets n'ont encore fait l'objet d'aucune recherche.

S'y ajoutent des sujets sensibles tels que la cybersécurité de ces systèmes et les aspects relatifs à la protection des données, qui constituent une priorité de la recherche.

Enfin, la numérisation et la forte croissance subséquente du volume de données entraînent une hausse de la consommation d'énergie. Cet élément doit être évalué régulièrement et des stratégies visant à économiser l'énergie doivent être définies.

### **Modélisation de scénarios et analyse systémique**

Les profonds changements en cours dans le système énergétique se traduisent par de nombreuses modifications au niveau de la production, de la transformation, du transport et de la consommation d'énergie. Il y a beaucoup de possibilités techniques, et elles nécessitent une vaste compréhension systémique. Dans cet environnement complexe, la recherche portant sur la modélisation de scénarios et l'analyse systémique, qui doivent tenir compte des ressources ainsi que d'aspects techniques, sociaux ou économiques à différents niveaux spatio-temporels, joue un rôle de plus en plus important pour trouver des solutions et options optimisées destinées au système énergétique de demain. Pour obtenir des résultats aussi solides que possible, il faut comparer plusieurs modèles et scénarios et vérifier leur sensibilité par rapport à différentes conditions. Ces travaux de recherche devraient également inclure une évaluation (benchmark) régulière du progrès technique et économique des différentes technologies et de leur impact sur l'ensemble du système, ainsi qu'une évaluation systématique des risques inhérents à ces dernières et des éventuelles modifications disruptives dans le système énergétique.

### **Développement durable**

L'évolution continue du système énergétique implique une utilisation soutenue des nouvelles technologies de production ou de stockage ainsi qu'un couplage croissant des différents secteurs. Les effets de ces vastes changements sur le développement durable doivent être évalués et optimisés à tout point de vue (res-

sources, matériaux, processus, production, énergie grise et émissions de gaz à effet de serre, impact social et économique ou aspects de l'aménagement du territoire).

### **Énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables constituent déjà l'un des piliers du secteur de l'électricité et de la chaleur dans le système énergétique suisse, mais elles devront assumer un rôle sensiblement plus important dans le futur approvisionnement en énergie. Outre la force hydraulique, le photovoltaïque fournira de loin la contribution la plus grande à l'approvisionnement en électricité.

Les différentes technologies doivent encore faire l'objet de vastes travaux de recherche spécifiques pour permettre de combiner de manière optimale et économique la production d'électricité, de chaleur et (à long terme) de carburants.

Concernant la force hydraulique, une technologie désormais éprouvée, la recherche devrait porter principalement sur le maintien et sur l'augmentation de la production d'électricité, tout en considérant l'évolution en cours dans l'environnement opérationnel: régime hydrologique (p. ex. cadre légal, fonte des glaciers, régime des précipitations), besoin de flexibilité à court terme en cas d'usure importante et passage à une production hivernale accrue. L'évaluation des effets de ces changements d'exploitation sur la qualité de l'eau et le régime d'écoulement implique d'autres travaux détaillés.

Dans le photovoltaïque, la recherche sur les cellules solaires et modules ultraperformants doit se poursuivre au niveau technique. Pour ce qui est des produits et des systèmes, il conviendra de tenir compte de l'énorme potentiel du photovoltaïque et de son intégration dans les bâtiments, les infrastructures, la mobilité et le système énergétique dans son ensemble. En plus de l'efficacité et des coûts, il faudra aussi considérer l'esthétique et la multifonctionnalité dans le développement du photovoltaïque. Les processus industriels et une production de pointe resteront des objectifs de recherche importants. L'intégration du photovoltaïque dans le réseau électrique et, en cas de forte pénétration, dans le système énergétique égale-

ment est un thème transversal qui touche aussi d'autres domaines de recherche. Les analyses du cycle de vie et l'amélioration des prévisions relatives aux ressources solaires constituent aussi des sujets de recherche concomitante majeurs.

La bioénergie comprend une grande variété de processus de transformation qui utilisent plusieurs matières premières et déchets et permettent de nombreuses formes de consommation finale dans les domaines de la chaleur, de l'électricité, du gaz, des autres carburants et des substances chimiques. Le développement et l'amélioration de certaines chaînes de création de valeur, y compris les processus microbiologiques et thermochimiques ou leur combinaison, devraient se traduire par une transformation encore plus efficace et une meilleure valorisation des matières premières. La recherche sur le futur rôle de la biomasse dans le stockage de l'énergie, la climatisation et le couplage des secteurs devrait également être renforcée.

La géoénergie peut jouer un rôle important dans l'approvisionnement en chaleur ou en froid, dans les réseaux de chauffage à distance, dans la production d'électricité et dans le stockage. L'évaluation et la compréhension du sous-sol géologique, de son potentiel géothermique et des formes de raccordement possibles sont des domaines de recherche prioritaires. La recherche sur la géoénergie se consacre également aux techniques de pointe pour la stimulation et le forage. L'évaluation et la réduction des risques ainsi que la sécurité constituent des aspects particulièrement importants de la recherche en raison de la future utilisation de la géoénergie.

L'énergie éolienne est une technologie relativement éprouvée. Les aspects spécifiques à la Suisse (p. ex. givre) et les concepts alternatifs de turbine nécessitent néanmoins d'autres travaux de recherche. De plus, les prévisions de performance et les stratégies de contrôle avancées contribueront à optimiser la puissance des centrales.

L'énergie solaire présente, au-delà du photovoltaïque, un vaste potentiel d'applications à basse température pour la chaleur ainsi qu'à haute température pour la production d'électricité, pour les processus industriels et, à long terme, pour la production de carburants.

Dans ce domaine, la thermochimie solaire, la photoélectrochimie et la synthèse électrochimique des combustibles constituent des sujets de recherche fondamentale.

Les aspects liés au stockage de l'énergie sont pertinents si des volumes importants d'énergie solaire et éolienne sont injectés dans le système énergétique. Une consommation et une production souples sont uniquement possibles si des éléments de stockage viennent renforcer et flexibiliser le système énergétique, qui est encore rigide. Pour le moment, les accumulateurs à court terme servent principalement à surmonter les pics de consommation (peak shaving) et à fournir de la chaleur en été. Les questions de coûts et de fiabilité doivent être examinées pour rendre l'installation de ces dispositifs plus intéressante. À l'avenir, des systèmes de stockage à long terme seront nécessaires à grande échelle (en Suisse) pour réduire la dépendance vis-à-vis des importations énergétiques en hiver et le coût de l'électricité. Ce type de systèmes de stockage, dont le Power-to-X (p. ex. Power-to-Gas ou la combinaison de grands systèmes de stockage de la chaleur et de grandes pompes à chaleur), en est encore aux premiers stades de son développement, mais il sera essentiel pour réaliser les objectifs climatiques. Donner un rôle plus important au stockage permet d'accroître l'indépendance et la résilience du système énergétique.

### **Énergie et déchets nucléaires**

Il faut garantir une recherche réglementaire indépendante, à la pointe de la science et de la technique, pour conserver sur le long terme les normes de sécurité les plus élevées dans les centrales nucléaires suisses. Étant donné que la durée d'exploitation de ces dernières sera probablement étendue au-delà de 60 ans, leur sécurité dépendra de plus en plus des processus de vieillissement. Il faudra donc prouver que les centrales nucléaires sont protégées contre les accidents liés à leur architecture et présentent une marge de sécurité suffisante. De plus, l'accident de Fukushima et le lancement des tests de résistance au niveau européen ont engendré une vaste activité de recherche sur la gestion des incidents, sur le rééquipement au niveau des systèmes de sécurité et sur les combustibles résistants aux accidents. Toutes ces mesures requièrent des efforts de recherche permanents pour prouver leur

efficacité en termes de sécurité et pour pouvoir conserver en Suisse les sites cruciaux de la recherche nucléaire.

Quel que soit le rôle de l'énergie nucléaire dans le futur mix énergétique de la Suisse, la question du stockage sûr des déchets radioactifs doit être étudiée jusqu'à la réalisation complète d'un dépôt en couches géologiques profondes. La prochaine troisième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» doit permettre de trouver un site définitif d'ici à la fin de la décennie. Cela nécessite des infrastructures scientifiques pour accompagner les sondages géologiques et une modélisation informatique sophistiquée pour comprendre les processus géochimiques et mécaniques complexes de la roche d'accueil. Tout le processus de détermination du site doit être transparent et comprendre une évaluation précise des critères sociaux et psychologiques. Ce point est essentiel en vue d'une large acceptation de la solution retenue.

À l'avenir, la Suisse jouera également un rôle dans le développement de technologies permettant de disposer de réacteurs plus sûrs et innovants pour pouvoir continuer à donner son propre avis de spécialiste sur les technologies nucléaires de pointe d'autres pays. Pour ce qui est des nouvelles technologies utilisées

dans les réacteurs de quatrième génération et de leurs cycles de combustibles, il convient donc d'examiner régulièrement la sécurité nucléaire, la durabilité et les stratégies de réduction des déchets. Grâce à cette recherche permanente sur la quatrième génération dans le cadre d'organisations internationales telles qu'Euratom, l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), la Suisse peut défendre ses propres intérêts lors de l'élaboration de règles et de directives internationales sur la sécurité nucléaire. C'est la meilleure garantie pour continuer à faire entendre sa voix sur la scène internationale.

La recherche sur la fusion devrait se poursuivre dans la mesure où elle peut être financée dans le cadre d'activités multilatérales et n'interfère pas avec les fonds de recherche alloués à d'autres technologies énergétiques.

Toutes ces mesures contribuent à l'objectif suprême, à savoir maintenir et assurer une grande compétence nationale dans le domaine du nucléaire afin d'assurer une exploitation aussi sûre que possible des centrales nucléaires suisses bien au-delà des années 2040 ainsi qu'une gestion compétente de l'héritage nucléaire au cours des décennies suivantes.



*La recherche énergétique au niveau systémique est plus importante que jamais pour la décennie à venir: une gestion novatrice des réseaux d'énergie, l'intégration des systèmes, le couplage des secteurs et le stockage joueront un rôle essentiel pour accroître encore la pénétration des énergies renouvelables. Des travaux de recherche approfondis dans ces domaines permettront d'augmenter cette pénétration bien au-delà de la capacité actuelle du réseau de distribution. © Shutterstock*

# Processus industriels

Les processus industriels constituent des piliers d'une économie circulaire dans laquelle l'empreinte écologique des matériaux, d'énergie et des émissions sur l'ensemble du cycle de vie des produits et des services sont réduits au minimum.

La recherche permet de développer des procédés technologiques novateurs et des pratiques de gestion intelligentes qui font progresser l'efficacité des ressources dans l'industrie de sorte que la consommation des matériaux est réduite au minimum et que les besoins en énergie sont couverts par les sources d'origine renouvelable.

*La concrétisation de cette vision est parsemée de défis et d'opportunités pour les processus industriels:*

## **Économie circulaire**

Pour parvenir à «boucler la boucle» du cycle des matériaux, il faut commencer par une conception intelligente du produit qui vise à réduire la consommation d'énergie et de matières non seulement pendant ses phases de fabrication et d'utilisation, mais également à la fin de sa durée de vie. La réutilisation, le recyclage et la transformation des matériaux à l'échelle industrielle offrent de nouvelles possibilités de couplage des chaînes de gestion des déchets et d'approvisionnement en matériaux. La production durable de biomasse ou l'utilisation du carbone issu des processus émettant du CO<sub>2</sub> offrent d'autres alternatives au carbone d'origine fossile que l'on trouve dans les matières premières et les carburants.

Le remplacement de matériaux de base bien établis implique toujours la réorganisation des chaînes d'approvisionnement existantes. Dans de nombreux cas, cela se traduit par le passage de grands sites de production de masse à des entités plus petites et plus décentralisées, que ce soit pour récupérer les matériaux directement sur le lieu de leur utilisation ou pour recourir à la biomasse locale. Le fait de disposer de matières premières renouvelables mais aussi la proximité des clients favorisent la fabrication décentralisée, car la numérisation des chaînes d'approvisionnement permet de réaliser des produits sur mesure en plus petites quantités en conservant des stocks réduits et assurant davantage de souplesse pour la livraison.

Pour qu'ils soient rentables et écologiques, les processus de récupération intervenant à la fin de la vie du produit doivent pouvoir rivaliser avec la production de nouveaux matériaux en termes de qualité, de prix et d'efficacité. Les restrictions relatives à la qualité et à la disponibilité des matériaux, qui sont inhérentes aux cycles fermés des matériaux, nécessitent des processus industriels résilients pour garantir la qualité du produit fini quelle que soit celle des matériaux de base obtenus. De manière analogue, la tendance aux chaînes d'approvisionnement flexibles requiert des installations industrielles adaptables, qui sont bien intégrées dans les réseaux de fabrication numériques.

## **Énergies renouvelables**

Le secteur industriel affiche actuellement une faible part d'énergies renouvelables, principalement car les exigences des processus industriels en matière d'approvisionnement énergétique entravent fortement l'intégration de ces énergies. La fiabilité est primordiale, car tout dysfonctionnement dans l'alimentation en énergie peut non seulement affecter la productivité de l'installation, mais également mettre en péril la sécurité de cette dernière et la qualité des produits. Dans le cas de la chaleur industrielle, il ne suffit pas qu'elle soit disponible sur place; il faut aussi tenir compte de la température requise qui est fixée par le processus industriel.

Ces exigences du côté de la demande vont à l'encontre des schémas de production irréguliers et saisonniers des énergies éolienne et solaire ainsi que de la disponibilité et de la qualité de la bioénergie, de la

géothermie ou de la chaleur ambiante spécifiques au site. Il faut donc fréquemment des solutions spécifiques complexes (choix de la technologie, gestion de l'exploitation ou organisation du modèle commercial) pour couvrir la demande industrielle avec des énergies renouvelables. En général, une solution d'intégration est plus abordable financièrement lorsque les mesures d'efficacité énergétique sont prises en compte au préalable.

### **Approches systémiques en matière d'efficacité et de flexibilité**

L'efficacité énergétique et celle des matériaux sont étroitement liées, car la majeure partie de l'énergie est utilisée dans les chaînes industrielles de création de valeur pour traiter les matériaux dans le cadre de la production. De manière générale, la baisse de la consommation de matériaux dans un processus se traduit par une diminution des coûts de l'énergie ainsi que du volume des émissions et des déchets.

Intégrer les flux d'énergie et de matières au niveau local ou favoriser leur échange dans des hubs énergétiques décentralisés devrait apporter d'autres gains d'efficacité et de flexibilité lorsque les sites industriels sont reliés à des immeubles commerciaux ou d'habitation situés à proximité. Des méthodes sophistiquées d'intégration des processus jouent un rôle essentiel dans la réalisation de solutions optimales à l'échelle d'un site ou dans des systèmes régionaux. Les réseaux multi-énergies exploitent conjointement les réseaux destinés à l'électricité, au chauffage et au refroidissement à distance, aux carburants, à l'eau potable et aux eaux usées. L'énergie y est stockée, transformée et redistribuée de manière coordonnée.

L'intégration au niveau suprême du système conduit à un couplage des secteurs dans lequel la fourniture et l'utilisation de l'énergie sont liés par de nombreuses technologies de transformation et de stockage. En l'espèce, les processus industriels jouent un rôle majeur, car les producteurs et les consommateurs peuvent négocier non seulement de l'électricité et du chauffage, mais également des produits chimiques plateformes ou des carburants. Enfin, les solutions les

plus performantes engendreront des gains d'efficacité et de nouvelles applications industrielles pour l'utilisation des énergies renouvelables et fourniront également de nouvelles marges de manœuvre opérationnelles qui permettront à l'industrie de proposer des services de flexibilisation du réseau et d'accroître la productivité des installations.

### **La numérisation comme moteur de la transformation du secteur industriel**

Dans l'Internet des objets, des capteurs financièrement abordables et consommant un minimum d'énergie fournissent de nombreuses données sur les paramètres d'un processus, sur la puissance d'une installation et sur la qualité des matériaux. Ces données peuvent être envoyées en temps réel dans le monde entier, même dans des conditions difficiles. Cette surveillance à distance est un atout précieux pour le contrôle dynamique et prédictif des processus, une maintenance clairvoyante et une planification souple de la chaîne d'approvisionnement. Elle confère des avantages directs pour l'efficacité des ressources, la sécurité des processus, la qualité des produits, la productivité des installations et en matière de coûts.

Le calibrage rapide et fiable des modèles de processus grâce aux données collectées dans des conditions réelles clairement définies, et non selon des hypothèses, facilite la conception de processus plus solides et prévient le gaspillage des ressources ou des fonds générés par une ingénierie excessive ou des redondances liées à la sécurité. Si une telle conception est mise en œuvre, des modèles actualisés régulièrement peuvent être utilisés au quotidien comme outils d'optimisation ou pour l'analyse de scénarios, soutenant ainsi la prise de décisions commerciales. S'ils reproduisent numériquement des installations précises, ces modèles pourront également servir lors de formations pour éviter les temps d'arrêt inefficaces liés à la maintenance et à la modernisation.

Compte tenu de la puissance croissante des calculateurs et des progrès réalisés dans l'intelligence artificielle, le champ d'application des modèles de processus peut être étendu de l'exploitation d'une simple

installation à des sites industriels intégrés, en passant par des lignes de production complètes. Grâce à la surveillance intelligente des processus aux différents échelons du système, il sera plus simple de trouver le point de fonctionnement optimal et de s'adapter à des conditions changeant rapidement. La logique d'agrégation permet de coordonner et de piloter à distance des «usines en nuage», c'est-à-dire des installations disséminées sur le plan spatial, mais reliées sur le plan numérique.

Les données en temps réel sur la production et sur la consommation d'énergie, qui peuvent être utilisées pour optimiser l'efficacité énergétique dans l'industrie ou pour proposer des services de flexibilisation du réseau axés sur la demande, confèrent une nouvelle dimension à la gestion de l'énergie. Couplées à des informations ponctuelles sur les coûts et l'empreinte écologique du mix énergétique, elles permettent même d'exploiter de manière fiable, économique et respectueuse de l'environnement des systèmes énergétiques complexes comprenant une part importante d'énergies renouvelables.

## Priorités à moyen et long termes

### **Procédés technologiques améliorant l'efficacité énergétique et celle des matériaux**

Les meilleures pratiques actuellement disponibles et rentables offrent encore un énorme potentiel pour améliorer davantage l'efficacité des ressources, en particulier dans les installations existantes et lors de modernisations. Des innovations disruptives pourraient cependant apporter des gains d'efficacité bien plus importants.

La conception de produits reposant sur une utilisation minimum des matériaux et une capacité de recyclage élevée se traduit par des flux de déchets plus faibles présentant une valeur accrue. Les processus intelligents transformant ces déchets et la biomasse obtenue durablement en substances de base et en énergie pour l'industrie seront essentiels à l'économie circu-

laire. Dans de nombreux processus classiques, il ne sera pas possible d'utiliser directement les faibles températures générées par les flux de chaleur résiduelle ou ambiante. Mais de nouveaux processus biologiques et des méthodes de catalyse novatrices pourraient s'affranchir de ces contraintes sans affecter significativement le rendement, la sélectivité et la vitesse de la transformation. Des technologies innovantes élevant efficacement le niveau des températures et réduisant les pertes lors du transfert de chaleur étendront encore plus les possibilités d'utilisation des sources de chaleur d'origine renouvelable.

L'intensification des processus est un autre domaine de recherche visant à augmenter l'efficacité des ressources. Plusieurs stratégies peuvent diminuer la consommation d'énergie et la perte de matériaux: processus optimisés pour un transfert de chaleur ou de masse plus rapide, temps de réaction plus courts, rendement et sélectivité plus vaste, conditions de réaction assouplies, synergies dans l'exploitation des installations et passage de processus par lot à des processus en continu.

Les nouveaux types d'appareils présentant un meilleur transfert de chaleur ou de masse dans des champs de flux optimisés (p. ex. microréacteurs ou échangeurs thermiques sans canalisation) constituent un facteur essentiel de l'intensification des processus. Les avancées réalisées dans la recherche sur les matériaux et dans la fabrication additive offriront de nouvelles marges de manœuvre dans les structures 3D et permettront d'adapter, pour un coût raisonnable, les composants critiques des installations aux exigences spécifiques des processus. L'intelligence artificielle pourrait sensiblement accélérer la phase de conception grâce au tri rapide et automatisé des différentes variantes. Au final, des éléments modulaires, compacts et multifonctionnels, qui conviennent tant aux modernisations qu'à de nouvelles installations de toute taille, fourniront dans une économie circulaire une flexibilité accrue aux concepteurs de processus industriels et aux planificateurs des chaînes d'approvisionnement.

### **Intégration des processus au niveau du site et du système**

L'intégration des processus vise un échange économiquement raisonnable et une utilisation en cascade des flux de matières ou d'énergie au niveau tant des installations que du site et de la région. Elle constitue donc une condition essentielle de l'économie circulaire. La recherche devrait dès lors jeter les bases scientifiques des technologies et instruments qui seront nécessaires pour développer, gérer et exploiter des systèmes industriels très intégrés.

Les opérations techniques de base requièrent des modèles qui décrivent de manière appropriée les particularités physiques des flux de matières ou d'énergie ainsi que des processus de transformation. Ces modèles doivent permettre de recenser tant les schémas de consommation que la capacité d'intégration des processus dans des réseaux connexes utilisant en

cascade la chaleur ou les matériaux. De nouveaux concepts de symbiose au niveau des sites industriels créeront des synergies en mettant en réseau des processus, en couplant la gestion des matériaux et des déchets et en intégrant des sources d'énergie renouvelable. Les bioraffineries destinées à la production conjointe de matériaux, de combustibles, de chaleur et d'électricité illustrent parfaitement cette approche. L'intégration de pôles industriels au sein de réseaux multi-énergies pose de nouveaux défis en raison des fluctuations quotidiennes et saisonnières de l'offre et de la demande. Même si des systèmes sophistiqués de contrôle des processus pourraient atténuer ces fluctuations dans une certaine mesure, il convient de poursuivre la recherche sur des technologies efficaces et financièrement abordables pour le stockage de l'énergie à court et à long termes dans l'industrie. Eu égard à la longue durée de vie des installations industrielles, la modernisation des infrastructures et



*Les procédés technologiques et les pratiques de gestion innovants augmentent l'efficacité énergétique. Les énergies renouvelables sont intégrées dans des installations et sites en réseau et dans toute la chaîne de création de valeur. © Shutterstock*

équipements de production existants représente un défi particulier.

Tant que les outils usuels de planification et d'optimisation ne représentent que difficilement les réseaux de processus, la recherche en ingénierie devra proposer de nouvelles méthodes pour sélectionner rapidement les options d'intégration au niveau des sites et des chaînes d'approvisionnement. Une symbiose durable étant dans l'intérêt de tous les participants à l'échange, la recherche doit examiner non seulement la faisabilité et l'impact environnemental des conceptions techniques, mais également la rentabilité des nouveaux modèles commerciaux et des innovations sociétales qui favorisent les approches collaboratives.

#### **Analyses multicritères pour faciliter les décisions des milieux industriels et politiques**

Eu égard à l'intégration progressive des processus industriels dans des réseaux physiques ou virtuels plus vastes, la portée des décisions technologiques, commerciales ou stratégiques dépasse de plus en plus la sphère d'influence directe des décideurs. Pour relever les futurs défis sans effets de rebond ni transferts de charges indésirables, les décideurs s'appuieront toujours plus sur des instruments exposant de façon fiable les répercussions positives et négatives des options en présence. Compte tenu de la complexité croissante, la recherche se doit de proposer des modèles qui permettent d'étudier différentes options sur une base scientifique et peuvent se muer en instruments pratiques pour impliquer les groupes d'intérêt et soutenir les décisions.

Les variantes d'un produit et les processus alternatifs doivent être évalués dans la perspective du cycle de vie pour éviter qu'un sous-système ne soit optimisé aux dépens d'objectifs supérieurs. L'étendue des analyses du cycle de vie doit être soigneusement délimitée. Elle va souvent de l'acquisition des matières premières et des énergies primaires à la fermeture du cycle à l'issue de la durée de vie du produit, en passant par l'utilisation de ce dernier. Notamment les gains d'efficacité liés à une utilisation en cascade ou à

un échange via les réseaux passent facilement inaperçus lorsque l'analyse se limite à un processus principal ou à un seul site de production.

Des méthodes transversales d'analyse multicritères sont nécessaires non seulement pour identifier les problèmes potentiels sur la base d'un vaste catalogue de catégories d'impact, mais également pour mettre en évidence les multiples avantages résultant des économies d'énergie ou de la diminution des gaz à effet de serre (p. ex. réductions de coûts ou avantages immatériels au niveau de la qualité, de la productivité, de la sécurité, de la résilience ou de la réputation). Dans des systèmes très intégrés, les avantages et les inconvénients ne dépendent guère d'une seule mesure. La recherche doit donc s'interroger sur les méthodes de suivi, de monétarisation et d'allocation qui tiennent compte des exigences des partenaires commerciaux, des autorités de réglementation et d'autres groupes d'intérêt.

Il est préférable d'intégrer ces analyses à un stade précoce du développement des produits et des processus. Toutefois, la qualité et la disponibilité insuffisantes des données entravent fréquemment l'évaluation des nouvelles technologies. Pour éviter que les décisions commerciales ou politiques relatives aux scénarios de demain ne reposent sur des informations obsolètes, les chercheurs doivent donc parvenir à présenter les innovations disruptives de telle manière que la compatibilité avec les analyses multicritères soit garantie.

Une collaboration étroite avec l'industrie et d'autres acteurs est indispensable lors de la définition des objectifs, des expertises critiques et de la diffusion des résultats pour garantir la pertinence et la crédibilité des analyses. Or en raison du contenu complexe et très technique de ces analyses, il est souvent difficile d'impliquer un plus large public dans les réflexions. La recherche devrait dès lors faciliter un dialogue soutenu dépassant largement le cercle restreint des spécialistes internes afin que les décideurs provenant de l'industrie, de la politique ou de la société puissent s'appuyer sur les résultats des analyses multicritères.

# Annexe

## Sujets de recherche

### 2021–2024

La liste ci-après présente les sujets de recherche sur lesquels il faudra mettre l'accent pendant la période 2021–2024. La plupart des sujets mentionnés sont importants pour plusieurs priorités de recherche. Ainsi, une meilleure compréhension des facteurs qui influenceront à l'avenir la consommation individuelle d'énergie est par exemple essentielle pour la mobilité qu'en matière de travail et d'habitat.

#### ÉCONOMIE, SOCIÉTÉ ET MESURES POLITIQUES

##### Entreprises et ménages

###### *Consommation d'énergie et comportement individuel*

- Modélisation du processus individuel de prise de décision tant dans un cadre rationnel (rendements/risque) que sous l'influence d'une «rationnelle limitée»;
- Étude des interactions entre les déterminants socio-économiques et les facteurs émotionnels, normatifs et cognitifs entrant en jeu dans la consommation d'énergie;
- Étude des effets de l'innovation sociétale dans le secteur de l'énergie ainsi que du comportement des ménages lorsqu'ils sont confrontés à des innovations dans ce secteur.

###### *Approches pour réduire la demande d'énergie des ménages et des entreprises*

- Étude des aspects structurels de la demande d'énergie des ménages: style de vie, lieu et type de logement;
- Étude des évolutions sociétales et économiques: tendances à long terme ayant un impact sur la demande d'énergie;
- Étude des changements de comportement pendant une période favorable (en raison de modifications techniques, sociétales ou économiques; numérisation, notamment);
- Élaboration des signaux de prix reflétant les coûts effectifs correspondants de l'énergie (y c. transport);

- Étude de l'impact et de la conception de mesures non tarifaires en vue d'une réduction de la consommation d'énergie;
- Étude des effets de rebond et élaboration de stratégies ciblées pour contrer ces effets.

###### *Exploiter et accroître la flexibilité de la demande des ménages et des entreprises*

- Élaboration de modèles commerciaux augmentant la flexibilité dans le système énergétique tout en tenant compte des effets et des opportunités de la numérisation;
- Définition et étude de modèles tarifaires qui concernent l'utilisation du réseau et la consommation d'énergie et qui prennent en compte la flexibilité de la demande;
- Étude expérimentale de nouveaux instruments liés à la flexibilité de la demande.

###### *Comportement des investisseurs, stratégie d'entreprise et organisation*

- Étude de l'attrait des investissements dans les infrastructures énergétiques du point de vue des investisseurs et de l'optimisation du portefeuille; élaboration de stratégies pour renforcer cet attrait;
- Élaboration de stratégies concernant les systèmes énergétiques intelligents (y. c. limites posées par le droit relatif à la protection des données);
- Étude des freins à l'investissement dans l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables;
- Étude du secteur de l'énergie en tant que système d'innovation: fonctionnement et déterminants de l'innovation, incitations et obstacles à l'innovation; diffusion des nouveaux produits;

- Étude du comportement des acteurs dans les organisations ainsi que des solutions destinées à éliminer les freins à l'innovation dans le domaine de l'énergie;
- Évaluation de la manière dont les entreprises peuvent influencer sur le comportement de leur personnel en matière d'énergie et inversement (y c. limites posées par le droit du travail);
- Opportunités de collaboration entre des acteurs de plusieurs branches ou secteurs;
- Intégration des nouvelles technologies (p. ex. stockage): études des chances et des avantages pour les entreprises et les autres acteurs.

### **Marchés, réglementation et mesures politiques**

#### *Organisation et réglementation du marché*

- Évaluation de différentes organisations du marché suisse de l'énergie et élaboration de nouvelles conceptions efficaces du marché, l'accent étant mis sur leur capacité
  - › à intégrer à grande échelle les énergies renouvelables;
  - › à promouvoir le couplage des secteurs;
  - › à encourager des investissements et efforts de développement efficaces dans le stockage et dans les pratiques de gestion de la demande;
  - › à exploiter le potentiel des nouvelles technologies (p. ex. numérisation progressive) et des évolutions sociétales (p. ex. économie circulaire et mines urbaines [urban mining]).
- Développement d'outils décisionnels pour le couplage des secteurs;
- Étude des effets d'une libéralisation du marché, en particulier pour l'électricité et le gaz;
- Évaluation des options de régulation du marché;
- Étude des aspects juridiques de l'approche Energy as a Service;
- Étude de la mise en œuvre au niveau législatif des incitations d'investissement dans les nouvelles conceptions du marché;
- Étude de la pertinence des instruments législatifs du point de vue du système énergétique dans son ensemble.

#### *Intégration des énergies renouvelables et décentralisation*

- Étude des défis et des opportunités juridiques ou sociaux lors du passage à une énergie décentralisée intermittente (p. ex. aspects de la distribution, compétence pour la stabilité systémique, nouveaux outils réglementaires);
- Développement d'approches (p. ex. conception du marché et modèles commerciaux) pour gérer un grand nombre d'acteurs hétérogènes en raison de la décentralisation, notamment en ce qui concerne la coordination des décisions portant sur les investissements, sur la réalisation ou sur l'utilisation: opportunités de la numérisation en la matière;
- Évaluation de la contribution des communautés de consommation propre et de la transition consommateur-prosommateur pour la stratégie énergétique;
- Développement d'approches pour gérer la production intermittente et assurer la sécurité d'approvisionnement dans un système très décentralisé;
- Élaboration d'aides décisionnelles pour évaluer l'évolution dans un système énergétique décentralisé.

#### *Étude des instruments politiques et réglementaires*

- Élaboration de nouvelles mesures politiques et approches visant:
  - › à réduire la demande d'énergie et à accroître l'efficacité énergétique, en tenant compte des déterminants et des défis ressortant du domaine de recherche 1 («Entreprises et ménages») ainsi que des nouvelles perspectives découlant de la numérisation;
  - › à augmenter les investissements dans la technologie et l'infrastructure énergétiques, en considérant les obstacles ressortant du domaine de recherche 1 («Entreprises et ménages») et les risques financiers;
  - › à utiliser l'aménagement du territoire comme point de départ des nouveaux projets énergétiques (zone d'urbanisation, procédure de permis de construire);
  - › à améliorer les effets de répartition des mesures politiques (p. ex. amortisseurs sociaux).

- Évaluation de l'impact des interactions entre les mesures politiques (transversalité, mesures anciennes/nouvelles) et le développement d'approches et de processus pour gérer ces mesures;
- Étude ex-post des effets des mesures politiques/instruments promouvant l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables; enseignements tirés pour la Suisse.

#### *Aspects juridiques et internationaux*

- Positionnement de la Suisse sur le marché international de l'énergie; options pour intégrer la Suisse dans le marché européen de l'énergie ou de l'électricité, y compris les centrales de pompage-turbinage;
- Évaluation de l'influence et des interactions de la politique énergétique étrangère et de la politique climatique internationale avec les instruments et mesures suisses;
- Évaluation de la conformité des instruments et mesures suisses au droit international et, en particulier, au droit européen;
- Élaboration d'options pour résoudre ou réduire les conflits d'objectifs entre le droit de l'aménagement du territoire, le droit de l'environnement et le droit de l'énergie; possibilités et limites des procédures accélérées de planification et d'autorisation;
- Étude et évaluation normative du cadre légal pour les investissements à long terme.

### **Modélisation, évaluations systémiques et processus de transformation**

#### *Modélisation et scénarios axés sur l'énergie comme aides à la décision*

- Amélioration et élaboration de nouveaux modèles et scénarios axés sur l'énergie qui tiennent compte des aspects de la distribution, des changements disruptifs et de l'incertitude;
- Amélioration et développement de méthodes et d'outils appropriés (p. ex. modèles économiques) pour élaborer et simuler des scénarios avec différentes options de politique énergétique;
- Élaboration de scénarios venant compléter les scénarios axés sur l'énergie et mettant l'accent sur les acteurs clés et l'ensemble de la société (p. ex. comportement et style de vie, utilisation des terres, emploi, construction de logements, numérisation, consommation, loisirs et mobilité);
- Amélioration de la modélisation de la demande d'énergie en tenant compte des comportements individuels et des interactions sociales;
- Développement d'outils de modélisation appropriés en vue de l'analyse globale d'un système énergétique numérique et très dynamique, y compris des normes de comparaison de modèles et une meilleure prise en compte de l'incertitude.

#### *Évaluations systémiques*

- Évaluation, au niveau systémique, des mesures politiques visant à décarboniser le système suisse de mobilité et de chaleur;
- Simulation des effets de différentes options politiques et conceptions du marché sur l'approvisionnement en énergie, sur la compétitivité de l'industrie suisse et sur l'environnement;
- Évaluation des mécanismes visant à accentuer le découplage des courbes de l'énergie et de la croissance;
- Élaboration et évaluation de stratégies d'adaptation du secteur de l'énergie au changement climatique (p. ex refroidissement et disponibilité de l'eau).

*Processus de transformation*

- Dans le cadre de la stratégie énergétique, étude et analyse de la complexité et des interactions:
  - › des différents secteurs, y compris les corrélations entre les évolutions intervenant aux niveaux technique, sociétal, politique ou individuel;
  - › des différentes stratégies (p. ex. efficacité, économie du partage, numérisation, etc.)
- Étude et analyse des interactions sociales dans différents contextes institutionnels: apprentissage de la vie en société et innovations sociétales, gouvernance, mouvements, mouvements citoyens, communautés, processus collaboratifs et participatifs, acceptation/refus des nouvelles technologies et des mesures politiques;
- Étude et analyse des corrélations spatiales, telles que les interactions niche/régime/paysage, la prise de décision internationale/nationale/cantonale/locale et les processus de mise en œuvre dans des contextes comprenant plusieurs niveaux;
- Élaboration de stratégies pour éviter une perte de qualité de vie pendant la transformation du système énergétique.

## TRAVAIL ET HABITAT

### Sites et quartiers

- Fiabilité des systèmes énergétiques comprenant des sources locales d'énergie renouvelable et mesures relatives à l'efficacité énergétique pour accroître la sécurité d'approvisionnement;
- Bâtiments et sites (y c. électromobilité) en tant que fournisseurs d'énergie: quelle flexibilité au niveau de la charge ou de la fourniture d'énergie un bâtiment ou un site peut-il offrir au réseau électrique ou thermique et à quel prix? Allocation de ces flexibilités (bâtiments, site, quartier)? Rôle des approches comprenant des TIC innovantes?
- De la gestion énergétique d'un bâtiment à celle d'un site ou quartier: concept, planification, exploitation;
- Développement d'outils de planification pour mieux intégrer la chaleur, le gaz et l'électricité d'origine renouvelable dans le système (y c. installations CCF biogènes et synthétiques);
- Plateformes numériques pour une planification intégrative, multidisciplinaire et collaborative prenant en considération les aspects énergétiques et utilisant, le cas échéant, des données géoréférencées (système d'information géographique, SIG);
- Réaménagement des stratégies existantes de développement durable telles que «Sites 2000 watts» ou «Villes et communautés intelligentes» pour tendre vers la neutralité climatique au niveau des quartiers, ainsi que démonstration de ces nouvelles approches. Sur cette base, analyse, élaboration et test de concepts, de processus, de mesures et de conditions-cadres;
- Concepts d'adaptation climatique pour organiser la résilience des bâtiments, des sites et des villes face à l'évolution climatique mondiale ainsi qu'aux microclimats urbains et locaux (y c. effet d'îlot de chaleur urbain).

### Bâtiments

- Lean retrofit: réduction des coûts grâce à des solutions d'assainissement simples et robustes, voire modulables, qui soient à la fois simples et performantes, y compris rénovations énergétiques numérisées reposant sur des données et des modèles;
- Systèmes efficaces en termes d'énergie et de coûts pour assainir l'enveloppe des bâtiments. Nouveaux concepts, nouvelles approches et technologies (p. ex. membranes);
- Réduction des écarts de performance énergétique grâce à des bâtiments conviviaux (notamment pilotage basé sur le feed-back des utilisateurs, interfaces utilisateurs, prévention des effets de rebond) et à une optimisation automatisée de l'exploitation;
- Vitrages, systèmes de fenêtres et éléments de façade innovants présentant des propriétés améliorées et modifiables (p. ex. transmission de la lumière, apport et stockage de chaleur);
- Isolation thermique: nouveaux matériaux et nouvelles constructions qui sont énergétiquement efficaces, respectueux de l'environnement, financièrement abordables et compacts;
- Réduction des flux de matériaux, évaluation du cycle de vie et augmentation de la capacité de recyclage en vue d'une économie circulaire;
- Rôle du BIM dans l'évaluation du cycle de vie et l'optimisation énergétique (p. ex. gestion des installations basée sur le BIM);
- Rôle du machine learning et de l'intelligence artificielle en vue du conseil, de la planification, de la construction et de l'exploitation (p. ex. diagnostic des pannes);
- Réinventer la culture architecturale ainsi que les processus de planification, de construction, d'exploitation et de démantèlement pour permettre et accélérer la mise en œuvre de nouvelles technologies et de nouveaux concepts (tenir compte des corrélations entre l'économie circulaire, les processus de construction, la souplesse d'utilisation et l'évaluation du cycle de vie).

## Technique du bâtiment

### *Technique décentralisée*

- Accumulateurs thermiques à court terme: intégration des accumulateurs thermiques et électriques locaux dans le système énergétique;
- Nouvelles technologies de stockage de la chaleur (thermochimique, latent);
- Évaluation du cycle de vie, matériaux, réduction des coûts des systèmes de stockage décentralisés
- Systèmes efficaces de préparation de l'eau chaude qui protègent contre la légionellose en cas d'assainissement d'un bâtiment;
- Concepts alternatifs d'aération des logements dans un parc immobilier qui nécessitent peu d'interventions, induisent peu de charges liées à l'énergie grise et se caractérisent par leur robustesse et leur performance.

### *Utilisation thermique ou électrique des énergies renouvelables locales*

- Nouveaux types d'éléments de façade solaires (photovoltaïque, solaire thermique, photovoltaïque-thermique) à géométrie variable qui, grâce à leur esthétique, s'intègrent mieux aux bâtiments, voire en deviennent un élément décoratif;
- Systèmes solaires/solaires thermiques intelligents (intégration au système de gestion de l'énergie, surveillance du fonctionnement, alertes automatisées à l'installateur, pilotage de l'autoconsommation dans les systèmes hybrides);
- Réduction du besoin hivernal en électricité grâce à des accumulateurs et à la fourniture d'énergie au niveau local.

### *Pompes à chaleur et installations CCF*

- Pompes à chaleur performantes en cas d'assainissement d'un bâtiment;
- Installations CCF financièrement abordables et neutres en termes d'émissions (p. ex. piles à combustible) pour contribuer à un parc immobilier climatiquement neutre.

### *Fourniture de froid*

- Potentiel, concepts et technologies en vue d'un refroidissement de l'espace urbain énergétiquement efficace et préservant les ressources, intégration d'accumulateurs thermiques (chaud/froid), solutions optimisées du point de vue des ressources et des coûts pour un refroidissement actif et passif des bâtiments (y c. systèmes de protection solaire);
- Systèmes efficaces de réaménagement (alternatives aux climatiseurs bibloc).

### *Technologies de l'information et de la communication (TIC)*

- Solutions comprenant des TIC innovantes pour la domotique et pour les technologies de mesure, de pilotage ou de réglage;
- Capteurs et pilotages financièrement abordables pour une utilisation en réseau.

### *Monitoring et optimisation de l'exploitation*

- Analyse de la concordance des valeurs de planification avec les valeurs effectives de consommation lors de constructions ou de rénovations, identification et analyse des causes des éventuels écarts (systèmes de diagnostic) et déduction de recommandations;
- Élaboration de méthodes financièrement abordables visant à recenser ou à prévenir la consommation d'énergie par l'exploitation ou par la mobilité inhérente à la localisation du bâtiment;
- Analyse des possibilités techniques d'autorégulation des systèmes et de leur efficacité à long terme.

## Être humain, marché, politique

- Étude des possibilités (nouvelles approches pour les incitations, les normes et les prescriptions) permettant d'accélérer la transformation du parc immobilier et d'augmenter le taux de rénovation;
- Analyse visant à déterminer qui peut utiliser et exploiter de manière judicieuse les infrastructures énergétiques critiques (gestionnaires de réseaux, propriétaires fonciers, producteurs d'énergie).  
Dédution de recommandations d'action, y compris sur le plan politique, et élaboration de nouveaux modèles commerciaux;
- Besoins des utilisateurs en matière de domotique et acceptation des solutions correspondantes, en tenant compte de l'influence de la sphère privée et de la sécurité, des concepts relatifs à la souplesse d'utilisation et des interfaces bâtiment-utilisateurs;
- Étude des facteurs d'influence, des motivations et des obstacles ainsi que des incitations possibles qui poussent les propriétaires fonciers à former ou à rejoindre un réseau (nouveaux processus participatifs et modèles commerciaux pour toutes les parties prenantes, y c. les locataires).

## MOBILITÉ

### La mobilité en tant que système global

- Analyse de la réduction potentielle de CO<sub>2</sub> grâce à l'amélioration des concepts de transport multimodaux;
- Analyse de l'intégration de la production d'électricité renouvelable et du rôle de l'électromobilité;
- Solutions pour l'électrification totale ou partielle du trafic lourd de marchandises et du transport de marchandises par bateau;
- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le trafic aérien commercial grâce à l'utilisation de carburants renouvelables et à l'électrification partielle des éléments de propulsion et des unités auxiliaires;
- Monitoring complet de l'impact environnemental de certains aspects du système de mobilité (p. ex. comportement des utilisateurs) ainsi que du mix entre carburant et système de propulsion;
- Analyse des émissions totales des véhicules et de leurs technologies de propulsion du point de vue du cycle de vie, y compris les effets possibles du réseau électrique sur ces émissions;
- Étude de l'impact d'une vaste flotte de véhicules électriques sur le réseau correspondant;
- Évaluation de l'impact de différents taux de diffusion des technologies de propulsion des véhicules sur l'infrastructure du réseau électrique, notamment en ce qui concerne le besoin de développement ou de renforcement de ce dernier;
- Étude des questions relatives à la collecte, à la disponibilité, à la sécurité et à la propriété des données de mobilité.

### Élaboration de nouveaux concepts de mobilité intelligents grâce aux TIC

- Étude sur la manière de réaliser des systèmes intelligents et efficaces de transport de personnes ou de marchandises (terrestres et aériens) dans des zones urbaines denses;
- Poursuite du développement et réalisation de concepts en vue d'une excellente gestion opérationnelle des réseaux de transports publics;
- Réduction des imprécisions des écobilans et des analyses du cycle de vie grâce à l'amélioration des critères et des méthodes de recensement des données, y compris des sujets tels que la disponibilité de ces dernières et les techniques d'évaluation pour les scénarios de demain;
- Étude de solutions modernes, basées sur les TIC, pour des modèles commerciaux adaptés aux nouveaux concepts de mobilité (p. ex. applications Vehicle-to-X);
- Étude des influences indirectes et des effets de rebond sur la consommation d'énergie des nouveaux concepts de mobilité;
- Étude de l'impact des nouvelles technologies sur la logistique et le transport de marchandises (p. ex. choix du mode de transport et résilience accrue aux événements disruptifs de la chaîne logistique);
- Analyse des nouvelles solutions de transport de marchandises (p. ex. pelotons routiers et concepts alternatifs de transport automatisé) et de leur impact sur les véhicules proprement dits (c. à d. sur la notion de voiture);
- Analyse du rôle des véhicules électriques dans la maîtrise de la demande en énergie, en ce qui concerne l'équilibrage du réseau électrique.

### **Comportement des utilisateurs, changement sociétal, aménagement du territoire, économie et réglementation**

- Élaboration de mesures et d'offres centrées sur l'attrait des transports publics et de la mobilité combinée;
- Analyse des possibilités provenant de l'aménagement du territoire, de la mobilité collaborative et d'autres mesures pour réduire la demande de trafic;
- Étude du potentiel lié à l'amélioration des stratégies marketing des fournisseurs de mobilité;
- Étude des approches destinées à encourager la circulation des piétons et des cyclistes, par exemple en relation avec des mesures de promotion de la santé;
- Étude socio-économique et sociotechnique des technologies, des infrastructures requises, des modèles commerciaux, des instruments ainsi que des mesures incitatives ou réglementaires sur les déplacements professionnels et de loisirs, de leur impact sur la demande de mobilité et sur la consommation d'énergie ainsi que des effets de rebond éventuels;
- Étude du potentiel d'amélioration au niveau de la disponibilité, de la connectivité, de l'infrastructure ou de l'efficacité énergétique des options durables lors du choix du mode de transport;
- Analyse visuelle et simulation de la circulation automobile et du comportement des utilisateurs grâce à l'intelligence artificielle;
- Étude des mesures de gestion de la charge, par exemple grâce à des tarifs variables, et de leurs effets sur le système de mobilité;
- Étude de la perception, dans la population, des nouveaux concepts de propulsion et de véhicules.

### **Stockage de l'énergie et remplacement des combustibles fossiles**

- Développement de solutions hybrides de stockage de l'énergie pour les véhicules, telles que l'hydrogène, les batteries et les supercondensateurs (super caps);
- Optimisation des batteries au niveau de la densité énergétique, de la durée de vie, des matériaux, de la sécurité, des coûts, de leur chargement rapide et des possibilités de les réutiliser (par ex. dans des applications second life);
- Déduction de scénarios pour mettre en place une infrastructure de synthèse et de distribution des carburants synthétiques dans le transport routier, par bateau ou par avion;
- Analyse de l'influence des agents énergétiques alternatifs utilisés dans les moteurs à combustion classiques (p. ex. hydrogène, carburants synthétiques et biocarburants) sur les émissions de CO<sub>2</sub> et les autres émissions.

### **Efficacité des véhicules**

- Poursuite du développement et optimisation des pièces et des systèmes pour véhicules permettant une utilisation efficace et économique de l'électricité et des agents énergétiques alternatifs (p. ex. hydrogène, carburants synthétiques et biocarburants);
- Réduction du poids des véhicules grâce à de nouveaux matériaux, à de nouvelles méthodes de fabrication et à de nouveaux éléments de construction légère pour diminuer la consommation d'énergie;
- Amélioration de la gestion de l'énergie dans les véhicules, optimisation de la propulsion, réalisation de systèmes de récupération et réduction du besoin en énergie non lié à la propulsion (propulsion auxiliaire);
- Hausse de l'efficacité des moteurs à combustion classiques lorsque l'électrification ou le remplacement des combustibles est difficile, par exemple dans le transport de marchandises à longue distance par la route ou par bateau et dans le transport aérien.

## SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

### Réseaux d'énergie, intégration des systèmes, couplage des secteurs et captage du CO<sub>2</sub>

#### *Intégration des systèmes*

- optimisation des architectures incitatives pour les différentes infrastructures de réseau (chaleur, gaz, électricité, eau, éventuellement CO<sub>2</sub>, hydrogène);
- optimisation de la production locale d'énergie et de la consommation propre.

#### *Couplage des secteurs*

- développement de technologies innovantes (p. ex. Power-to-X);
- étude des effets sur l'environnement et l'économie.

#### *Chaleur et froid*

- prévision de la demande de chaleur, de froid ou d'électricité dans différentes branches, y compris modification de la charge thermique due au changement climatique;
- technologies et solutions de refroidissement potentielles pour les zones urbaines existantes;
- évaluation des configurations optimales du chauffage à distance.

#### *Captage du CO<sub>2</sub>*

- amélioration de l'efficacité tarifaire et énergétique des technologies de captage du CO<sub>2</sub> ayant un bon potentiel énergétique, telles que la bioénergie avec captage et stockage du carbone (CSC) ou le captage du CO<sub>2</sub> dans l'air avec stockage ou conversion;
- potentiel, avantages indirects et conflits d'objectifs d'un point de vue global.

### Numérisation

#### *Analyse des données*

- analyse de big data pour la planification et le pilotage;
- plateformes d'interopérabilité et gestion des installations basées sur des données.

#### *Partage et protection des données*

- développement de plateformes de partage de données destinées aux acteurs du marché de l'énergie et élaboration de mécanismes d'anonymisation.

#### *Modèles basés sur des données*

- analyse et pilotage de réseaux très étendus;
- échange entre les exploitants des systèmes de transport ou de distribution.

#### *Sécurité des données*

- collecte et agrégation des données, transmission des signaux de contrôle, cyberattaques, moyens de protection.

#### *Thèmes transversaux*

- applications basées sur l'intelligence artificielle, y compris les marchés numériques en vue d'une participation accrue des clients;
- consommation électrique de la numérisation, stratégies de réduction de la consommation.

### Réseaux électriques

#### *Technologies et gestion des données*

- quantification de la flexibilité au niveau des clients;
- planification et gestion de systèmes de stockage décentralisés (y c. véhicules électriques);
- partage des données et interopérabilité, gestion des installations, sécurité des données.

#### *Flexibilité*

- prestations de service nécessaires des réseaux de distribution jusqu'aux réseaux de transport;
- intégration des petites et grandes centrales hydrauliques;
- prévisions pour plusieurs horizons temporels et tailles de système, agrégation des ressources.

#### *Réseaux et marchés de transport*

- exploitation et planification résilientes des réseaux;
- modèles tarifaires vs. utilisation du réseau;
- intégration des objectifs politiques et des structures du marché dans l'environnement européen (UE).

#### *Méthodes incitatives et moyens de protection*

- capteurs décentralisés;
- systèmes résilients de protection et de localisation des erreurs;
- pilotage centralisé vs. décentralisé basé sur les fonctions;
- stabilité du réseau de transport en cas d'inertie réduite.

#### *Composants du réseau*

- évaluation de la performance des architectures électroniques de puissance;
- technologies sophistiquées pour la conversion à moyenne fréquence;
- matériaux pour l'isolation très performante des composants du réseau à haute tension.

### **Stockage**

#### *Concepts de stockage*

- offre et demande d'énergie à l'avenir;
- impact économique et écologique des technologies de stockage;
- options de stockage optimales (centralisé/décentralisé, à court, moyen ou long terme, chaleur/électricité/chimie, lieu et temps).

#### *Stockage par pompage-turbinage*

- options de modernisation ayant une incidence sur les coûts, dynamique des systèmes réversibles de stockage ou de production.

#### *Stockage d'énergie par air comprimé*

- gains d'efficacité grâce à une nouvelle conception des installations, choix de cavernes en Suisse;
- stockage thermique de l'énergie ou à l'aide de turbomachines pour une exploitation dynamique.

#### *Stockage à long terme*

- concepts sophistiqués de réduction chimique et électrochimique du CO<sub>2</sub>;
- transformation de la biomasse en biocarburants pouvant être stockés;
- nouveaux concepts de production d'hydrogène.

#### *Batteries*

- disponibilité des matériaux et concepts de fabrication pour la production de batteries à grande échelle;
- technologies fiables et ayant une incidence sur les coûts pour des applications stationnaires ou mobiles;
- applications de recyclage ou de réutilisation, y compris les aspects économiques et écologiques.

#### *Stockage de la chaleur*

- stabilité thermomécanique des accumulateurs en phase solide destinés à la chaleur et au froid;
- transfert thermique et dégradation dans les systèmes de changement de phase pour le stockage de la chaleur latente;
- accumulateurs à stratification et échangeurs de chaleur stables pour le stockage thermo-chimique de la chaleur;
- stockage de la chaleur à grande échelle dans le sous-sol.

### **Modélisation de scénarios et analyse systémique**

#### *Voies vers l'objectif «zéro émission nette de gaz à effet de serre»*

- modélisation du système énergétique en vue de solutions techniques aux coûts optimisés;
- dimensions temporelles et spatiales et leurs implications pour l'infrastructure et le stockage;
- imprécision de la modélisation;
- interactions des technologies énergétiques dans un système énergétique avec couplage des secteurs;
- monitoring et benchmarking du développement des nouvelles technologies et de leur impact sur le système énergétique.

#### *Risques*

- prise en compte des risques dans la modélisation d'un système énergétique optimisé et dans l'analyse des scénarios;
- analyse des menaces et des risques de certaines technologies et infrastructures du système énergétique;
- analyse comparative et complète des risques d'un système énergétique global fortement couplé.

### *Prévoir l'imprévisible*

- effets des événements disruptifs naturels, techniques ou politiques pour accroître la résilience et la fiabilité du système;
- examen de la résistance dans différents scénarios grâce à une modélisation du système énergétique, par exemple en cas de recul marqué de la disponibilité de la biomasse ou de la force hydraulique en raison du changement climatique progressif ou d'une sortie soudaine du nucléaire (p. ex. après un incident en Europe).

## **Énergies renouvelables, ressources naturelles**

### *Force hydraulique*

Utilisation de la force hydraulique

- approches novatrices pour le respect des lois (loi fédérale sur la protection des eaux);
- potentiel hydraulique sur des sites sensibles.

### *Flexibilité à court terme*

- solutions innovantes en matière de flexibilité;
- numérisation des installations et monitoring en temps réel pour optimiser la production;
- exploitation et gestion;
- hybridation des centrales hydrauliques avec des batteries stationnaires.

### *Passage à une production hivernale*

- identification du potentiel lié à la fonte des glaciers en cas de barrages proches de ces derniers;
- relèvement des barrages, mise en réseau des bassins d'accumulation, prévisions de l'écoulement intrasaisonnier;
- réduction de la perte liée à l'ensablement des bassins d'accumulation critiques.

### *Sécurité d'exploitation*

- techniques de prolongation de la durée de vie utile et définition des pannes critiques en termes de sécurité;
- définition et vérification des critères relatifs aux nouvelles centrales hydrauliques afin d'étendre les possibilités d'exploitation;
- effets du changement climatique sur l'exploitation sûre et continue du système de force hydraulique et amoindrissement de ces effets.

### *Photovoltaïque*

Cellules photovoltaïques

- réduction des coûts grâce à l'efficacité accrue de la transformation ou à une meilleure technologie de fabrication;
- nouveaux appareils performants étendant les possibilités d'utilisation (y c. Light-to-X/transformation en carburants).

Modules photovoltaïques

- processus et matériaux pour accroître la fiabilité opérationnelle des modules, des systèmes et des centrales;
- nouvelles méthodes de fabrication industrielle et nouveaux protocoles d'essais;
- meilleures propriétés du photovoltaïque en termes de cycle de vie.

Systèmes photovoltaïques, maisons solaires et systèmes non conventionnels

- définition de normes industrielles;
- outils numériques pour accélérer le développement et l'installation des systèmes photovoltaïques sur les bâtiments;
- potentiel, puissance et coûts des installations photovoltaïques sur des infrastructures non conventionnelles.

Intégration du photovoltaïque dans le système énergétique

- prévisions fiables, y compris dans le temps et l'espace, de la production photovoltaïque;
- intégration du photovoltaïque dans le réseau à basse tension, pénétration massive du réseau par le photovoltaïque;
- méthodes d'évaluation de la valeur systémique du photovoltaïque.

### *Bioénergie*

La biomasse comme matière de base

- mobilisation, logistique, traitement et stockage de la biomasse;
- concepts et processus pour maximiser l'utilisation de la biomasse issue de déchets;
- utilisation de nouveaux substrats de bioénergie pour une consommation d'énergie élevée.

La biomasse pour les carburants gazeux ou liquides et pour l'industrie chimique

- base de biomasse pouvant être fermentée grâce à de nouveaux processus microbiologiques;
- biocarburants ayant une incidence minimale sur l'infrastructure de raffinage et de distribution;
- approches destinées à une production plus souple de biogaz dans toute la chaîne de procédés.

Incinération de la biomasse

- technologies d'incinération propres;
- concepts et processus innovants pour obtenir de la chaleur industrielle avec peu d'émissions.

La biomasse pour le stockage de l'énergie et les technologies de climatisation

- nouvelles possibilités d'utiliser le CO<sub>2</sub> d'origine biogène pour des modèles Power-to-Gas et Power-to-Liquid;
- biomasse avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> en tant que technologie à émissions négatives (NET).

Utilisation de la biomasse dans le système énergétique

- intégration optimisée des centrales de bioénergie, y compris le couplage des secteurs;
- produits finis et semi-finis issus de la transformation de la biomasse pour des cycles de matières fermés;
- concepts de bioraffineries.

*Géoénergie*

Recherche et détection de sources d'énergie renouvelable dans le sous-sol

- géologie, développement et dynamique du sous-sol en Suisse;
- méthodes de prospection intégrées pour augmenter les chances de succès d'un premier forage exploratoire;
- réduction de l'imprécision grâce à une modélisation avancée des ressources et réservoirs statique et dynamique.

Ressources géothermiques renouvelables

- concepts de chauffage, de refroidissement et de stockage pour les zones de chauffage à distance;
- nouveaux concepts pour réduire les coûts de forage et de finalisation du puits de forage et augmenter la puissance du réservoir;
- technologies de forage, de finalisation et de stimulation destinées aux systèmes hydrothermaux et géothermiques.

CO<sub>2</sub> dans le sous-sol pour le stocker et l'utiliser à grande échelle

- capacité d'injection de CO<sub>2</sub> dans les aquifères salins profonds pour déterminer le potentiel de stockage du CO<sub>2</sub> en Suisse;
- le CO<sub>2</sub> comme support d'échange thermique dans les applications géothermiques pour une utilisation directe et la production d'électricité.

Sécurité et systèmes

- nouvelles méthodes d'observation, de contrôle et de réduction des risques liés à la sismicité induite;
- recherche portant sur la sécurité en cas d'exploration et d'extraction de géothermie et d'hydrocarbures sur un même site;
- évaluation de l'utilisation de la géoénergie pour le système énergétique suisse.

Stockage souterrain de chaleur ou de gaz

- capacité d'injection de H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dans les aquifères salins profonds pour déterminer le potentiel de stockage en Suisse;
- exploration du stockage souterrain de chaleur pour les réseaux de chauffage et pour le stockage saisonnier de chaleur

*Énergie éolienne*

- Aspects spécifiques à la Suisse des installations éoliennes, tels que la réalisation des centrales, les prévisions, le bruit et la glace.

#### *Autres technologies solaires (hors photovoltaïque)*

##### Solaire thermique (à basse température)

- température de stagnation des capteurs;
- installations drain-back
- systèmes standard simplifiés;
- capteurs solaires thermiques hybrides.

##### Solaire thermique (à haute température)

- réduction des coûts en cas de technologies solaires à concentration;
- fluides résistants à la chaleur;
- intégration de la chaleur solaire à haute température dans les processus industriels.

##### Carburants et matériaux solaires

###### approches thermochimiques

- substances oxydoréductrices efficaces, stables et fréquentes;
- optimisation du transport combiné de chaleur ou de masse dans les réacteurs solaires;
- raffinage efficace des carburants solaires et processus évolutifs pour les matériaux solaires.

###### approches recourant à la photoélectrochimie (PEC)

- matières de base efficaces, stables et durables pour la dissociation de l'eau par PEC;
- appareils PEC évolutifs grâce à un couplage optimisé du transport de chaleur, de masse et de charge;
- substances PEC et mécanismes de réaction PEC au-delà de la dissociation de l'eau.

#### **Énergie et déchets nucléaires**

##### *Exploitation à long terme et gestion du vieillissement*

- appréciation des évaluations déterministes et probabilistes de la sécurité des centrales nucléaires suisses;
- exploitation à long terme, intégrité structurelle, vieillissement des matériaux;
- comportement hydraulique mécanique et thermique des nouveaux éléments combustibles complexes;
- améliorations techniques de la sécurité (p. ex. rééquipement au niveau des systèmes de sécurité passifs, combustibles résistant aux accidents);
- étude des mesures de gestion des incidents et mise en place de nouvelles directives;
- études de risque concernant l'impact des menaces externes ou des cyberattaques sur les centrales nucléaires;
- évaluation de la sécurité du suivi de charge concernant le parc suisse de centrales nucléaires;
- maintien en Suisse de toutes les infrastructures nucléaires critiques.

##### *Arrêt et démantèlement des centrales nucléaires*

- sécurité et radioprotection pendant le processus d'arrêt des centrales nucléaires;
- procédure optimale pour le démantèlement, la décontamination et le traitement des résidus radioactifs;
- techniques sophistiquées pour mesure de libération des déchets radioactifs;
- comportement des combustibles usés en cas de stockage intermédiaire à sec sur une période prolongée.

*Déchets radioactifs et dépôts en couches géologiques profondes*

- défis liés à la mise en œuvre de la nouvelle ordonnance sur la radioprotection;
- contribution de la recherche à la géochimie et à la modélisation du processus de transport des nucléides pour le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes»;
- effets du rayonnement à faible dose sur l'environnement et sur la santé publique;
- impact d'un stockage à sec prolongé sur les éléments combustibles usés (processus de vieillissement).

*Dimensionnement et matériaux des conteneurs destinés au transport ou au stockage*

- propriétés et variabilité de l'argile à Opalinus (roche d'accueil), effets de cette roche sur la construction du puits et sur les processus dans et autour du dépôt en couches géologiques profondes;
- évolution à long terme du paysage pour mieux comprendre les futurs phénomènes d'érosion (glaciaire et fluviale).

*Concepts de réacteur sophistiqués et innovants*

- participation aux travaux de recherche internationaux sur les technologies de pointe utilisées dans les réacteurs par l'intermédiaire d'Euratom, de l'OCDE (AEN), de l'AEIA et du Forum international Génération IV;
- recherche sur l'amélioration des aspects liés à la sécurité et à la durabilité des principaux concepts de réacteur de quatrième génération;
- évaluation des nouveaux cycles (fermés) sophistiqués des combustibles à l'aune d'exigences en matière de cycle;
- potentiel des systèmes sophistiqués tels que les systèmes basés sur un accélérateur et refroidis rapidement par du sodium;
- monitoring des éléments combustibles usés et des technologies de séparation (partitioning technologies).

## PROCESSUS INDUSTRIELS

La liste ci-après énumère les sujets de recherche pour la période 2021–2024. Ceux-ci ont été regroupés et classés par ordre de priorité après une vaste procédure de consultation. Chaque groupe thématique décrit une stratégie d'innovation pour concrétiser la vision de processus industriels efficaces en termes de ressources dans une économie circulaire.

Priorité est donnée aux innovations techniques susceptibles de réduire sensiblement l'empreinte des processus industriels ou qui contribuent à l'efficacité et à la résilience dans d'autres secteurs. Les sujets de recherche non technologiques, qui visent à comprendre et à surmonter les obstacles en matière de réalisation, sont également répertoriés.

### Produits et processus pour des chaînes de création de valeur énergétiquement efficaces

#### *Matériaux réduisant l'empreinte des produits*

- Remplacement des matières premières fossiles par des déchets ou des biomatériaux locaux;
- Processus durables pour capter, valoriser et stocker le CO<sub>2</sub> (CCUS) et fermer ainsi le cycle du carbone;
- Alternatives aux matériaux composites;
- Revêtements et traitement des surfaces en vue de nouvelles fonctionnalités des produits;
- Matériaux destinés à des cycles d'entretien et de remplacement plus longs pour les biens de consommation à longue durée de vie;
- Matériaux et conception de produits destinés à améliorer la capacité de recyclage et intégrant la gestion de la fin de vie.

#### *Processus de production innovants et optimisés*

- Ingénierie de la catalyse et ingénierie métabolique en vue de transformations plus rapides, plus efficaces et plus sélectives des matériaux dans des conditions favorables;
- Synthèse biotechnique et préparation de produits à faible consommation d'énergie;
- Apport ciblé d'énergie grâce à l'électronique de puissance (p. ex. dans les processus de séchage);
- Procédures avancées de séparation (p. ex. sorption, membranes, séparation réactif) présentant des rendements et sélectivités élevés et consommant peu d'énergie;
- Processus hybrides combinant les opérations de base (p. ex. réaction et séparation) pour éviter les étapes intermédiaires et réduire les pertes;
- Matériaux et appareils conçus pour une perte minimale de chaleur et de produit au cours du processus et pour simplifier les routines de nettoyage et de changement de produit;
- Processus stables en continu présentant des pertes minimales, notamment lors du traitement des matériaux solides (p. ex. agglomération, filtrage de produits pharmaceutiques ou chimiques spéciaux);
- Nouveaux matériaux, conceptions optimisées en termes de dynamique des flux et techniques sophistiquées pour fabriquer des composants compacts affichant un meilleur transfert de chaleur ou de masse;
- Capteurs compacts et financièrement abordables consommant très peu d'énergie pour surveiller des processus à distance;
- Modèles dynamiques pour régler et planifier le déroulement de processus très intégrés;
- Concepts de numérisation pour surveiller, gérer et optimiser la consommation d'énergie des installations de production;
- Développement de matériels et de logiciels selon les principes de l'efficacité énergétique (energy-aware computing).

#### *Fermeture des boucles de ressources avec une charge énergétique minimale*

- Processus efficaces pour traiter les produits et les déchets et recycler les matériaux à une échelle appropriée et avec une charge énergétique minimale;
- Conception de processus flexibles et adaptables aux flux hétérogènes et variables de l'économie circulaire;
- Réutilisation des matériaux et utilisation des rejets de chaleur pour réduire l'empreinte énergétique et les émissions générées par la gestion des déchets;
- Approches intégrées pour optimiser l'efficacité des ressources et la flexibilité dans le traitement des eaux usées pour des installations de toute taille;
- Approches systémiques pour moderniser les installations de production et les appareils en vue d'augmenter leur efficacité énergétique et leur durée de vie.

#### *Planification et développement d'un point de vue systémique*

- Intégration de méthodes prometteuses d'analyse du cycle de vie dans la conception des produits et l'élaboration des processus pour augmenter l'efficacité en terme d'énergie et des ressources pendant toute la durée de vie des produits;
- Méthodes d'optimisation multicritères pour accélérer l'élaboration des processus plus durable à tous les niveaux;
- Méthodes scientifiques de conception et d'optimisation pour évaluer la performance des réseaux de procédés intégrés au niveau d'un site et de la chaîne d'approvisionnement;
- Modèles de processus génériques et installations de production numériques en vue d'une analyse globale des scénarios au début des phases de développement et de planification;
- Modèles de branche génériques pour comparer la consommation d'énergie actuelle à des valeurs minimales et définir ainsi la priorité et la planification des mesures d'efficacité et d'intégration.

#### **Processus industriels dans un système énergétique durable et résilient**

##### *Produits et processus pour la technique énergétique de demain*

- Processus efficaces et écologiques pour traiter la biomasse complexe avant son utilisation en tant que matériau ou en tant que source d'énergie;
- Processus de fabrication intégrés pour des biocarburants ou des carburants de synthèse respectueux du climat, y compris Power-to-Gas et Power-to-X;
- Processus efficaces et écologiques pendant la phase d'utilisation des biocarburants et des carburants de synthèse (incinération, piles à combustible, etc.);
- Production durable, réutilisation, recyclage et élimination des batteries, piles à combustible et catalyseurs à l'échelle commerciale.

##### *Intégration des installations de production et des sites industriels dans les systèmes énergétiques de demain*

- Méthodes et outils pratiques et novateurs pour définir des solutions d'intégration des processus efficaces, fiables et flexibles au niveau tant des installations que de grands systèmes combinés, pour de nouvelles installations ou pour la modernisation des installations existantes;
- Systèmes efficaces de récupération, d'échange et de stockage de l'énergie chimique, thermique ou électrique dans les processus de fabrication industriels et dans les systèmes basés sur les TIC;
- Intégration de sources fluctuantes d'énergie renouvelable (solaire thermique, chaleur ambiante, photovoltaïque, etc.) dans les processus de production en optimisant la planification des procédures et le stockage;
- Modèles novateurs de pilotage des processus pour exploiter les avantages des systèmes intégrés en termes de flexibilité et de résilience;
- Concepts d'utilisation, de transformation et de transport dans le domaine du chauffage à distance, en particulier dans le segment des basses températures et pour les flux d'énergie décentralisés;

- Électrification des processus de fabrication (p. ex. pompes à chaleur pour fournir de la chaleur ou du froid industriels) pour raccorder une production d'électricité décentralisée;
- Systèmes multi-énergies pour fournir de la chaleur et de l'électricité aux installations industrielles dans des réseaux ayant des sources d'énergie fluctuantes et des schémas d'utilisation dynamiques;
- Symbiose au niveau des sites industriels pour réduire et flexibiliser le besoin en énergie et créer des possibilités commerciales grâce à un échange local de chaleur, d'électricité, de matériaux ou d'appareils;
- Méthodes d'optimisation de la conception et de l'exploitation des infrastructures multi-énergies.

*Recherche sectorielle en sciences humaines et sociales*

- Obstacles à l'optimisation énergétique lors de la planification de la production et au niveau de l'exploitation: solutions, y compris modèles de gestion;
- Modèles commerciaux encourageant l'efficacité énergétique et l'intégration des systèmes, y compris les outils de monitoring et de gestion;
- Facteurs de réussite de la commercialisation de nouveaux produits énergétiquement efficaces, y compris la formation et le perfectionnement;
- Identification des avantages contextuels multiples (multiple benefits) allant au-delà des aspects énergétiques;
- Implication appropriée des acteurs en vue d'une meilleure prise de décision au moyen d'analyses multicritères.