Recherche pour l'avenir énergétique de la Suisse

Résumé du Programme national de recherche « Énergie »

Avant-propos 3

1 Vue d'ensemble et recommandations 4 — 9

2 Transformation du système énergétique 10 — 31

2.1 Le système énergétique de demain — 14
2.2 Les acteurs et leurs champs d'action — 14
2.3 Les défis de la transformation du système énergétique — 21
2.4 Dynamiques de développement — 26

3 Champs d'action de la transformation et propositions de solutions 32 — 81

3.1 L'efficacité énergétique – paramètre clé de la transition énergétique — 36
3.2 Sources d'énergie renouvelables — 41
3.3 Répartition et couplage des vecteurs d'énergie — 48
3.4 Nouveaux modèles de financement et d'affaires — 54
3.5 Un système énergétique durable — 60
3.6 Le facteur humain — 65
3.7 Pilotage politique – de la définition des objectifs à la mise en œuvre — 73
3.8 Le contexte européen — 78

4 Conclusion 82 — 91

4.1 Potentiel inexploité dans le parc immobilier — 86
4.2 L'énergie hydraulique, entre besoins d'investissement et développement durable — 87
4.3 Motiver la population — 88
4.4 Besoin de re-réglementation et de soutien accru — 89

5 Recommandations 92 — 103

Bibliographie 104 — 107

Annexe 108 — 109

Suggestion pour la citation

Balthasar, A., Schalcher, H.R. (2020): Recherche pour l'avenir énergétique de la Suisse. Résumé du Programme national de recherche « Énergie ».

Éd.: Comités de direction des Programmes nationaux de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) et « Gérer la consommation d'énergie » (PNR 71), Fonds national suisse, Berne.

FNSNF Fonds national suisse de la recherche scientifique

70 PNR Virage énergétique Programme national de recherche

71 PNR Gérer la consommation d'énergie Programme national de recherche

Mentions légales
Les résultats des Programmes nationaux de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) et « Gérer la consommation d'énergie » (PNR 71) sont réunis sous le titre « Programme national de recherche Énergie ».

Ce résumé rassemble les résultats de 103 projets de recherche et quatre études complémentaires, ainsi que six synthèses thématiques et quatre synthèses conjointes du PNR « Énergie », pour en tirer des conclusions et des recommandations. Il constitue une contribution scientifique à la formation de l'opinion, au débat politique et technique, ainsi qu'à la planification des mesures et stratégies de transformation du système énergétique dans le contexte de la Stratégie énergétique 2050 de la Suisse.

L'élaboration du résumé a nécessité un processus en plusieurs étapes. Un grand nombre d'expertes et d'experts ont fourni des textes, qu'un rédacteur s'est chargé de rassembler et de mettre en forme. Un groupe de réflexion composé de huit spécialistes de l'administration et de la pratique a examiné le document et l'a évalué de son point de vue.
Le résumé a ensuite été complété et validé par les Comités de direction. Le présent texte relève de la responsabilité de ses auteurs. Les appréciations et recommandations d'action de ces derniers ne doivent pas nécessairement correspondre à celles du groupe de réflexion, des expertes et experts ayant fourni des textes, des équipes de recherche ou du Fonds national suisse.

Le portail web www.pnr-energie.ch propose des informations complémentaires à propos de tous les projets de recherche du PNR « Énergie » cités ci-après.

Éditeur
Comités de direction des Programmes nationaux de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) et « Gérer la consommation d'énergie » (PNR 71)

Auteurs
Pr Dr Andreas Balthasar
Président du Comité de direction du PNR 71
Département de science politique
Université de Lucerne

Pr Dr Hans-Rudolf Schalcher
Président du Comité de direction du PNR 70
EPF de Zurich

Rédaction
Urs Steiger
dipl. sc. nat. EPF/SIA
journaliste scientifique
steiger texte konzepte beratung
Lucerne

Contributions de textes
Pr Dr Matthias Finger
Management des industries de réseau, EPF de Lausanne

Pr Dr David Gugerli
Chaire d'histoire de la technique
EPF de Zurich

Pr Dr Peter Hettich
Institut de finance et de droit financier
Université de Saint-Gall

Pr Stefan Hirschberg
Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen

Pr Dr Gabriela Hug
Power Systems Laboratory
EPF de Zurich

Pr Dr Marco Mazzotti
Institut des procédés, EPF de Zurich

Pr Dr Frank Scheffold
Département de physique
Université de Fribourg

Pr Dr Petra Schweizer-Ries
Membre du Comité de direction du PNR 71
Institut intégré du développement durable, Haute École de Bochum

Pr Dr Isabelle Stadelmann-Steffen
Institut de science politique
Université de Berne

Urs Steiger
dipl. sc. nat. EPF/SIA
journaliste scientifique
steiger texte konzepte beratung Lucerne

Dr Jan van der Eijk
Membre du Comité de direction du PNR 70
Technology and Business Innovation Consultant, Dordrecht

Pr Dr Frédéric Varone
Membre du Comité de direction du PNR 71
Département de Science Politique et Relations Internationales
Université de Genève

Pr Dr Hannes Weigt
Centre de recherche pour un approvisionnement durable en eau et en énergie, Université de Bâle

Pr Dr Rolf Wüstenhagen
Institut d'économie et d'écologie
Université de Saint-Gall

Groupe de réflexion
Dr h.c. Lukas Bühlmann
EspaceSuisse, Conseil de l'organisation du territoire COTER, Berne

Michael Frank
Association des entreprises électriques suisses AES, Aarau

Kurt Lanz
economiesuisse, Zurich

Roger Nordmann
Swissolar, Zurich

Benoît Revaz
Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne

Dr Raimund Rodewald
Fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage, Berne

Dr Franziska Schwarz
Office fédéral de l'environnement OFEV
Berne

Barbara Schwickert
Association Cité de l'énergie, Bienne

Coordination globale
Dr Stefan Husi
Manager du PNR 70 et du PNR 71, Fonds national suisse, Berne

Suivi et production
Dr Andrea Leu
Transfert de connaissances et technologie PNR 70 et PNR 71, Senarclens, Leu + Partner AG, Zurich

Dr Oliver Wimmer
Transfert de connaissances et technologie PNR 70 et PNR 71, CR Kommunikation AG, Bâle/Berne/Zurich

Traduction
STP Language Services GmbH, Stäfa

Mise en forme
CR Kommunikation AG, Bâle/Berne/Zurich

Illustrations de projets:
ikonaut GmbH, Brugg

Crédits photos de couverture
Première de couverture:
Magazine « Energie & » | Énergie & Réseaux, Illustration: Studio Wøt

Quatrième de couverture:
Magazine « Energie & » | Énergie & fiction, Illustration: CR Kommunikation AG

Copyright
© 2020 Fonds national suisse de la recherche scientifique

Version numérique corrigée
(Février 2020)

Impression
ILG AG WIMMIS, Wimmis

Le résumé a été imprimé de manière climatiquement neutre.

PERFORMANCE myclimate neutral Imprimé | 01-14-213652 myclimate.org

En se prononçant en faveur de la révision de la Loi sur l'énergie et, par conséquent, de la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050, l'électorat suisse a décidé de la sortie du nucléaire. La transformation du système énergétique suisse, une tâche d'une ampleur exceptionnelle, a ainsi été mise sur les rails. Avec les Programmes nationaux de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) et « Gérer la consommation d'énergie » (PNR 71) – réunis dans le PNR « Énergie » – le Conseil fédéral a chargé le Fonds national suisse de répertorier les découvertes scientifiques et les solutions innovantes susceptibles de favoriser cette transformation, ainsi que de formuler des recommandations en la matière.

Plus d'une centaine de projets de recherche ont permis au PNR « Énergie » de mettre en avant une grande variété de découvertes et d'innovations, représentant autant de contributions tournées vers l'avenir, pertinentes tant pour les développements fondamentaux que pour la mise en œuvre pratique. Dans de nombreux domaines, les travaux de recherche ont permis des constats très précieux sur le plan social et politique. Ils ont par exemple montré clairement que la transformation du système énergétique est l'affaire de la société dans son ensemble et nécessite la conjugaison d'innovations technologiques et sociales. Si la recherche et l'innovation sont à même d'ouvrir des portes et de tracer des chemins, ce sont les acteurs individuels et les instances politiques qui décident finalement – au nom de la société – si les solutions proposées sont appropriées et acceptables au quotidien.

Les différents travaux de recherche menés appréhendent les défis de la transformation selon des perspectives très variées. Parce qu'elles expriment parfois des conflits d'objectifs liés à la transformation énergétique, leurs déclarations ne coïncident pas toujours. Dans le cadre des synthèses consacrées aux différents axes thématiques, le PNR « Énergie » les a soupesées et, dans la mesure où les résultats des recherches le permettaient, les a consolidées au sein d'une vision d'ensemble. Malgré son ampleur et sa diversité, le programme ne peut apporter de réponse globale aux défis considérables qu'implique la transformation du système énergétique. Des aspects importants, comme la mobilité ou le rôle du numérique, n'ont pas pu être traités avec le niveau d'approfondissement requis. Dans le contexte du débat sur le climat, la politique énergétique évolue en outre de façon très dynamique en ce moment. Des recommandations qui ne semblent encore guère faire consensus sur le plan politique aujourd'hui peuvent très bien réunir une majorité demain !

Grâce à leurs travaux, les chercheuses et chercheurs du PNR « Énergie » ont fourni de nombreuses pièces pour composer le grand puzzle de la transformation. Les synthèses relatives aux axes thématiques ont permis de les organiser et de les préparer en vue de la mise en œuvre. Celles-ci – ainsi que l'ensemble des informations relatives aux différents projets de recherche – sont disponibles sur le portail web spécialement créé: www.pnr-energie.ch.

Il appartient désormais aux actrices et acteurs cités dans ce résumé – fournisseurs d'énergie, ménages privés, entreprises, propriétaires de maisons, bailleurs de fonds, administrations publiques, associations et ONG, électorat et instances politiques – d'assembler les pièces du puzzle et de faire progresser la transformation du système énergétique.

Pr Dr Hans-Rudolf Schalcher
Président du Comité de direction du PNR 70

Pr Dr Andreas Balthasar
Président du Comité de direction du PNR 71

Dans le contexte de la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 et des prochaines étapes de la politique climatique, le Conseil fédéral suisse a lancé en 2012 les Programmes nationaux de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) et « Gérer la consommation d'énergie » (PNR 71). Tandis que le PNR 70 s'est plus particulièrement intéressé aux questions technologiques tout en tenant compte des aspects économiques, le PNR 71 a étudié plus spécifiquement la dimension sociale et réglementaire de la transformation du système énergétique. Les conclusions des deux programmes de recherche sont réunies sous l'intitulé « Programme national de recherche Énergie » (PNR « Énergie »).

Au nombre de plus de 100, les projets de recherche du PNR « Énergie » ont débouché sur des centaines de résultats individuels. Certains d'entre eux ont promu ou généré des innovations technologiques, d'autres ont analysé l'environnement économique ou social. Divers projets portaient sur les aspects techniques, mais aussi économiques et sociaux de la transformation du système énergétique, et sur l'étude de la durabilité des innovations. Le chapitre 2 du présent résumé propose une vue d'ensemble des défis qui se posent en Suisse du fait de la transformation initiée par la Stratégie énergétique 2050. Le chapitre 3 présente les champs d'action de la transformation et les propositions de solutions développées par le PNR « Énergie ». Le chapitre 4 met en avant les aspects qui semblent particulièrement pertinents pour la transformation du système énergétique du point de vue du PNR « Énergie ». C'est sur cette base qu'un certain nombre de recommandations sont ensuite formulées dans le chapitre 5. Les propositions de solutions et les recommandations du résumé s'adressent tout particulièrement aux acteurs clés qui ont une influence notable sur le système énergétique et peuvent donc contribuer à le façonner.

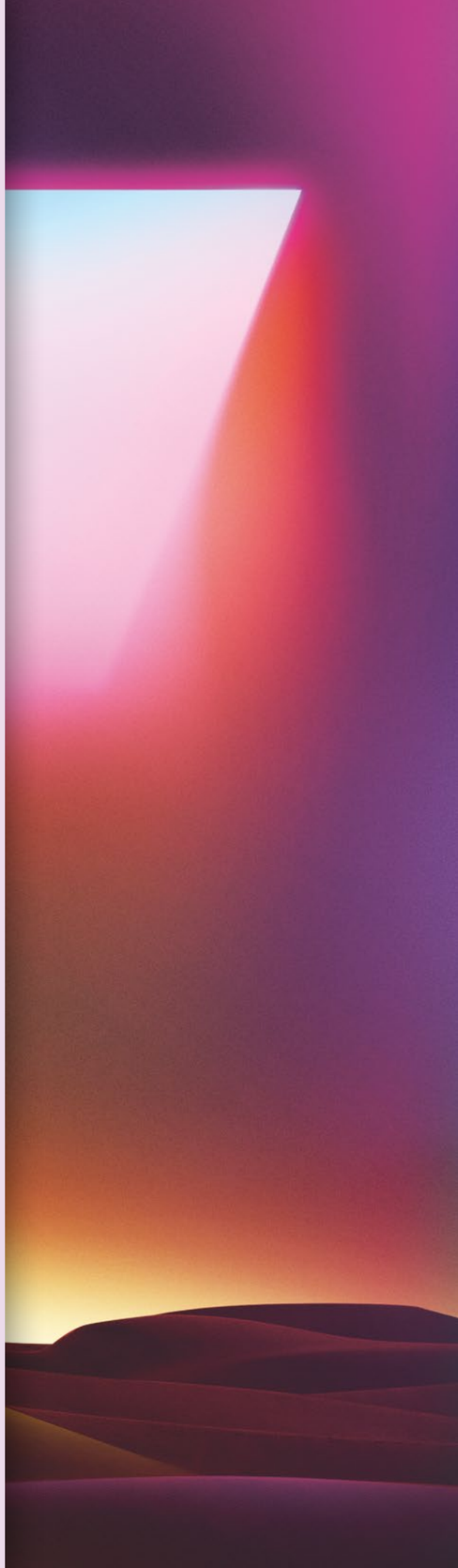
Les enseignements issus du PNR « Énergie » soulignent une nouvelle fois que les aspects socio-politiques sont tout aussi importants que les considérations techniques pour la transformation du système énergétique ; ils constituent la clé qui permet la réalisation des solutions techniques. Afin que les individus agissent dans les diverses fonctions qu'ils occupent, ils doivent être informés des possibilités d'action concrètes et ils doivent être en mesure de les mettre en œuvre.

Le secteur de la mobilité et le parc immobilier offrent un potentiel considérable dans la perspective de la réalisation de la Stratégie énergétique 2050. Dans le domaine de la mobilité, on peut notamment tabler sur les progrès des véhicules économes en énergie, mais aussi sur de nouveaux carburants, des concepts de mobilité innovants et des changements de comportement volontaires. Le parc immobilier réserve toujours des possibilités considérables d'amélioration de l'efficacité et de recours aux sources d'énergie renouvelables pour l'électricité et le chauffage, mais aussi de vastes surfaces sous-exploitées pouvant accueillir des installations photovoltaïques. Si l'assainissement du parc immobilier devenait plus rapide et plus poussé, il pourrait contribuer à la transformation du système énergétique conformément aux attentes, voire encore davantage.

L'énergie hydraulique conservera à l'avenir un rôle central au sein du système énergétique de la Suisse. Pour continuer à jouer pleinement ce rôle, elle nécessite une attention accrue. Elle dispose certes d'un solide potentiel d'amélioration de l'efficacité, mais ses possibilités de développement demeurent limitées pour des raisons économiques et écologiques.

Un des constats clés du PNR « Énergie » est cependant que, globalement, la législation ne soutient pas la transformation autant que nécessaire. En outre, la mise en œuvre des mandats d'utilité publique nécessite notamment une coordination accrue des acteurs publics à tous les échelons des autorités, mais aussi entre ces derniers. En effet, les villes et les communes disposent d'une marge de manœuvre qu'elles pourraient utiliser beaucoup plus activement pour faire progresser la transformation.

1 Vue d'ensemble et recommandations



Dans le contexte de la mise en c
Stratégie énergétique 2050 et des proc
de la politique climatique, le Conseil féd
a lancé en 2012 les Programmes nation
che « Virage énergétique » (PNR 70) et
consommation d'énergie » (PNR 71). Tar
PNR 70 s'est plus particulièrement inté
questions technologiques tout en tenar
aspects économiques, le PNR 71 a étud
quement la dimension sociale et réglem
la transformation du système énergétic
conclusions des deux programmes de r
réunies sous l'intitulé « Programme nati
recherche Énergie » (PNR « Énergie »).

Au nombre de plus de 100, les projets c
PNR « Énergie » ont débouché sur des c
résultats individuels. Certains d'entre e
ou généré des innovations technologiqu
analysé l'environnement économique ou
projets portaient sur les aspects techni
aussi économiques et sociaux de la tran
système énergétique, et sur l'étude de l
innovations. Le chapitre 2 du présent ré
une vue d'ensemble des défis qui se po
du fait de la transformation initiée par l
énergétique 2050. Le chapitre 3 présen
d'action de la transformation et les prop
solutions développées par le PNR « Éne
chapitre 4 met en avant les aspects qui
particulièrement pertinents pour la tran
système énergétique du point de vue du
gie ». C'est sur cette base qu'un certain
recommandations sont ensuite formulé
chapitre 5. Les propositions de solution
mandations du résumé s'adressent tout
ment aux acteurs clés qui ont une influ
sur le système énergétique et peuvent
à le façonner.

Les enseignements issus du PNR « Éne
soulignent une nouvelle fois que les asp
politiques sont tout aussi importants qu
rations techniques pour la transformati
tème énergétique ; ils constituent la clé
réalisation des solutions techniques. Af
individus agissent dans les diverses for

En 2012, le Conseil fédéral a lancé le Programme national de recherche « Énergie » dans le contexte de la Stratégie énergétique 2050 et du développement continu de la politique climatique. Les résultats de ces recherches et la quinzaine de recommandations qu'en a déduit le Comité de direction animent désormais le débat.

Magazine « E& » | Énergie & fiction, illustration : Magdiel Lopez

15 Recommandations

1 – Encourager l'efficacité énergétique grâce à une réglementation ciblée et promouvoir le développement des sources d'énergie renouvelables.

Bon nombre des technologies nécessaires à la transformation du système énergétique sont déjà opérationnelles. Sur la simple base du volontariat, celles-ci sont toutefois insuffisamment utilisées, en particulier dans le secteur des bâtiments et de la mobilité. Pour atteindre les objectifs fixés, des interventions réglementaires sont par conséquent requises en complément des incitations économiques. Diverses décisions politiques préliminaires prises récemment vont dans la bonne direction.

2 – Inciter aux économies d'énergie grâce à une tarification flexible et dynamique de l'électricité, des objectifs de récompense et l'information.

Les fournisseurs d'énergie doivent développer et appliquer des plans tarifaires flexibles et dynamiques, qui incitent à diminuer la consommation d'électricité et les dépenses d'énergie. La combinaison avec un système de bonus, récompensant la réalisation des objectifs d'économie, permet d'améliorer l'acceptation de cette tarification.

3 – Soutenir le développement des sources d'énergie renouvelables grâce à une taxe CO_2 incitative globale et efficace.

Les mesures incitatives sont plus efficaces et moins coûteuses que les mesures d'encouragement. L'application d'une taxe CO_2 à l'ensemble des sources d'énergie fossiles est donc particulièrement bien adaptée pour faire progresser la transformation du système énergétique.

4 –Mettre en place une logistique décarbonée d'ici 2050.

Un approvisionnement décarboné des agglomérations urbaines permet d'atteindre 7 % des objectifs d'efficacité de la Stratégie énergétique 2050 en la matière et près de 9 % de la réduction des gaz à effet de serre visée. Les cantons, villes et communes sont donc invités à mettre en place les conditions cadres correspondantes et à collaborer avec les acteurs logistiques.

5 – Créer des systèmes multiénergies décentralisés (DMES).

Les systèmes multi-énergies décentralisés (DMES) permettent une utilisation particulièrement efficace de l'énergie produite de façon décentralisée. Pour permettre leur réalisation, la production et la fourniture d'énergie doivent être appréhendées comme un tout aux niveaux local et régional. L'organisation autonome et la réglementation gouvernementale doivent se compléter au mieux. Les communes, mais aussi le gouvernement fédéral et les cantons doivent préparer le terrain en termes de planification et de législation.

6 – Focaliser l'énergie hydraulique sur son rôle stabilisateur au sein du système énergétique.

Les nouvelles sources d'énergie renouvelables sont confrontées au problème que la production et la consommation ne coïncident pas toujours. L'énergie hydraulique joue un rôle central à cet égard : elle stabilise le système de distribution et garantit techniquement la sécurité d'approvisionnement du système énergétique suisse. Cette fonction peut également servir de base à des compensations financières.

7 – Aligner les redevances hydrauliques sur les rendements.

En 2024, une nouvelle solution doit être trouvée pour la redevance hydraulique. Elle devrait se baser sur le rendement et refléter ainsi le prix du marché et les coûts de production. La nouvelle solution doit également prendre en compte les intérêts des régions de montagne, pour lesquelles la redevance hydraulique est économiquement bien plus importante que pour les producteurs d'électricité.

8 – Adapter le régime de l'eau résiduelle aux impératifs écologiques.

La Loi sur la protection des eaux est aujourd'hui insuffisamment appliquée du point de vue des objectifs écologiques. La diversité biologique souhaitée n'est pas atteinte en aval des ouvrages de retenue. C'est pourquoi les cantons doivent conditionner leur réalisation de façon à ce que le débit d'eau résiduel puisse garantir les objectifs écologiques. Les mesures requises nécessitent davantage d'eau et réduisent la production d'électricité.

9 – Créer des conditions optimales pour les modèles de financement auxquels la population peut participer.

La participation financière aux investissements dans les infrastructures des sources d'énergie renouvelables est un facteur d'identification. Les organismes ancrés localement comme les associations, les coopératives ou les organisations de quartier sont sources d'acceptation et contribuent à faire progresser le développement des sources d'énergie renouvelables.

10 – Dès le départ, impliquer activement la population dans la planification des projets d'infrastructures.

La participation renforce l'identification et contribue à l'acceptation. Les initiateurs de projets doivent par conséquent adopter une organisation participative des processus de planification des projets dans le domaine des sources d'énergie renouvelables.

11 – Transmettre des connaissances de manière neutre et ciblée.

La diffusion de connaissances et d'informations doit employer des stratégies innovantes pour prendre en compte les niveaux de connaissance et de motivation variables des différents groupes de population. Les autorités fédérales et cantonales, les villes et les communes, les associations et le secteur économique doivent informer sur le fonctionnement des technologies et des mécanismes de commande, et communiquer de façon convaincante qu'une large partie du potentiel d'efficacité énergétique peut être mise à profit sans sacrifice et sans perte de confort : gagner en efficacité énergétique ne signifie pas perdre en confort.

12 – Laisser les associations prendre davantage de responsabilités.

Les associations échangent étroitement avec leurs membres et disposent de connaissances spécifiques à leur secteur, susceptibles de faire progresser la transformation du système énergétique. Elles devraient tirer profit de l'importance de leur rôle dans les processus de décision politiques pour convaincre leurs membres de soutenir des solutions développées en commun.

13 – Inciter les villes et les communes à exploiter plus activement leur marge de manœuvre dans le domaine de l'énergie.

En tant que propriétaires de bâtiments et exploitantes de régies et d'entreprises publiques, entités politiques ou soutiens d'initiatives locales, les villes et communes disposent de nombreuses possibilités de contribuer à la transformation du système énergétique. Elles peuvent par conséquent agir en matière de planification, d'organisation et de communication – et ce, pas uniquement dans le domaine de l'énergie.

14 – Clarifier rapidement les rapports entre la Suisse et l'Union européenne dans l'intérêt de la sécurité d'approvisionnement en électricité.

Des importations d'électricité permettent à la Suisse de compenser les fortes variations saisonnières de la production des centrales hydroélectriques. Les relations avec l'Union européenne et, par conséquent, avec les marchés européens de l'énergie déterminent comment cet équilibre peut être garanti à l'avenir, et à quel prix. En l'absence d'accord sur l'électricité, les coûts seront nettement supérieurs.

15 – Élaborer un concept fédéral pour la transformation du système énergétique.

Des processus de planification et d'autorisation mal, voire pas du tout coordonnés ralentissent de nombreux projets d'infrastructures énergétiques. Grâce à un concept élaboré conjointement, le gouvernement fédéral, les cantons et les communes doivent ainsi créer une base fiable, permettant de concilier les intérêts des différents échelons administratifs et de résoudre les blocages.

Dans le contexte de la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 et des prochaines étapes de la politique climatique, le Conseil fédéral suisse a lancé en juillet 2012 les Programmes nationaux de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) et « Gérer la consommation d'énergie » (PNR 71), et a confié leur réalisation au Fonds national suisse (FNS). L'objectif était notamment de jeter des bases dans la perspective du deuxième train de mesures de la Stratégie énergétique 2050. Tandis que le PNR 70 s'est plus particulièrement intéressé aux questions technologiques tout en tenant compte des aspects économiques, le PNR 71 a étudié plus spécifiquement la dimension sociale et réglementaire de la transformation du système énergétique. Les conclusions des deux Programmes nationaux de recherche sont réunies sous l'intitulé « Programme national de recherche Énergie » (PNR « Énergie »).

Le PNR « Énergie » s'est entre autres appuyé sur le rapport de référence du 24 avril 2012 sur le plan d'action « Recherche énergétique suisse coordonnée » du gouvernement fédéral et sur le message correspondant. Ce document définit également les Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER), dont le but premier est le développement des capacités de recherche dans le domaine de l'énergie et qui traitent par conséquent de thématiques semblables à celles du PNR « Énergie ». Les deux initiatives de recherche sont toutefois rigoureusement complémentaires, de façon à éviter toute redondance.

L'enveloppe financière allouée au PNR 70 était de 37 millions de francs, celle du PNR 71 de huit millions de francs. En 2013, plus de 350 esquisses de projets ont été soumises. Sur la base d'un processus d'évaluation international à deux tours, les Comités de direction ont sélectionné 15 projets conjoints, comprenant en tout 62 sous-projets et sept projets individuels pour le PNR 70 ainsi que 19 projets individuels pour le PNR 71. La contribution attendue à la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 et la qualité scientifique étaient les critères d'évaluation prioritaires des projets. Aux 103 projets de recherche retenus se sont ajoutées au fil du programme quatre études complémentaires, dont les résultats pratiques comblent des lacunes thématiques dans le portefeuille de recherche du PNR « Énergie ».

Le présent résumé propose une vue d'ensemble des défis (chap. 2) engendrés par la transformation du système énergétique en Suisse. Il présente les champs d'action de la transformation et les propositions de solutions développées par le PNR « Énergie » (chap. 3). Puis il conclut sur les aspects qui semblent particulièrement pertinents pour la transformation du système énergétique du point de vue du PNR « Énergie » (chap. 4) et les recommandations qui en ont été déduites (chap. 5). Le résumé complète six synthèses thématiques[1] qui proposent des informations détaillées sur des thèmes précis. Les propositions de solutions et les recommandations du résumé s'adressent tout particulièrement aux acteurs clés qui ont une influence notable sur le système énergétique et peuvent donc contribuer à le façonner.

1 Les synthèses relatives aux axes thématiques « Acceptation », « Réseaux d'énergie », « Bâtiments et habitations », « Conditions du marché et réglementation », « Comportement de mobilité », « Force hydraulique et marché » du PNR « Énergie » sont disponibles sous forme numérique sur le portail Web www.pnr-energie.ch.

2 Transformation du système énergétique

Dans le contexte de la mise en c
Stratégie énergétique 2050 et des proc
de la politique climatique, le Conseil féd
lancé en juillet 2012 les Programmes na
recherche « Virage énergétique » (PNR
consommation d'énergie » (PNR 71), et
réalisation au Fonds national suisse (FN
était notamment de jeter des bases dar
tive du deuxième train de mesures de la
énergétique 2050. Tandis que le PNR 70
particulièrement intéressé aux question
ques tout en tenant compte des aspect
le PNR 71 a étudié plus spécifiquement
sociale et réglementaire de la transforn
système énergétique. Les conclusions d
Programmes nationaux de recherche so
l'intitulé « Programme national de reche
(PNR « Énergie »).

Le PNR « Énergie » s'est entre autres ap
rapport de référence du 24 avril 2012 su
d'action « Recherche énergétique suisse
du gouvernement fédéral et sur le mess
dant. Ce document définit également le
Competence Centers for Energy Resear
dont le but premier est le développeme
tés de recherche dans le domaine de l'é
traitent par conséquent de thématiques
à celles du PNR « Énergie ». Les deux in
recherche sont toutefois rigoureuseme
taires, de façon à éviter toute redondar

L'enveloppe financière allouée au PNR 7
37 millions de francs, celle du PNR 71 d
de francs. En 2013, plus de 350 esquiss
ont été soumises. Sur la base d'un proc
tion international à deux tours, les Com
ont sélectionné 15 projets conjoints, co
tout 62 sous-projets et sept projets ind
PNR 70 ainsi que 19 projets individuels
La contribution attendue à la mise en œ
Stratégie énergétique 2050 et la qualite
étaient les critères d'évaluation priorita
projets. Aux 103 projets de recherche r
ajoutées au fil du programme quatre ét
plémentaires, dont les résultats pratiqu
des lacunes thématiques dans le portef
recherche du PNR « Énergie ».

Les technologies marquent le système énergétique, ainsi que les conditions-cadres politiques et les actrices et acteurs impliqués dans le système. Les défis associés à la refonte du système énergétique sont d'autant plus variés.

Magazine « E& » | Énergie & Mobilité, illustration : Walkingframes Animation Studio

2.1 Le système énergétique de demain

Tout comme l'actuel système énergétique celui de demain (cf. illustration 1) est un système socio-technique complexe : complexe parce qu'il est ouvert, extrêmement dynamique et associé à d'innombrables facteurs d'incertitude; socio-technique parce qu'il présente aussi bien une dimension technique que des aspects socio-organisationnels. La dimension technique comprend l'ensemble des éléments techniques de l'infrastructure énergétique, tels que les centrales, les réseaux de distribution, les installations de stockage et de commande, ainsi que les consommateurs d'énergie que sont les appareils électroménagers, les équipements informatiques, les installations de production et les moyens de transport. Les acteurs privés et publics du système énergétique comme les fournisseurs d'énergie, les ménages, les entreprises et les instances politiques font, quant à eux, partie de la dimension socio-organisationnelle.

Ces éléments s'organisent autour d'un réseau dense et polyvalent de liaisons et de flux. Ces derniers comprennent notamment les flux énergétiques à proprement parler (p. ex. l'électricité, la chaleur et le gaz), les flux de matériaux (p. ex. les déchets et la biomasse), les flux financiers (p. ex. les frais, les remboursements d'emprunts et les taxes d'incitation) et les flux d'informations. Les flux d'énergie et de matériaux font office de jonction entre les éléments techniques et les flux financiers et d'informations des acteurs. D'autres liaisons émanent des processus qui se déroulent entre les acteurs, à l'instar du processus politique, qui se déploie jusqu'à l'autorisation de surélévation d'un barrage existant, ou des processus de collaboration et de formation de l'opinion. De nombreuses relations systémiques existent également entre le système énergétique suisse et son environnement, d'autant plus que le système énergétique de la Suisse sera à l'avenir tributaire d'une interconnexion plus forte avec l'Europe, bien que variable au fil du temps.

Le futur système énergétique sera nettement plus complexe que l'actuel. Le nombre d'acteurs – et par conséquent d'interactions – augmentera, la fourniture d'énergie deviendra de plus en plus irrégulière, et la responsabilité du système reposera sur un nombre croissant d'intervenants. Cette complexité met les acteurs au défi de planifier et de mettre en œuvre les mesures de développement du système énergétique sous forme de train de mesures coordonnées et non plus à titre isolé, tout en tenant compte de l'ensemble des répercussions potentielles sur l'ensemble du système énergétique, l'environnement, l'économie et la société.

2.2 Les acteurs et leur champ d'action

Le PNR « Énergie » s'est intéressé de manière approfondie à la question de savoir qui a une influence déterminante sur le système énergétique. Il s'est notamment demandé quels acteurs pouvaient faire bouger les choses dans un délai raisonnable. C'est à ces acteurs majeurs que s'adressent les messages clés et les recommandations dérivés des conclusions du PNR « Énergie ».

● **Fournisseurs d'énergie** – La catégorie des fournisseurs d'énergie comprend aussi bien les producteurs d'énergie, notamment les exploitants de centrales et d'installations d'énergie renouvelable, que les distributeurs d'énergie, qui approvisionnent les consommateurs via un réseau de distribution.

En Suisse, la distribution d'électricité implique à elle seule quelque 700 entreprises (OFEN 2019), dans lesquelles les cantons et les communes détiennent parfois des participations conséquentes. Hormis quelques grandes entreprises, il s'agit fréquemment de régies (inter)municipales qui, outre la distribution d'électricité, assurent également la distribution du gaz ou encore l'exploitation d'un réseau de chaleur à distance. Bon nombre de ces entreprises œuvrent à la fois comme producteur et comme distributeur d'électricité. Leurs capacités d'influence sur la transformation du système énergétique sont d'autant plus variées. Elles peuvent par exemple y contribuer par l'intermédiaire de leurs investissements et de leurs concepts d'exploitation. Les distributeurs d'énergie sont aussi en contact étroit avec les consommateurs d'énergie (ménages, entreprises, propriétaires de bâtiments), dont ils peuvent influencer le comportement par leur stratégie de produits et de prix, mais aussi par les informations qu'ils leur communiquent.

L'énergie, qu'est-ce que c'est ?

L'énergie ne peut pas être fabriquée et ne se perd pas. Si dans le langage courant on parle de « consommation d'énergie », il s'agit en fait de la conversion de l'état énergétique d'une matière en une autre. La combustion du bois génère, par exemple, de la fumée et des cendres en libérant de l'énergie sous forme de chaleur utilisable par l'homme ou la technique.

La fusion nucléaire qui se produit dans le soleil est à l'origine de presque toutes les formes d'énergie utilisables par les humains. Au cours de cette réaction, un noyau d'hélium est obtenu par fusion de deux noyaux d'hydrogène dont la masse diminue de Δm. Conformément à la théorie générale de la relativité d'Einstein, l'énergie libérée correspond à $E = \Delta mc^2$. La densité énergétique de cette réaction est énorme : à partir d'un kilogramme d'hydrogène, le soleil génère 100 milliards de fois plus d'énergie qu'un moteur n'en produit avec un kilogramme d'essence. Une infime partie du rayonnement solaire généré par cette fusion nucléaire atteint la terre sous forme de lumière.

Grâce au rayonnement solaire, les êtres vivants produisent de la biomasse, conservée pendant de longues périodes de temps dans des sources d'énergie fossiles comme le pétrole et le charbon. L'énergie solaire de temps très anciens est ainsi stockée chimiquement et peut-être retransformée et utilisée par combustion avec de l'oxygène. Le stockage chimique de l'énergie solaire fonctionne cependant aussi de façon plus rapide et plus directe, par exemple en exploitant la biomasse issue des déchets ou par l'intermédiaire de carburants comme le bioéthanol ou le biodiesel. Beaucoup d'autres sources d'énergie renouvelables sont également basées sur l'énergie solaire : lorsque le rayonnement solaire touche la surface de la terre, il réchauffe cette dernière et assure ainsi un échange de chaleur avec l'atmosphère. L'énergie solaire est ainsi à l'origine de tous les phénomènes météorologiques et, en combinaison avec la rotation terrestre, intervient dans la formation du vent, des vagues, de la pluie, de la neige, des lacs et des rivières, qui sont déjà tous exploités pour la production d'électricité. Les modules photovoltaïques convertissent jusqu'à un quart du rayonnement solaire directement en énergie électrique. Le rayonnement solaire peut également servir à chauffer des fluides, par exemple dans les capteurs solaires installés sur les toits des maisons ou dans des centrales solaires thermiques.

De rares sources d'énergie sont totalement indépendantes du soleil. Outre l'énergie nucléaire, on peut par exemple citer la géothermie, qui exploite la chaleur stockée dans la croûte terrestre, ou les marées, basées sur l'énergie cinétique de la Terre et de la Lune.

À l'avenir, la catégorie des fournisseurs d'énergie se confondra de plus en plus avec celle des consommateurs d'énergie en raison de la forte augmentation du nombre de bâtiments qui seront à la fois producteurs et consommateurs d'énergie. La mise en place de systèmes multiénergies décentralisés, associée au couplage des différents agents énergétiques (couplage sectoriel, cf. chap. 3.3), par exemple par l'intégration de l'électromobilité ou le raccordement à la chaleur dissipée par l'activité industrielle, redistribue également les rôles au sein du système énergétique. Pour l'heure, il reste difficile d'évaluer le rôle que pourraient jouer à l'avenir des fournisseurs de prestations jusqu'ici étrangers à la branche (p. ex. Google ou Amazon), qui commencent à se positionner sur le marché de l'énergie grâce à des instruments basés sur le Web, à l'exploitation des « big data », des « block chain » et d'autres technologies numériques.

● **Ménages privés** – Les ménages privés – c'est-à-dire les personnes qui vivent ensemble dans un même logement – sont des acteurs clés du système énergétique. En 2017, la Suisse comptait 3,72 millions de ménages privés (OFS 2018), soit 6 % de plus qu'en 2013. Leur nombre continue de croître. Autre fait marquant d'un point de vue énergétique : près d'un logement sur cinq est souvent inoccupé (OFS 2018a). Or, dans bon nombre d'entre eux, le chauffage et le chauffe-eau

L'illustration 1

montre la complexité du futur système énergétique et des flux inhérents (sans prétendre à l'exhaustivité).

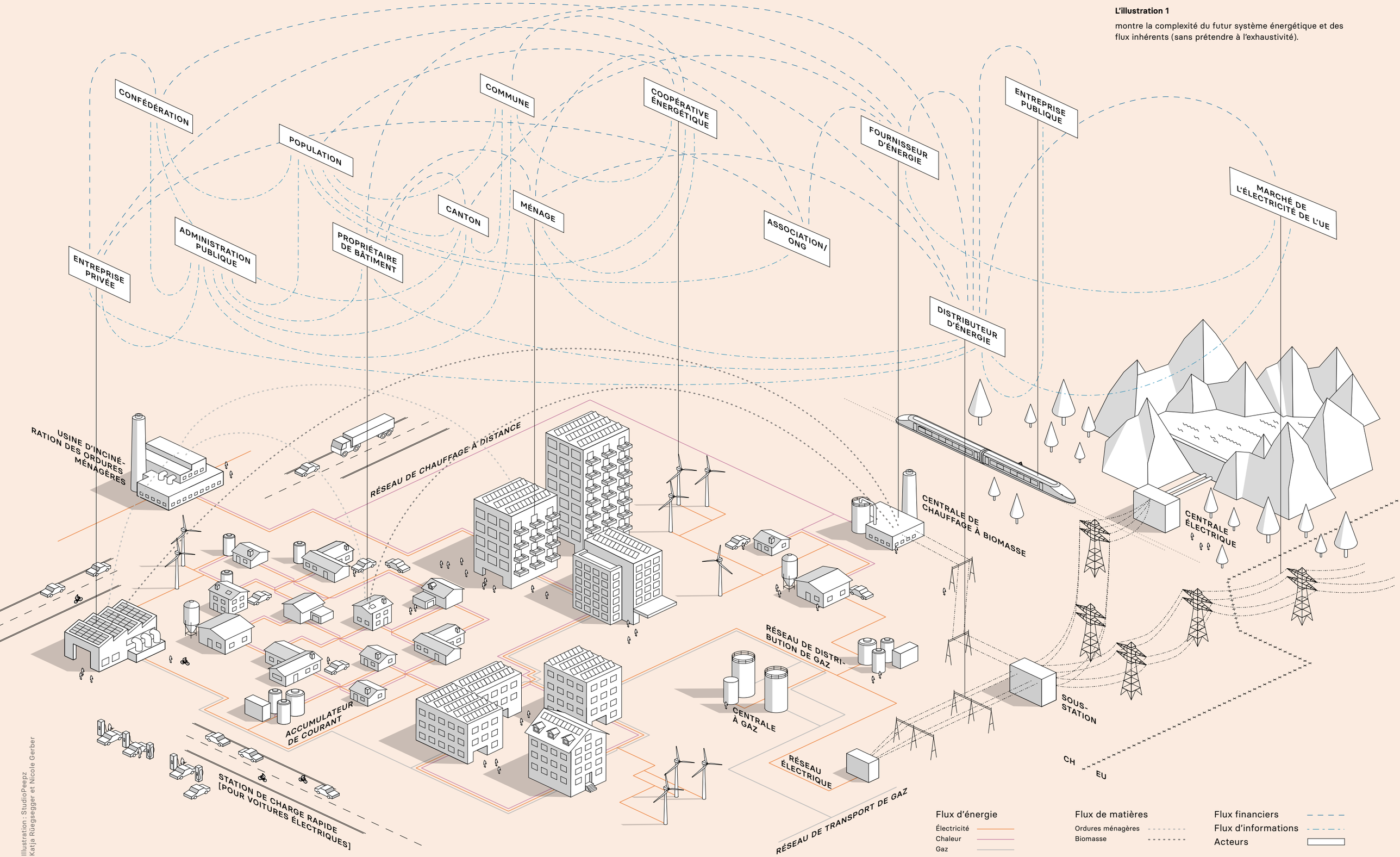
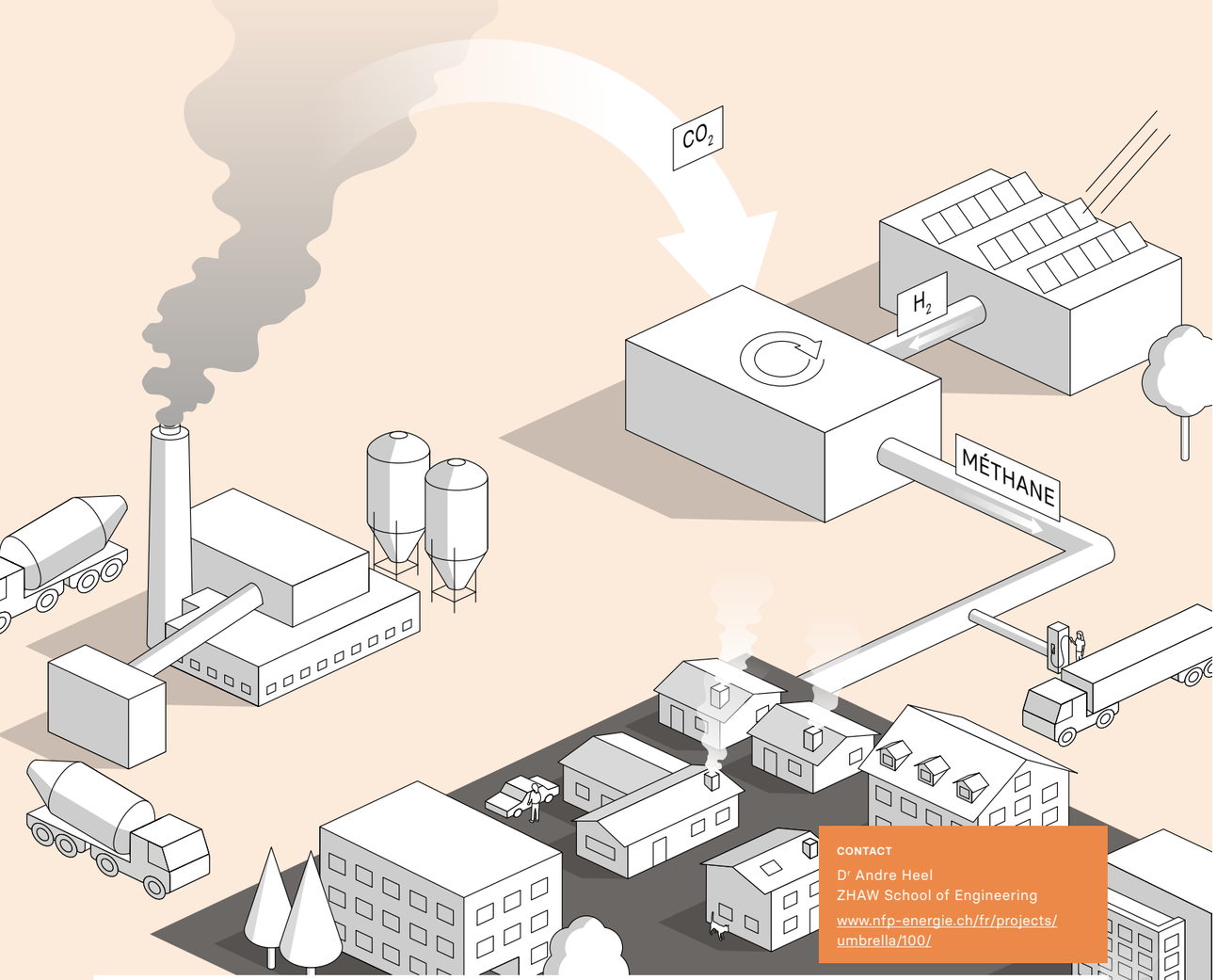


Illustration : StudioPeepz
Katja Rüegsegger et Nicole Gerber



CONTACT
Dr Andre Heel
ZHAW School of Engineering
www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/100/

PROJET #CO_2/Gaz à effet de serre #gaz/hydrogène #méthane/méthanisation

« Combustibles renouvelables pour produire de l'électricité »

En Suisse, environ 7 % des émissions de CO_2 sont le fait de la production de ciment. L'équipe de recherche a étudié comment convertir en méthane de synthèse le CO_2 concentré ainsi généré, et mettre en place une nouvelle chaîne de valorisation dédiée. **La méthanation des quelque 2,5 millions de tonnes de CO_2 issus de la production suisse de ciment permettrait de remplacer un tiers de l'ensemble des importations de gaz.** L'équipe a recherché des technologies plus efficaces, plus durables et plus rentables pour les processus de transformation requis. Responsable de près de 90 % du coût total, la première étape du procédé, la production d'hydrogène (H_2) par électrolyse, est de loin la plus coûteuse de la chaîne de valorisation. C'est cette opération qui explique que le méthane de synthèse est actuellement trois fois plus cher que celui d'origine fossile. Pour le rendre plus compétitif, les coûts du courant solaire utilisé pour la production de H_2 et du processus d'électrolyse correspondant doivent être réduits, ou les cellules photoélectrochimiques (PEC) doivent gagner en efficacité. Un nouveau catalyseur de sorption développé dans le cadre du projet permet de convertir 100 % du CO_2 en méthane, via un procédé utilisant l'intégralité du si coûteux hydrogène.

sont tout de même en service. Par ailleurs, du fait de l'évolution démographique, le nombre de personnes par foyer diminue, ce qui se traduit par une augmentation de la surface de référence énergétique par personne.[2]

Les ménages privés consomment 236 PJ (OFEN 2018) par an et sont responsables de 27,8 % des besoins énergétiques de la Suisse (hors mobilité). La consommation d'énergie des ménages est ainsi supérieure à celle de l'industrie (18,5 %). Ils jouent par conséquent un rôle déterminant dans la Stratégie énergétique 2050. Malgré une hausse prévisionnelle de la population (+8,5 % d'ici 2050), la consommation d'énergie des ménages privés doit être quasiment réduite de moitié (124 PJ) jusqu'à 2050 par rapport à aujourd'hui.

Les ménages privés ont un rôle à jouer à différents niveaux : en tant que citoyennes et citoyens suisses, la démocratie directe leur confère des droits de participation conséquents. Ils sont aussi fréquemment mis à contribution en tant que propriétaires résidents de biens immobiliers. Un autre moyen de participer à la transformation du système énergétique s'offre à eux en tant qu'employés ou responsables d'entreprises ou d'administrations publiques. Avant toute chose, c'est cependant en tant que consommateurs d'énergie que les ménages privés ont un rôle à jouer.

● Entreprises privées et publiques – Si on les additionne, les quelque 145 000 entreprises industrielles et 457 000 entreprises de services (état en 2016 ; OFS 2018b) sont les principaux consommateurs d'énergie de Suisse. Privées ou publiques, les entreprises ont besoin d'énergie pour leurs processus opérationnels et administratifs, mais aussi pour les bâtiments occupés par leurs activités. En 2017, la consommation d'énergie des entreprises s'élevait à 296,3 PJ, soit 35 % de la consommation totale d'énergie (18,5 % pour l'industrie et 16,4 % pour les activités de services). Cela représente un peu moins que la consommation due aux transports (36,3 %), mais nettement plus que celle des ménages privés (27,8 %). Les entreprises utilisent principalement de l'électricité, suivie par les produits pétroliers, le gaz et le bois. La moitié de ces agents énergétiques sert à produire de la chaleur de processus, un quart sert à l'entraînement et environ un septième au chauffage des locaux (Prognos 2012).

La Stratégie énergétique 2050 met les entreprises face à des défis de taille : malgré une augmentation prévisionnelle du produit intérieur brut (PIB) de près de 30 % entre aujourd'hui et 2050, le scénario « Nouvelle politique énergétique » de la Stratégie énergétique 2050 leur demande de réduire sur la même période leur demande d'énergie d'environ 30 % à 211 PJ.

● Propriétaires d'immeubles – La Suisse compte quelque 2,5 millions de bâtiments publics et privés (Rütter & Staub 2018) pour une surface de plancher totale de 940 millions de mètres carrés et une valeur d'assurance d'environ 2540 milliards de francs. Approximativement 1,7 million de ces bâtiments servent d'habitation. 89 % des immeubles et 73 % des appartements sont la propriété de particuliers (Rütter & Staub 2018). Sur les quelque 3,7 millions d'appartements que compte la Suisse, environ 57 % sont des logements locatifs (BFS 2018a), dont une bonne moitié est la propriété de particuliers. Environ un quart appartient à des institutionnels, et 8 % sont détenus par des coopératives. Concernant les biens immobiliers utilisés pour des activités professionnelles, 69 % sont la propriété des entreprises, le reste faisant l'objet de contrats de location de longue durée. En termes de valeur, seul un bon septième de l'ensemble du parc immobilier, soit 350 milliards de francs, est détenu par le secteur public. Les particuliers et les entreprises sont donc les principaux propriétaires d'immeubles en Suisse.

Le parc immobilier représente une grande partie des besoins d'énergie de la Suisse. En 2012, la consommation d'énergie finale de l'ensemble des bâtiments s'élevait à 366 000 TJ (Prognos 2013), soit 41,5 % de la consommation totale. Cela représente davantage que la consommation d'énergie finale des transports. Plus de 70 % de la consommation d'énergie finale des bâtiments sont dus au chauffage. La surface de référence énergétique est un indicateur d'autant plus important. En 2016, elle atteignait environ 745 millions de mètres carrés, dont 67 % étaient des immeubles d'habitation, 21 % des bâtiments de services et 12 % des bâtiments industriels (EnDK 2014).

Outre la nécessité d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique de leurs bâtiments, les propriétaires doivent aussi envisager l'installation potentielle de systèmes photovoltaïques en toiture et, de plus en plus aussi, en façade de leurs immeubles. En cas de réalisation d'une installation de ce type,

2 [Potentiel d'économies d'énergie chez les ménages des personnes âgées]

divers rôles peuvent s'offrir à eux selon qu'ils choisissent d'investir eux-mêmes dans une installation photovoltaïque ou de confier l'exploitation des surfaces à des tiers.

● Bailleurs de fonds extérieurs – La transformation du système énergétique nécessite des investissements considérables dans les infrastructures pour la fourniture d'énergie renouvelable (hydroélectricité, énergie solaire et éolienne), mais aussi pour la réalisation d'installations de stockage et de distribution. Étant donné la durée de vie des installations, il peut s'agir d'investissements à très long terme, à l'horizon de plusieurs décennies, en particulier dans le cas de l'hydroélectricité. Par leurs décisions d'investissement, les bailleurs de fonds déterminent substantiellement la conception et la dynamique de la transformation du système énergétique.

Des acteurs institutionnels tels que les fonds de pension, les caisses de retraite et les assurances peuvent être envisagés en tant qu'investisseurs à cet égard. En matière d'« efficacité énergétique » et de développement des sources d'énergie renouvelables, les investissements dépendent de façon croissante d'un grand nombre de petits investisseurs (particuliers), qui participent via des offres d'investissement correspondantes ou qui s'organisent par exemple en coopératives énergétiques ou en associations. Dans tous les aspects des investissements dans l'énergie, les banques jouent avant tout un rôle important en tant qu'intermédiaire et bailleur de fonds extérieur.

● Administrations publiques
Les administrations publiques de la Confédération, des cantons, des villes et des communes sont des acteurs clés de la politique énergétique. En effet, elles sont en charge de la concrétisation des orientations politiques et utilisent à cet effet une large gamme d'instruments de régulation (normes techniques pour les appareils, les bâtiments ou les véhicules, planifications, permis de construire, etc.), d'incitation (octroi de subventions et d'allégements fiscaux, prélèvement de taxes incitatives, etc.) et de persuasion (étiquette énergétique, campagne de sensibilisation, etc.) (Balthasar & Walker 2015). Elles disposent ainsi d'un potentiel considérable pour faire progresser la transformation du système énergétique dans leur sphère d'influence.

En tant que gestionnaires et exploitantes du parc immobilier public, les administrations jouent aussi un rôle de propriétaire d'immeuble et d'entreprise, ainsi que de fournisseur d'énergie en tant que (co)propriétaire d'entreprises productrices d'énergie. De plus, elles peuvent sensiblement influencer le développement de la mobilité, par exemple par l'intermédiaire de prescriptions de planification ou en tant que commanditaire de prestations de transport public.

● Associations et autres organisations non gouvernementales – Les associations, les groupements professionnels et les organisations jouissant du droit de recours, qui œuvrent en faveur des intérêts de la branche ou de l'intérêt général, s'engagent dans la conduite de la politique énergétique ou souhaitent l'influencer. Ces groupes d'intérêt jouent un rôle important dans l'acceptation des modèles et projets de politique énergétique par leurs membres, mais aussi dans le cadre des procédures de consultation, débats parlementaires ou campagnes référendaires. Dans le cadre du processus politique ou des procédures d'approbation, des organisations professionnelles et des associations environnementales font régulièrement état de leur opposition, par exemple à l'encontre des taxes incitatives pour les uns et contre la construction de petites centrales hydroélectriques pour les autres. Les associations professionnelles organisent elles-mêmes la formation initiale et continue dans leur domaine d'activité, et plusieurs d'entre elles (ingénieurs, architectes, installateurs-électriciens, etc.) se chargent de définir des réglementations sur la base de leur expertise technique et élaborent des normes techniques et des procédures de certification qui sont ensuite intégrées à la législation.

● Électorat – Dans le contexte de la démocratie directe helvétique, la fonction souveraine de la population lui confère un rôle plus important que dans d'autres pays, où la politique énergétique est quasi exclusivement décidée par le gouvernement et le Parlement. Même les petites avancées sur la voie du succès nécessitent en Suisse le soutien de larges catégories de population. Ceci vaut autant pour les votations populaires nationales, cantonales ou communales que pour les décisions prises par une Landsgemeinde ou une assemblée communale. Le rôle d'électrice et d'électeur est complémentaire de celui de consommatrice ou consommateur d'énergie.

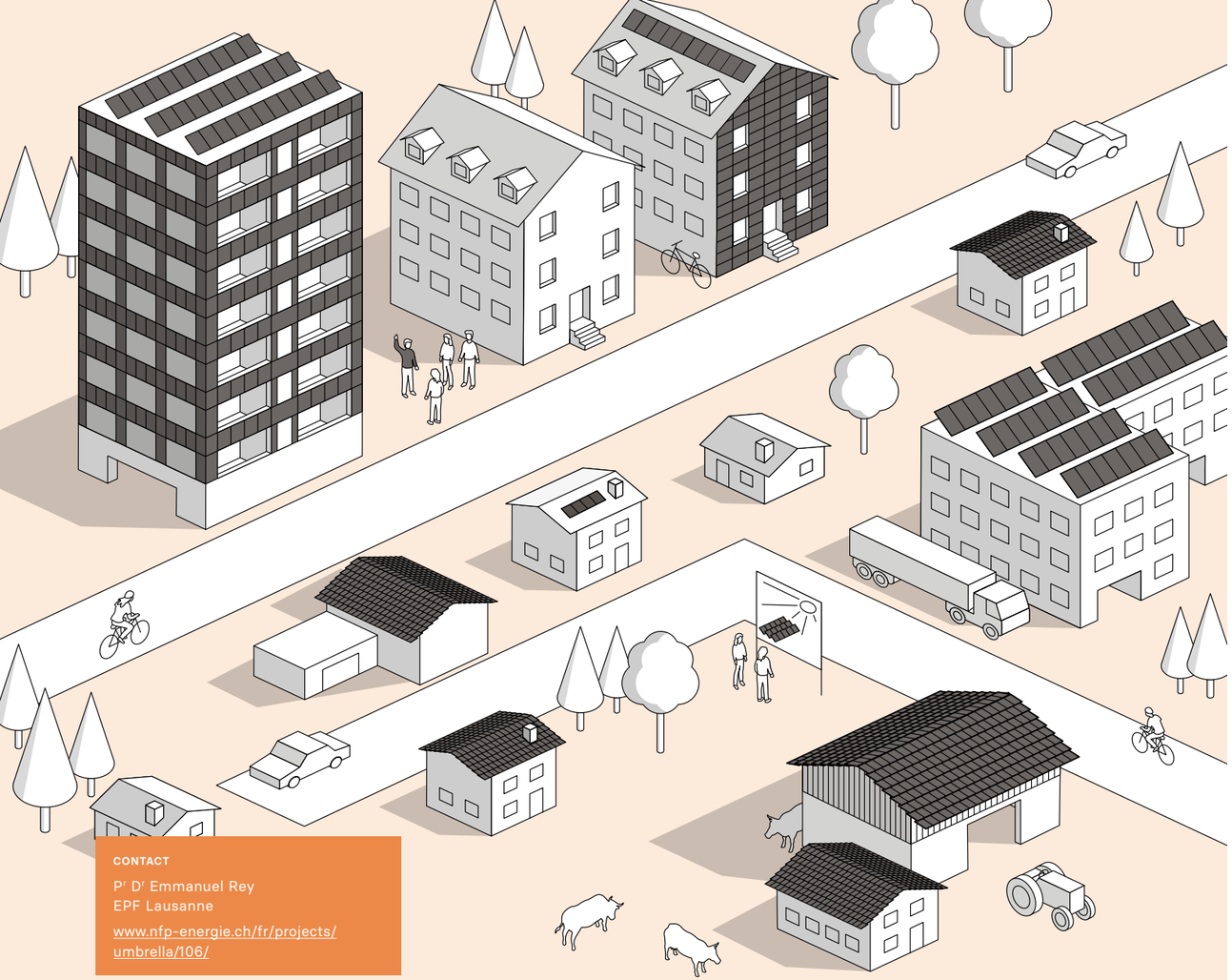
● Instances politiques (Confédération, cantons, communes) – Les instances politiques, composées d'organes législatifs, de fonctions exécutives, du pouvoir judiciaire et du corps électoral, définissent les conditions-cadres à l'intérieur desquelles la transformation du système énergétique peut se dérouler. Elles ne déterminent pas seulement la politique énergétique stricto sensu mais, par l'intermédiaire des autres politiques sectorielles (environnement, agriculture, politique régionale, etc.), également les intérêts à prendre en compte lors de la transformation. La politique de la Confédération, des cantons et des communes détermine aussi les procédures de planification et d'approbation, qui ont une influence significative sur la réalisation des projets d'infrastructures énergétiques. Par ailleurs, les cantons et les communes détiennent parfois des parts non négligeables dans les entreprises de fourniture d'énergie et ont de ce fait leur mot à dire dans les stratégies d'investissement et de tarification de ces dernières.

2.3 Les défis de la transformation du système énergétique

Avec la Stratégie énergétique 2050, la Suisse veut se doter d'un régime énergétique qui, en tenant compte des changements climatiques, de l'évolution démographique et des fluctuations conjoncturelles, satisfaisait aux objectifs de développement durable tout en permettant la sortie du nucléaire et le développement des sources d'énergie renouvelables, ainsi qu'en tirant profit des aspects créatifs des développements techniques et économiques. Ces exigences vis-à-vis de la transformation soulèvent des défis et des questions dans divers domaines.

L'énergie – un casse-tête économique ?

Comme tous les secteurs économiques, celui de l'énergie est tributaire des coûts, des prix et du marché. Une transformation du système énergétique est par conséquent largement influencée par des facteurs et des interdépendances économiques et aura à son tour des répercussions économiques. Avec des dépenses d'énergie représentant environ 25 milliards de francs (OFS 2019) par an et une proportion de 4 à 5 % du produit intérieur brut (PIB), l'énergie est un secteur économique majeur en Suisse. Plus de la moitié de ces dépenses correspondent à des importations d'agents énergétiques fossiles. L'importance du système énergétique pour l'économie ne suffit pas, à elle seule, pour en faire un « casse-tête économique ». Son extraordinaire complexité y est pour bien plus. Les innombrables décisions relatives à l'énergie illustrent bien la situation : sur les routes de Suisse circulent par exemple quelque 4,6 millions de voitures (OFS 2019), qui doivent toutes être achetées, stationnées, déplacées et approvisionnées en carburant. Pour chauffer les 1,7 million d'immeubles résidentiels (OFS 2018a), il faut acheter des chauffages, les entretenir et les ravitailler en combustible ou avec une autre forme d'énergie. Les quelque 1000 centrales hydroélectriques et 700 fournisseurs d'énergie de Suisse (OFEN 2019) sont d'ailleurs étroitement liés aux évolutions du marché européen de l'électricité et aux décisions correspondantes. Toute modification du système énergétique a par conséquent des répercussions sur de nombreux acteurs – des ménages à l'État en passant par les entreprises – se traduisant à leur tour par des frais d'investissement ou d'exploitation.



CONTACT

P' D' Emmanuel Rey
EPF Lausanne

www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/106/

PROJET #photovoltaïque #bâtiments #acceptation

« Photovoltaïque intégré au bâtiment »

Les panneaux solaires ne servent pas qu'à produire de l'électricité. Dans une installation photovoltaïque intégrée au bâtiment (BIPV), ils peuvent également servir d'habillage de façade. Cela leur permet non seulement de limiter la consommation d'énergies fossiles, mais également d'entraîner des économies au niveau des matériaux et des frais d'électricité. Les installations photovoltaïques intégrées aux bâtiments restent toutefois encore rares. L'équipe du projet « Systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments » a étudié comment lever les obstacles techniques, économiques et réglementaires actuels, de la production à la mise en œuvre locale. Des entretiens ont été menés avec des architectes et des propriétaires de maisons, afin de déterminer les motivations et les réticences face à la mise en œuvre d'installations photovoltaïques intégrées aux bâtiments. **Le projet a permis de développer de nouvelles stratégies de conception architecturale pour la rénovation et le bâti neuf,** conciliant les panneaux solaires de nouvelle génération et les systèmes de façade BIPV innovants avec l'esthétique architecturale. Ces derniers procurent aux architectes, aux installateurs, aux maîtres d'ouvrage et aux autorités une gamme de solutions permettant de prendre en compte les spécificités et les exigences de tous types de bâtiments.

L'énergie – un défi écologique ?

La production et la consommation d'énergie revêtent une importance significative du point de vue écologique. Les processus et les produits associés nécessitent des ressources naturelles telles que des matériaux de construction, de la biomasse, des matières premières fossiles comme le charbon et le pétrole, ou de l'espace. Ils génèrent des émissions de CO_2 et de particules fines ou du bruit, affectent l'habitat des plantes, des animaux et des humains, peuvent nuire à la santé et dégrader le bien-être des humains.

Travailler à l'avenir d'un système énergétique durable implique de développer des solutions permettant la production et la consommation d'énergie avec un impact minimal sur l'environnement. Outre un bilan CO_2 optimisé, ce défi exige entre autres de raisonner de façon systémique et d'agir dans une perspective d'économie circulaire. Les technologies de production d'énergie doivent uniquement être utilisées si les ressources nécessaires à cet effet peuvent en grande partie et pour un coût raisonnable être remises dans un état ne présentant aucun risque pour l'environnement.

Cet objectif est loin d'être atteint comme le montrent les exemples suivants : l'électromobilité est certes considérée comme une solution prometteuse à la limitation du réchauffement climatique, mais il n'existe pour l'heure aucune filière économiquement viable permettant un recyclage complet des batteries lithium-ion qui constituent la pièce maîtresse de cette technologie. Il en va de même dans le domaine de l'éolien : les pales de rotor et les nacelles de plusieurs tonnes des éoliennes, fabriquées dans un matériau composite à base de fibres de verre, de fibres de carbone et de bois, ne sont pas réellement recyclables. Bien qu'elle ne soit pas encore idéale, la situation se présente un peu mieux dans le cas des modules photovoltaïques, dont l'élimination consiste pour l'instant en un démantèlement et un nettoyage de leurs éléments constitutifs. Les composants contenant du silicium sont déchiquetés et réutilisés pour fabriquer des supports de circuits imprimés (wafer). Ce procédé, qui permet d'atteindre un taux de valorisation de 90 %, est toutefois énergivore et génère des solutions caustiques comportant de nouveaux risques pour l'environnement. Il reste beaucoup à faire avant que le système énergétique ne fonctionne réellement en circuit fermé.

Le sol et l'espace utilisés par les infrastructures énergétiques, ainsi que l'impact sur la biodiversité constituent en outre des dilemmes fondamentaux. Ces aspects peuvent certes être optimisés mais pas éliminés.

Technologie et innovation – une mise en application semée d'embûches

La transformation du système énergétique suppose des technologies capables de réduire la consommation d'énergies fossiles et de préserver les ressources naturelles limitées. Les progrès scientifiques et opérationnels ont d'ores et déjà permis des réductions de coûts spectaculaires dans le domaine des sources d'énergie renouvelables. Dans deux domaines scientifiques particulièrement dynamiques – la science des matériaux et les technologies de l'information et de la communication (TIC) – les avancées sont très significatives. La science des matériaux, et notamment la manipulation de la matière au niveau atomique, est au cœur des développements dans les domaines suivants : « éolien » (pales de rotor toujours plus grandes), « électromobilité » (meilleure densité énergétique et durée de vie des batteries), « photovoltaïque » (rendement solaire supérieur) et « (bio)carburants » (catalyseurs et capteurs améliorés). Grâce aux progrès rapides du secteur des TIC dans des domaines comme « la gestion et le stockage des données », « l'analyse des big data » ou « la connectivité en temps réel », de nombreux nouveaux produits et services arrivent actuellement sur le marché. Ceux-ci réduisent la consommation d'énergie dans l'industrie et l'habitat, permettent l'utilisation des sources d'énergie renouvelables via les réseaux dits intelligents (« smart grids » en anglais) et favorisent des formes de mobilité plus efficaces sur le plan énergétique.

Les produits et services radicalement nouveaux émanent souvent de l'initiative de petites start-up. Les « incubateurs » et les « espaces partagés » implantés dans les parcs scientifiques sont un moyen connu de favoriser des liens forts entre ces start-up et la communauté scientifique. Un des défis pour bon nombre de ces entreprises réside dans l'accès aux financements. L'allocation de capitaux est par conséquent essentielle pour surmonter cette étape et

amener les concepts prometteurs à maturité commerciale. Cependant, les entreprises investiront uniquement dans le développement de nouvelles technologies si elles s'attendent à une demande significative sur le marché et si des perspectives de bénéfices existent à court ou moyen terme. Il n'est pourtant pas facile de générer une demande substantielle de produits respectueux de l'environnement. La forte baisse des coûts des sources d'énergie renouvelables intervenue récemment montre toutefois que les mesures gouvernementales d'ouverture du marché incitent les entreprises à accroître la production et à baisser les prix.

Position affaiblie en Europe

Le réseau électrique suisse est étroitement lié à ceux des pays voisins. Cela lui procure des capacités très élevées d'importation, d'exportation et de transit d'électricité. La Suisse jouit traditionnellement d'un poids relativement important au sein des organisations qui définissent les standards du réseau européen et œuvrent au développement du réseau. En raison de l'intégration croissante des marchés européens de l'énergie et des relations incertaines avec l'UE, la Suisse a perdu en influence au cours des dernières décennies. À la suite de la libéralisation et de l'harmonisation des marchés européens de l'énergie, diverses organisations relèvent actuellement de la compétence du droit européen, ce qui se traduit par une marginalisation croissante de la Suisse.

Un accord avec l'UE sur l'électricité est en cours de négociation depuis 2007. Du côté de l'UE, on indique clairement qu'en l'absence d'accord-cadre institutionnel, les négociations concernant un accord sur l'électricité ou d'autres accords sectoriels d'accès au marché ne pourront pas être menées à terme. Indépendamment d'un accord sur l'électricité et d'un rapprochement des réglementations, les marchés européens ont un impact direct sur la formation des prix sur le marché de l'électricité interconnecté de la Suisse. Tout déficit dans la coordination institutionnelle avec l'UE entrave par conséquent la garantie de stabilité du réseau et l'accès au marché. De même, il empêche la Suisse d'avoir voix au chapitre et un droit de codécision sur les développements européens au sein des commissions non techniques.

Légitimation politique et nécessité de coordination

En approuvant la nouvelle Loi sur l'énergie en tant que partie intégrante de la Stratégie énergétique 2050, l'électorat suisse a légitimé la transformation du système énergétique. La mission des instances politiques est de concrétiser celle-ci sous forme d'objectifs fixés par des procédés démocratiquement légitimés et de mettre en œuvre les instruments nécessaires à cet effet. Le système énergétique présente en outre des caractéristiques rendant nécessaire une intervention gouvernementale : outre l'échec du marché de l'énergie, on peut citer les coûts élevés du réseau énergétique ou la situation de monopole des fournisseurs d'énergie. Les effets externes de la production d'énergie peuvent également nécessiter une action gouvernementale, par exemple lorsque des éoliennes portent préjudice au paysage ou lorsqu'il s'agit d'assurer le financement des coûts induits par les centrales nucléaires. Les exigences gouvernementales peuvent concerner tous les aspects du triangle classique de la durabilité, c'est-à-dire la garantie de la sécurité d'approvisionnement, la prévention des effets négatifs sur l'environnement ou l'assurance de prix de l'énergie abordables.

Le fédéralisme est un élément clé de la politique énergétique suisse. Le tableau 1 donne un aperçu des principaux domaines d'intervention des différents échelons des autorités publiques. Il met en évidence l'importance de la coordination verticale (p. ex. soutien des sources d'énergie renouvelables par la Confédération et les cantons) et horizontale (p. ex. transfert de pratiques éprouvées entre les communes). Le niveau international, et en particulier européen (cf. chap. 3.8), vient compléter les trois échelons du fédéralisme helvétique.

Les instruments de démocratie directe permettent aux citoyennes et citoyens, aux groupes d'intérêt et aux partis politiques de participer activement aux décisions en matière de politique énergétique. Assurer l'acceptation des mesures de politique énergétique représente par conséquent un défi permanent pour les autorités (cf. chap. 3.7), mais aussi pour les partis qui doivent concilier des exigences divergentes et souvent contradictoires.

	Aspects importants de la Stratégie énergétique 2050	Exemples de tâches de coordination
Confédération	– standards énergétiques pour les appareils et les véhicules – taxe sur le CO_2 – subventions et rétributions pour le courant vert – régulation du marché de l'électricité et des réseaux électriques – sécurité nucléaire, déchets radioactifs y compris	Direction du programme *SuisseEnergie*, la plate-forme qui accompagne également les mesures des cantons, des communes et du secteur privé.
Cantons	– rénovation des bâtiments – utilisation de la chaleur dissipée – promotion des sources d'énergie renouvelables, hydroélectricité y comprise	Harmonisation des normes cantonales conformément aux modèles de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC).
Communes	– Les Cités de l'énergie, y compris la mobilité et les quartiers durables	Coopération intercommunale au niveau régional.

Tableau 1
Champs d'action des autorités publiques

La transformation du système énergétique – un devoir de société

Que ce soit en tant que consommatrice ou consommateur, comme actrice ou acteur économique ou en tant qu'électrice ou qu'électeur, les citoyennes et citoyens suisses peuvent influencer le système énergétique par leur comportement. En faisant des économies d'énergie au quotidien ou en adoptant un comportement d'achat et d'investissement responsable, toutes et tous peuvent contribuer à réduire la consommation d'énergie à leur niveau, même s'ils ne décident pas en toute indépendance. Selon leur rôle et leur situation de vie (jeunes, familles, retraités, etc.), leurs besoins diffèrent et, en tant que membres d'un groupe, leur comportement s'inspire de ce dernier. À condition de disposer des informations nécessaires, les consommatrices et consommateur peuvent opter pour des produits fabriqués de façon économe en énergie ou des appareils peu énergivores. En ce qui concerne le choix d'un agent énergétique, leur choix est souvent restreint. En raison de l'ouverture limitée du marché, un ménage ne peut pas, pour le moment, choisir chez qui il souhaite s'approvisionner en électricité. Il en va de même pour le chauffage : en termes de système de chauffage ou d'isolation thermique, les locataires sont tributaires des choix des propriétaires immobiliers. Dans certains cas, il peut également exister une obligation de raccordement à un réseau de gaz ou de chauffage à distance, imposée par la commune. Pour certaines décisions, les individus peuvent toutefois jouer pleinement leur rôle de citoyenne ou de citoyen. Par leur comportement de vote, ils légitiment l'intervention publique et l'orientent dans la direction souhaitée.

En somme, la mobilisation de la société s'avère être un instrument clé pour la transformation du système énergétique, qu'il s'agisse de susciter la volonté des individus, de modifier leur modèle de consommation d'énergie, de stimuler l'intérêt pour les produits et services peu énergivores, de soutenir des projets énergétiques locaux ou de favoriser l'acceptation d'investissements publics, d'infrastructures énergétiques ou de nouvelles réglementations.

2.4 Dynamiques de développement

L'histoire mouvementée de l'énergie en Suisse

Avec la Stratégie énergétique 2050, la Suisse a mené à bien un processus politique complexe pour formuler de façon consensuelle les objectifs négociés. Elle écrit ainsi un nouveau chapitre de l'histoire déjà riche et variée de l'énergie suisse (cf. p. 30/31), au fil de laquelle il a régulièrement fallu trouver un terrain d'entente concernant l'orientation à donner au régime énergétique dans l'avenir proche. Durant ces différentes phases, le pays a toujours su faire preuve de stabilité sur le plan des règles d'utilisation, de la gestion tarifaire et de la normalisation des équipements. Chaque époque a été marquée par l'apparition de nouvelles sources d'énergie: en Suisse, aux alentours de 1860, le régime énergétique traditionnel, basé sur le bois de chauffage et l'utilisation directe de la force de l'eau, a cédé la place à un régime de forte hausse du recours au charbon et au coke. À la fin du XIXe siècle, le régime énergétique s'enrichit d'un nouveau volet avec l'électricité, produite grâce à l'énergie hydraulique et au charbon, et utilisée pour l'éclairage et les processus chimiques, puis pour l'entraînement et, enfin, pour la production de chaleur. Au XXe siècle, le pétrole est venu compléter le mix énergétique, notamment pour la navigation, la motorisation de masse, le transport aérien et le chauffage des bâtiments. Parallèlement au régime du pétrole sont apparus des projets de régime énergétique basé sur le nucléaire, dont la concrétisation est toutefois restée bien en deçà des prévisions initiales. En revanche, le régime énergétique suisse a fortement changé au cours des deux dernières décennies en raison de toute une série de nouvelles formes d'agents et de technologies énergétiques: les installations photovoltaïques et les éoliennes sont venues épauler la production d'électricité, la géothermie, le gaz naturel et les techniques d'isolation ont endossé un rôle grandissant dans le domaine du chauffage, tandis que divers types de biocarburants et de véhicules électriques ont émergé dans le secteur du transport individuel motorisé. À l'exception du gaz naturel, ces nouvelles solutions énergétiques sont qualifiées de sources d'énergie renouvelables (Kupper & Pulla 2016).

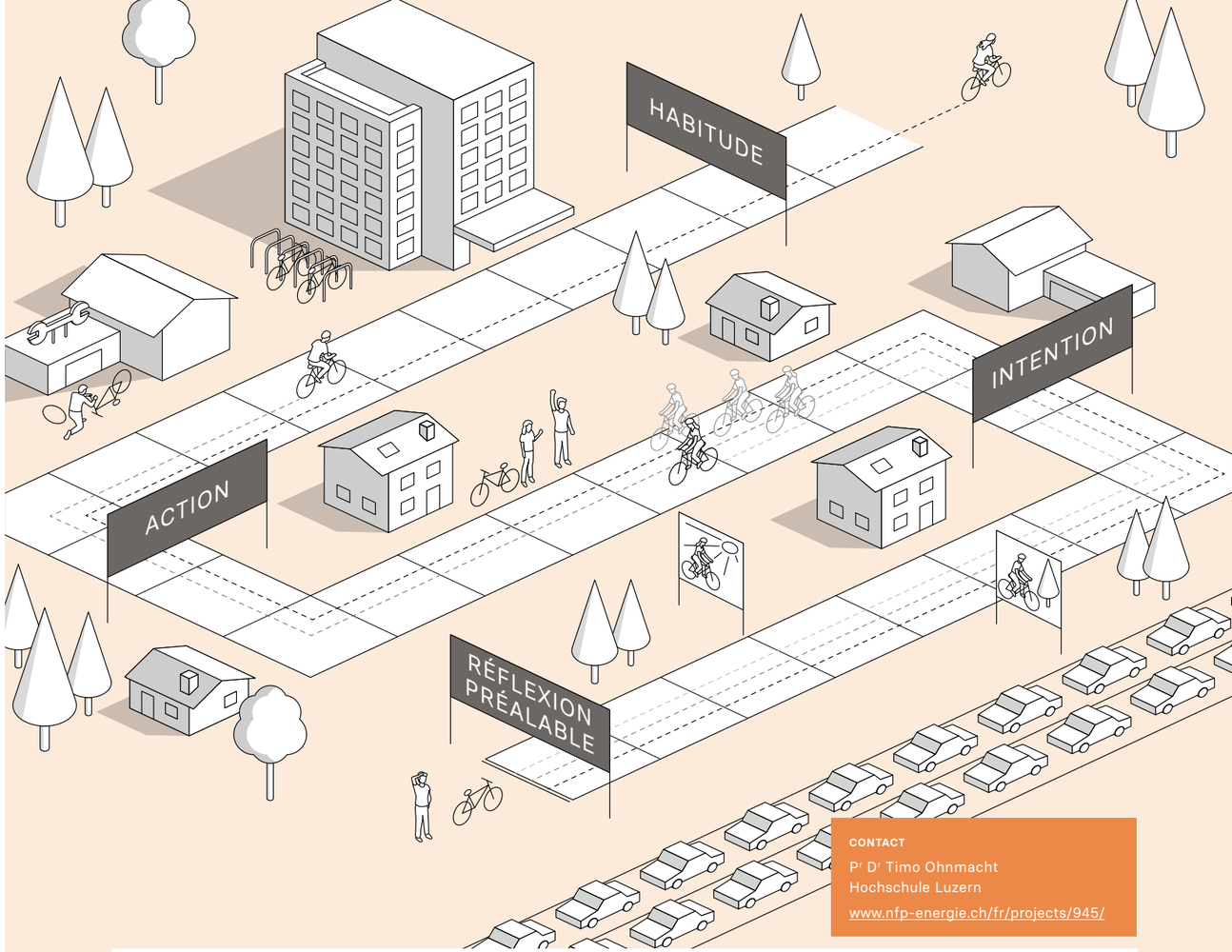
Les marchés de l'énergie – objet de négociations politiques

Le fait que les marchés de l'énergie fassent l'objet de débats politiques n'a rien de nouveau. Que ce soit dans le passé, actuellement ou à l'avenir, toutes les formes d'énergie ont besoin de mécanismes de protection réglementaires pour se développer. Elles sont tributaires de subventions croisées et bénéficient à divers degrés de la protection des réglementations communales, cantonales et fédérales. Un régime énergétique politiquement équilibré permet de planifier l'avenir du système énergétique de façon consensuelle.

À l'époque moderne, les pénuries d'approvisionnement en énergie sont devenues exceptionnelles. Grâce à des volumes de productions conséquents, le prix du pétrole a connu une baisse constante au fil du XXe siècle. À l'exception de quelques hausses passagères en temps de guerre, ce phénomène de baisse des prix à long terme s'applique également au charbon, et, selon toute vraisemblance, les sources d'énergie renouvelables ne devraient pas échapper à la règle. Pour garantir le bon fonctionnement des marchés de l'énergie, les fournisseurs doivent pouvoir miser sur une demande en hausse et des coûts de production en baisse, tandis que les consommateurs doivent être à l'abri de tout risque de pénurie. Quiconque vend de l'énergie doit aussi être en mesure de le faire dans un avenir proche et s'efforcera par conséquent de développer constamment ses capacités et d'améliorer son efficacité d'approvisionnement.

L'anticipation – une nécessité

Anticiper la future demande est indispensable non seulement d'un point de vue économique, mais aussi sur le plan technique. Un réseau d'alimentation électrique dont la capacité ne permet pas de couvrir pleinement la demande s'effondrera rapidement, avec des conséquences catastrophiques pour tous les consommateurs. La capacité d'approvisionnement doit par conséquent toujours être supérieure à la demande momentanée. Depuis la fin du XIXe siècle, pour équilibrer le rapport précaire entre l'offre et la demande, les producteurs d'électricité ont d'abord cherché à couvrir les capacités de leurs centrales hydroélectriques avec des contrats portant sur des applications fortement consommatrices de courant



CONTACT
Pr Dr Timo Ohnmacht
Hochschule Luzern
www.nfp-energie.ch/fr/projects/945/

PROJET #population #efficacité énergétique #durabilité

« Modes de vie durables et consommation d'énergie »

La progression de la transformation du système énergétique dépend aussi de la capacité à convaincre les individus d'adopter des modes de vie économes en énergie. Le comportement des gens est essentiellement influencé par des facteurs socio-psychologiques. Sur la base du modèle dit « par phases », l'équipe de recherche a mené une enquête de grande envergure. Pour qu'un nouveau comportement devienne une habitude, le modèle par phases part du principe que les personnes traversent quatre phases: réflexion préalable, intention, action et enfin habitude. L'équipe de recherche a pu démontrer que des informations et des mesures personnalisées en fonction des différents groupes cibles contribueraient à convaincre ces derniers d'adopter un mode de vie économe en énergie. **Les informations et mesures employées doivent toutefois correspondre précisément à la phase dans laquelle les personnes se trouvent dans leur processus de décision.** Les personnes n'ayant jamais envisagé un comportement économe en énergie peuvent par exemple être incitées à le faire grâce à une communication privilégiant les aspects émotionnels. Au contraire, les personnes qui ont déjà décidé de vivre de façon plus économe en énergie ont besoin de renseignements concrets pour mettre en pratique leurs intentions. Pour six aspects de la vie, l'équipe de recherche a développé un fil conducteur, illustrant concrètement comment organiser des campagnes pertinentes.

ou sur l'exportation d'électricité, avant de s'ouvrir progressivement à l'approvisionnement général. Le processus a été facilité grâce à des conditions de financement préférentielles pour les sociétés communales, publiques et d'économie mixte, et des banques spécialisées de l'industrie des biens d'équipement pour les centrales du secteur privé (Gugerli 1996). Des incitations tarifaires (heures creuses) et un pilotage ciblé des appareils (chauffe-eau, lave-linge) ont permis aux exploitants de centrales de contrôler la consommation d'électricité et, par conséquent, la charge de leur réseau. Pour la production, ils avaient recours à une gestion coopérative des charges, combinant les différents types de centrales. Grâce à des appareils énergivores comme les cuisinières électriques ou les radiateurs électriques à accumulation, puis à partir des années 1990 en commercialisant des équipements efficaces sur le plan énergétique, les producteurs d'électricité stimulaient la demande, ce qui leur permettait d'en anticiper la croissance.

Le besoin de réglementation est marqué par les valeurs sociales

Même dans un contexte économique libéral, les régimes énergétiques contemporains se distinguent par un fort besoin de réglementation. Des questions de sécurité, de tarification, de gains raisonnables et de subventions, jusqu'à l'acceptabilité des usages et des dégâts à l'environnement, en passant par les questions de monopole, d'organisation cartellisée et de standardisation technique des infrastructures et des équipements, d'innombrables aspects nécessitent un consensus à la fois solide et flexible. Plus un régime énergétique implique de conditions, plus le besoin de réglementation associé sera important, et plus l'investissement technique sera important, plus l'environnement réglementaire sera riche en prérequis. La conception des règles qui président à un régime énergétique est à cet égard étroitement liée au changement des modèles de perception et d'interprétation. L'énergie nucléaire est particulièrement représentative de cela. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, cette technologie était un problème de physique avec une solution à caractère militaire. Pour « civiliser la bombe », il a fallu démonter les fortes attentes vis-à-vis de la « technologie nucléaire » ainsi que les craintes associées, de façon à ce que les centrales nucléaires deviennent l'application majeure de cette technologie.

Pour le gouvernement fédéral, les centrales nucléaires ouvraient un nouveau champ de politique scientifique, permettant de concrétiser d'un seul coup des objectifs de politique environnementale, de politique énergétique, de politique régionale et économique, voire de stratégie militaire. Au début des années 1960, le gouvernement fédéral et l'énergie nucléaire faisaient figure de partenaires idéals : la politique de paix alors menée avait pour mot d'ordre « Transformez vos épées en socs de charrue », un programme qui n'a pas manqué de susciter des rêves d'autarcie énergétique dans la mesure où il réduisait directement la dépendance du secteur de l'énergie vis-à-vis du charbon et du pétrole. L'énergie nucléaire était ainsi un symbole de la politique technologique du gouvernement fédéral (Gugerli et al. 2000 ; Gugerli 2004).

Dans l'ensemble, l'énergie nucléaire était perçue comme très positive. Outre des noyaux d'uranium, sa mise en œuvre divisait toutefois aussi la société. L'échec du réacteur expérimental suisse de Lucens (VD), qui n'a été en service qu'un seul jour, n'a affecté ni l'industrie ni le système politique (Wildi 2003). Près de deux décennies de conflits au sujet du projet de centrale nucléaire de Kaiseraugst ont toutefois relié toute une série de problématiques à l'avenir de l'énergie nucléaire en Suisse. Porte-étendard de la politique technologique du gouvernement fédéral, l'énergie atomique a été associée à la peur de l'État nucléaire, à une maximisation sans pitié des profits, à des problèmes de sécurité considérables, à la menace de dégâts environnementaux et à l'aveuglement technocratique, jusqu'à devenir emblématique d'une dystopie des années 1970 et 1980 (Kupper 2003). Les accidents comme ceux de Three Mile Island (1979) et de Tchernobyl (1986) ont relativisé la tranquillité apportée par les réglementations techniques de sécurité ou le Probability Risk Assessment (Carlisle 1997). Le risque résiduel qui subsistait a certes été réparti entre les composants de la société, mais il n'a pas été éliminé (Beck 1986).

La révision à la baisse des prévisions de demande d'énergie, les coûts de production croissants de l'électricité issue de l'énergie nucléaire, la mise en évidence du risque de catastrophe ainsi qu'une forte recrudescence de la sensibilité écologique, y compris vis-à-vis du problème des déchets nucléaires, ont conduit en Suisse à l'adoption de l'« Initiative pour un moratoire » (1990). Ce « moratoire » est ensuite devenu

la base d'un consensus fragile auquel on a commencé à s'habituer. Au début du nouveau millénaire, dans le contexte de la prise de conscience croissante de la problématique du CO_2 sous la pression du changement climatique, l'énergie nucléaire est apparue une seconde fois comme une alternative intéressante aux combustibles fossiles. Les événements de Fukushima (2011) ont cependant provoqué un tel revirement de l'opinion collective sur l'énergie nucléaire que la transformation du système énergétique et la sortie du nucléaire ont fini par faire l'objet d'un large consensus. En même temps, les problèmes climatiques se sont intensifiés. En adoptant l'Accord de Paris, la Suisse a annoncé en 2017 une réduction de ses émissions de gaz à effet de serre de 50 % par rapport à 1990 d'ici 2030 et un objectif global de réduction de l'ordre de 70 à 85 %. Cette décision de politique climatique signifie également l'abandon des sources d'énergie fossiles et doit, entre autres, être mise en œuvre avec la révision totale de la Loi sur le CO_2.

Le long chemin de la transition en matière de politique énergétique

L'histoire de l'utilisation de l'énergie le montre clairement : le passage d'un régime énergétique au suivant a toujours été bien plus long que ne le suggère le discours sur l'« arrivée triomphale » de l'énergie électrique, sur le « syndrome des années 1950 », sur le « diagnostic des années 1970 » (Kupper 2003a) ou encore sur la « transition » vers les sources d'énergie renouvelables. Chaque régime énergétique a gardé de nombreuses séquelles du passé, et chaque transition a suscité d'intenses débats. Même les processus de substitution majeurs n'ont jamais conduit à la disparition totale d'une source d'énergie. En revanche, les nouveaux agents énergétiques étaient systématiquement liés à des processus d'exclusion générateurs de conflits, des attentes et des craintes excessives, un changement des prix relatifs, de nouvelles réglementations gouvernementales, des appareillages innovants et une modification de la demande. La Stratégie énergétique 2050 de la Suisse est certes un projet largement tempéré par des considérations de politique économique, environnementale, énergétique, industrielle ou scientifique, et ayant prouvé sa dimension consensuelle en passant l'épreuve du référendum de 2017. Elle servira néanmoins durant quelques années de point de référence pour une action axée sur la concertation. Cette nouvelle transition énergétique prendra toutefois beaucoup de temps et pourra uniquement réussir à condition d'offrir constamment de nouveaux avantages.

Homme et énergie – deux entités indissociables

Depuis plus de deux millions d'années, l'homme cherche à compléter l'énergie dont il dispose grâce à sa force musculaire par des sources d'énergie supplémentaires et de les exploiter au moyen des techniques les plus variées. La première source d'énergie qui s'est ainsi offerte à l'humanité était le feu, déclenché par la foudre, les incendies ou les éruptions volcaniques. Les plus anciens indices de domestication du feu, identifiés dans la grotte de Wonderwerk en Afrique du Sud, remontent à plus de 1,5 million d'années. Les premières traces de foyers en Europe, âgées d'environ 400 000 ans, ont été trouvées en Angleterre, dans le sud de la France et en Hongrie. Les deux grandes étapes suivantes sont les moulins à vent de Babylone remontant à 1700 av. J.-C. et les roues à eau développées par les ingénieurs grecs aux IVe et IIIe siècles av. J.-C. pour l'irrigation agricole. Les premiers moulins à meule ont été décrits par l'architecte Vitruve au Ier siècle avant notre ère. L'utilisation directe de la chaleur terrestre, avant tout dans les thermes, mais aussi pour le chauffage des bâtiments, était également répandue dès les temps anciens.

À l'ère moderne, les progrès techniques se sont fortement accélérés : à la fin du XVIIe siècle, Denis Papin a développé la première machine à vapeur, plus tard améliorée par James Watt. La principale source d'énergie alors utilisée était le bois, mais de plus en plus aussi le charbon, qui est connu depuis l'Antiquité. Au XVIIIe siècle, le magnétisme et l'électricité ont fait

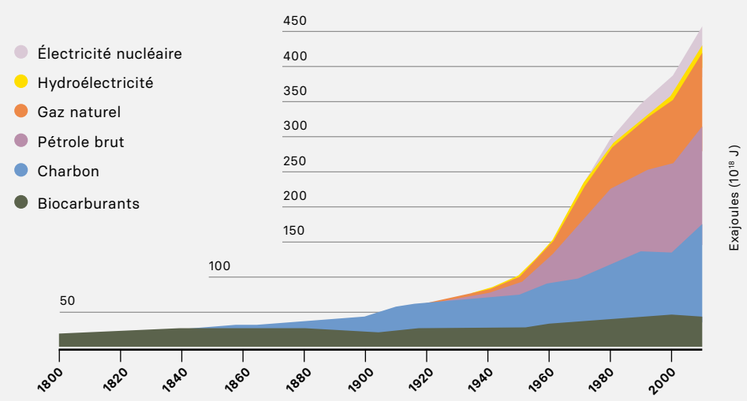


Illustration 2
Consommation mondiale d'énergie de 1800 à 2010 par source d'énergie (Bice s. a.).

l'objet de recherches systématiques comme sources d'énergie. En 1859, Étienne Lenoir a présenté le premier moteur à combustion au gaz, qui a finalement conduit à une utilisation accrue du pétrole. Peu de temps avant la Seconde Guerre mondiale, un groupe de chercheurs autour d'Otto Hahn a découvert le phénomène de la fission nucléaire à base d'uranium.

La formidable dynamique de développement apparue à partir de la fin de la Seconde Guerre mondiale était avant tout fondée sur une explosion de la consommation de sources d'énergie fossiles (charbon, gaz, pétrole ; cf. illustration 2). Les principaux moteurs de cette évolution étaient et restent la progression démographique et la croissance économique (cf. illustration 3). La grande disponibilité et le faible coût de ces sources d'énergie ont également contribué à leur développement. Il est évident que l'évolution ne peut pas se poursuivre sur cette voie : l'augmentation de la population doit être ralentie, et la consommation d'énergie doit être découplée de la croissance économique. En d'autres termes, les sociétés et les économies du monde entier sont confrontées à des défis gigantesques. La priorité est d'améliorer l'efficacité énergétique et de remplacer les sources d'énergie fossiles par de nouvelles sources d'énergie renouvelables.

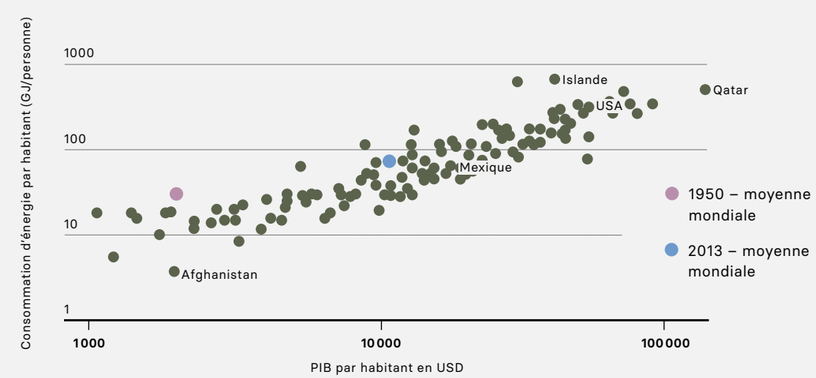


Illustration 3
Relation entre PIB (produit intérieur brut) et consommation d'énergie (Bice s. a.).

La transformation du système énergétique suisse, telle qu'elle a été introduite avec la Stratégie énergétique 2050, exige des actions dans de nombreux domaines techniques, économiques, sociaux ou politiques. Ce chapitre dresse un panorama des principaux défis qui se posent et présente une sélection de conclusions du PNR « Énergie » pouvant contribuer à les surmonter.

3 Champs d'action de la transformation et propositions de solutions

La transformation du système é
suisse, telle qu'elle a été introduite avec
énergétique 2050, exige des actions da
breux domaines techniques, économiqu
politiques. Ce chapitre dresse un panor
principaux défis qui se posent et présen
tion de conclusions du PNR « Énergie »
contribuer à les surmonter.

Les projets de recherche du PNR « Énergie » ont développé de nombreuses approches susceptibles de contribuer à la transformation du système énergétique. Celles-ci comprennent aussi bien des évolutions techniques innovantes visant à améliorer l'efficacité énergétique que des recommandations d'aménagement du cadre politico-juridique ou portant sur l'acceptation des nouvelles technologies et comportements.

3.1 L'efficacité énergétique – paramètre clé de la transition énergétique

Améliorer l'efficacité énergétique est un des moyens de réduire la consommation d'énergie. Utiliser l'énergie de manière plus efficace ne signifie pas uniquement atteindre le même effet avec moins d'énergie, mais aussi éviter la consommation d'énergie inutile. Une autre approche est la sobriété (parfois aussi appelée suffisance), c'est-à-dire la modification des comportements humains, par exemple en limitant les déplacements, en baissant la température ambiante durant la saison de chauffe ou en renonçant à divers appareils électroménagers (cf. p. 66).

Pistes d'amélioration de l'efficacité

En 2017, 850 000 TJ d'énergie ont été consommés en Suisse. À eux deux, les ménages et les services sont responsables de 44 % de la consommation totale d'énergie finale, en particulier pour l'exploitation des bâtiments, suivis des transports avec 36 % (cf. illustration 4).

Le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments en matière de chauffage et de climatisation se situe avant tout au niveau de l'enveloppe du bâtiment (toiture, murs et fenêtres). L'isolation, l'utilisation de la lumière naturelle et l'ombrage jouent un rôle central à cet égard. Les étiquettes énergétiques mises en place au cours de la dernière décennie pour les éclairages, les équipements ménagers ou de bureau et les voitures particulières constituent une aide à la décision fiable pour les consommatrices et les consommateurs désireux de choisir des produits efficaces sur le plan énergétique.

Efficacité énergétique et rendement

L'efficacité énergétique se réfère généralement à un processus d'une installation technique ou d'un appareil et correspond au rapport entre l'énergie consommée et l'énergie fournie. Elle est par conséquent étroitement liée au rendement, qui exprime le rapport entre la puissance consommée et la puissance fournie. Une ampoule à incandescence traditionnelle ne convertit par exemple pas plus de 5 % de l'électricité consommée en lumière. La majeure partie – environ 95 % – est restituée à l'environnement sous forme de rayonnement thermique. Si le rendement d'une ampoule à incandescence est ainsi de 5 %, celui des LED se situe entre 30 et 40 %. En ce qui concerne les éclairages, la puissance lumineuse (lumen/watt) – et donc l'efficacité – est toutefois une grandeur de comparaison plus appropriée. Pour une ampoule à incandescence elle est de l'ordre de 10 à 20 lm/W. Avec une puissance lumineuse de 80 à 180 lm/W, les éclairages modernes à LED sont par conséquent huit à dix fois plus efficaces.

Les processus industriels utilisent principalement de l'énergie sous forme mécanique ou pour chauffer/refroidir. Leur efficacité énergétique peut être améliorée au moyen de procédés d'économie d'énergie – par exemple en produisant en continu plutôt que par à-coups – ou grâce à la récupération de la chaleur de processus. Ces approches offrent toutes deux un potentiel considérable, mais nécessitent souvent la modification de processus de production éprouvés et des investissements conséquents.

Dans les transports, les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique résident dans les comportements, ainsi que dans les domaines organisationnel et technique. Le potentiel principal concerne les comportements de mobilité, notamment avec le passage du véhicule individuel aux transports en commun, l'acquisition de voitures peu énergivores, l'amélioration du taux d'occupation des véhicules ou l'autopartage.[3] Sur le plan technique, il s'agit avant tout de réduire le poids des véhicules, de mettre en œuvre des moteurs efficaces en énergie, ainsi que de récupérer et de stocker l'énergie cinétique. Ces possibilités techniques peuvent être mises à profit par les automobilistes lors de leurs décisions d'achat, à condition que les constructeurs les intègrent à leurs véhicules dans un avenir proche.

Le taux de rénovation à la traîne compromet la réalisation des objectifs dans le secteur du bâtiment

Étant donné leur importance sur le plan de la consommation d'énergie finale et des possibilités d'action réelles, des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique à court et moyen terme doivent avant tout être prises dans le secteur du bâtiment. Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, d'après laquelle la consommation d'énergie finale des bâtiments doit être divisée par deux entre 2010 et 2050, les bâtiments et

3 Synthèse thématique « Comportement de mobilité » du PNR « Énergie », FNS

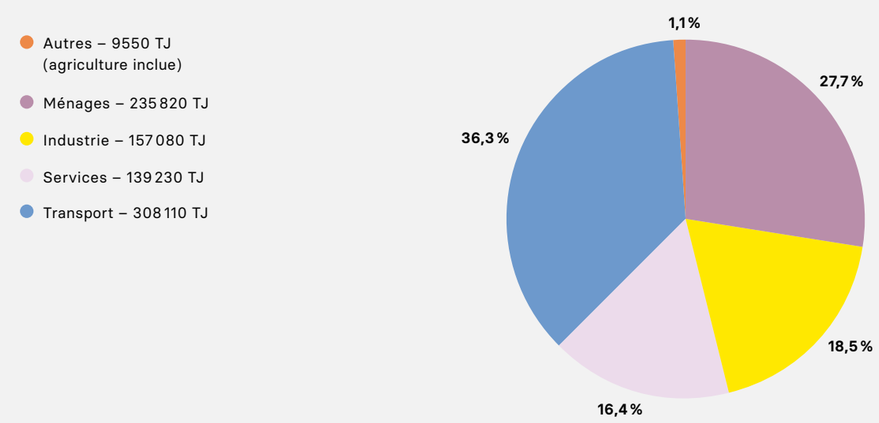


Illustration 4
Consommation d'énergie finale de la Suisse en 2017 (OFEN 2018) (diagramme circulaire).

CONTACT
Dr Bruno Michel
IBM Research GmbH
www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/104/

PROJET #froid / chaleur #pompe à chaleur #bâtiments

« Utilisation de chaleur avec des pompes chaleur d'adsorption »

En lieu et place d'un échangeur thermique liquide, les pompes à chaleur d'adsorption à entraînement thermique emploient un échangeur solide très poreux, avec de l'eau ou du méthanol en guise de fluide frigorigène. Elles utilisent de la chaleur (dissipée) comme énergie d'entraînement. Les pompes à chaleur d'adsorption actuelles sont trop chères pour être compétitives par rapport aux pompes à chaleur traditionnelles. Les améliorations considérables que l'équipe de recherche est parvenue à apporter à cette technologie ont permis de rendre ces systèmes moins chers et plus efficaces. Ces nouvelles pompes à chaleur d'adsorption permettent désormais d'utiliser la chaleur résiduelle des sites industriels ou des installations photovoltaïques pour chauffer des bureaux ou des logements à moindres frais et sans émissions, ou encore pour refroidir des centres de calcul grâce à leur propre chaleur dissipée. L'équipe de recherche a analysé les possibilités de mise en œuvre et les conditions du marché des pompes à chaleur d'adsorption en Suisse, et a développé des technologies relatives aux systèmes et aux matériaux comprenant, entre autres, des procédés de fabrication de couches d'adsorption haute performance pour les échangeurs thermiques. **Le projet a par ailleurs mis en évidence le potentiel technique, écologique et économique des pompes à chaleur d'adsorption.** Ainsi, cette technologie pourrait améliorer la capacité et l'efficacité énergétique des réseaux de chaleur. De même, pour les chauffages de bâtiments et les installations de refroidissement, les coûts d'exploitation et les émissions pourraient être réduits.

les habitations sont des priorités du PNR « Énergie »[4]. En raison du réchauffement climatique, les besoins d'énergie liés à la ventilation et à la climatisation des bâtiments vont continuer d'augmenter. Les besoins de chauffage devraient quant à eux connaître une baisse équivalente.

Aujourd'hui, les nouvelles constructions ne représentent plus un problème du point de vue de l'efficacité énergétique et de la réduction des émissions de CO_2. Pour un surcoût raisonnable, il est actuellement possible de réduire sensiblement la consommation d'énergie des nouveaux bâtiments et de couvrir la majeure partie des besoins restants d'électricité et de chauffage grâce à l'autoproduction et sans émettre de CO_2. Ce qui représente l'« état de l'art » dans les constructions neuves n'est appliqué encore que très timidement aux bâtiments plus anciens. Comme le constate le projet « Déterminants des investissements en efficacité énergétique », le taux global de rénovation des immeubles résidentiels et de bureaux ne dépasse pas 1,5 % par an (Ott et al. 2013)[5], ce qui compromet grandement la réalisation en temps utile des objectifs de la Stratégie énergétique 2050 dans le domaine des bâtiments. Pour les bâtiments construits au siècle dernier, voire avant, le besoin d'agir est d'autant plus important.

Mesures d'amélioration de l'efficacité dans le secteur du bâtiment

L'amélioration de l'efficacité énergétique du parc immobilier nécessite avant tout des mesures dans deux domaines : l'optimisation énergétique de l'enveloppe du bâtiment et le pilotage intelligent de l'offre et de la demande d'énergie.

Une isolation appropriée de l'enveloppe du bâtiment (toiture, façade et dalle de séparation avec le sous-sol non chauffé) et des fenêtres ayant un faible coefficient de transmission thermique permettent de réduire sensiblement les besoins de chauffage et de climatisation, en particulier dans les nouvelles constructions. Pour que des mesures de ce type soient effectivement mises en œuvre, des objectifs chiffrés contraignants sont nécessaires. La définition d'objectifs ambitieux a permis de réduire les besoins de chauffage des nouvelles constructions à un sixième de leur valeur au cours des 40 dernières années (cf. illustration 5).

Le vitrage, en particulier dans les immeubles de bureaux, offre un potentiel considérable d'amélioration de l'efficacité énergétique. Les derniers développements du Swiss Competence Centers for Energy Research – Future Energy Efficient Buildings & Districts (SCCER FEEB&D)[6] rendent possibles des vitrages dynamiques, qui pilotent automatiquement la luminosité en fonction de la position du soleil et réduisent en même temps le rayonnement thermique et, par conséquent, les besoins de climatisation. D'autres vitrages innovants misent sur la ventilation de l'espace entre les couches de verre pour évacuer la chaleur générée par le rayonnement solaire. Dans la mesure où leurs coûts de production devraient encore être considérablement réduits, ces technologies affichent un solide potentiel de gain d'efficacité. L'éclairage artificiel des postes de travail devrait à l'avenir varier en fonction de l'intensité lumineuse requise. Le contrôle de luminosité nécessaire à cet effet est assuré automatiquement par des capteurs reliés à un détecteur de présence et au système d'ombrage des fenêtres.

Le projet « Demande et stockage dans les réseaux électriques » est consacré au développement d'une méthode de gestion de la consommation d'énergie des bâtiments et des équipements associés, permettant un stockage d'énergie sur une plage temporaire étendue, c'est-à-dire du court au long terme.[7] Ceci permet de diminuer de près d'un quart les frais d'énergie courants – sans sacrifier le confort des utilisateurs des bâtiments – et de réduire nettement le besoin de batteries décentralisées.

Le projet « Régulation du parc immobilier » a permis d'élaborer des méthodes pour maximiser l'efficacité énergétique, la réduction des émissions de CO_2 et la production d'énergie renouvelable dans une perspective globale, au niveau des bâtiments individuels ou dans des aménagements complets. Cela suppose une prise en compte exhaustive de tous les aspects techniques et de physique du bâtiment soumis aux

4 Synthèse thématique « Bâtiments et habitations » du PNR « Énergie », FNS

5 [Déterminants des investissements en efficacité énergétique]

6 www.sccer-feebd.ch

7 [Demande et stockage dans les réseaux électriques]

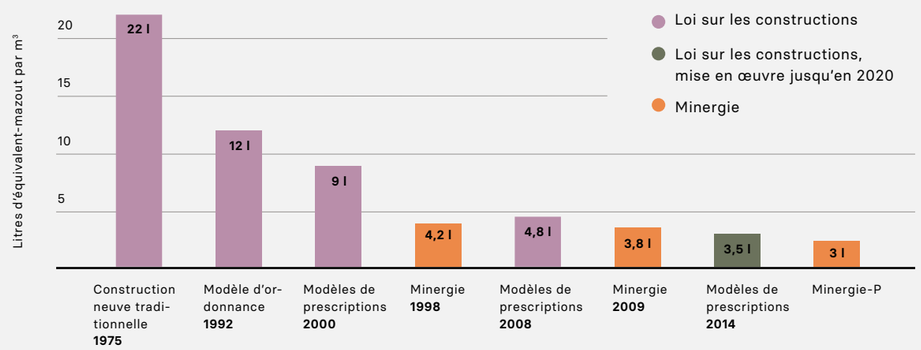


Illustration 5

Évolution des directives et des normes portant sur les besoins de chauffage des nouvelles constructions (chauffage et eau chaude) sur les 40 dernières années (Cieslik & Knüsel 2018).

prescriptions en matière d'énergie.[8] Les cantons sont tenus de mettre en œuvre ces aspects dans le contexte des modèles de prescriptions énergétiques (MoPEC) actuels.

Potentiel d'efficacité inutilisé dans les entreprises

La Stratégie énergétique 2050 met les entreprises face à des défis de taille (cf. chap. 2.2). En Suisse, les entreprises énergivores[9] ont réduit leur consommation d'énergie de près d'un tiers depuis 1990[10], principalement pour améliorer leur positionnement sur le marché. Comme l'a révélé une étude du SCCER EIP, il subsiste encore des possibilités substantielles d'économies – selon la branche jusqu'à 15 % pour l'électricité (secteur du ciment) et jusqu'à 60 % pour les combustibles (secteur de l'alimentation). Des économies seraient avant tout possibles dans les domaines de l'« alimentation », de la « cellulose et du papier » et de la « chimie », grâce à une récupération systématique de la chaleur et à la mise en œuvre de pompes à chaleur et de processus ORC (Organic Rankine Cycle).

Pour les entreprises, le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique ne se limite d'ailleurs pas aux processus opérationnels, mais comprend aussi les bâtiments nécessaires à leur activité.

La gestion de l'énergie : une clé de la réussite

Pour le projet « Déterminants des investissements en efficacité énergétique » , au moins 300 entreprises suisses ont été interrogées sur les thèmes de la

8 [Régulation du parc immobilier]

9 Entreprises dont la part des frais d'énergie dépasse 15 % de la valeur ajoutée brute ; notamment dans les branches « ciment », « production de fer et d'acier », « chimie », « alimentation » ainsi que « cellulose et papier »

10 www.eneff-industrie.info

« gestion de l'énergie » et des « investissements visant à économiser l'énergie ».[11] Cette enquête a montré que les grandes entreprises, en particulier celles qui sont les plus consommatrices d'énergie et axées sur l'international, pratiquent généralement une gestion professionnelle de l'énergie, ont recours à un gestionnaire d'énergie qualifié et ont formulé des objectifs d'économies. De plus, elles disposent de budgets spécifiques. Une gestion aussi pointue de l'énergie conduit naturellement à des économies d'énergie substantielles. Pour les petites et moyennes entreprises (PME), la thématique de la consommation d'énergie est certes aussi importante, mais est souvent uniquement abordée dans le contexte d'autres investissements opérationnels. Dans la plupart des entreprises, des actions sont requises en ce qui concerne la surveillance systématique et le contrôle des résultats des mesures d'économie d'énergie mises en place.

Concernant une gestion rigoureuse de l'énergie et la mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie, le soutien de la direction générale revêt une grande importance (Iten et. al 2017). Dans les entreprises, la thématique de l'énergie doit par conséquent être ancrée au plus haut niveau hiérarchique et faire l'objet de l'attention correspondante de la part de la direction. Dans d'autres pays, des mesures réglementaires ont été mises en place. Ainsi, aux Pays-Bas, toutes les entreprises sont tenues d'élaborer un plan d'économie d'énergie.

Potentiel d'efficacité chez les fournisseurs d'énergie et en logistique urbaine

Le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique ne se cantonne pas aux consommatrices et aux consommateurs, mais concerne par exemple aussi la production et le transport de l'énergie, ou encore le secteur de la logistique.

Dans les centrales hydroélectriques, les sédiments peuvent par exemple entraîner une abrasion des installations hydrauliques. Dans les centrales de moyenne et haute pression suisses, les pertes de production annuelles dues à des installations de dessablage insuffisantes sont estimées à 160 GWh. Le projet « Barrages et sédimentation » a démontré qu'une amélioration de ces installations permettrait de limiter la contamination par des sédiments.[12]

Selon les estimations du projet « Logistique urbaine intelligente », d'ici 2050 une logistique intelligente du fret urbain, couvrant l'intégralité des processus de transport, de manutention et de stockage des marchandises, des colis et des services de messagerie, pourrait contribuer aux objectifs de la politique énergétique à hauteur d'environ 7 % et à ceux de la politique climatique à hauteur de 9 %.[13] Cela nécessiterait des mesures coordonnées de la part des entreprises de logistique, notamment le recours à des véhicules fonctionnant à l'hydrogène, mais aussi de la part des villes et des cantons, en matière d'aménagement du territoire et d'infrastructures de transport, dans le but d'optimiser les infrastructures logistiques.

3.2 Sources d'énergie renouvelables

La Stratégie énergétique 2050 mise fortement sur le développement des sources d'énergie renouvelables pour rendre possible la sortie du nucléaire et l'abandon des énergies fossiles. Les ressources renouvelables, hors hydroélectricité, doivent produire au moins 4400 GWh d'ici 2020 et au moins 11400 GWh d'ici 2035.[14/15]

11 [Déterminants des investissements en efficacité énergétique]

12 [Barrages et sédimentation]

13 [Logistique de fret urbain efficace sur le plan énergétique]

14 Constitution fédérale suisse (CF ; RS 101) : art. 89 al. 2 CF

15 Loi sur l'énergie (Lene ; RS 730.0) : art. 2

Possibilités d'optimisation et de développement de l'hydroélectricité[16]

La production d'électricité grâce à la force hydraulique est peu coûteuse, efficace, respectueuse du climat et, dans une large mesure, respectueuse de l'environnement. Grâce à sa topographie et à un volume moyen de précipitations relativement conséquent, la Suisse jouit de conditions idéales pour tirer profit de la force hydraulique. Aussi, cette dernière couvre actuellement environ 60 % de la consommation d'électricité de la Suisse. Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, l'hydroélectricité doit contribuer à remplacer le courant produit par les centrales nucléaires.

En Suisse, les installations hydroélectriques ont des possibilités d'extension limitées. C'est pourquoi, la priorité est donnée à l'optimisation des centrales hydroélectriques existantes. Des prédictions hydrométéorologiques allant au-delà de l'échelle temporelle des prévisions météorologiques – de plus de deux à quatre semaines – peuvent y contribuer. Les prévisions d'arrivée et d'évacuation d'eau peuvent être combinées avec l'évolution des prix attendue sur le marché de l'énergie. Cette combinaison permet d'optimiser encore davantage l'exploitation et la rentabilité des centrales à accumulation. La prise en compte de ces prédictions hydrométéorologiques dans les plans d'exploitation des centrales permet d'accroître la production de 4 à 6 % par an.[17]

En zone alpine, le recul des glaciers libère de nouveaux espaces pouvant servir de lieu de stockage et offrir par conséquent de nouvelles possibilités d'exploitation de la force hydraulique. Les premiers lacs de barrage glaciaires sont déjà en cours de formation. Pour couvrir le déficit d'électricité de 1,1 TWh/an prévu d'ici 2035, au moins sept nouvelles centrales hydroélectriques seraient nécessaires à proximité de glaciers.[18] En guise d'effet secondaire positif, grâce à leur capacité de stockage d'environ 1,3 TWh, elles pourraient soutenir la production d'électricité hivernale. La plupart des sites envisageables se situent toutefois dans des zones protégées.

D'un point de vue écologique, d'autres défis se posent en matière de force hydraulique. Les assainissements de débit résiduel en attente de réalisation pourraient entraîner des pertes de production. Le projet « Gestion durable des zones inondables et force hydraulique » montre en outre que les dispositions mises en œuvre en matière de débits résiduels sont insuffisantes pour préserver la biodiversité en aval des barrages et des captages d'eau (cf. p. 43).[19]

Progrès technologiques et conceptuels en énergie solaire

Le rayonnement ou l'énergie solaire peuvent être directement convertis en chaleur ou en énergie électrique. Pour servir au chauffage, l'énergie solaire est absorbée par des capteurs solaires thermiques. Cette énergie sert à réchauffer un agent de stockage, qui pourra restituer la chaleur ainsi emmagasinée via un échangeur thermique pour la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage.

Les installations photovoltaïques (PV) et les centrales solaires thermiques sont les deux concepts envisageables pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Les installations photovoltaïques se composent de cellules solaires formées de couches semi-conductrices produisant du courant continu en présence de photons. Un onduleur se charge ensuite de convertir celui-ci en courant alternatif. Dans les centrales solaires, l'énergie thermique est absorbée par des capteurs. Puis, grâce à un échangeur de chaleur, elle est utilisée pour produire de la vapeur, destinée à faire fonctionner un générateur classique. Dans le cadre du projet conjoint « Une nouvelle génération du photovoltaïque », le PNR « Énergie » a fortement contribué au perfectionnement des cellules solaires, notamment avec le recours à des matériaux inédits permettant d'améliorer le rendement des cellules (cf. p. 45 et p. 64).[20]

16 Synthèse thématique « Force hydraulique et marché » du PNR « Énergie », FNS

17 [Prédictions hydrométéorologiques]

18 [Zones périglaciaires et hydroélectricité]

19 [Gestion durable des zones inondables et force hydraulique]

20 [Une nouvelle génération du photovoltaïque]

CONTACT
Pr Dr Anton Schleiss
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/fr/projects/1021/

PROJET #hydroélectricité #paysage #écologie / environnement

« Gestion durable des zones inondables et force hydraulique »

Conformément à ce qu'exige la législation, les tronçons de cours d'eau situés en aval de barrages ou de retenues sont alimentés en continu par une petite quantité d'eau appelée « débit résiduel ». Cependant, en raison de l'absence de crues naturelles, ces tronçons sont colonisés par les algues et leur lit s'endurcit. Les eaux s'appauvrissent, et de la végétation forestière s'installe sur les berges. Les barrages empêchent également le charriage de gravier et de sable. Dans la Sarine, l'équipe de recherche a étudié l'impact d'une crue artificielle sur la biocénose du cours d'eau en aval du barrage de Rossens (FR). L'inondation provoquée a purgé les bancs de gravier de la végétation qui les avait envahis et a amené de l'eau dans des zones préalablement asséchées. La crue artificielle a donc eu un impact positif sur le paysage alluvial. Les dépôts artificiels de gravier dans la Sarine ont joué à cet égard un rôle capital. **Pour que l'opération soit bénéfique à l'écologie du paysage alluvial sur le long terme, des crues avec apports de sédiments doivent être déclenchées régulièrement.**

En 2017, la Suisse a produit environ 700 GWh d'énergie thermique grâce à des capteurs solaires (Eicher + Pauli 2018). Mais c'est le photovoltaïque qui doit jouer un rôle essentiel dans la Stratégie énergétique 2050. Fin 2017, la puissance photovoltaïque installée s'élevait à 1906 MW, pour une production annuelle de 1683 GWh (OFEN 2018a). Après avoir fortement augmenté entre 2005 et 2013, la puissance installée a ensuite stagné et même légèrement diminué.[21] Les installations devraient cependant reprendre. Outre les installations sur les toitures, les systèmes PV intégrés aux bâtiments offrent un solide potentiel de développement. Basées sur des cellules solaires faisant office d'élément de façade ou de tuile, ces solutions étaient restées jusqu'ici à l'état de marché de niche. Dans la ville de Neuchâtel, le projet « Accélération du recours au photovoltaïque » a permis d'identifier un bon potentiel de réalisation d'installations PV intégrées aux bâtiments sur 45 % des permis de construire. Le manque de connaissances, une faible pression sociale et des coûts élevés sont les principaux obstacles à l'essor de ces technologies (cf. p. 22).[22] Comme l'ont révélé les conclusions du projet « Paysages énergétiques », les installations photovoltaïques bénéficient en outre d'une bonne acceptation en zone résidentielle.[23]

Difficultés d'acceptation de l'énergie éolienne

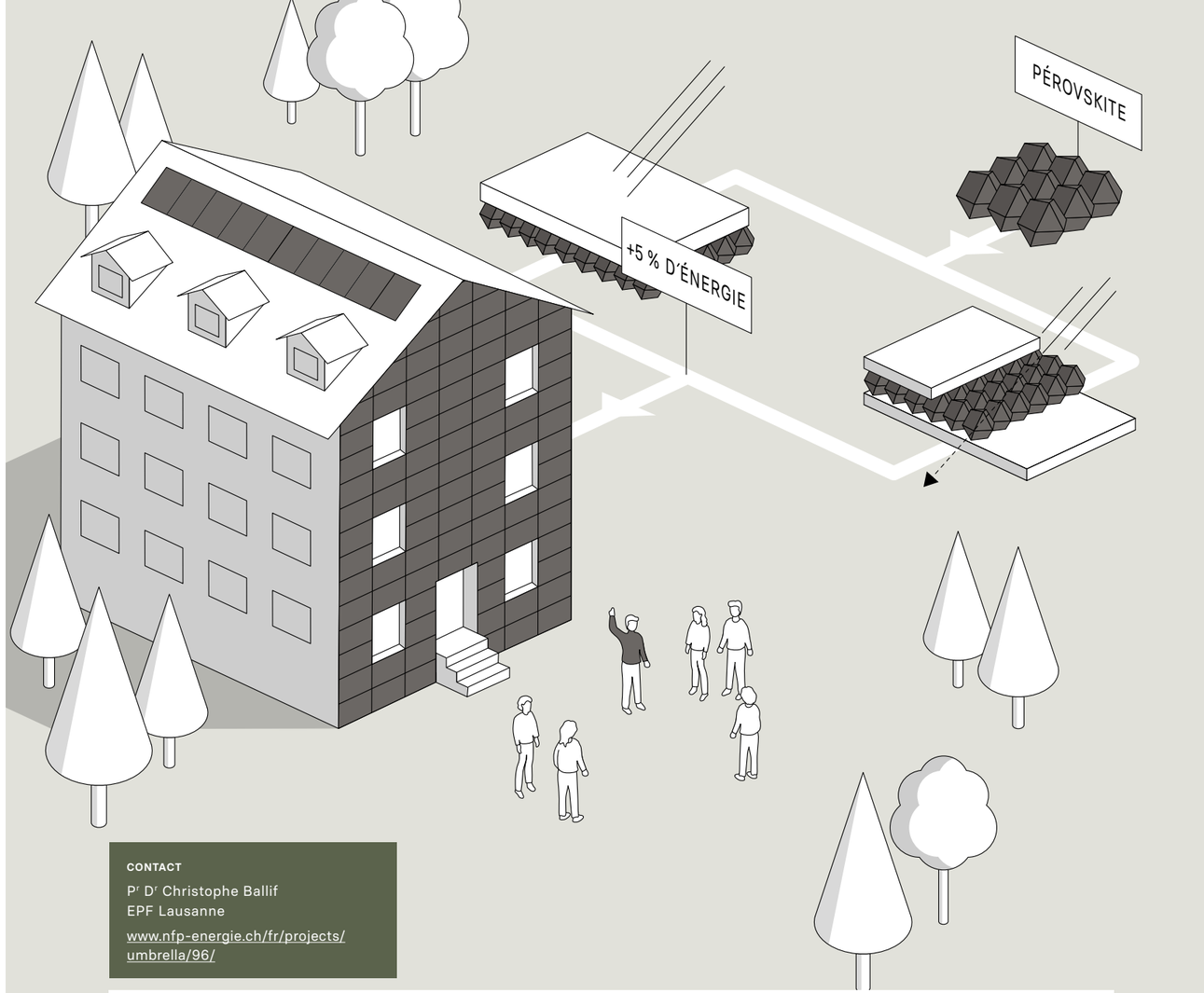
Les éoliennes produisent de l'électricité grâce à l'énergie cinétique du vent. Le modèle d'éolienne prédominant est celui d'un axe horizontal avec trois pales de rotor. La position angulaire des pales permet d'influencer la puissance de production. La turbine entraîne un générateur qui convertit l'énergie de rotation mécanique en énergie électrique. En 2017, les installations éoliennes suisses, d'une capacité de 75 MW, ont permis de produire quelque 132 GWh d'énergie électrique (OFEN 2018a).

La réalisation d'installations éoliennes, et notamment de grands parcs éoliens, doit toutefois prendre en compte un grand nombre de conditions-cadres, par exemple en matière de protection acoustique ou de respect des zones de passage des oiseaux migrateurs. La « Conception énergie éolienne » du gouvernement fédéral (ARE 2017) définit entre autres les principaux intérêts fédéraux à respecter lors de la planification. Les installations éoliennes doivent cependant lutter contre des difficultés d'acceptation à bien d'autres égards encore. Ainsi, plus le nombre d'éoliennes visibles dans un paysage est important, plus l'installation aura du mal à se faire accepter.[23] Leur perception est un peu meilleure en combinaison avec des installations photovoltaïques, mais un peu moins bonne en combinaison avec des lignes haute tension aériennes. On constate notamment de fortes variations selon le type de paysage. Ainsi, les installations éoliennes sont mieux acceptées dans les espaces déjà marqués par l'activité humaine, comme les zones fortement peuplées du Plateau suisse ou les régions disposant déjà d'infrastructures touristiques, que dans d'autres paysages. Même dans les plaines à forte activité agricole, les schémas associant de rares éoliennes et des installations photovoltaïques sur les bâtiments ne sont que modérément privilégiés, bien qu'ils soient relativement bien perçus par rapport à d'autres régions comme le Jura, les Préalpes et les zones montagneuses. Les espaces paysagers où les sources d'énergie renouvelables sont privilégiées ne correspondent souvent pas aux régions identifiées par le gouvernement fédéral pour leur potentiel éolien. Ces dernières tiennent compte des zones à fort rendement éolien, des principaux intérêts fédéraux et d'une concentration spatiale suffisante des installations.

Nouvelles perspectives pour la géothermie profonde

La géothermie utilise la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour chauffer des bâtiments via des pompes à chaleur ou pour produire de l'électricité au moyen de turbines à vapeur et de générateurs. Le système est basé sur le réchauffement d'un fluide dans le sous-sol. Grâce à un échangeur thermique ou une pompe à chaleur, la chaleur ainsi emmagasinée est transmise à un autre fluide afin de servir au chauffage de bâtiments. Il suffit de descendre de quelques mètres sous la surface de la terre pour pouvoir récupérer la chaleur du sous-sol via des capteurs géothermiques et se chauffer avec. À partir d'une profondeur de forage d'environ 50 mètres, on utilise des sondes géothermiques pour produire de la chaleur ou du froid. Le même principe permet aussi de récupérer la chaleur dans d'autres milieux de l'environ-

21 www.swissolar.ch
22 [Accélérer l'utilisation du photovoltaïque]
23 [Paysages énergétiques]



CONTACT
P' D' Christophe Ballif
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/96/

PROJET #photovoltaïque #bâtiments #acceptation

« Une nouvelle génération du photovoltaïque »

Outre les technologies photovoltaïques à base de silicium cristallin et de séléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS), il existe désormais des alternatives plus efficaces dans la conversion de l'énergie solaire contenue dans les photons. Un rendement électrique supérieur peut par exemple être atteint avec des cellules tandem associant des cellules de structure différente. **L'équipe de recherche a développé des systèmes fonctionnels pour des cellules tandem inédites combinant des cellules en silicium cristallin avec des cellules à pérovskites (cf. p. 64).** Celles-ci peuvent être revêtues de couches supplémentaires permettant par exemple une gestion optimale de la lumière. Au total, ce procédé permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 27 à 30 %, c'est-à-dire surpassant de plus de cinq points les cellules conventionnelles. Bien que de nombreux obstacles restent à surmonter, ces cellules solaires offrent un potentiel considérable du point de vue industriel et énergétique. En Suisse, si des toitures et des façades idéalement orientées en sont équipées, le potentiel de base actuel des bâtiments, estimé à 67 TWh, pourrait gagner de 13 à 14 TWh grâce à ces améliorations de rendement.

nement comme l'air, les eaux souterraines ou les lacs. L'exploitation de la chaleur terrestre pour se chauffer au moyen d'une pompe à chaleur est largement répandue en Suisse. Environ 15 % des chauffages de bâtiments sont alimentés par des pompes à chaleur géothermiques (SuisseEnergie & OFEN 2018a).

Dans une centrale géothermique, la vapeur produite entraîne une turbine. Cela suppose que la température atteigne au moins 100 °C dans le circuit thermique, ce qui nécessite de creuser à plusieurs milliers de mètres de profondeur en Suisse (SuisseEnergie & OFEN 2017). En raison des risques sismiques associés aux forages de grande profondeur, aucune centrale géothermique n'a été mise en service en Suisse. Le manque de techniques permettant de contrôler les conséquences sismiques reste un des principaux freins à la production d'électricité géothermique en Suisse. Une gestion des risques appropriée et des stratégies en temps réel basées sur les données peuvent limiter les risques techniques de provoquer des phénomènes sismiques. Les dégâts dus aux microséismes pouvant être provoqués par l'injection d'eau dans les couches profondes n'étaient jusqu'à présent guère prévisibles. De nouvelles méthodes développées dans le cadre du projet « Gestion du risque en géothermie et hydroélectricité » contribuent à estimer les dégâts potentiels des microséismes et les risques généraux associés aux sites géothermiques et hydroélectriques, et permettent ainsi d'évaluer le rapport risque-coût-utilité sur des bases plus solides. Les moyens de communication aident par ailleurs à mieux comprendre les souhaits et les craintes du grand public, afin de prendre en compte les aspects sociaux.[24]

Les conclusions du projet « Géothermie profonde » ouvrent de nouvelles perspectives au col du Grimsel : les zones de fracture tectonique des Alpes centrales et de la région de la vallée du Rhône pourraient se révéler très prometteuses pour la géothermie haute température et, par conséquent, pour la production d'électricité ou de chaleur (cf. p. 75).[25]

Progrès dans la production et l'utilisation d'hydrogène

L'hydrogène (H_2) n'est certes pas une source d'énergie directement disponible mais, fabriqué grâce à la technologie « power to gas » (cf. p. 53) avec de l'électricité issue d'énergie renouvelable, il est adapté à de nombreuses applications, en particulier dans les piles à combustible et, par conséquent, pour alimenter des véhicules électriques. Le caractère durable d'une telle motorisation dépend avant tout des ressources utilisées pour la production d'hydrogène. Si l'énergie électrique utilisée est effectivement issue de ressources renouvelables, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être considérablement réduites lors de la production par électrolyse.[26] La caractérisation des matériaux dans des modèles tridimensionnels et les modélisations mathématiques du projet « Piles à combustible PEM » permettent de mieux analyser le processus de transformation de l'hydrogène dans les piles à combustible afin de rendre celles-ci plus efficaces. Elles se distinguent par un rapport élevé entre les rendements thermique et électrique, ainsi que par une dynamique de conversion rapide. Le projet « Technologie des systèmes énergétiques décentralisés » a démontré que les piles à combustible PEM étaient les mieux adaptées aux systèmes de couplage chaleur-force privés.[27]

À ce jour, l'hydrogène reste toutefois encore très coûteux à produire. Sa généralisation nécessite des technologies permettant de rendre sa production plus efficace et moins chère. L'état actuel de la technique, consistant à produire l'hydrogène à partir de lumière solaire et d'eau au moyen de matériaux semi-conducteurs, n'est pas encore adapté aux installations et à la production à grande échelle. La mise en œuvre de nouveaux matériaux dans le cadre du projet « Dissociation de l'eau par photocatalyse » a toutefois permis d'améliorer le rendement.[28]

24 [Gestion du risque en géothermie et hydroélectricité]
25 [Géothermie profonde]
26 [Durabilité de la méthanation]
27 [Technologie des systèmes énergétiques décentralisés]
28 [Dissociation de l'eau par photocatalyse]

CONTACT
Pr Dr Stefanie Hellweg
EPF de Zurich
www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/101/

PROJET #recyclage #industrie #politique (confédération, canton, commune)

« Gestion des déchets pour soutenir la transition énergétique »

Les déchets renferment de grandes quantités d'énergie aussi bien directe qu'indirecte. Les déchets ménagers incinérés chaque année en Suisse représentent une valeur énergétique de quelque 30 PJ. L'incinération des déchets contribue directement à la production d'électricité du pays à hauteur de 3 %. La contribution à la fourniture de chaleur pour les ménages et l'industrie, par l'intermédiaire du réseau de chauffage à distance ou de vapeur d'une UIOM, peut localement dépasser 80 %. À l'aide de scénarios, l'équipe de recherche a démontré que **le plus gros potentiel en matière de gestion des déchets réside généralement dans le recyclage des matériaux, afin de leur donner une seconde vie et d'éviter ainsi indirectement la production énergivore de matières premières.** Les économies d'énergie sont toutefois très dépendantes de la qualité des matériaux collectés. De plus, en termes de coût de revient global, la valorisation thermique se révèle en général plus intéressante d'un point de vue économique. L'équipe de recherche a également identifié des possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les UIOM. Ces dernières manquent parfois de consommateurs à proximité, susceptibles d'utiliser la chaleur de façon optimale. Le secteur de la gestion des déchets peut également gagner en efficacité énergétique en s'organisant davantage tout au long de la chaîne de création de valeur et en renforçant la collaboration entre les acteurs à l'échelle fédérale.

Potentiel d'utilisation du bois et des déchets

Le biogaz issu de la fermentation de biomasse (matières organiques comme les résidus de récolte, le fumier, le compost, etc.) peut servir à la production de chaleur et d'électricité. Le bois appartient également à la catégorie de la « biomasse ». De même, les composants organiques des déchets (p. ex. le compost, le bois, etc.) sont considérés comme des sources d'énergie renouvelables (AES 2018).

Le bois est en grande partie brûlé. La chaleur générée peut directement servir au chauffage des bâtiments. Les centrales qui utilisent du biogaz et les usines d'incinération d'ordures ménagères combinent quant à elles la production de chaleur et d'électricité. En 2017, la valorisation énergétique de la biomasse (bois y compris) et des déchets a fourni quelque 10 400 GWh d'énergie de chauffage et 1720 GWh d'énergie électrique. Cela représente environ 65 % de la chaleur et 50 % de l'énergie électrique produites à base de sources d'énergie renouvelables (hors hydraulique) (OFEN 2018a).

Le bois disponible dans les forêts suisses couvre largement la consommation actuelle. Une partie peut par exemple servir à chauffer des logements, mais lors de la combustion, des polluants nocifs sont rejetés dans l'air. Pour développer le chauffage au bois dans les bâtiments résidentiels, il faut donc opter pour des foyers appropriés et les exploiter de façon optimale. Deux projets du PNR « Énergie » se sont intéressés à ces aspects. Ils ont conclu que les foyers automatiques étaient clairement à privilégier. Dans des conditions de fonctionnement optimales, ceux-ci rejettent jusqu'à 2400 fois moins de polluants que ceux qui sont gérés manuellement. Les rejets de polluants étant particulièrement importants durant la phase de démarrage, une bonne planification des besoins de chaleur permet de faire fonctionner les foyers de façon aussi constante que possible et de limiter ainsi les émissions polluantes.[29]

En 2012, la Suisse a produit 35 000 GWh d'électricité à partir de ses déchets. Comme exposé plus haut, ceux-ci peuvent s'utiliser directement par incinération et pour la production de chaleur et d'électricité, ou bien être recyclés et substitués à des matières premières pour économiser indirectement de l'énergie par ailleurs. Avec des volumes importants de déchets, l'énergie récupérée directement et indirectement pourrait plus que doubler d'ici 2050.[30] Même en cas de réduction de 40 % du volume de déchets, il serait néanmoins possible de récupérer 10 % d'énergie supplémentaire. Le recyclage revêt à cet égard un rôle très important, à condition de servir effectivement à remplacer des matières premières (cf. p. 47).

3.3 Répartition et couplage des vecteurs d'énergie

La proportion supérieure d'énergie solaire et éolienne dans le futur système énergétique implique des fluctuations plus importantes de l'offre d'énergie. De plus, le nombre de fournisseurs d'énergie décentralisés va également croître. Pour préserver la stabilité du système énergétique tout en faisant preuve de la souplesse requise, il convient de se doter de stratégies de distribution assurant l'échange spatial et temporel, ainsi qu'entre les différents vecteurs d'énergie (convergence). Outre les infrastructures elles-mêmes (lignes de transport et de distribution, stockage), il faut également des mesures organisationnelles, sous la forme de nouveaux systèmes de contrôle du réseau et de gestion des charges, pour équilibrer les diverses charges de façon aussi souple que possible. La complexité croissante du système énergétique confère une importance considérable à cette tâche, dont il est impossible de venir à bout sans un recours massif au numérique.[31]

29 [Combustion du bois et production d'énergie dans les bâtiments]

30 [Gestion des déchets pour soutenir la transition énergétique]

31 Synthèse thématique « Réseaux d'énergie » du PNR « Énergie », FNS

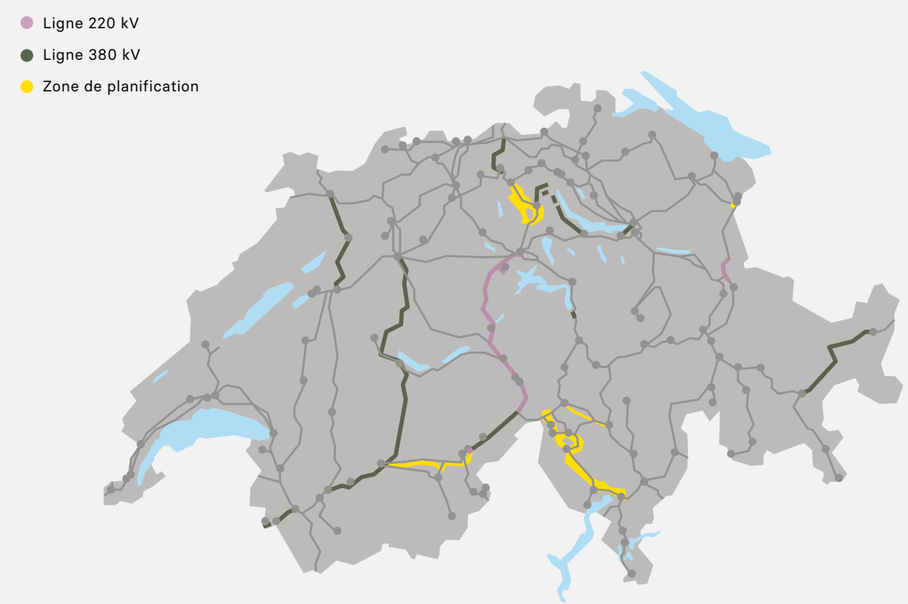


Illustration 6
Extension prévue du réseau électrique (Swissgrid).

Extension planifiée du réseau électrique – un prérequis à la sécurité d'approvisionnement

Pour satisfaire aux exigences supérieures qui s'appliqueront à l'avenir au réseau électrique, une planification et une exploitation intégrées du réseau de transport et des réseaux de distribution seront incontournables. L'approche intégrée de ces deux aspects offrira diverses nouvelles possibilités, par exemple en termes de flexibilité. Le projet « Infrastructures énergétiques du futur » a montré que les extensions prévues au sein du réseau suisse de transport d'électricité (cf. illustration 6) étaient nécessaires pour garantir la sécurité d'approvisionnement, et ce avec différents scénarios d'évolution. Le développement du réseau lui permettra de gérer les futurs flux d'énergie sans nécessiter d'extension supplémentaire.[32]

Le projet « Lignes aériennes hybrides » montre par ailleurs que la combinaison, sur un même tracé, de lignes de courant alternatif (AC) et de courant continu (DC) – également appelées lignes aériennes hybrides – pourrait contribuer à améliorer la capacité de transport et à renforcer la sécurité du réseau. Une configuration optimale permet de réduire les immissions liées aux lignes (bruissements et forts champs électromagnétiques).[33]

32 [Infrastructures énergétiques du futur]

33 [Lignes aériennes hybrides en Suisse]

Développement des technologies de stockage

Le stockage joue depuis longtemps un rôle central dans l'alimentation électrique de la Suisse, notamment pour absorber l'excédent d'énergie en ruban des centrales nucléaires la nuit et le réinjecter en journée lorsque la demande d'électricité est forte. L'intérêt actuel pour les solutions de stockage s'explique par la flexibilité requise pour absorber les fluctuations à court terme et saisonnières.

Les technologies de stockage sont très variées. Les centrales de pompage-turbinage et les centrales hydroélectriques à lac de retenue représentent de loin la technologie la plus répandue pour le stockage du courant. Elles disposent de capacités énergétiques et de performances relativement importantes, mais leur potentiel d'extension est très limité. Le stockage en batterie gagne en popularité, notamment chez les propriétaires de maisons équipées d'une installation photovoltaïque. Les fournisseurs d'énergie commencent eux aussi à s'équiper de batteries de stockage, afin de disposer d'énergie de réglage (EKZ 2018). Les batteries métal-air, capables de stocker jusqu'à 30 fois plus d'énergie que les accumulateurs traditionnels (cf. p. 59)[34], s'annoncent particulièrement prometteuses, même si le chemin jusqu'à la mise en application concrète de cette technologie est encore long et pavé d'incertitudes.

Le projet « Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air » a démontré la faisabilité pratique de la technologie de stockage à air comprimé (cf. p. 55). Ce procédé consiste à stocker de l'air comprimé dans une cavité géologique, en vue de le récupérer à un moment ultérieur pour produire de l'électricité.[35]

Les volants d'inertie et les condensateurs sont d'autres technologies de stockage, qui ne suscitent toutefois guère d'intérêt en Suisse. Au rang des stratégies de stockage d'avenir, le couplage des différents vecteurs énergétiques (stockage « power-to-x », cf. p. 52) fait l'objet de beaucoup d'attention. Face à l'interdépendance croissante du système énergétique, la combinaison optimale du stockage à court et long terme gagne elle aussi en importance. Elle dépend essentiellement de l'objectif recherché (p. ex. l'optimisation des coûts ou la minimisation des émissions de CO_2) ainsi que de la configuration des systèmes respectifs, par exemple concernant la part des sources d'énergie renouvelables.[36]

Gestion des charges – une mission d'avenir

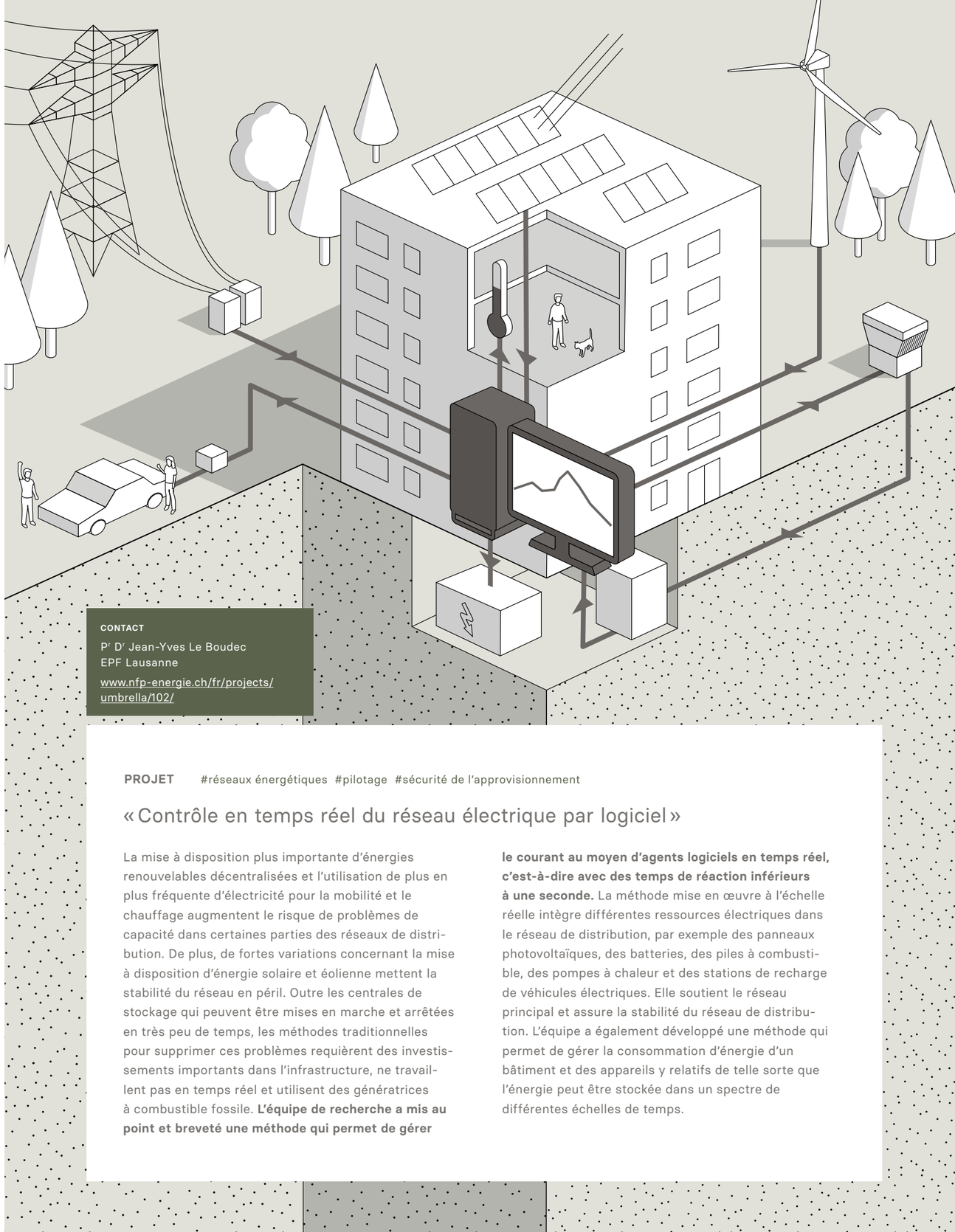
En raison de la hausse du nombre de producteurs d'énergie décentralisés, le système énergétique se caractérisera à l'avenir par un degré croissant de décentralisation de l'alimentation en électricité. Les producteurs décentralisés qui consomment une partie de leur propre production, également appelés « prosommateurs », modifient le profil de tension et des flux de charge du réseau. C'est à la gestion des charges qu'incombe la tâche de piloter le système dans ce contexte de complexité et d'interconnexions croissantes, et d'adapter la consommation électrique aux capacités de production en présence, par exemple à l'aide de tarifs différenciés (heures creuses/heures pleines), d'heures de blocage ou d'activation/de désactivation de consommateurs selon la situation.

Le régime des heures pleines et creuses constitue une forme très simplifiée de gestion de la charge. Ce système incite les abonnés à décaler l'utilisation de certains équipements aux périodes d'heures creuses, généralement la nuit ou le week-end. Des systèmes de compteurs intelligents, également appelés « smart meters », procurent davantage de souplesse de pilotage, par exemple en relevant la consommation individuelle d'électricité tous les quarts d'heure. Ces compteurs intelligents sont également en mesure de réceptionner des signaux. La proposition du Conseil fédéral, de remplacer 80 % des compteurs électriques traditionnels par ces compteurs de nouvelle génération d'ici 2027, offre la possibilité d'intégrer davantage les consommatrices et les consommateurs dans l'équilibrage de la production et de la consommation d'énergie. Plusieurs entreprises proposent d'ores et déjà des produits destinés à tirer profit de cette flexibilité chez les clientes et clients.

34 [Matériaux pour les batteries du futur]

35 [Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air]

36 [Production d'électricité durable décentralisée]



CONTACT
Pr Dr Jean-Yves Le Boudec
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/102/

PROJET #réseaux énergétiques #pilotage #sécurité de l'approvisionnement

« Contrôle en temps réel du réseau électrique par logiciel »

La mise à disposition plus importante d'énergies renouvelables décentralisées et l'utilisation de plus en plus fréquente d'électricité pour la mobilité et le chauffage augmentent le risque de problèmes de capacité dans certaines parties des réseaux de distribution. De plus, de fortes variations concernant la mise à disposition d'énergie solaire et éolienne mettent la stabilité du réseau en péril. Outre les centrales de stockage qui peuvent être mises en marche et arrêtées en très peu de temps, les méthodes traditionnelles pour supprimer ces problèmes requièrent des investissements importants dans l'infrastructure, ne travaillent pas en temps réel et utilisent des génératrices à combustible fossile. **L'équipe de recherche a mis au point et breveté une méthode qui permet de gérer le courant au moyen d'agents logiciels en temps réel, c'est-à-dire avec des temps de réaction inférieurs à une seconde.** La méthode mise en œuvre à l'échelle réelle intègre différentes ressources électriques dans le réseau de distribution, par exemple des panneaux photovoltaïques, des batteries, des piles à combustible, des pompes à chaleur et des stations de recharge de véhicules électriques. Elle soutient le réseau principal et assure la stabilité du réseau de distribution. L'équipe a également développé une méthode qui permet de gérer la consommation d'énergie d'un bâtiment et des appareils y relatifs de telle sorte que l'énergie peut être stockée dans un spectre de différentes échelles de temps.

Une méthode développée dans le cadre du PNR « Énergie » permet de réguler le flux d'électricité d'un bâtiment en temps réel, c'est-à-dire avec des temps de réponse inférieurs à une seconde. Elle intègre au réseau de distribution diverses ressources électriques, telles que les modules photovoltaïques, les batteries, les piles à combustible, les pompes à chaleur et les stations de recharge des véhicules électriques (cf. p. 51).[37]

Couplage sectoriel – opportunités étendues pour les sources d'énergie renouvelables

La combinaison de plusieurs secteurs énergétiques (électricité, mobilité, chauffage), également appelée « couplage sectoriel », joue un rôle central dans la conception d'un système énergétique durable. L'électrification de secteurs comme la « mobilité » et le « chauffage » offre la possibilité d'un recours accru aux sources d'énergie renouvelables dans ces secteurs. Le cas échéant, le couplage sectoriel permet en outre de convertir l'énergie électrique excédentaire en d'autres formes d'énergie, plus faciles à stocker.

Grâce au couplage chaleur-force (CCF), également appelé « cogénération », les centrales de chauffage peuvent produire aussi bien de la chaleur que de l'électricité. Des réseaux de chaleur à distance permettent d'approvisionner les zones résidentielles proches en chauffage. L'essentiel des besoins de courant étant couvert par les centrales hydroélectriques et nucléaires, les centrales de cogénération ne sont pas encore très répandues en Suisse. La chaleur dissipée par la centrale nucléaire de Beznau est par exemple aussi utilisée à des fins de chauffage par l'intermédiaire d'un réseau de chaleur à distance. Au total, avec 4 % des ménages, la proportion des foyers chauffés via un réseau de chaleur à distance reste relativement faible (OFS 2017). Le nombre de pompes à chaleur, utilisant de l'électricité pour récupérer la chaleur contenue dans l'air ambiant ou le sol à des fins de chauffage, est en augmentation. Dans les nouvelles constructions, ce type d'installation est devenu la règle. Près d'un cinquième des bâtiments suisses sont aujourd'hui équipés d'une installation de ce type (OFS 2017). Le recours à de nouvelles technologies dans les pompes à chaleur permettrait d'améliorer la capacité et l'efficacité énergétique des réseaux de chauffage et de refroidissement (cf. p. 38).[38]

L'offre de voitures fonctionnant à l'énergie électrique s'est fortement développée au cours des dernières années. Si les modèles hybrides, associant un moteur électrique et un moteur thermique, étaient initialement les plus répandus, les véhicules tout électriques sont actuellement de plus en plus nombreux. Dans des pays comme la Norvège, grâce à des programmes de soutien, une nouvelle immatriculation sur trois est déjà une voiture électrique. En Suisse, leur proportion demeure inférieure à 2 % (SuisseEnergie & OFEN 2018). Par rapport à d'autres modes de propulsion alternatifs (p. ex. l'hydrogène ou le biogaz), les véhicules électriques ont le grand avantage de disposer d'un réseau d'alimentation en électricité déjà en place. Pour les poids lourds couvrant des distances moyennes et longues, la priorité est donnée aux solutions de propulsion à base d'hydrogène, tandis que les batteries sont privilégiées pour les véhicules de livraison et les bus urbains. Ces derniers pourraient être alimentés par des stations de recharge situées au niveau des arrêts.[39]

Power-to-x – Stockage d'électricité convertie

Le couplage de plusieurs vecteurs d'énergie permet de tirer profit de la capacité de stockage d'un agent pour compenser les variations de production d'un autre, par exemple en permettant le stockage de l'énergie très fluctuante issue d'installations solaires ou éoliennes. Le terme « power-to-x » couvre diverses solutions de couplage : power-to-heat, power-to-gas, power-to-chemicals et power-to-liquid. L'énergie peut être stockée sous une nouvelle forme en vue d'être utilisée ultérieurement soit sous cette forme d'énergie, soit en la reconvertissant en énergie électrique. Les pompes à chaleur font partie des technologies power-to-heat. Grâce à un accumulateur de chaleur, pouvant prendre la forme de sondes géothermiques ou d'un réservoir d'eau chaude, la chaleur peut être stockée pendant une durée prolongée.

37 [Contrôle en temps réel du réseau électrique par logiciel]

38 [Utilisation de chaleur avec des pompes à chaleur d'adsorption]

39 www.sccer-mobility.ch

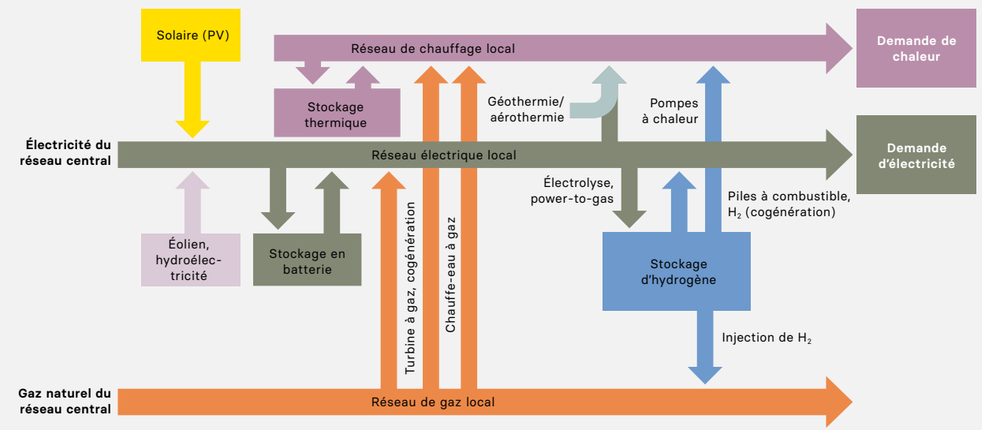


Illustration 7

Schéma d'un système multiénergies décentralisé, combinant électricité, chaleur, gaz naturel et hydrogène, pour fournir du courant et du chauffage aux consommatrices et consommateurs finaux. Ce système inclut des technologies de conversion utilisant des sources d'énergie renouvelables (modules photovoltaïques) à base de gaz (piles à combustible, microturbines à gaz, chaudières), ainsi que des technologies de stockage à court et à long terme (batteries, power-to-hydrogen).

En guise de stockage longue durée de grande capacité, la Suisse est notamment propice aux solutions de stockage profond, permettant l'accumulation de gaz ou de chaleur, voire éventuellement de CO_2. La plus grande formation rocheuse de Suisse considérée jusque-là comme adaptée aux applications de stockage, une couche de grès imprégnée de sel (aquifère salin) entre Olten et Schaffhouse, n'est toutefois adaptée à cet usage que sous certaines conditions selon le projet « Réservoirs de chaleur souterrains ».[40]

La technologie power-to-gas consiste à décomposer de l'eau en hydrogène et en oxygène par le biais d'une électrolyse. L'hydrogène peut en outre être converti en méthane et être injecté dans le réseau de gaz naturel ou stocké dans une cavité géologique (OFEN 2017). Ce procédé permet une future conversion en énergie électrique. Ce stockage saisonnier au moyen de systèmes power-to-gas constitue une solution pour réduire les émissions de CO_2 dans les régions à fort potentiel de sources d'énergie renouvelables, tout en faisant face à une alternance saisonnière marquée entre les besoins d'énergie et la production d'énergie renouvelable.[41] Diverses installations power-to-gas fonctionnent selon ce principe, notamment en Allemagne. En Suisse, ce type d'installation n'est pas encore nécessaire. Le stockage saisonnier est toutefois aussi très coûteux, ce qui freine sa mise en œuvre.

40 [Réservoirs de chaleur souterrains]

41 [Technologie des systèmes énergétiques décentralisés]

Avec les technologies power-to-chemicals et power-to-liquid, l'hydrogène est réutilisé pour synthétiser des substances chimiques respectivement liquéfié. Ces technologies affichent cependant encore toutes un mauvais rendement. Le PNR « Énergie » a contribué à l'amélioration de ces technologies via différents projets (cf. p. 18).[42/43]

Systèmes multiénergies décentralisés – le summum du couplage de vecteurs d'énergie

Si le couplage des vecteurs d'énergie est envisagé à l'échelle de quartiers ou de villages entiers, la dimension système revêt une importance encore plus grande. La combinaison de composants locaux et leur pilotage conjoint apportent des avantages considérables, notamment lorsqu'ils se complètent et permettent d'éviter les redondances. En raison de leur complexité, mais aussi pour des raisons de protection des données, une optimisation globale de ces systèmes est particulièrement ardue. Comme le montre le projet « Contrôle des systèmes énergétiques décentralisés », les systèmes multiénergies décentralisés (DMES) permettent d'éviter de coûteuses extensions de réseau.[44] Ils profitent du couplage de différents vecteurs d'énergie et associent des sources d'énergie renouvelables et conventionnelles, des technologies de conversion, ainsi que des techniques de stockage. L'objectif est de limiter l'impact écologique négatif de la fourniture d'énergie, tout en contenant les coûts (cf. illustration 7).

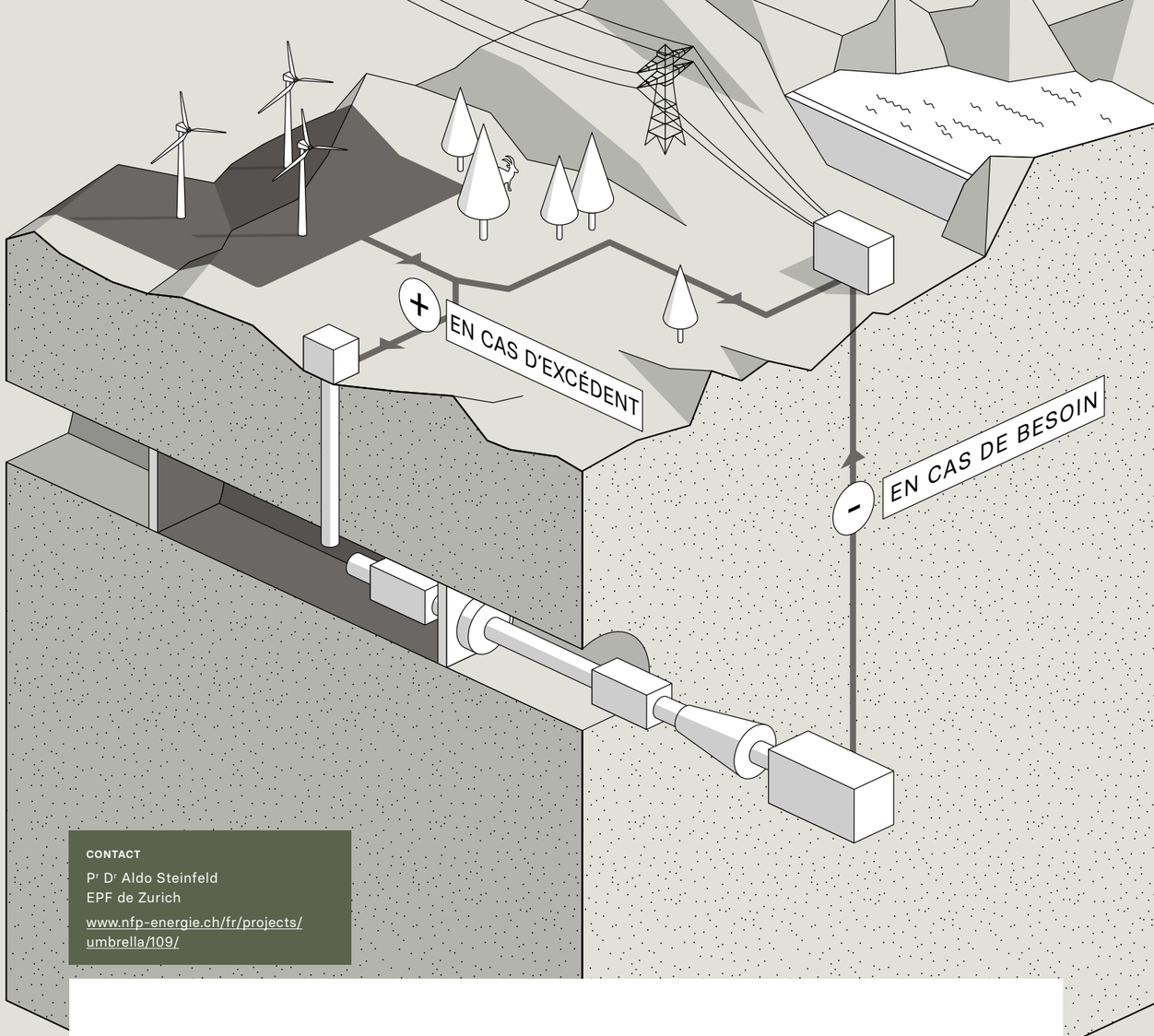
L'analyse des performances économiques d'un DMES à base d'énergie solaire révèle que, tant sur le plan économique qu'en matière de respect de l'environnement, les systèmes couplés au réseau associant une installation photovoltaïque et une technologie de conversion affichent dès aujourd'hui de meilleurs résultats qu'une chaudière à mazout.[45] Les coûts des DMES autonomes, c'est-à-dire sans connexion au réseau, intégrant une solution de stockage demeurent quant à eux nettement supérieurs à ceux des systèmes intégrés au réseau (Grosspietsch et al. 2018). Avec la hausse des prix de l'énergie et la baisse des coûts des technologies (de stockage), les systèmes autonomes pourraient eux aussi devenir rentables à l'avenir. L'exploitation techniquement et économiquement pertinente d'un DMES nécessite des mesures politiques, par exemple en termes d'organisation du marché ou de planification au niveau communal.

3.4 Nouveaux modèles de financement et d'affaires

La transformation du système énergétique n'est pas simplement une opération technique, mais implique aussi divers aspects économiques. La tendance à la décentralisation et à la décarbonation de la production d'énergie nécessite des investissements et rend possible de nouveaux modèles d'activités. Les besoins d'investissement grandissent dans quatre domaines : l'augmentation de l'efficacité énergétique, le développement des sources d'énergie renouvelables locales, l'électromobilité ainsi que les infrastructures (par exemple pour la transformation et l'extension des réseaux électriques, en particulier dans le but de renforcer les réseaux de distribution, pour le stockage de l'électricité et pour les réseaux d'autres énergies comme le gaz ou les réseaux de chaleur à distance). Le Conseil fédéral a chiffré les besoins d'investissement dans le parc de production suisse à 193 milliards de francs d'ici 2050. Une grande partie de ces investissements est rendue nécessaire par des rénovations indispensables au bon fonctionnement des installations. Le développement accru des nouvelles sources d'énergie renouvelables nécessiterait à lui seul 16 milliards de francs (Conseil fédéral 2013).

La transformation du système énergétique met les modèles d'affaires traditionnels des fournisseurs existants sous pression. En même temps, elle offre des opportunités inédites, aussi bien pour les fournisseurs actuels que pour les nouveaux. Parmi celles-ci figurent notamment les prosommateurs, mais aussi les plates-formes électroniques, qui interviennent avant tout dans le commerce de l'énergie – jusqu'à présent de façon externe au secteur.

42 [Combustibles renouvelables pour produire de l'électricité]
43 [Méthane pour les transports et la mobilité]
44 [Contrôle des systèmes énergétiques décentralisés]
45 [Production d'électricité durable décentralisée]



CONTACT
Pr Dr Aldo Steinfeld
EPF de Zurich
www.nfp-energie.ch/fr/projects/umbrella/109/

PROJET #accumulateur d'énergie #souplesse #sécurité de l'approvisionnement

« Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air »

Le recours accru à des sources d'énergie renouvelables augmente le besoin de grandes capacités de stockage, permettant de garantir la stabilité du réseau et d'harmoniser l'offre et la demande. **Une installation pilote unique au monde a permis à l'équipe de recherche de démontrer la faisabilité technique des centrales de stockage par compression adiabatique d'air.** De l'air comprimé a été stocké à cet effet dans une cavité rocheuse à Pollegio, près de Biasca. La chaleur générée par la compression peut atteindre des températures de l'ordre de 566 °C. Elle ne se perd toutefois pas dans l'environnement, mais est récupérée par un échangeur thermique intégré, dont l'agent de stockage présente des caractéristiques physiques et matérielles spécifiques. L'expansion de l'air comprimé dans une turbine permet de produire de l'électricité. Grâce à la chaleur stockée, la décompression se passe de tout apport de chaleur additionnel, ce qui pourrait porter le rendement global jusqu'à 74 %, sans émissions de CO_2 supplémentaires. Dans l'optique d'une mise en œuvre pratique, divers progrès sont encore nécessaires, notamment en termes d'étanchéité des cavernes et de comportement à long terme de l'accumulateur de chaleur.

Perspectives pour les exploitants de centrales hydroélectriques

La construction et l'exploitation de centrales de pompage-turbinage sont un exemple typique des modèles d'affaires qui ont perdu en attractivité. Jusqu'à ces dernières années, les fournisseurs d'énergie suisses pouvaient acquérir de l'électricité excédentaire à bas prix en période nocturne, la stocker temporairement dans des centrales hydroélectriques alpines, puis turbiner l'eau à la mi-journée et revendre le courant produit à un tarif supérieur à des consommateurs suisses et étrangers. Le développement de l'énergie solaire a rendu cette stratégie commerciale caduque. L'offre abondante de courant solaire a fait chuter les prix, en particulier à la mi-journée lorsque l'ensoleillement est le plus fort, ce qui a érodé la différence de prix du courant entre la charge de base et les pics de charge, dont profitait le négoce de l'électricité.

Les valeurs de rendement des centrales de pompage-turbinage se sont stabilisées dans toute l'Europe à environ deux euros par kilowattheure de capacité de stockage et par an. Il n'y a donc plus d'attrait à investir dans des solutions de stockage d'énergie à long terme.[46] Le projet «Investissements dans l'hydroélectricité» a permis de développer de nouveaux instruments permettant de s'engager fermement dans des investissements malgré les incertitudes. Ces nouveaux instruments de financement atténuent les difficultés liées au fait de devoir investir à l'horizon de plusieurs décennies, alors que les marchés n'offrent qu'une visibilité à court terme. Pour que les investissements redeviennent rentables, le recours à la méthode des «options réelles» a été proposé. Cette dernière est basée sur une approche progressive et flexible des investissements. Parallèlement aux investissements à court terme, des options – pas encore rentables à l'heure actuelle – sont prévues pour l'avenir et prises en compte dans la planification. Ces investissements optionnels sont temporairement reportés.

Un moyen d'influencer la situation économique des producteurs d'électricité hydraulique est débattu dans le cadre de l'assouplissement de la redevance hydraulique. Très peu d'entreprises du secteur de l'électricité sont toutefois vraiment tributaires de la forme de la redevance hydraulique. Son influence – qu'elle soit flexible ou fixe – est nettement inférieure à l'impact du prix du marché. Plus le prix du marché est élevé, moins il pèse sur la rentabilité et inversement. Le cas extrême d'une suppression totale de la redevance hydraulique n'avantagerait que très peu d'exploitants face à des conditions de marché défavorables. En revanche, des modifications apportées à la redevance hydraulique impacteraient bien plus les titulaires des droits d'eau (cantons et communes), étant donné que pour de nombreuses communes, la redevance hydraulique représente une part importante des recettes (cf. illustration 8).[47]

Vif intérêt pour le cofinancement privé des sources d'énergie renouvelables

En raison des prix plancher atteints ces dernières années sur le marché de l'électricité, les fournisseurs d'énergie ont subi des pertes financières dans leur cœur d'activité. Dans une certaine mesure, cela s'est traduit par un déplacement des capacités d'investissement des grandes compagnies d'électricité nationales vers les fournisseurs d'énergie régionaux et urbains, moins fortement touchés par les changements sur le marché de l'électricité.

L'espace libéré par les difficultés économiques des grands fournisseurs d'énergie a également été comblé par de nouveaux acteurs. En règle générale, les installations solaires décentralisées sont financées par des propriétaires individuels ou des sociétés immobilières. Ce secteur est ainsi déconnecté des difficultés du secteur traditionnel de la fourniture d'énergie. Des locataires, ainsi que des ménages et des entreprises ne disposant pas de la possibilité de réaliser leur propre installation de production d'énergie renouvelable font eux aussi preuve d'un vif intérêt pour participer à la création d'installations solaires et éoliennes en tant que petits investisseurs. Les fournisseurs d'énergie, les entreprises du secteur de l'énergie solaire ou éolienne ou les coopératives énergétiques sont à même de mobiliser des «capitaux patients» pour la réalisation des objectifs de la Stratégie énergétique 2050 (Ebers et al. 2019).

46 [Investissements dans l'hydroélectricité]

47 [L'avenir de l'énergie hydroélectrique en Suisse]

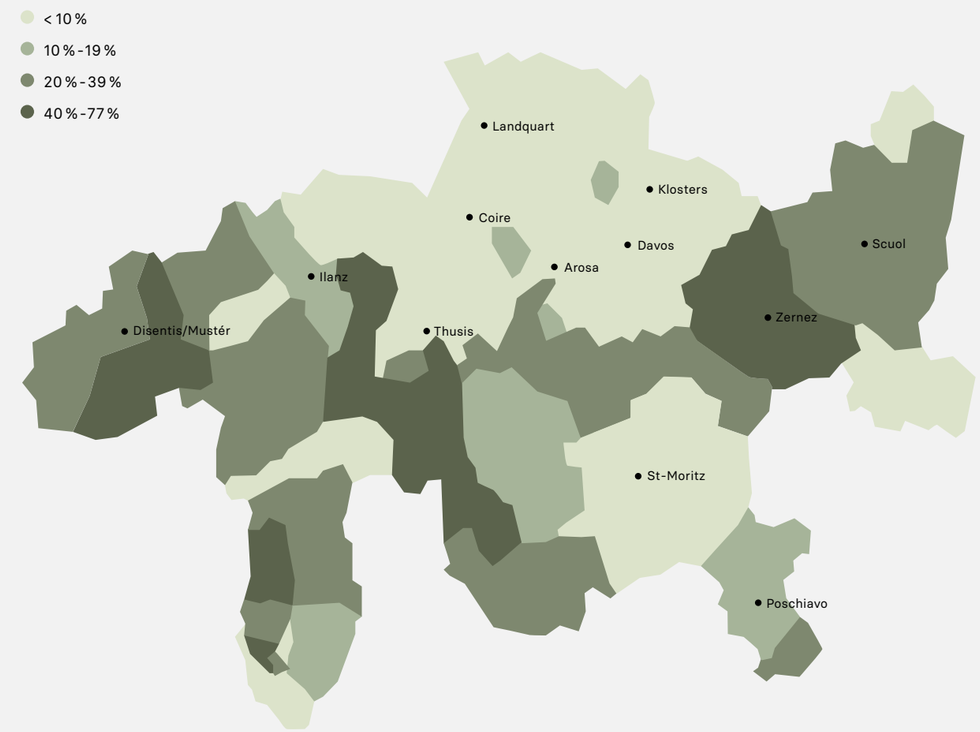


Illustration 8

Part des recettes issues des redevances hydrauliques par rapport aux ressources des communes des Grisons en 2018 (Barry et al. 2019).

Selon les données (2018) de l'Office des communes (AfG) des Grisons.

Un certain nombre de fournisseurs d'énergie font évoluer leurs produits de courant vert existants en modèles participatifs qui permettent aux clientes et clients d'acquérir des participations dans des installations solaires de grande envergure. En Suisse, quelque 300 coopératives énergétiques se sont constituées à ce jour pour contribuer au financement collectif de projets d'énergie solaire ou éolienne. Comme en Allemagne, où ce modèle d'organisation est plus répandu, cette démarche est étroitement liée à la politique de soutien aux sources d'énergie renouvelables. Un grand nombre de coopératives sont par exemple apparues peu après l'introduction de la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) en 2009. À moins de bénéficier d'aides au niveau communal, rares sont les coopératives ayant récemment étendu leurs capacités.[48] À ce jour, les coopératives énergétiques ne représentent qu'entre 1 et 1,5 % de la production de courant solaire. Ce sont avant tout les conditions du marché qui les empêchent d'exploiter pleinement leur potentiel.

48 [Financement collectif des énergies renouvelables]

Les formes de participation comme les coopératives énergétiques sont en mesure d'amplifier l'identification de la population avec les installations de production d'énergie. Elles renforcent le sentiment communautaire dans les régions concernées et suscitent ainsi une dynamique positive pour la mise en œuvre d'autres projets énergétiques.

Besoin de nouveaux modèles de financement pour les réseaux de distribution

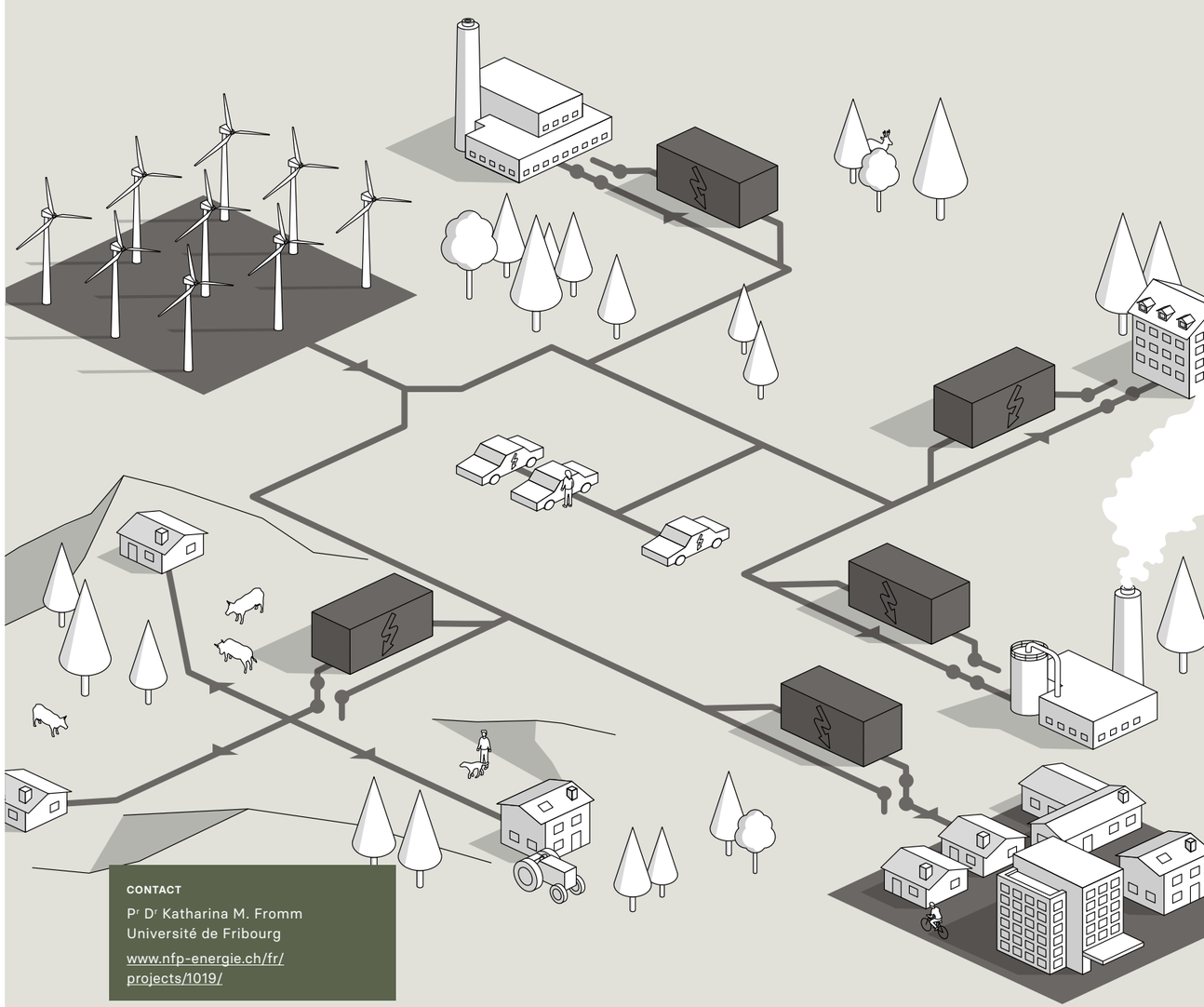
Le nombre croissant de prosommateurs n'est pas sans conséquence sur le financement des réseaux de distribution : si la quantité de courant achetée via le réseau de distribution diminue en raison du taux élevé d'autoconsommation des installations privées, le tarif d'utilisation du réseau basé sur la consommation tel qu'il est en vigueur actuellement entraîne une réduction de la base de financement. Les consommateurs d'électricité sans possibilité d'autoconsommation sont contraints de prendre en charge la part des coûts d'utilisation du réseau qui est perdue du fait de l'autoconsommation. Cela revient à une subvention croisée en faveur de l'autoconsommation et, par conséquent, à une réorganisation de la distribution (Ulli-Baer et al. 2016). Les conditions-cadres actuelles n'incitent guère les clients finals et les prosommateurs à développer les sources d'énergie renouvelables, à adopter un comportement bénéfique au réseau et à investir dans des solutions de stockage ou des technologies DMES. Une révision des tarifs d'utilisation du réseau devrait générer ce type d'incitations et imputer les coûts de façon plus équitable. Il appartient aux gestionnaires régionaux des réseaux de distribution de développer des modèles commerciaux correspondants.[49]

Alternatives et obstacles aux investissements

Les différents types d'investisseurs agissent selon des critères et des processus de décision très hétérogènes (Salm et al. 2016). Les charges de capital des différents investisseurs divergent selon les possibilités de placement alternatives auxquelles ils comparent les investissements dans le secteur de l'énergie. Dans le contexte actuel de taux d'intérêts bas, les caisses de pensions peuvent parfois financer leurs investissements pour un coût moindre que les fournisseurs d'énergie (Salm & Wüstenhagen 2018). En ce qui concerne les investisseurs privés, le projet « Potentiel d'économies d'énergie chez les ménages des personnes âgées » a établi qu'ils décidaient souvent de façon moins analytique et intégraient aussi des aspects intuitifs à leur processus de décision.[50]

49 Synthèse thématique « Conditions du marché et réglementation » du PNR « Énergie », FNS

50 [Potentiel d'économies d'énergie chez les ménages des personnes âgées]



CONTACT
Pr Dr Katharina M. Fromm
Université de Fribourg
www.nfp-energie.ch/fr/projects/1019/

PROJET #accumulateur d'énergie #souplesse #mobilité

« Matériaux pour les batteries du futur »

La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables ne coïncide pas nécessairement avec le moment où les besoins sont les plus importants. L'excédent d'énergie produit doit par conséquent être stocké. Pour le stockage en batterie, les batteries métal-air se distinguent par leur capacité à stocker beaucoup d'énergie dans un minimum d'espace. De 10 à 30 fois plus élevée que celle des accumulateurs traditionnels, leur densité énergétique pourrait presque rivaliser avec celle de l'essence. Pour les batteries à haute énergie à base de lithium, l'équipe de recherche a développé de nouveaux composants – membranes en disulfure de molybdène (MoS_2) et liquides ioniques à base d'éther couronne – offrant des propriétés supérieures à celles des composants actuellement disponibles sur le marché. Ils optimisent le cycle de charge/décharge tout en améliorant la sécurité. De larges champs d'application s'ouvrent à ces nouveaux matériaux. **En évoluant, ces nouveaux matériaux pourraient également être employés dans les accumulateurs équipant les véhicules électriques.**

Le contexte actuel de taux d'intérêt bas est globalement favorable au financement des investissements dans l'efficacité énergétique. Aux yeux des investisseurs, l'efficacité énergétique est toutefois en concurrence avec d'autres options d'investissement (plus de surface habitable, meilleur équipement, etc.). Des offres ciblées comme l'hypothèque Minergie ou les offres de financement des installations solaires peuvent améliorer la probabilité de réalisation de ces investissements. Enfin, dans le domaine des logements locatifs, la question de la répartition des coûts et de l'utilité des investissements énergétiques entre le propriétaire et le locataire constitue un obstacle de taille aux investissements en faveur de l'efficacité énergétique.

3.5 Un système énergétique durable

Conformément aux objectifs de développement durable, le système énergétique doit lui aussi satisfaire au mieux aux exigences de durabilité strictes et mondialement acceptées pour les trois critères que sont l'environnement, l'économie et la société. Concrètement cela signifie une « atténuation du changement climatique », une « utilisation efficace des ressources énergétiques et autres », des « effets minimes sur la santé des populations et sur l'écosystème », des « coûts supportables », la « sécurité de l'approvisionnement » et l'« acceptation sociale ».

Au cours des deux dernières décennies, avec le « sustainability assessment for energy technologies » (évaluation de la durabilité des technologies énergétiques), les scientifiques ont développé une méthodologie basée sur l'aide multicritères à la décision (AMCD), qui est adaptée à l'évaluation comparative et quantitative des nouvelles technologies et de leur impact sur le développement durable (Hirschberg & Burgherr 2015). Cette approche est en phase avec les objectifs de développement durable de l'ONU (Sustainable Development Goals, SDG). Sur les 17 objectifs et 169 indicateurs des SDG, seuls ceux qui sont vraiment pertinents pour le système énergétique ont été retenus. Les objectifs dans le domaine de la pauvreté, de la faim dans le monde et du genre ne sont par exemple pas pris en compte.

État de l'art de l'évaluation de la durabilité

La hiérarchie en termes d'impact sur le développement durable de diverses technologies ou solutions envisageables est en principe déterminée en six étapes :

1. Sélection et description des éléments à comparer (technologies/solutions alternatives)
2. Définition des critères cibles et des indicateurs associés
3. Quantification des indicateurs
4. Pondération des indicateurs
5. Évaluation globale des éléments à comparer
6. Analyse de sensibilité pour une pondération variable des indicateurs

Dans le cadre du projet européen NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability), un effort global sans précédent a conduit à l'élaboration d'une liste de critères (cf. illustration 9), permettant une évaluation comparative de la durabilité des technologies de production d'électricité et de la chaîne de création de valeur correspondante (Ricci et al. 2009). Aux trois dimensions traditionnelles du développement durable, des études récentes ont ajouté la sécurité d'approvisionnement en guise de quatrième dimension.

La quantification des indicateurs (étape 3) applique généralement différentes approches. Dans l'esprit du développement durable, la quantification des indicateurs environnementaux s'appuie sur des analyses de cycle de vie (Life Cycle Assessment, LCA). Pour les indicateurs sociaux, notamment les indicateurs « Atteintes à la santé » et « Pollution de l'air », l'«Impact Pathway Approach» a également fait ses preuves (Friedrich & Bickel 2001). La quantification des risques consécutifs à d'hypothétiques accidents graves se base sur des valeurs empiriques réelles ou, dans certains cas, sur un « Probabilistic Safety Assessment » (PSA). Les indicateurs économiques sont estimés à l'aide d'analyses des coûts du cycle de vie et les autres indicateurs sur la base de données issues du secteur de l'énergie ou d'avis d'experts.

En lieu et place de l'aide multicritère à la décision, une analyse coût-bénéfice (Cost-Benefit Analysis), avec une quantification monétaire de l'ensemble des indicateurs, est également possible. Cette approche est toutefois très controversée chez les spécialistes, étant donné qu'un certain nombre d'indicateurs, en particulier ceux qui relèvent de la dimension sociale,

	CRITÈRE
DIMENSION ENVIRONNEMENTALE	**RESSOURCES** Ressources énergétiques Ressources minérales (minerai)
	CHANGEMENT CLIMATIQUE
	IMPACT SUR LES ÉCOSYSTÈMES Impact en fonctionnement normal Impact en cas d'accident grave
	DÉCHETS Déchets chimiques pour stockage souterrain Déchets radioactifs de moyenne et de haute activité pour enfouissement géologique
DIMENSION ÉCONOMIQUE	**RÉPERCUSSIONS SUR LES CLIENTS** Prix de l'électricité
	RÉPERCUSSIONS SUR L'ÉCONOMIE GÉNÉRALE Emploi Autonomie de la production d'électricité
	RÉPERCUSSIONS SUR LES SERVICES PUBLICS Risques financiers Exploitation
DIMENSION SOCIALE	**SÉCURITÉ / FIABILITÉ DE L'APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIE** Menaces politiques pour la continuité du service énergétique Flexibilité et adaptation
	STABILITÉ ET LÉGITIMITÉ POLITIQUE Conflits potentiels dus aux systèmes énergétiques Nécessité de processus de décision participatifs
	RISQUES SOCIAUX ET INDIVIDUELS Estimation des risques pour le fonctionnement normal basée sur les opinions des experts Estimation des risques en cas d'accident basée sur les opinions des experts Risques perçus Menace terroriste
	QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT RÉSIDENTIEL Répercussions sur la qualité du paysage Nuisances sonores

Illustration 9

Critères d'évaluation et indicateurs d'après NEEDS (Hirschberg et al. 2008).

sont difficiles à exprimer en valeur monétaire. Grâce à l'aide multicritère à la décision, de nombreuses évaluations de la durabilité très complexes ont été menées dans le domaine de l'énergie au cours des dix dernières années, en Suisse mais aussi en Europe et en Chine (Roth et al. 2009; Schenler et al. 2009; Volkart et al. 2017). Étant donné la diversité et l'ampleur de ces études, il est permis de conclure que l'aide multicritère à la décision et les indicateurs répertoriés dans l'illustration 9 constituent une base méthodologique appropriée pour l'évaluation comparative des réponses possibles à différentes interrogations ayant trait à la durabilité du système énergétique.

Approches méthodologiques au sein du PNR « Énergie »

La mise au concours du PNR 70 posait comme condition que les avantages et les inconvénients écologiques, économiques et sociaux des différentes chaînes de création de valeur des projets conjoints soient quantitativement identifiables. Cette tâche transversale devait reposer sur des méthodes d'analyse et d'évaluation éprouvées. Une bonne moitié des 15 projets conjoints ont satisfait à cette condition avec un sous-projet indépendant sur le thème du développement durable. Les autres ont intégré les considérations correspondantes au rapport scientifique final. Tous les chercheurs se sont efforcés de mener une analyse comparative des technologies développées dans le cadre de leur projet conjoint avec des concepts traditionnels. Ils ont utilisé à cet effet diverses approches méthodologiques:

- Une évaluation de la durabilité globale, au moyen d'une analyse de valeur utile prenant en compte les trois dimensions que sont l'environnement, l'économie et la société, a été menée dans les projets conjoints « L'avenir de l'énergie hydroélectrique en Suisse »[51], « Combustibles renouvelables pour produire de l'électricité »[52] et « Utilisation de chaleur avec des pompes à chaleur d'adsorption »[53].

- Deux projets conjoints ont utilisé des analyses de cycle de vie (LCA): dans le projet conjoint « Transformateur électronique ‹SwiSS› mettant en œuvre des composants SiC »[54] à l'aide d'une liste de 19 indicateurs environnementaux pour l'ensemble du transformateur; dans le projet conjoint « Une nouvelle génération du photovoltaïque »[55] pour la dimension sociale des étapes « approvisionnement en matières premières » et « assemblage » du processus de fabrication des nouvelles cellules solaires tandem à pérovskites, ainsi que pour la dimension écologique des nouvelles cellules solaires et de leur intégration au réseau. Dans ce dernier projet, les analyses LCA ont été complétées par des analyses de rentabilité.

- Pour les projets conjoints « Gestion des déchets pour soutenir la transition énergétique »[56] et « Béton à basse énergie »[57], la durabilité est au centre des préoccupations et donc omniprésente dans tous les sous-projets. D'un point de vue méthodologique, les analyses de cycle de vie (LCA) sont essentielles dans l'évaluation de la durabilité des produits et stratégies développés. Dans le cadre du projet conjoint consacré à la gestion des déchets, elles ont été complétées par des analyses des coûts de cycle de vie et des trajectoires de transformation.

- Dans les autres projets conjoints, la durabilité des technologies développées n'a été traitée que de façon ponctuelle, non systématique et essentiellement qualitative.

Évaluations de la durabilité dans le cadre du PNR « Énergie »

Les résultats des évaluations de durabilité ont permis de formuler les six constats suivants:

- Aussi bien dans un bâtiment individuel qu'au sein d'un système multiénergies décentralisé (DMES), en termes de durabilité intégrale, les pompes à chaleur d'adsorption s'en sortent mieux que les pompes à chaleur traditionnelles à compresseur.[58]

51 [Durabilité de l'hydroélectricité]
52 [Durabilité de la méthanation]
53 [Durabilité des pompes à chaleur d'adsorption]
54 [Transformateurs SiC dans le réseau électrique]
55 [Durabilité des systèmes photovoltaïques]
56 [Gestion des déchets pour soutenir la transition énergétique]
57 [Béton à basse énergie]
58 [Durabilité des pompes à chaleur d'adsorption]

- La force hydraulique est globalement considérée comme durable. Même une rentabilité négative et les indéniables inconvénients pour l'environnement sont largement compensés par la somme des autres indicateurs.[59]

- Concernant la méthanation du CO_2 issu de la production de ciment, sur les trois applications étudiées (« méthane dans le réseau de gaz », « chauffage de bâtiments » et « hydrogène pour les voitures »), seule la dernière se révèle plus durable que les solutions actuelles, et ce uniquement à condition que l'électricité utilisée pour l'électrolyse provienne à 100 % de l'excédent de production d'énergie renouvelable. En termes de rentabilité, les trois solutions s'avèrent moins performantes que l'utilisation de méthane fossile associée à des certificats de CO_2.[60]

- L'utilisation des nouvelles cellules solaires tandem à pérovskites avec des hétérojonctions dans les panneaux solaires intégrés aux bâtiments offre un potentiel considérable en termes de durabilité intégrale. Pour concrétiser cette solution, des progrès restent à accomplir sur le plan des conditions de travail, en particulier en Chine, et de la longévité ou de la baisse de rendement au fil du temps.[61]

- La durabilité du transformateur statique SIC à base de semi-conducteurs est nettement moins bonne que celle des transformateurs traditionnels. De plus, il n'est pas adapté à l'utilisation au niveau inférieur du réseau de distribution d'électricité (niveau 6), comme cela était initialement prévu. Son principal avantage réside dans le fait qu'il permet d'injecter une quantité nettement supérieure de courant solaire ou éolien intermittent, sans renforcer le réseau.[62]

- La production de carburant pour avion à partir de biomasse pourrait être organisée de façon durable en Suisse. D'un point de vue économique, il est toutefois très éloigné du kérosène d'origine fossile.[63]

L'aide multicritère à la décision n'a pas été utilisée de façon exhaustive et détaillée dans le cadre du PNR « Énergie », étant donné que la plupart des recherches présentaient encore un degré relativement faible de maturité technologique. Par conséquent, de nombreux indicateurs importants ne sont pas encore connus ou ne peuvent être estimés que très approximativement.

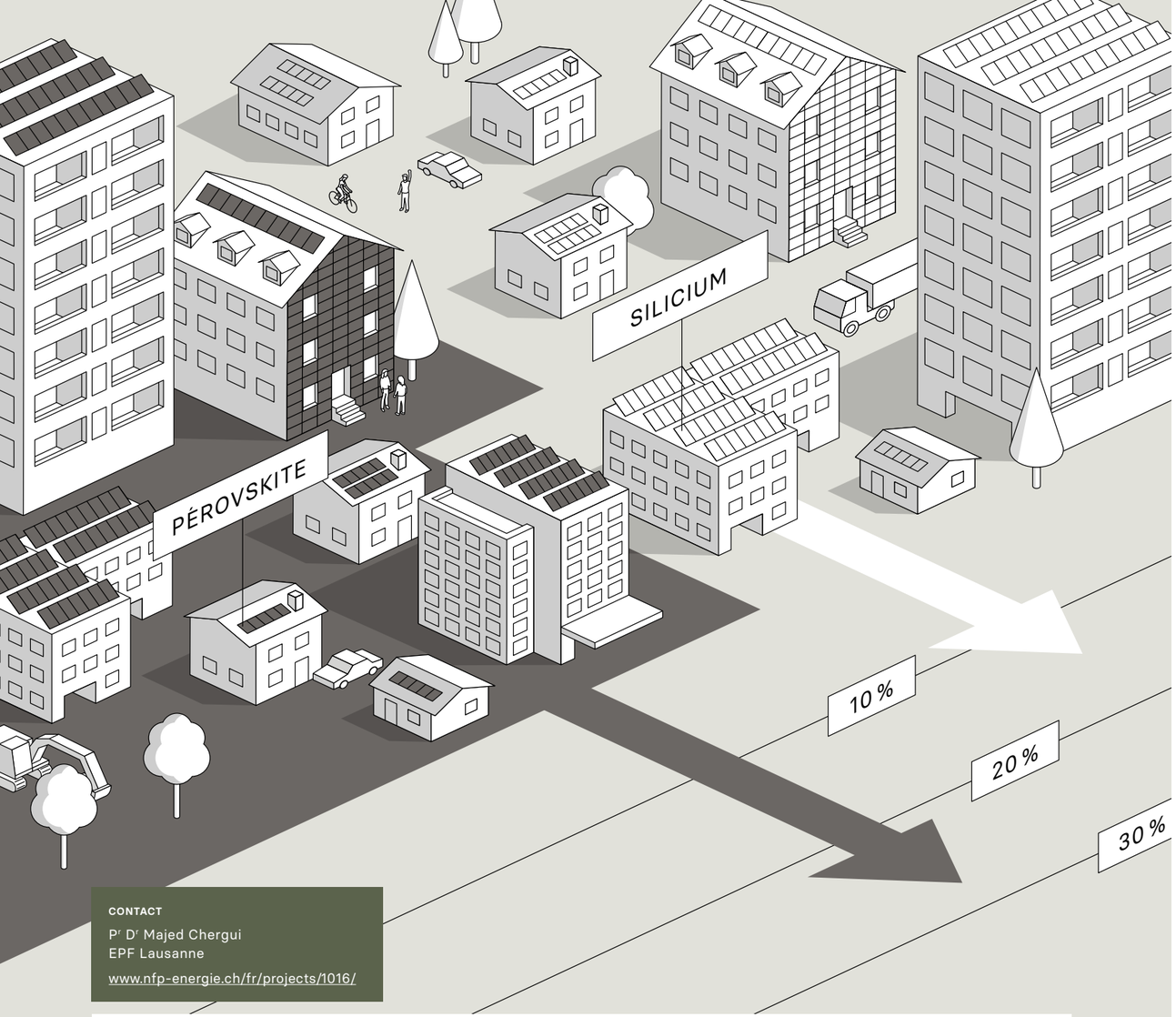
Il apparaît aussi clairement qu'aucune technologie ne satisfait pleinement à l'ensemble des critères de durabilité, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. D'ailleurs, ce ne sera très probablement jamais le cas. Toute décision en faveur d'une technologie donnée est par conséquent indissociable d'une certaine dose de compromis.

Nécessité de pondération des intérêts

Chaque projet d'infrastructure énergétique – grande ou petite, en ville ou à la campagne, renouvelable ou non – nécessite généralement la prise en compte d'exigences et d'intérêts très variés. Cela conduit fréquemment à des conflits d'objectifs avec d'autres aspects politiques comme l'environnement, l'agriculture, l'aviation civile ou la défense. Un processus de planification clair permet d'identifier et de résoudre bon nombre de ces conflits. Certains sont toutefois de nature fondamentale parce qu'ils ont trait à des questions de droit fédéral ou constitutionnel de même importance. Approuvée par l'électorat suisse, la Loi sur l'énergie attribue à certaines installations exploitant des sources d'énergie renouvelables un intérêt national assimilable à d'autres intérêts nationaux protégés par la loi (p. ex. les paysages d'importance nationale). Concrètement, il s'agit toutefois de décider, au cas par cas, quel intérêt l'emporte (Conseil fédéral 2012). Si un projet énergétique affecte un autre intérêt national, ils sont initialement sur un pied d'égalité et les intérêts en concurrence doivent être déterminés, évalués et soigneusement mis en balance conformément à la Loi sur l'aménagement du territoire (LAT).[64]

Le fondement de cette pondération des intérêts est une évaluation de la durabilité intégrale – prenant en compte de façon équilibrée les trois dimensions que sont l'environnement, l'économie et la société – qui compare la nouvelle solution – ou, mieux, diverses alternatives – à l'état actuel. Le nombre et le choix des indicateurs à retenir ainsi que leur pondération

59 [Durabilité de l'hydroélectricité]
60 [Durabilité de la méthanation]
61 [Durabilité des systèmes photovoltaïques]
62 [Transformateurs SiC dans le réseau électrique]
63 [Durabilité des biocarburants]
64 Art 3 de l'Ordonnance sur l'aménagement du territoire (OAT)



CONTACT
Pr Dr Majed Chergui
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/fr/projects/1016/

PROJET #photovoltaïque #efficacité énergétique #bâtiments

« Pérovskites pour l'énergie solaire »

Les pérovskites sont des minéraux qui suscitent depuis quelques années beaucoup d'espoir pour l'avenir des cellules solaires. Du fait de leur composition et de leur structure réticulaire, ils disposent de propriétés remarquables, comme une bonne absorption de la lumière et une bonne mobilité des porteurs de charge, qui sont essentielles pour la production d'électricité. De plus, ils sont faciles à manipuler et adaptés à la synthèse chimique. **Grâce à un procédé de synthèse optimisé, l'équipe de recherche est parvenue à atteindre avec des cellules photovoltaïques à base de pérovskites un rendement de 21 %, une valeur record déjà dépassée depuis.** L'équipe a également réussi à améliorer la stabilité et le comportement à long terme des cellules. Enfin, des comportements inédits des charges ont été mis en lumière, qui pourraient ouvrir la voie à de nouvelles applications employant des pérovskites en guise de dispositifs émetteurs de lumière.

dépendent fortement du cas concret. L'essentiel est que le choix et la quantification des indicateurs soient effectués par des experts. Les conclusions doivent toutefois être élaborées en concertation avec les parties prenantes. Cela suppose que tous les intervenants concernés soient impliqués dès les premières phases du processus.

3.6 Le facteur humain

Pour faire progresser la transformation du système énergétique, des technologies satisfaisant aux critères de durabilité ne suffisent pas. Des décisions doivent aussi être prises par des individus dans leurs différents rôles. Le PNR « Énergie » a étudié de manière approfondie les aspects sociaux susceptibles d'orienter l'action vers un système énergétique durable.

Savoir, vouloir, agir

Pour qu'une personne agisse d'une certaine façon, elle doit être motivée pour cela et disposer de l'opportunité et de la capacité à le faire. Si ces conditions sont remplies, il y a de fortes chances que les bonnes intentions soient converties en actions. La motivation, l'opportunité et la capacité peuvent être résumées de façon simplifiée par les mots-clés « savoir », « vouloir » et « agir ».

Afin que chacune et chacun puisse apporter sa contribution à l'amélioration de l'efficacité énergétique ou à la sobriété (cf. p. 66), il doit disposer de connaissances sur les problématiques associées à la consommation d'énergie. Or, la population souffre parfois d'un manque de connaissances conséquent.[65] Moins de la moitié de la population suisse connaît par exemple le montant de sa facture d'électricité (Filippini et al. 2018). Une proportion étonnamment élevée de 20 % de la population ne croit d'ailleurs pas à la réalité du réchauffement climatique global, pourtant attesté par la science (cf. p. 68).[66] Pour avancer vers un système énergétique durable dans un tel contexte, les campagnes d'information et de sensibilisation doivent tenir compte de façon ciblée du stade où se trouve chaque groupe cible dans sa progression entre « savoir », « vouloir » et « agir » (cf. p. 27).[67] De même, il est important de communiquer de façon convaincante sur le fait qu'une grande partie du potentiel d'efficacité énergétique est réalisable sans sacrifice et sans perte de confort : plus d'efficacité énergétique ne signifie pas moins de confort ![68]

Les pratiques et normes sociales déterminent largement la volonté et l'action individuelles. C'est ce que soulignent divers projets du PNR « Énergie ». Intégrer les changements de comportement aux pratiques de communautés existantes, comme des clubs sportifs et des associations de quartier, se révèle par exemple prometteur.[69] On a ainsi pu constater que les gens n'utilisaient pas seulement les possibilités de covoiturage dans le but d'apporter leur contribution à une forme de mobilité durable. Le fait que le covoiturage soit accepté comme un moyen de transport attractif par leur entourage était au moins aussi important.[70] Pour la dimension « vouloir », les modèles revêtent par conséquent un rôle important dans tous les groupes sociaux.[71] Des modèles appropriés peuvent ainsi contribuer à faire évoluer un phénomène isolé en tendance largement répandue dans la société. En jouant un rôle de multiplicateurs, ils renforcent la crédibilité et contribuent à lever les réticences et à véhiculer des normes sociales.

Bon nombre de personnes manquent aussi de connaissances pratiques sur les comportements efficaces sur le plan énergétique. Or, la disposition individuelle à changer de comportement dépend en grande partie de l'importance du changement demandé et des aspects de la vie concernés. L'acceptation d'approches et de produits favorisant l'efficacité énergétique augmente lorsque les gens peuvent les expérimenter personnellement. Ainsi, la population des cantons

65 [Acceptation de l'énergie renouvelable]
66 [Mesures douces et consommation d'énergie]
67 [Modes de vie durables et consommation d'énergie]
68 [La consommation énergétique des ménages]
69 [Promouvoir un comportement efficace sur le plan énergétique dans les villes]
70 [Consommation collaborative : effet de mode ou réelle promesse ?]
71 [Modes de vie durables et consommation d'énergie]

disposant de nombreuses petites centrales hydroélectriques accepte plus facilement cette technologie (Balthasar & Strotz 2017).[72]

Pour un grand nombre de Suissesses et de Suisses, les thèmes de l'énergie et de l'environnement ne sont pas des priorités. Ces dernières s'articulent davantage autour d'aspects liés à la qualité de vie personnelle, comme la santé, le bien-être, le confort, la connectivité, la commodité ou la sécurité.[72] L'effet d'une campagne est donc d'autant plus grand si le comportement soucieux de l'énergie qu'elle prône peut être associé à un avantage connexe en termes de qualité de vie personnelle. La démarche préconisée revêt ainsi une connotation positive.

La sobriété ou la limitation volontaire

La sobriété – ou suffisance – est une stratégie importante dans la perspective d'un système énergétique plus durable. La limitation de la consommation d'énergie que cela sous-entend peut prendre diverses formes (Kaufmann-Hayoz et al. 2001, 2006):

- renoncement contraint par la législation, p. ex. l'interdiction des ampoules à incandescence;
- renoncement incité par la tarification, p. ex. la taxation des carburants;
- renoncement suggéré par les conditions infrastructurelles (« nudging »), p. ex. lorsqu'il est plus rapide de prendre l'escalier que l'ascenseur (Thaler & Sunstein 2009);
- renoncement volontaire pour soi-même ou en communauté, p. ex. si une association propose à ses membres de venir en vélo;
- usage restreint pour des raisons morales, p. ex. par intuition que les ressources pourraient ne pas suffire pour tous;
- usage restreint pour des « raisons de santé » pour soi-même et pour les autres, p. ex. privilégier le vélo parce que cela garde la forme, procure du plaisir et limite la pollution pour tous (Schweizer-Ries 2009).

Hormis le renoncement imposé par la législation, toutes ces mesures sont basées sur le volontariat. La démarche de la sobriété s'articule autour de l'idée de « juste mesure », c'est-à-dire la volonté de vivre et d'être heureux, mais pas au détriment des autres (Küstenmacher & Seiwert 2004). Le principe de base est la décision active de personnes, d'organisations ou d'états de réfléchir à leurs réels besoins en termes de surface, de température ambiante, d'eau chaude, d'intensité lumineuse, etc. et d'adapter leurs usages en conséquence.

La sobriété n'implique pas de se passer de ce qui est nécessaire, mais de renoncer volontairement à ce qui n'est pas indispensable (Stengel 2011). Cela ne se traduit pas réellement par des restrictions sur le plan des services, mais en termes de consommation de ressources. Les ressources qui sont de toute façon disponibles, par exemple les excédents de production d'énergie renouvelable, peuvent être utilisées sans états d'âmes. Il s'agit de faire preuve d'un comportement de consommation intelligent, c'est-à-dire d'utiliser l'énergie lorsqu'elle est la plus disponible ou excédentaire (décalage de charge) (Lange 2019). La démarche de sobriété a également un impact dans le domaine de l'efficacité en évitant que les gains d'efficacité obtenus grâce à la technologie ne soient contrebalancés ou même annulés par une utilisation accrue (effet de rebond).

La politique de la sobriété s'articule autour de quatre axes: habiliter (structurel), encourager (informatif et incitatif), engager (grâce à la participation et à la gouvernance) et être exemplaire (créer une concurrence et des exemples positifs) (Linz 2017; Schneidewind & Zahrnt 2013; Sachs 1993). Ces axes ne sont pas à considérer comme diverses éventualités mais comme des approches concomitantes. Pour parvenir à une efficacité globale, il convient d'agir à tous les niveaux. Concrètement, des stimulations dans la planification – par exemple dans le domaine de la mobilité – peuvent contribuer à favoriser la sobriété, par exemple en privilégiant la proximité pour des activités comme le travail, les achats ou la détente. D'autres possibilités résident dans la mise en évidence des avantages que comporte la réduction de la consommation.

72 [Acceptation de l'énergie renouvelable]

Briser les automatismes

L'essentiel des comportements quotidiens suit des routines bien rodées. Changer ce type d'automatismes est considéré comme très difficile. C'est pourquoi plusieurs projets de recherche soulignent que la compatibilité du comportement respectueux de l'environnement souhaité avec les habitudes quotidiennes des gens compte parmi les principaux facteurs de succès des campagnes et des activités.[73/74/75] Pour sortir des automatismes indésirables, des événements majeurs de la vie comme le mariage, le premier enfant ou le déménagement dans un nouveau logement peuvent servir de point de départ. Il est aussi important de s'adresser aux gens en fonction de la phase dans laquelle ils se trouvent dans leur processus de décision (cf. p. 27).[76]

Des organisations non spécialisées dans le secteur de l'énergie fournissent un travail de pionnier en testant des méthodes originales pour favoriser la transition énergétique. La Société suisse des propriétaires fonciers (HEV) a mené des ateliers interactifs visant à inciter les propriétaires d'un certain âge à mieux planifier leurs futures conditions de vie et d'habitat. La densification des constructions, le déménagement dans un logement plus petit ou la rénovation énergétique représentent potentiellement des économies d'énergie considérables dans les ménages de personnes âgées. Ces stratégies permettraient de réaliser jusqu'à 4 % des objectifs annuels d'économies de la Stratégie énergétique 2050 dans le domaine du chauffage.[77] L'association « Terragir » mène son action à un tout autre niveau: elle a lancé un concours consistant à porter un nouveau jean le plus longtemps possible sans le laver. Cette opération a permis aux participantes et aux participants de remettre en question leurs habitudes en matière de lessive et, par conséquent, la consommation d'électricité associée. Elle a également montré que l'apprentissage social sous la forme de concours ou de présentations pouvait contribuer à faire évoluer les pratiques établies (Sahakian & Bertho B. 2018).

73 [Consommation collaborative: effet de mode ou réelle promesse?]

74 [Vers un consensus sociétal]

75 [La consommation énergétique des ménages]

76 [Modes de vie durables et consommation d'énergie]

77 [Potentiel d'économies d'énergie chez les ménages des personnes âgées]

Importance de l'acceptation dans le système politique suisse[78]

En raison du fédéralisme et de la démocratie directe, il est particulièrement important en Suisse que les objectifs et les mesures en matière d'énergie soient largement acceptés. La possibilité de la population suisse de lancer un référendum au sujet d'une décision parlementaire lui permet par exemple de contraindre à l'organisation d'une votation et, selon le résultat, de mettre son veto à la décision du Parlement. Ceci ne s'applique pas uniquement à l'orientation de base de la politique énergétique, mais aussi à sa mise en œuvre au niveau national, cantonal ou communal. Le succès de la votation nécessite l'approbation de groupes d'intérêt et de partis majeurs. Seule leur adhésion à la volonté des autorités permet de dégager une majorité parmi les électrices et les électeurs.

L'acceptation ne peut pas être forcée, elle doit se construire. Des informations crédibles et transparentes en constituent le fondement. Sur cette base, la population et le secteur économique doivent pouvoir identifier l'intérêt général ainsi que les avantages individuels d'un projet. Cela permet de démontrer que le développement des sources d'énergie renouvelables progresse lorsque la population locale en profite sur le plan économique et perçoit cet avantage en tant que tel (Zoellner et al. 2012). Les démarches les plus prometteuses sont par conséquent celles qui ont trait à l'environnement local et personnel des gens. L'acceptation est toutefois aussi une question de confiance qu'il s'agit de gagner. Il convient cependant aussi de s'interroger sur le degré d'acceptation à atteindre. Peut-on se contenter d'un consentement passif, ou un soutien actif est-il nécessaire? Si l'acceptation passive se traduit par l'approbation, l'acceptation active consiste en un véritable soutien. Parfois il suffit que les acteurs concernés ne s'opposent pas à un projet, parfois il est nécessaire que les parties impliquées s'engagent activement dans la conception ou se prononcent explicitement en faveur d'un projet ou d'une mesure.

78 Synthèse thématique « Acceptation » du PNR « Énergie », FNS

CONTACT
Pr Dr Ulf Liebe
Université de Berne
University of Warwick
www.nfp-energie.ch/fr/projects/943/

PROJET #incitations #acceptation #comportement

« Mesures douces et consommation d'énergie »

Outre les motivations financières, des incitations non matérielles comme les normes sociales, les récompenses symboliques ou les changements de comportements standards – aussi appelés « mesures douces » (« nudges » en anglais) – sont également susceptibles d'influencer les comportements en matière d'économies d'énergie. Pour déterminer l'influence des mesures douces sur la vie réelle, l'équipe de recherche a conjugué des expériences de terrain, des enquêtes longitudinales et des études d'intervention. Les données de consommation d'énergie de plus de 200 000 foyers, 7000 petites et moyennes entreprises (PME) et 400 entreprises grandes consommatrices d'énergie ont notamment été analysées. Ces derniers ont été informés, par leur fournisseur d'électricité, que le courant délivré proviendrait désormais par défaut de sources renouvelables. Les abonnés ne souhaitant pas bénéficier de cette offre standard avaient la possibilité d'opter pour de l'électricité conventionnelle. La mise en place de ce principe a eu un effet massif : alors qu'auparavant, plus de 90 % des foyers et des entreprises utilisaient de l'électricité conventionnelle, près de 80 % d'entre eux ont accepté la nouvelle offre fournissant par défaut du courant vert. L'acceptation de ce nouveau standard ne dépendait que très peu de la consommation d'électricité et est restée très stable au fil du temps. Moins de 5 % des clientes ou clients sont repassés à l'électricité conventionnelle dans un délai de quatre ans. Le groupe de recherche n'en doute pas : **définir des comportements respectueux de l'environnement en guise de standard se révèle être une approche réussie au quotidien.**

La démocratie directe explique en grande partie qu'au sein du système politique suisse, des « majorités fortes » (Linder et al. 2017) soient nécessaires pour faire avancer les choses. Un instrument de pilotage politique comme la taxe sur l'énergie ne peut être introduit et une nouvelle installation d'énergie ne peut être réalisée qu'à condition qu'une large majorité politique soutienne ces projets et qu'aucune opposition forte ne se forme. Les critères d'acceptation varient certes en fonction du projet et de la situation, mais ils sont généralement stricts.[79] La planification et la conception d'un projet de politique énergétique impliquent par conséquent d'identifier les acteurs concernés et leur rôle, et de les intégrer au processus concret. En cas de succès, le projet fera potentiellement l'objet d'une large acceptation et la probabilité de rencontrer de l'opposition sera réduite.

De façon générale, le système politique de la Suisse ne favorise pas les réformes de grande envergure. Toutefois, une fois des compromis trouvés, ceux-ci bénéficient d'un large soutien et offrent une forte probabilité de pouvoir passer à l'étape suivante. Un compromis largement partagé a de meilleures chances de succès parce qu'il intègre typiquement les facteurs susnommés, susceptibles de favoriser l'acceptation d'un projet. Un compromis peut aussi jouer un rôle central pour remporter l'adhésion d'une majorité des citoyennes et des citoyens à un projet, malgré une forte aversion pour les frais générés.[80] La planification à long terme de la Stratégie énergétique 2050, approuvée par les électrices et les électeurs, est ainsi un facteur de succès dont il faut tenir compte pour la concrétisation de la mise en œuvre. Des conditions-cadres stables sur le long terme sont déterminantes pour la propension à l'innovation des acteurs économiques, et la population se montre généralement prête à ne pas perdre de vue un objectif fixé. Divers exemples de politique migratoire, européenne, énergétique et des transports en attestent.

79 [Acceptation de l'énergie renouvelable]
80 [Modernisation de la gestion des déchets]

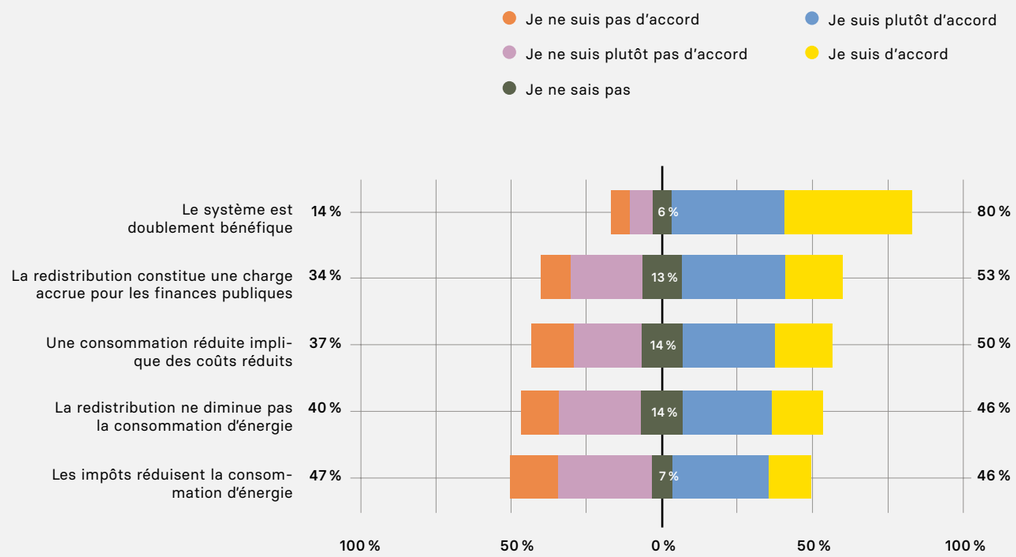


Illustration 10
Attitudes par rapport aux taxes écologiques. Approbation des taxes écologiques et des moyens employés (Stadelmann-Steffen et al. 2018).

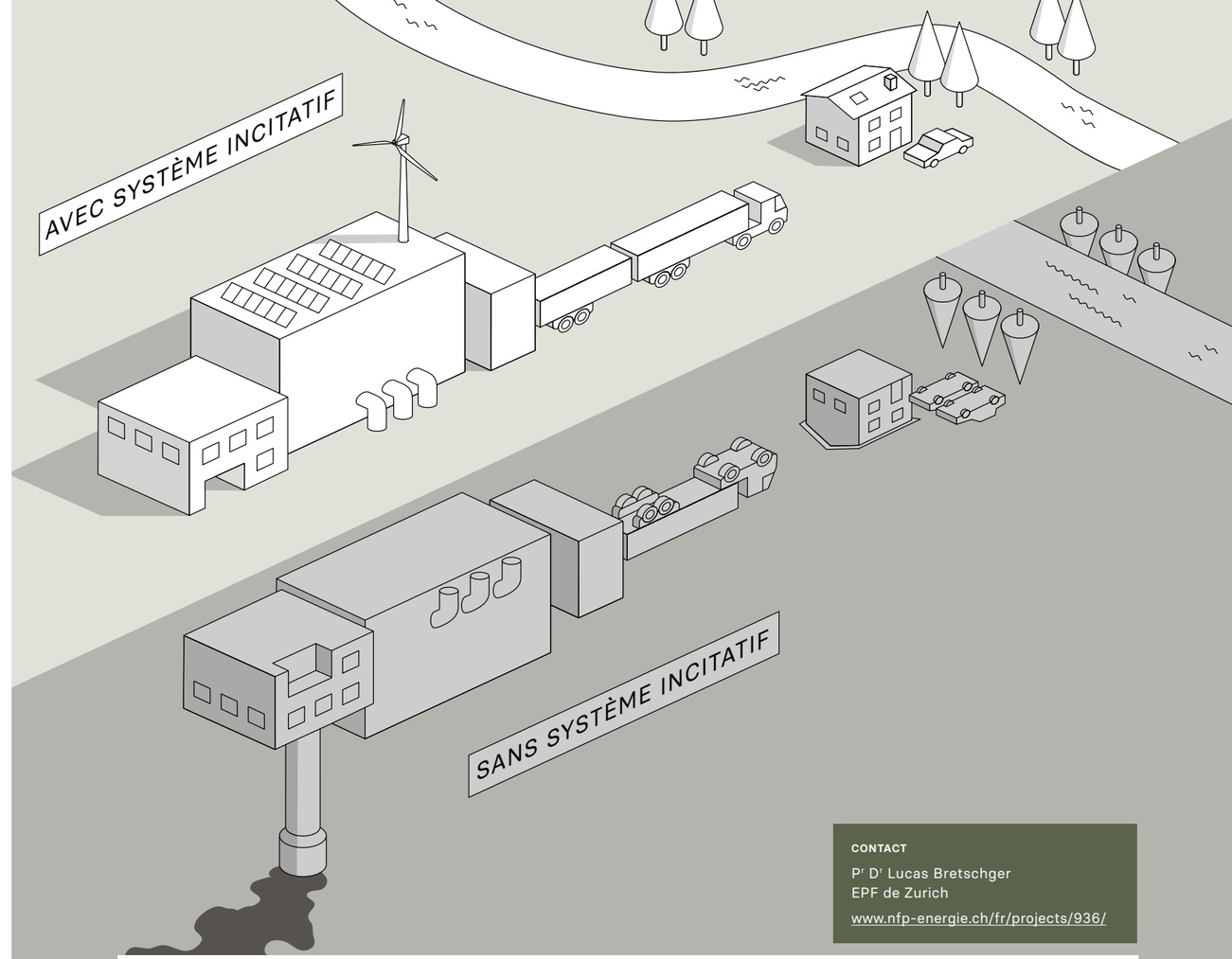
Les consommatrices et les consommateurs aux urnes

Dans leurs rôles de consommateurs et de votants, les Suissesses et les Suisses adoptent divers modes de pensée. Les individus évaluent les mesures de politique énergétique sur la base de critères différents selon qu'ils jugent de leur effet sur leur vie personnelle ou qu'ils les considèrent dans leur rôle de citoyenne et de citoyen.[81] Les deux rôles ne sont bien sûr pas strictement séparés l'un de l'autre. Si les individus se prononcent dans le cadre d'une votation de politique énergétique, l'attrait qu'ils éprouvent pour le projet présenté en tant que consommatrice ou consommateur n'est pas anodin. La formule est simple : plus les coûts sont élevés, plus la probabilité d'approbation du projet soumis à la votation des citoyennes et des citoyens sera faible. Il est intéressant de relever que ce schéma se vérifie aussi bien pour les personnes qui sont politiquement plutôt à droite, et n'accordent donc guère d'intérêt à la transition énergétique, que chez les électrices et les électeurs de la gauche verte.[82]

Des aspects déterminants dans l'évaluation de la future politique énergétique sont l'utilité attendue d'une mesure, sa faisabilité et sa pertinence pour les différents acteurs. De l'avis des citoyennes et des citoyens, bon nombre de mesures soumises au débat ne satisfont pas à ces critères essentiels. Ceci s'explique souvent par le fait qu'ils n'ont pas connaissance de leur propre consommation d'énergie. En

81 [Vers un consensus sociétal]

82 [Acceptation de l'énergie renouvelable]



CONTACT
Pr Dr Lucas Bretschger
EPF de Zurich
www.nfp-energie.ch/fr/projects/936/

PROJET #financement #incitation / encouragement #économie

« Réforme fiscale écologique et croissance endogène »

Pour atteindre les objectifs de la Stratégie énergétique 2050 et réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre, la politique de soutien actuelle peut être complétée ou remplacée par un système incitatif. Dans le cadre du projet « Réforme fiscale écologique et croissance endogène », les chercheuses et chercheurs ont analysé l'influence d'un système d'incitation sur l'économie de la Suisse. Pour ce faire, ils en ont calculé les effets à l'aide d'un modèle informatique calibré en fonction des spécificités suisses. L'équipe de recherche est parvenue à la conclusion qu'une réforme fiscale écologique profiterait également à la Suisse sur le plan économique. **Pour limiter la charge liée aux taxes sur l'électricité et les carburants, les entreprises investiraient davantage de moyens dans l'innovation et l'efficacité des processus.** Ceci stimulerait la croissance économique et compenserait ainsi la hausse des coûts de production due aux taxes. D'un point de vue politique, il est souhaitable que les taxes soient reversées aux différents groupes sociaux sous une forme pertinente et équitable. Sur la base de son modèle, l'équipe de recherche a étudié à cet effet différents scénarios : durant la transition vers un système incitatif, la croissance de la consommation serait légèrement inférieure à ce qu'elle serait en l'absence d'incitation. Cette estimation axée sur les coûts fait toutefois abstraction du gain de qualité de vie que procurerait un environnement plus propre.

outre, ils n'ont qu'une compréhension insuffisante du fonctionnement des mesures dont ils doivent décider. Ainsi, une majorité d'entre eux est par exemple faussement persuadée qu'une taxe écologique ne permet pas de réduire la consommation d'énergie lorsque les recettes fiscales sont redistribuées à la population (cf. illustration 10). Dans ce contexte, il n'est guère surprenant que les propositions de politique énergétique soient fréquemment rejetées par le vote populaire : pourquoi approuver une mesure qui engendre des frais et dont on ne croit pas à l'efficacité ?

La conception des installations énergétiques et les processus de décision sont des bases importantes de l'acceptation

Comme l'ont montré divers projets du PNR « Énergie », mais aussi la nette approbation de la nouvelle Loi sur l'énergie par le peuple souverain, une majorité de la population suisse préfère les sources d'énergie renouvelables aux énergies fossiles ou au nucléaire. Pourtant, les projets concrets des sources d'énergie renouvelables, comme les installations éoliennes ou les petites centrales hydroélectriques, sont fréquemment confrontés à de la résistance. Cette opposition locale a longtemps été expliquée par le phénomène NIMBY (« not in my backyard » ou « pas dans mon arrière-cour) : les citoyennes et citoyens sont certes favorables à l'énergie éolienne en général mais, pour des raisons d'intérêts personnels, ils n'en veulent pas près de chez eux. Les motifs de l'opposition locale sont toutefois bien plus variés : en effet, une partie de la population est sceptique vis-à-vis des infrastructures techniques associées aux sources d'énergie renouvelables, telles que les éoliennes, les installations géothermiques ou les lignes à haute tension, et ce indépendamment de leur emplacement.[83]

Le projet « Paysages énergétiques » montre que l'acceptation des infrastructures d'approvisionnement en énergie renouvelable dépend aussi fortement du type de paysage, de la combinaison d'installations énergétiques et de l'utilisation existante des espaces concernés. Plus un paysage est perçu comme intact, plus l'opposition à la construction d'infrastructures énergétiques sera forte. Un recours modéré à l'énergie solaire en toiture ou en façade s'avère être la solution la mieux acceptée, même mieux qu'un paysage dépourvu d'infrastructures énergétiques (cf. p. 44).[84] Ceci concorde avec les constats qui ont été faits à propos de l'acceptation des lignes électriques aériennes. La transformation de lignes aériennes existantes, afin d'augmenter leur capacité, est nettement mieux acceptée que la construction de nouvelles lignes.[85]

Les principaux motifs de refus des nouvelles installations sont généralement des aspects techniques « durs » comme la taille, l'emplacement ou l'impact sur la nature. La conception concrète d'un projet d'infrastructure locale est par conséquent capitale pour qu'il ait les faveurs des citoyennes et des citoyens. Les projets les plus plébiscités sont ceux qui sont prévus sur des sites déjà occupés et transformés par l'activité humaine, par exemple sur un terrain militaire ou le long d'une route à fort trafic (cf. p. 44). Les zones résidentielles, les forêts et leurs abords, ainsi que les espaces agricoles, qui servent d'espace naturel, d'habitation ou de détente ne doivent quant à eux pas être affectés davantage. Lorsque leur construction est approuvée, les installations devraient par ailleurs apporter une contribution significative à l'approvisionnement énergétique et leur impact sur la nature devrait se limiter au minimum nécessaire.

Outre le projet d'infrastructure à proprement parler, le processus de décision participatif a également son importance : dans le contexte de démocratie directe de la Suisse, une simple information ne suffit pas du point de vue de la population. Seule une véritable démarche participative associée à une votation garantit l'acceptation du processus. La transition de la participation informelle à une procédure formelle constitue toutefois un défi à cet égard. De plus, il convient de s'assurer que les décisions conjointement validées pourront effectivement être mises en œuvre et ne seront pas remises en question par des droits de recours. Enfin, même au niveau local, le facteur coût a son importance.[86]

83 [Acceptation de l'énergie renouvelable]

84 [Paysages énergétiques]

85 [Lignes aériennes hybrides en Suisse]

86 [Acceptation de l'énergie renouvelable]

3.7 Pilotage politique – de la définition des objectifs à la mise en œuvre

Chaque régime énergétique nécessite une réglementation spécifique (cf. chap. 2.4). Le système énergétique suisse est actuellement régi par une législation spécifique aux vecteurs d'énergie. À ceci s'ajoutent non seulement d'autres lois fédérales liées à la politique environnementale ou de développement territorial, qui interviennent de façon déterminante dans les conditions-cadres de mise en œuvre de la politique énergétique, mais aussi des réglementations cantonales, notamment dans le secteur du bâtiment. En effet, outre le gouvernement fédéral, les cantons et les communes ont eux aussi un rôle à jouer dans cette mise en œuvre des lois et des ordonannces.

Pour concrétiser la transformation du système énergétique, il est nécessaire d'appliquer des mesures, de réaliser des projets ou d'introduire des technologies. Le pilotage politique peut lancer, faciliter et permettre ces développements. Les instruments de politique publique (« policy tools » en anglais) sont les mesures utilisées par les acteurs gouvernementaux pour atteindre les objectifs politiques (Howlett 2005). La transformation du système énergétique modifie la situation des différents acteurs. Des adaptations réglementaires peuvent par conséquent s'avérer nécessaires.

Des objectifs ambitieux pour la politique

Sur le plan politique, les objectifs de la transformation du système énergétique sont définis en Suisse avec la Stratégie énergétique 2050 et ancrés dans la loi par les votantes et les votants avec l'approbation de la Loi sur l'énergie et des modifications législatives associées. La Loi sur l'énergie vise ainsi à assurer une production et une distribution d'énergie rentables et respectueuses de l'environnement, une utilisation économique et efficace de l'énergie, ainsi que la transition vers un approvisionnement croissant à base des sources d'énergie renouvelables. Le point de départ de la transformation est la sortie du nucléaire, à laquelle se sont ajoutées les obligations internationales de protection du climat. Les baisses d'émissions requises d'après l'Accord de Paris sont inscrites dans la législation de façon prévisionnelle, par l'intermédiaire de la révision totale de la Loi sur le CO_2 qui est actuellement en cours. Elles tracent la voie vers l'abandon des sources d'énergie fossiles. Un système énergétique durable doit cependant encore répondre à d'autres exigences, comme des coûts supportables, qui ne sont que partiellement ancrées dans la Stratégie énergétique 2050 ou les bases légales qui en émanent.

Diversité des instruments de mise en œuvre – des interdictions aux incitations

La panoplie des instruments politiques est très étendue. Le format le plus strict sont les directives et les interdictions (instruments réglementaires), qui prescrivent ou restreignent le comportement des acteurs de façon très spécifique. À l'autre extrémité de la panoplie, on trouve les campagnes d'information, qui visent à une réalisation des objectifs politiques basée sur le volontariat, grâce à l'information et à la sensibilisation des acteurs. Les instruments économiques constituent une troisième catégorie, misant sur les incitations. Les changements de comportement voulus doivent être obtenus en récompensant les attitudes souhaitables, par exemple par le biais de subventions, ou en sanctionnant les conduites indésirables, par exemple avec une taxe écologique.

Un pilotage politique efficace combine généralement plusieurs instruments. Le projet « Acceptation de l'énergie renouvelable » a permis d'identifier, dans les différents niveaux du système fédéral, des conditions propices à la promotion des sources d'énergie renouvelables. La rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) du gouvernement fédéral influence par exemple la rentabilité des projets d'énergies renouve-

lables.[87] En même temps, elle améliore la marge de manœuvre, tant pour l'optimisation qualitative d'un projet que pour trouver des solutions de compromis. Parallèlement se pose aussi la question des moyens dont dispose le gouvernement fédéral pour soutenir la réalisation des objectifs d'efficacité énergétique sans entraver la liberté d'action des cantons par des taxes. La recherche sur l'énergie, qui dépend essentiellement du gouvernement fédéral, joue un rôle important à cet égard. La communication, que le gouvernement fédéral encourage par exemple via le programme « Suisse-Energie », a aussi son importance.

Confédération – l'incitation plus efficace que les subventions

L'échelon fédéral est responsable des conditions-cadres politiques, chargées de faire progresser la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050. Cela concerne avant tout la régulation du marché, les prix de l'énergie, le subventionnement des vecteurs d'énergie éligibles ou le soutien aux mesures d'efficacité énergétique (contribution au programme Bâtiments, appels d'offres publics, etc.). Les conditions-cadres devraient être organisées de sorte que les gens se comportent automatiquement de la manière souhaitée.

Avec la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC), le gouvernement fédéral dispose d'un instrument économique apportant une contribution substantielle à l'encouragement des sources d'énergie renouvelables en Suisse. Les moyens financiers alloués sont toutefois limités, et l'instrument arrivera à échéance fin 2022. La science a souligné à plusieurs reprises que, dans le domaine de la politique climatique et énergétique, les systèmes incitatifs étaient les plus efficaces pour atteindre les objectifs environnementaux (Carattini et al. 2017). À l'instar de la taxe incitative sur les combustibles fossiles, les systèmes d'incitation n'impliquent idéalement aucun coût pour les finances publiques. De plus, les taxes d'incitation s'avèrent non seulement nettement moins coûteuses que les mesures d'encouragement comme les subventions, mais aussi plus efficaces. Leur effet incitatif fonctionne partout et a un impact sur chaque décision des ménages et des entreprises en matière d'énergie.

87 [Acceptation de l'énergie renouvelable]

Leur portée est par conséquent plus large. En effet, l'incitation permet d'avantager un tiers de l'ensemble des ménages, tandis qu'une stratégie d'encouragement pénalise à la clé la quasi-totalité des ménages. Dans le cas d'un encouragement, ceux-ci doivent payer pour le financement, mais ne peuvent en tirer aucun profit.[88/89]

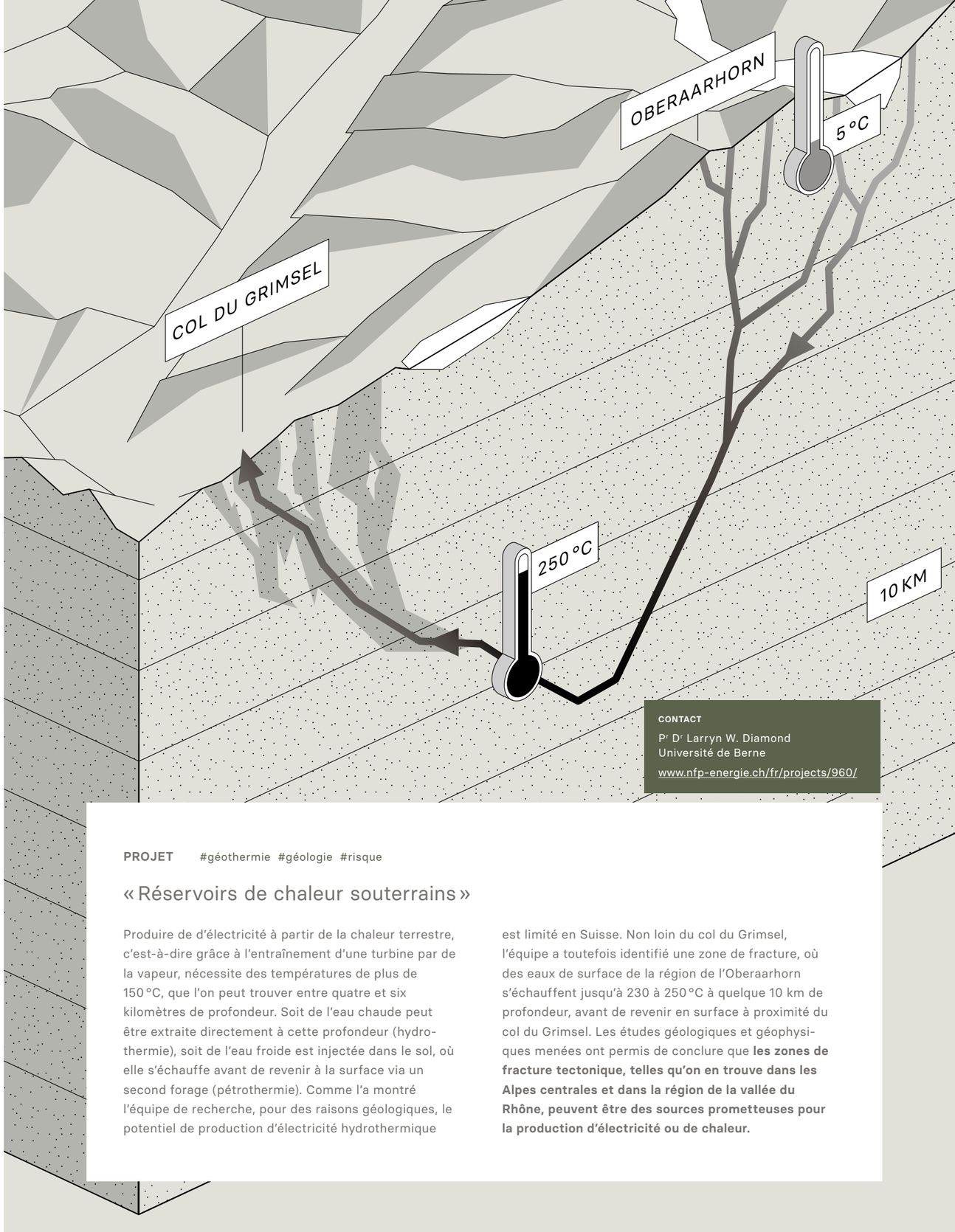
D'un point de vue politique, les instruments économiques basés sur l'incitation se sont toutefois révélés particulièrement impopulaires. Les acteurs politiques et le grand public privilégient souvent les obligations ou les interdictions, entre autres parce que le coût d'une mesure incitative, par exemple une taxe, est plus directement visible que celui d'une interdiction ou d'une obligation. Dans la pratique, les campagnes d'information sont encore plus fréquentes. En tant que forme de pilotage la plus douce, elles représentent souvent le plus petit dénominateur commun entre des acteurs politiques ayant des priorités et des visions divergentes. Bien qu'elles fassent partie des prérequis indispensables, elles présentent l'inconvénient d'une efficacité limitée.

Les multiples rôles des cantons

Les cantons jouent un rôle conséquent dans la concrétisation des objectifs de politique énergétique. Ils développent chacun des instruments spécifiques visant à compléter la RPC dans la promotion des sources d'énergie renouvelables. Les cantons profitent de leur marge de manœuvre pour organiser la politique énergétique cantonale en fonction de leurs priorités et de leurs points de vue. Le développement des sources d'énergie renouvelables fait par conséquent l'objet d'une réglementation et d'un encouragement variable dans les 26 cantons suisses (Sager 2014).

88 [Politique énergétique basée sur un système d'encouragement ou incitatif]

89 Synthèse thématique « Conditions du marché et réglementation » du PNR « Énergie », FNS



CONTACT
Pr Dr Larryn W. Diamond
Université de Berne
www.nfp-energie.ch/fr/projects/960/

PROJET #géothermie #géologie #risque

« Réservoirs de chaleur souterrains »

Produire de d'électricité à partir de la chaleur terrestre, c'est-à-dire grâce à l'entraînement d'une turbine par de la vapeur, nécessite des températures de plus de 150 °C, que l'on peut trouver entre quatre et six kilomètres de profondeur. Soit de l'eau chaude peut être extraite directement à cette profondeur (hydrothermie), soit de l'eau froide est injectée dans le sol, où elle s'échauffe avant de revenir à la surface via un second forage (pétrothermie). Comme l'a montré l'équipe de recherche, pour des raisons géologiques, le potentiel de production d'électricité hydrothermique est limité en Suisse. Non loin du col du Grimsel, l'équipe a toutefois identifié une zone de fracture, où des eaux de surface de la région de l'Oberaarhorn s'échauffent jusqu'à 230 à 250 °C à quelque 10 km de profondeur, avant de revenir en surface à proximité du col du Grimsel. Les études géologiques et géophysiques menées ont permis de conclure que **les zones de fracture tectonique, telles qu'on en trouve dans les Alpes centrales et dans la région de la vallée du Rhône, peuvent être des sources prometteuses pour la production d'électricité ou de chaleur.**

Les cantons sont avant tout sollicités sur le plan des mesures énergétiques dans le domaine du bâtiment, pour la diffusion d'installations de production d'énergie renouvelable, ainsi qu'à des fins d'information et de conseil. Dans le domaine du bâtiment, ils sont mis au défi de mettre en œuvre les modèles de prescriptions (MoPEC) actuels.[90]

Les procédures d'autorisation ainsi que les possibilités de subventions, très variables selon les cantons, pour la réalisation d'installations de production d'énergie renouvelable sont décisives dans le succès de la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 au niveau cantonal. Les cantons partagent certes l'orientation fondamentale de la Stratégie énergétique 2050, mais ils ne définissent pas les mêmes priorités en termes de sources d'énergie et d'instruments de politique publique. Ils s'appuient à cet égard sur leur expérience, sur les spécificités géographiques et sur les préférences politiques. Dans ce contexte, il est utile que les objectifs fixés par le gouvernement fédéral laissent aux cantons une marge de manœuvre suffisante pour développer leurs propres solutions, acceptées au niveau local.

En matière d'information et de conseil, les différents cantons ont également des approches très diverses. Le besoin d'information est considérable au sein de la population, mais aussi de certains groupes cibles spécifiques comme les locataires, les propriétaires de logements et de bâtiments, ainsi que les responsables d'entreprises. Les projets du PNR « Énergie » montrent qu'il est important que la population connaisse les défis de la politique énergétique, qu'elle les comprenne et qu'elle agisse en conséquence. Les campagnes qui prennent en compte l'environnement social du public ciblé ou qui misent sur l'implication directe des personnes ou sur l'expérience personnelle obtiennent des résultats nettement meilleurs que celles qui se bornent à diffuser des informations.[91/92/93]

Communes – entre planification, approbation et promotion

Parmi les leviers d'influence politique dont disposent les communes figurent l'information, en partie aussi les ressources financières, ainsi que les instruments réglementaires. En respectant les plans directeurs cantonaux, elles peuvent notamment ancrer des directives d'approvisionnement en énergie dans les plans de construction et d'affectation communaux. Souvent, elles délimitent ainsi des zones spéciales dans lesquelles les installations éoliennes sont autorisées, ou bien elles définissent des secteurs où ce type d'infrastructure est interdit. Les réglementations de ce type visent à régler à l'avance les interactions et les conflits d'objectifs entre différents domaines de la politique – par exemple les conflits entre la promotion des infrastructures des sources d'énergie renouvelables et la protection des paysages ou des animaux. Pour les porteurs de projets souhaitant investir dans la construction de telles infrastructures, ces instruments de planification locaux représentent des conditions-cadres importantes. En raison de la structure fédérale, celles-ci peuvent toutefois varier considérablement selon l'emplacement.
Afin d'atténuer les incertitudes de planification dans le domaine de l'éolien, le gouvernement fédéral a adopté en 2017 la « Conception énergie éolienne » (ARE 2017). Ce document doit assurer une application plus cohérente des réglementations en vigueur, sans anticiper sur les décisions finales prises au niveau communal.

Les difficultés issues de la structure fédérale de la Suisse ne sont qu'une face de la médaille. La perspective d'un « laboratoire du fédéralisme » peut aussi s'appréhender comme une chance à saisir (Balthasar et al. 2020). Les communes jouent à cet égard un rôle particulièrement important en tant que propriétaires de bâtiments et d'infrastructures de production, comme acteurs politiques ou en tant que soutien des initiatives des associations et organisations locales. Elles disposent d'un potentiel considérable de faire progresser la concrétisation de la Stratégie énergétique 2050.

Les communes détiennent souvent des parts non négligeables dans les entreprises de fourniture d'énergie et sont donc impliquées dans l'extension des capacités de production des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, il est important

90 [Régulation du parc immobilier]

91 [Consommation collaborative : effet de mode ou réelle promesse ?]

92 [La consommation énergétique des ménages]

93 [Promouvoir un comportement efficace sur le plan énergétique dans les villes]

d'avoir conscience que les Suissesses et les Suisses acceptent plus facilement les sources d'énergie renouvelables lorsqu'elles sont produites sur le territoire national ou, si elles viennent de l'étranger, lorsque le producteur est une entreprise suisse. Le rejet répété d'une privatisation de la production d'électricité lors de votations communales et cantonales suggère que des moyens de production d'énergie détenus par l'État ont une incidence positive supplémentaire sur l'acceptation.

Cette implication conséquente des communes dans la fourniture d'énergie est également source de problèmes. Étant donné la complexité croissante des solutions de technique énergétique, bon nombre de communes ne disposent pas des ressources personnelles et techniques nécessaires pour faire face aux défis qui s'annoncent. De même, certaines communes se sentent d'ores et déjà dépassées par des procédures d'autorisation toujours plus complexes.

Nécessité de coordination horizontale et verticale

En raison du nombre de domaines impliqués, la transformation du système énergétique exige des autorités à tous les niveaux une coordination horizontale accrue entre les différents domaines politiques, en particulier pour le lancement de projets innovants. La logistique urbaine est représentative de la situation[94]. La réglementation intelligente de la logistique du fret urbain a des répercussions dans de nombreux domaines : « énergie » (consommation de carburant), « climat » (émissions de CO_2), « transports » (ferroviaires et routiers), « aménagement du territoire » (zones de développement pour les activités axées sur la logistique) ou encore « finances » (tarification de la mobilité avec des redevances d'utilisation variables selon l'heure et la charge).

Au sein d'un système fédéral, la coordination verticale entre le gouvernement, les cantons et les communes, ainsi que sur le plan international, est tout aussi importante. En matière de promotion des sources d'énergie renouvelables, une planification coordonnée des domaines prioritaires de développement semble indispensable. En effet, une politique cantonale qui gère l'approbation des petites centrales hydroélectriques de façon restrictive peut fortement limiter l'exploitation du potentiel naturel et technique.[95] De même, le soutien financier du gouvernement fédéral – par exemple avec la rétribution à prix coûtant du courant injecté – ne suffit pas à lui seul pour vaincre les résistances locales à l'exploration de la géothermie profonde.[96] Il manque encore une coordination globale de la transformation du système énergétique, comme elle existe partiellement avec la « Conception énergie éolienne » ou le plan sectoriel « Lignes de transport d'électricité » (DETEC 2001) du gouvernement fédéral. Étant donné les nombreuses contraintes et exigences à coordonner, une gestion tripartite – c'est-à-dire en collaboration avec les cantons et les communes – de la transformation du système énergétique, dans le cadre d'un concept fédéral, serait judicieuse.

Les défis de la coordination s'étendent même jusqu'à l'échelon européen lorsqu'il s'agit de réglementer la libéralisation du marché de l'électricité, ses répercussions sur les prix et la promotion de l'hydraulique dans les cantons alpins.[97/98]

Dépendance vis-à-vis du marché européen de l'énergie

Compte tenu de l'importance de l'approvisionnement en énergie pour l'ensemble de l'économie, la sécurité d'approvisionnement figure également au rang des objectifs prioritaires. En raison de l'interconnexion internationale des systèmes énergétiques, mais aussi du caractère multidimensionnel de l'exploitation des réseaux de transport, la question de la sécurité d'approvisionnement énergétique d'un pays apparaît comme extrêmement complexe. La Commission fédérale de l'électricité (ElCom) a conclu que la sécurité d'approvisionnement de la Suisse était assurée jusqu'en 2025, à condition que la charge et

94 [Logistique de fret urbain efficace sur le plan énergétique]

95 [Acceptation de l'énergie renouvelable]

96 [Géothermie profonde]

97 [L'avenir de l'énergie hydroélectrique en Suisse]

98 [Européanisation du système énergétique suisse]

le portefeuille des moyens de production évoluent conformément aux Perspectives énergétiques 2050 (OFEN 2013) du gouvernement fédéral (ElCom 2018). Elle reste toutefois fortement dépendante de l'évolution de la situation à l'étranger et de l'intégration au marché européen de l'énergie (cf. chap. 3.8).[99]

La situation deviendra par exemple critique pour la Suisse dès lors que l'Allemagne abandonnera non seulement l'énergie nucléaire, mais aussi la production d'électricité dans des centrales à charbon, ce qui est prévu d'ici 2038. Un découplage plus important entre la Suisse et le marché européen de l'électricité pourrait en outre entraîner de l'instabilité dans les réseaux d'approvisionnement. Les solutions pour améliorer la sécurité d'approvisionnement sont une éventuelle extension des lacs d'accumulation, des réserves stratégiques garanties contractuellement, des obligations de production à base de certificats ou un parc de centrales diversifié. Comme le montre le projet « Investissements dans l'hydroélectricité », afin de rendre attractifs les investissements à long terme dans le parc de centrales suisse, des conditions-cadres réglementaires appropriées et de nouvelles stratégies d'investissement s'imposent (cf. p. 56).[100] Pour garantir la stabilité des infrastructures de distribution, il convient en outre de développer le réseau de lignes comme prévu.

3.8 Le contexte européen

Scénarios de relations Suisse-UE

En raison de l'intégration progressive des marchés européens de l'énergie et des relations tendues avec l'UE, le rôle historiquement fort de la Suisse dans le secteur européen de l'électricité s'est considérablement dégradé. Il est difficile d'estimer dans quelle mesure les dépendances physiques entre les réseaux électriques, la position de la Suisse en tant que pays de transit vers l'Italie et son expertise technique lui permettront de garder une influence informelle, même en l'absence d'accord sur l'électricité. Sur la base de l'état actuel des négociations trois scénarios sont envisageables[101] :

● **Scénario 1 – Le contrat-cadre institutionnel est signé dans sa forme actuelle ou dans une version renégociée.**

Les négociations pour un accord sur l'électricité peuvent par conséquent être poursuivies. Les principaux points controversés sont les règles et la supervision des subventions publiques (« gouvernance des entreprises d'approvisionnement »), l'ouverture totale du marché, les subventions pour l'hydroélectricité et le dégroupage des réseaux de distribution. Si un terrain d'entente est trouvé, la Suisse pourrait rejoindre d'ici quelques années les processus et marchés européens. En attendant, des solutions transitoires seraient convenues.

● **Scénario 2 : Le contrat-cadre institutionnel n'est pas signé.**

La conclusion d'un accord sur l'électricité devient impossible dans un avenir proche, ce qui a des répercussions négatives sur les marges de manœuvre du secteur suisse de l'électricité, la garantie efficace de la sécurité d'approvisionnement et les prix de gros sur le marché de l'électricité. Ce scénario offre éventuellement la possibilité de trouver des compromis ponctuels, à l'instar de l'accord sur les flux de réseaux non planifiés conclu par la Commission fédérale de l'électricité (ElCom). L'accès équitable au marché pour les entreprises d'électricité suisses demeurerait toutefois dans l'incertitude, indépendamment du fait que la législation suisse continue à se structurer pour être en phase avec le droit européen.

● **Scénario 3 : Le contrat-cadre institutionnel n'est pas signé non plus. En outre, aucune entente provisoire ne peut être trouvée à propos de l'accès équitable au marché intérieur de l'électricité.**

Même si les échanges transfrontaliers d'électricité subsistent physiquement, l'exclusion durable des plate-formes de négociation européennes conduira à des coûts système nettement plus élevés et, par conséquent, à des pertes économiques. La capacité de la Suisse à importer de l'électricité étant susceptible de diminuer, des investissements conséquents dans des réserves de compensation domestiques et dans le stockage de l'électricité hydraulique et solaire saisonnière seraient nécessaires. En l'absence d'accord sur l'électricité, d'après les simulations du projet « Européanisation du système énergétique suisse », les consommateurs suisses devront s'attendre à un certain nombre d'inconvénients. Un prix de gros de l'électricité nettement plus élevé que dans les autres pays européens pourrait nuire à la compétitivité des industries suisses particulièrement énergivores. Le déficit commercial annuel de la Suisse en matière de commerce d'électricité avec les pays voisins pourrait augmenter, tout comme le risque de pénuries d'approvisionnement.

99 [Européanisation du système énergétique suisse]
100 [Investissements dans l'hydroélectricité]
101 [Intégration du système énergétique suisse à la politique énergétique européenne]

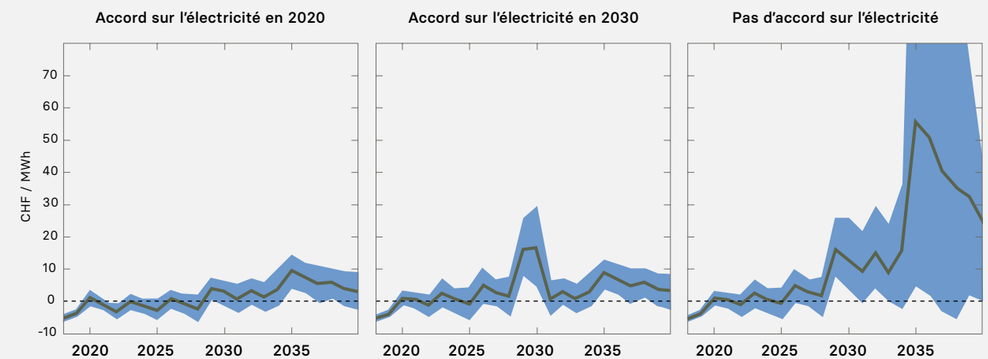


Illustration 11
Différence entre les prix de gros suisses et la moyenne de l'UE. La ligne représente la valeur moyenne annuelle, la zone ombrée l'intervalle de confiance de 90 %.[100]

Dégradation croissante des échanges transfrontaliers

La Suisse n'ayant que partiellement suivi la libéralisation des marchés et l'harmonisation de la régulation des marchés par l'UE, les conditions des échanges se sont dégradées, notamment pour les grandes compagnies électriques suisses. Pourtant, d'après le projet « Européanisation du système énergétique suisse », la libéralisation est considérée comme importante par la quasi-totalité des acteurs du secteur énergétique suisse. L'interconnexion efficace avec les marchés européens d'échange d'électricité figure elle aussi au rang des priorités lors des enquêtes d'opinion.[102]

Dans le cadre des échanges transfrontaliers d'électricité entre la Suisse et l'UE, les capacités de lignes doivent actuellement être explicitement acquises à la frontière, contrairement aux principes de gestion des capacités de transfert à la frontière de la plupart des pays européens. Le manque de couplage commercial du marché conduit à des incertitudes et des risques pour les sociétés de négoce, ce qui réduit les échanges transfrontaliers de courant. Cela peut se traduire par des pertes économiques et des prix de gros excessifs des deux côtés de la frontière.

En 2014, l'introduction d'une nouvelle méthode de calcul de la capacité de transmission transfrontalière (« flow-based ») s'est traduite par une diminution des capacités d'importation de la Suisse. En l'absence d'accord sur l'électricité avec des conditions commerciales équivalentes pour les acteurs suisses du marché, les échanges transfrontaliers devraient continuer à diminuer. Tous les États membres de l'UE fusionneront dans les années à venir au sein d'un marché de l'électricité unique et interconnecté, dont la Suisse sera partiellement exclue. Étant donné que l'hydroélectricité, qui sera la plus touchée par cette situation, occupe un rôle conséquent au sein du système énergétique visé (Stratégie énergétique 2050), les conditions-cadres réglementaires correspondantes doivent être vérifiées et adaptées le cas échéant au niveau national. Même en l'absence d'accord sur l'électricité, les éléments techniques du droit européen devraient tout de même être repris, tandis qu'en termes d'accès au marché, le maintien provisoire de réglementations différenciées est possible et probablement aussi pertinent.

Futures marges de manœuvre pour la promotion

Actuellement, certaines mesures de soutien pour de grandes centrales hydroélectriques suisses sont notamment en conflit avec le droit européen en matière d'aides d'État. La commission européenne veut exposer davantage ces installations de grande envergure aux signaux de prix du marché et définir les éventuels encouragements de façon plus concurrentielle. Dans la mesure où les instruments d'encouragement sont indépendants de toute technologie, ceci conduirait en Suisse à un développement accru des formes de production les moins coûteuses et/ou les plus simples à réaliser en termes d'aménagement du territoire, comme les installations hydroélectriques et photovoltaïques. Dans le cadre d'une intégration au marché européen de l'électricité, une telle spécialisation serait moins problématique qu'en l'absence de connexion au marché. Dans ce dernier cas, le législateur serait plutôt tenu d'axer les conditions-cadres sur un portefeuille bien diversifié, associant plusieurs formes de production d'énergie.[102]

Une promotion proche du marché, exclusivement pour les grandes installations domestiques, est actuellement possible dans le cadre du droit européen. D'ici 2030, au moins 10 % des subventions doivent cependant être ouverts aux installations étrangères. En l'absence d'accord sur l'électricité, une telle ouverture ne s'impose pas.

102 [Européanisation du système énergétique suisse]

Dans le cadre de l'encouragement de petits producteurs décentralisés d'électricité renouvelable, des exceptions aux procédures de mise en concurrence restent possibles d'après la nouvelle législation européenne. Des instruments tels que les aides à l'investissement ou l'exonération de la redevance d'accès au réseau pour l'autoconsommation peuvent également être utilisés. La plupart des mesures d'encouragement actuellement en vigueur en Suisse dans ce domaine, et arrivant à terme en 2022, sont compatibles avec le droit européen. La situation des producteurs décentralisés pourrait être encore améliorée en conformité avec le droit européen, en leur donnant par exemple la possibilité de vendre leur production d'électricité à un large éventail d'acteurs dans le cadre d'échanges de pair à pair ou d'un contrat d'achat d'électricité (Power Purchase Agreement, PPA).

Au nombre de plus de 100, les projets de recherche du PNR « Énergie » ont débouché sur des centaines de résultats individuels. Certains d'entre eux ont généré des innovations technologiques, d'autres ont analysé l'environnement économique ou social. Les synthèses disponibles sur le portail Web www.nfp-energie.ch ont regroupé les projets thématiquement connexes et ont permis de dégager de nouvelles conclusions globales. Les paragraphes qui suivent mettent en avant les aspects qui semblent particulièrement pertinents pour la transformation du système énergétique du point de vue du PNR « Énergie ». Il en ressort que les aspects socio-politiques sont tout aussi importants que les considérations techniques pour la transformation du système énergétique ; ils constituent la clé qui permet la réalisation des solutions techniques.

Au nombre de plus de 100, les p
recherche du PNR « Énergie » ont débou
centaines de résultats individuels. Cert
tre eux ont généré des innovations tech
d'autres ont analysé l'environnement éc
social. Les synthèses disponibles sur le
www.nfp-energie.ch ont regroupé les p
matiquement connexes et ont permis d
nouvelles conclusions globales. Les par
suivent mettent en avant les aspects qu
particulièrement pertinents pour la tran
système énergétique du point de vue du
gie ». Il en ressort que les aspects socio
sont tout aussi importants que les cons
techniques pour la transformation du sy
gétique ; ils constituent la clé qui perme
des solutions techniques.

De nombreuses solutions techniques, susceptibles de contribuer de façon cruciale à la transformation du système énergétique, sont opérationnelles. Chacune et chacun est appelé-e à saisir les opportunités de transformation du système énergétique. Ceci comprend aussi des réglementations incitatives, orientant les choix dans la direction souhaitée. Cet aspect est encore insuffisamment développé.

4.1 Potentiel inexploité dans le parc immobilier

Le fonctionnement des bâtiments représente près de deux cinquièmes de la consommation d'énergie finale. L'amélioration de l'efficacité énergétique du parc immobilier, c'est-à-dire son assainissement énergétique, constitue par conséquent une pierre angulaire de la Stratégie énergétique 2050. Les surfaces de toiture et de façade des bâtiments offrent en outre diverses possibilités dans le domaine du photovoltaïque, qui restent sous-exploitées jusqu'à présent.

L'assainissement énergétique du parc immobilier est bien trop lent et doit être renforcé.

Le taux de rénovation actuel des immeubles résidentiels et de bureaux ne dépasse pas 1,5 % par an. À ce rythme, la rénovation du bâti ancien prendra jusqu'à la fin de ce siècle, soit beaucoup trop longtemps pour fournir la contribution attendue à la transformation du système énergétique. Ce processus doit être accéléré. Or, les mesures d'encouragement en place s'avèrent insuffisantes à cet effet.

Les façades des bâtiments offrent un potentiel considérable au photovoltaïque.

Le photovoltaïque est une des technologies phares pour la production d'énergie renouvelable. La puissance devrait plus que se décupler d'aujourd'hui à 2050. Pour atteindre cet objectif, l'exploitation de nouvelles surfaces est indispensable. Alors que la création de parcs photovoltaïques sur des surfaces libres n'est guère populaire en Suisse, les infrastructures (touristiques) existantes et surtout les façades des bâtiments offrent un potentiel approprié. À ce jour, le photovoltaïque intégré aux bâtiments reste toutefois un marché de niche. Cela s'explique par le manque de connaissances des propriétaires de bâtiments et des architectes, l'absence de pression sociale et politique, ainsi que des coûts qui sont encore un peu incertains. En termes d'exigences esthétiques, l'offre de panneaux photovoltaïques satisfait dès aujourd'hui à des critères très élevés pour l'intégration aux bâtiments. L'offre continue d'ailleurs de se développer et de se diversifier, entre autres grâce aux travaux du PNR « Énergie ».

4.2 L'énergie hydraulique, entre besoins d'investissement et développement durable

L'énergie hydraulique reste un élément essentiel du futur système énergétique suisse. Elle apporte une contribution conséquente à l'alimentation énergétique, contribue à la sécurité d'approvisionnement et compense les fluctuations dans la production d'électricité. Elle jouit à ce titre d'une large acceptation. Son utilisation pourrait potentiellement être optimisée, mais son extension est strictement limitée par les conditions-cadres économiques et écologiques.

L'énergie hydraulique mérite plus d'attention.

Les besoins d'entretien des infrastructures hydroélectriques existantes sont importants. En raison de diverses incertitudes, les propriétaires des centrales n'effectuent cependant pas les investissements nécessaires. La précarité des rendements à court et moyen terme est ainsi en contradiction avec la perspective à long terme des investissements nécessaires sur plusieurs décennies. Les dispositions de concession en vigueur, impliquant un risque imminent de retour des centrales de leurs propriétaires à leurs concédants, freinent également les investissements.

Les installations hydroélectriques nécessitent une évaluation globale.

L'exploitation de la force de l'eau est foncièrement en conflit avec l'écologie des milieux aquatiques naturels. Pour de nombreuses centrales hydroélectriques, l'assainissement du débit résiduel reste encore à réaliser. En même temps, les dispositions applicables en matière de débits résiduels sont insuffisamment appliquées pour atteindre les objectifs de biodiversité visés. Le recul des glaciers ouvre de nouvelles possibilités de lacs de retenue, mais leur exploitation nécessite une évaluation approfondie de la durabilité. À l'avenir, il ne s'agira cependant plus simplement d'évaluer des installations isolées, mais d'adopter une perspective globale à l'échelle de tout le pays, afin de profiter du potentiel existant là où le rapport entre exploitation énergétique et dégâts écologiques est le plus favorable. Ceci implique également une coordination accrue et la prise en compte de l'ensemble des installations hydroélectriques.

4.3 Motiver la population

La transformation du système énergétique est en grande partie un devoir de société. Chacune et chacun est amené-e à y contribuer via les différents rôles qu'elle ou qu'il peut jouer. Au sein de la population, il existe une disposition à l'action, à condition d'avoir connaissance des possibilités et de pouvoir en tirer profit. À certains égards, le manque d'information et de connaissances est toutefois considérable.

Les comportements sont dictés par les normes sociales.

Que ce soit pour les achats quotidiens, les acquisitions importantes, les investissements ou encore les choix politiques, les critères économiques n'arrivent qu'au second rang des critères de décision. En premier lieu, les choix (de produits) sont influencés par les normes sociales. Souvent, l'acceptation sociale ou le caractère « tendance » sont ainsi décisifs. La question du coût ne se pose qu'ensuite. Ainsi, si les vélos électriques sont considérés comme « cool », la propension à l'achat de ce type de vélos augmente malgré leur prix élevé. Cette appréciation et cette catégorisation sociales jouent un rôle considérable dans la transformation du système énergétique. En effet, elles peuvent être mises à profit pour faire progresser la transformation. Rendre « tendance » les comportements énergétiques pertinents représente par conséquent une stratégie prometteuse, souvent encore sous-exploitée.

Le financement populaire de l'approvisionnement énergétique est source de crédibilité.

Les consommatrices et consommateurs font preuve d'un intérêt considérable pour le cofinancement des sources d'énergie renouvelables destinées à l'auto-approvisionnement. Protégées par la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) et avec le soutien de fournisseurs d'énergie locaux et régionaux, des entreprises ou des organisations comme les coopératives énergétiques fédèrent ces fragments de financement. La forte identification avec les structures proches des utilisateurs se révèle être un paramètre clé. Elle fait naître une forte acceptation des mesures locales et régionales en matière d'énergie et des investissements dans les infrastructures des sources d'énergie renouvelables. De ce point de vue, les quelque 700 fournisseurs d'énergie locaux et régionaux forment une base importante pour la transformation du système énergétique. Ils bénéficient d'un large soutien et d'une grande crédibilité pour leurs mesures innovantes et leurs investissements dans des infrastructures, même si ces dernières se situent à l'étranger.

4.4 Besoin de réglementation et de soutien accru

La législation ayant trait à l'énergie, qui va bien au-delà de la Loi sur l'énergie stricto sensu, est encore insuffisamment axée sur le système énergétique de l'avenir. Dans certains domaines, elle freine de ce fait la réalisation de solutions techniques prometteuses. Le manque de coordination entre les différents domaines politiques et administratifs, ainsi qu'au niveau des autorités dans le cadre de la mise en œuvre des missions légales ralentit également la transformation. Les villes et les communes auraient notamment la possibilité de faire progresser plus activement la transformation du système énergétique. Elles disposent à cet effet de divers moyens d'action sur le plan de l'information, ainsi qu'aux niveaux financier et réglementaire.

La législation ne soutient pas la transformation du système énergétique à sa juste mesure.

Le régime énergétique actuel se caractérise par une juxtaposition des divers vecteurs d'énergie et par une logique de distribution d'énergie basée sur une chaîne d'approvisionnement unidirectionnelle (production-distribution-consommation). La transformation du système énergétique bouleverse fondamentalement cette situation. Pour compenser les fluctuations de la production des sources d'énergie renouvelables, il est indispensable de surmonter le problème de la séparation des diverses sources d'énergie grâce au couplage sectoriel, par exemple dans le cadre de systèmes multiénergies décentralisés (DMES). L'importance croissante des prosommateurs – des acteurs qui ne consomment pas seulement de l'énergie, mais en produisent aussi de façon décentralisée – modifie aussi totalement la logique de distribution en place. En raison de son approche très sectorielle, la législation énergétique en vigueur n'est pas en phase avec cette nouvelle dynamique. Elle complique ou rend même impossible le recours à diverses technologies disponibles, ainsi que le couplage des technologies et des vecteurs d'énergie. Dans de nombreux domaines, elle freine les bonnes volontés souhaitant faire progresser la transformation du système énergétique. Le passé a montré que chaque régime énergétique a besoin de conditions-cadres réglementaires spécifiques. Les travaux de révision de la législation énergétique qui sont en cours devraient permettre de concrétiser un certain nombre d'adaptations nécessaires. Mais seule une refonte approfondie de la réglementation, bien au-delà de la législation sur l'énergie, fournira les marges de manœuvre nécessaires à l'exploitation de tout le potentiel technologique.

À l'avenir, le système énergétique nécessite davantage de souplesse.

La proportion supérieure d'énergie solaire et éolienne dans le futur système énergétique implique des fluctuations plus importantes de l'offre d'énergie. Une gestion souple des charges doit permettre de compenser ces fluctuations, ce qui implique des défis techniques considérables en matière de pilotage. De plus, le système énergétique doit gagner en flexibilité, aux niveaux spatial et temporel ainsi que sur le plan du mix énergétique. Du point de vue spatial, la souplesse requise peut être assurée grâce à des réseaux de distribution performants. L'extension prévue du réseau suisse de distribution d'électricité est par conséquent nécessaire et doit être réalisée dans cette perspective. Aucun autre aménagement ne semble nécessaire. La souplesse temporelle peut être assurée par des accumulateurs de tous types: lacs de retenue, batteries, réservoirs d'air comprimé, etc. Le couplage des différents vecteurs d'énergie assure la souplesse en termes de mix énergétique, par exemple grâce à la production d'hydrogène ou de méthane de synthèse à partir d'électricité issue d'installations solaires ou éoliennes. La souplesse accrue du système énergétique nécessite des solutions non seulement techniques, mais aussi réglementaires. La structure des taxes d'accès au réseau se traduit par des obstacles économiques partiellement insurmontables pour le couplage sectoriel. Des adaptations réglementaires pourraient fournir les marges de manœuvre nécessaires.

La transformation du système énergétique nécessite une coordination accrue des acteurs publics.

Au sein du système fédéral de la Suisse, dans le contexte de la Stratégie énergétique 2050, tous les échelons gouvernementaux interviennent dans la politique énergétique. Les missions des échelons respectifs peuvent concerner des secteurs opérationnels très variés. Que ce soit sur le plan horizontal ou vertical, les activités de politique énergétique sont toutefois insuffisamment coordonnées. L'amélioration de la coordination de ces activités et pratiques opérationnelles représente un potentiel non négligeable de rendre la transformation du système énergétique plus efficace et plus rapide.

Les villes et les communes disposent d'une grande marge de manœuvre pour participer activement à la politique énergétique.

Les villes et les communes, mais aussi les associations de communes et les régions jouissent d'une grande marge de manœuvre pour participer à la transformation du système énergétique et la faire progresser en termes de planification, d'organisation et de communication. La marge de manœuvre des communes va bien au-delà de la mise en application de la législation énergétique. Dans le cadre des plans d'affectation, elles définissent les conditions-cadres de planification qui permettent par exemple la réalisation d'installations photovoltaïques intégrées aux bâtiments, de systèmes multiénergies décentralisés (DMES) ou d'éoliennes. En tant que (co-)propriétaire d'entreprises locales de fourniture d'énergie, elles peuvent encourager l'introduction de « compteurs intelligents » ou contribuer à améliorer les capacités de production des sources d'énergie renouvelables. Elles peuvent s'appuyer pour cela sur la bonne acceptation de la propriété publique en matière de production d'énergie. Dans le domaine du transport aussi, les villes et les communes jouent un rôle central et disposent de nombreuses compétences. Elles peuvent par exemple contribuer à organiser la livraison des marchandises de façon plus respectueuse de l'environnement ou à convertir les transports publics aux énergies renouvelables. Leur proximité avec la population prédestine les villes et les communes à lui rendre accessible les innovations dans le domaine de l'énergie ou à motiver la population à participer à la transformation par l'intermédiaire d'activités d'information et de formation. Elles peuvent aussi encourager les initiatives d'associations et d'organisations locales, visant à favoriser les comportements d'économie d'énergie par des pratiques innovantes. Soutenus par le gouvernement fédéral, les programmes « Cité de l'énergie » et « Région-Énergie » proposent à cet effet des échanges d'expérience et des outils de gestion pour la planification, la mise en œuvre et l'évaluation d'une politique énergétique communale ou régionale réussie.

La recherche est parfaitement en mesure d'apporter des réponses à des questions isolées et de développer des solutions spécifiques. Des conflits d'intérêts entre les différentes solutions ne sont toutefois pas exclus. L'indispensable examen comparatif des intérêts sur le plan socio-politique et économique ne relève pas des chercheurs. Cette tâche revient bien plus aux instances politiques et à l'électorat.

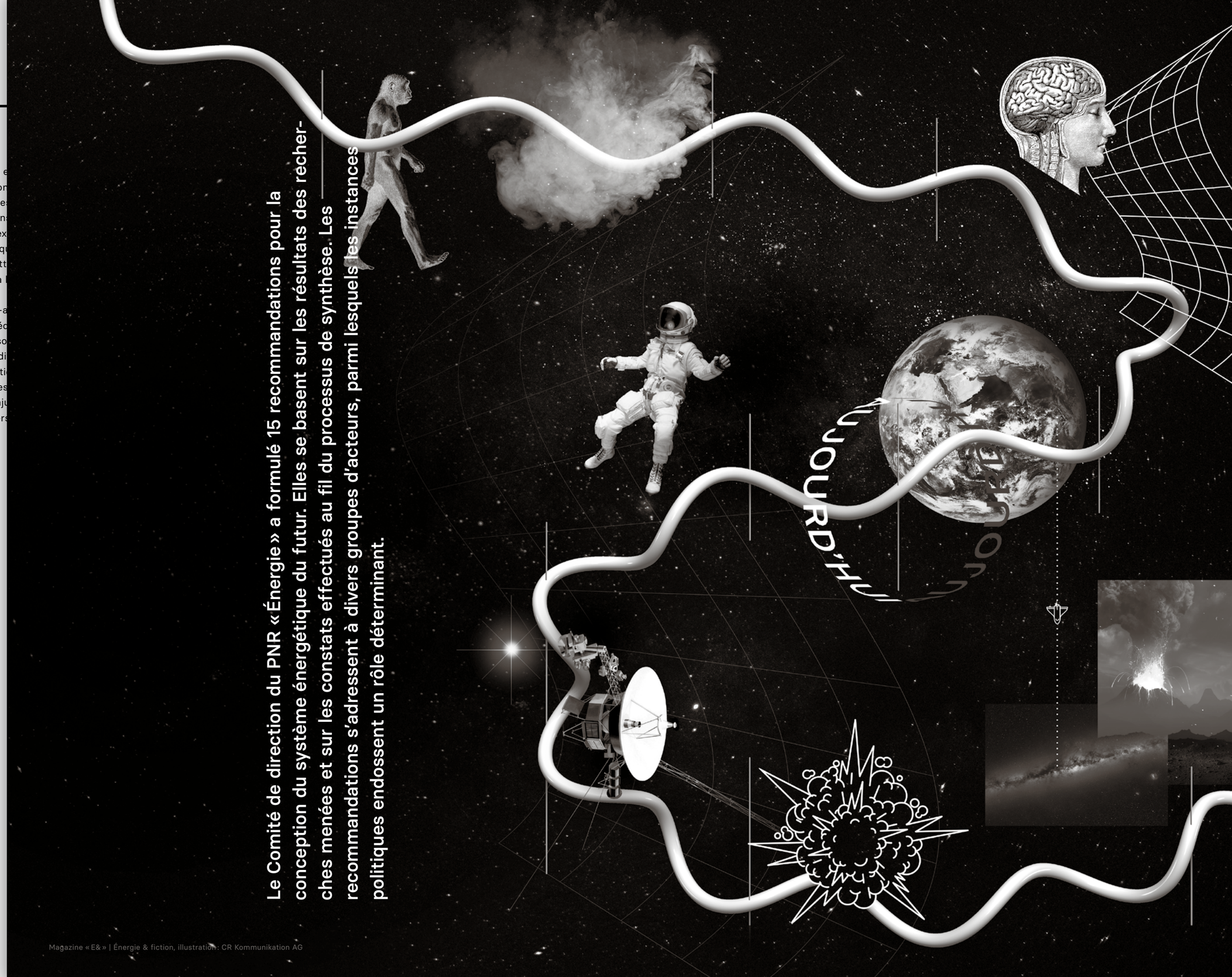
Les recommandations répertoriées ci-après constituent par conséquent une étape intermédiaire entre la recherche et la mise en œuvre. Elles sont essentiellement basées sur les conclusions des différents projets de recherche et des synthèses thématiques. Dans le cadre d'ateliers, elles ont été débattues et évaluées avec différents groupes d'acteurs et ajustées en fonction de l'expérience de ces derniers.

5

Recommandations

La recherche est parfaitement e
d'apporter des réponses à des question
de développer des solutions spécifique
d'intérêts entre les différentes solution
toutefois pas exclus. L'indispensable ex
tif des intérêts sur le plan socio-politiq
que ne relève pas des chercheurs. Cett
bien plus aux instances politiques et à

Les recommandations répertoriées ci-a
ent par conséquent une étape interméc
recherche et la mise en œuvre. Elles so
ment basées sur les conclusions des di
de recherche et des synthèses thémati
cadre d'ateliers, elles ont été débattues
avec différents groupes d'acteurs et aj
fonction de l'expérience de ces dernier



Le Comité de direction du PNR «Énergie» a formulé 15 recommandations pour la conception du système énergétique du futur. Elles se basent sur les résultats des recherches menées et sur les constats effectués au fil du processus de synthèse. Les recommandations s'adressent à divers groupes d'acteurs, parmi lesquels les instances politiques endossent un rôle déterminant.

Magazine « E& » | Énergie & fiction, illustration: CR Kommunikation AG

Acteurs : instances politiques

Élaborer un concept fédéral pour la transformation du système énergétique

Des procédés de planification et d'autorisation mal coordonnés, voire pas du tout, ralentissent de nombreux projets d'infrastructures énergétiques. Grâce à un concept élaboré conjointement, le gouvernement fédéral, les cantons et les communes doivent par conséquent créer une base fiable, permettant de concilier les intérêts des différents échelons administratifs et de résoudre les blocages.

La planification et la réalisation d'infrastructures énergétiques nécessitent généralement des procédures complexes, impliquant les autorités fédérales, cantonales et communales et auxquelles peuvent prendre part divers acteurs, notamment des organisations jouissant du droit de recours. Les plans sectoriels et conceptions adoptés jusqu'à présent concernent uniquement des infrastructures données, telles que les lignes haute tension ou les installations éoliennes. La législation sur l'énergie s'articule en outre autour de nombreuses réglementations spéciales portant sur les différents vecteurs d'énergie et compliquant l'indispensable vision globale du système énergétique. En même temps, il s'agit de tenir compte de divers intérêts à protéger. Grâce à un concept élaboré conjointement avec les cantons et les communes, le gouvernement fédéral peut montrer comment les missions d'aménagement du territoire et de politique énergétique sont accomplies de façon concertée dans le contexte de la transformation du système énergétique et comment il soutient les efforts des autorités de tous les échelons. La priorité est à ce titre la coordination des contenus et des procédés, dans le but d'accélérer la mise en œuvre des projets d'infrastructure nécessaires pour la Stratégie énergétique 2050.

Clarifier rapidement les rapports entre la Suisse et l'UE dans l'intérêt de la sécurité d'approvisionnement en électricité

Des importations d'électricité permettent à la Suisse de compenser les fortes variations saisonnières de la production des centrales hydroélectriques. Les relations avec l'UE et, par conséquent, avec les marchés européens de l'énergie déterminent comment cet équilibre peut être garanti à l'avenir, et à quel prix. En l'absence d'accord sur l'électricité, les coûts seront nettement supérieurs.

En raison de l'intégration progressive des marchés européens de l'énergie et des relations tendues avec l'UE, le rôle historiquement fort de la Suisse dans le secteur européen de l'électricité s'est considérablement affaibli. Des études ont certes permis de conclure que, quel que soit le sort des relations avec l'UE, la sécurité d'approvisionnement pouvait être garantie jusqu'en 2025. Cependant, la situation deviendrait critique pour la Suisse dès lors que l'Allemagne abandonnerait non seulement l'énergie nucléaire, mais aussi la production d'électricité dans des centrales à charbon, ce qui est prévu d'ici 2038. Un découplage plus important entre la Suisse et le marché européen de l'électricité pourrait entraîner de l'instabilité dans les réseaux d'approvisionnement. Les mesures nécessaires pour garantir malgré cela la sécurité d'approvisionnement impliquent des coûts plus élevés et nécessitent un cadre réglementaire. Afin de se préparer en conséquence, les relations avec l'UE devraient être clarifiées au plus vite.

Encourager l'efficacité énergétique grâce à une réglementation ciblée et promouvoir le développement des sources d'énergie renouvelables

Bon nombre des technologies nécessaires à la transformation du système énergétique sont déjà opérationnelles. Sur la simple base du volontariat, celles-ci sont toutefois insuffisamment utilisées, en particulier dans le secteur des bâtiments et de la mobilité. Pour atteindre les objectifs fixés, des interventions réglementaires sont par conséquent requises, en complément des incitations économiques. Diverses décisions politiques préliminaires prises récemment vont dans la bonne direction.

Du seul fait de l'impact sur le trafic des nouvelles offres de mobilité et des divers effets de rebond associés, la transformation du système énergétique ne pourra être concrétisée exclusivement grâce à des stratégies axées sur la technologie et/ou guidées par le marché dans le domaine des transports. Le même constat s'applique au secteur du bâtiment : le taux de rénovation énergétique est bien trop bas pour permettre d'atteindre les objectifs de la Stratégie énergétique 2050.

Des mesures tant incitatives que dissuasives sont nécessaires pour parvenir à un comportement durable en matière de mobilité. En tant que financeur et exploitant des infrastructures, mais aussi comme comandant des offres, l'État joue à tous les niveaux un rôle central dans la structuration de la mobilité. Il est d'autant plus important qu'il accompagne activement les nouveaux développements et qu'il les pilote compte tenu des objectifs politiques fixés, par exemple en facilitant l'accès au centre-ville des livreurs les plus efficaces sur le plan énergétique, en appliquant des directives plus strictes en matière de consommation pour les automobiles ou en encourageant les applis de mobilité mettant en évidence les solutions les plus efficaces sur le plan énergétique. À cet égard, des mesures organisationnelles comme l'autopartage et le covoiturage peuvent sensiblement influencer la mobilité dans la direction souhaitée.

En matière de production de chaleur dans le secteur du bâtiment, des mesures incitatives comme une taxe sur le CO_2 permettent d'accélérer la transition vers des sources d'énergie non fossiles. En revanche, en particulier dans le bâti ancien, les gains d'efficacité visés dans le domaine de l'enveloppe du bâtiment nécessitent des prescriptions et des incitations supplémentaires pour augmenter la part de l'énergie produite à base de ressources renouvelables. De plus, les mesures d'encouragement telles que le programme Bâtiments doivent être maintenues.

Soutenir le développement des sources d'énergie renouvelables grâce à une taxe CO_2 incitative globale et efficace

Les mesures incitatives sont plus efficaces et moins coûteuses que les subventions. L'application d'une taxe CO_2 à l'ensemble des sources d'énergie fossiles est donc particulièrement bien adaptée pour faire progresser la transformation du système énergétique.

Non seulement le marché n'est pas en mesure de déclencher à lui seul les investissements nécessaires au développement des sources d'énergie renouvelables, mais en outre le volontariat ne suffit pas à provoquer, auprès de la population et des acteurs économiques, les changements de comportement requis pour la transformation du système énergétique. Les taxes incitatives se révèlent être un instrument efficace pour favoriser les comportements souhaités. Jusqu'à cinq fois moins coûteuses que les mesures d'encouragement comme les subventions, elles ont un impact sur toutes les décisions concernées. Les répercussions peuvent ainsi être contrôlées à grande échelle. Cette approche profite à une grande partie des ménages, alors que dans le cas d'une stratégie d'encouragement, tout le monde paye et très peu en profitent. À l'instar de la taxe CO_2 sur les combustibles ou de la taxe sur les composés organiques volatils (COV), les taxes incitatives ont fait leurs preuves dans de nombreux domaines et y sont désormais acceptées. Si les mécanismes existants applicables aux entreprises énergivores sont maintenus, les taxes incitatives sur les émissions de CO_2 n'ont pas d'impact négatif sur le développement économique et devraient par conséquent si possible être étendues à tous les secteurs de l'énergie. Un système de rétribution transparent et des informations claires sur son mode d'action permettent d'améliorer l'acceptation des taxes incitatives. Une évolution progressive prédéfinie facilite la planification pour les entreprises.

Focaliser l'énergie hydraulique sur son rôle stabilisateur au sein du système énergétique

Les nouvelles sources d'énergie renouvelables sont confrontées au problème que la production et la consommation ne coïncident pas toujours. L'énergie hydraulique joue un rôle central à cet égard : elle stabilise le système de distribution et garantit techniquement la sécurité d'approvisionnement du système énergétique suisse. Cette fonction peut également servir de base à des compensations financières.

Grâce à leur capacité d'accumulation, les lacs de retenue jouent un rôle central dans la régulation du système énergétique suisse. Ils permettent de réguler les capacités et endossent des fonctions de stabilisation. Des conditions-cadres réglementaires doivent être créées pour consolider ces fonctions et rendre attrayants les investissements dans l'hydroélectricité. Pour conserver ce rôle stabilisateur dans le système d'énergie transformé, des capacités d'accumulation supplémentaires sont requises.

Aligner les redevances hydrauliques sur les rendements

En 2024, une nouvelle solution doit être trouvée pour la redevance hydraulique. Elle devrait se baser sur le rendement et refléter ainsi le prix du marché et les coûts de production. La nouvelle solution doit également prendre en compte les intérêts des régions de montagne, pour lesquelles la redevance hydraulique est économiquement bien plus importante que pour les producteurs d'électricité.

La redevance hydraulique est une indemnité versée par les producteurs d'électricité aux cantons et communes de montagne en contrepartie de l'utilisation de leurs ressources en eau. En 2015, son montant s'élevait à environ 560 millions de francs. Pour de nombreuses communes, les redevances hydrauliques représentent une part conséquente (20-50 %) des recettes financières : une redevance hydraulique flexible et basée sur le rendement est aujourd'hui considérée comme plus conforme au marché que des

montants maximaux fixes, dépendant uniquement de la puissance installée et non du courant effectivement produit. Une redevance hydraulique flexible signifie toutefois une augmentation unilatérale du risque pour les propriétaires des ressources, c'est-à-dire les communes et cantons de montagne, tandis que le risque diminue pour les exploitants des centrales. Pour ces derniers, le montant de la redevance hydraulique ne revêt pourtant que dans de rares cas spécifiques une importance décisive dans les recettes. C'est pourquoi il est préconisé d'introduire des redevances hydrauliques flexibles, basées sur le rendement et adoptant le principe de la répartition des gains et des pertes (« revenue sharing ») entre les propriétaires des ressources – c'est-à-dire les communes et les cantons – et les exploitants des centrales. Dans l'esprit d'une approche globale, les nouvelles réglementations doivent également prendre en compte des aspects politiques et économiques régionaux.

Créer des conditions optimales pour les modèles de financement auxquels la population peut participer

La participation financière aux investissements dans les infrastructures des sources d'énergie renouvelables est un facteur d'identification. Les organismes ancrés localement comme les associations, les coopératives ou les organisations de quartier sont source d'acceptation et contribuent à faire progresser le développement des sources d'énergie renouvelables.

Les chances d'acceptation des nouvelles infrastructures énergétiques sont meilleures lorsque la participation aux bénéfices des projets d'énergie renouvelable est davantage soulignée et mise en avant. Les modèles les plus attrayants semblent être ceux qui font des communes ou des particuliers des copropriétaires et génèrent ainsi des avantages économiques pour ces derniers, par exemple dans le cadre de sociétés par actions locales, d'associations, de coopératives ou d'organisations de quartier. Les communes peuvent soutenir publiquement ces dernières en contribuant au financement des infrastructures, par exemple par l'intermédiaire de prêts, ou en mettant à disposition des espaces publics comme les toitures pour l'installation de capteurs solaires. Les caisses de pension devraient elles aussi avoir la possibilité de contribuer au financement d'infrastructures énergétiques. Les centrales électriques locales peuvent mettre à disposition leur savoir-faire, garantir l'accès au réseau pour le courant produit à base de sources d'énergie renouvelables ou injecter ce courant à un tarif attractif.

Inciter les villes et les communes à user plus activement de leur marge de manœuvre dans le domaine de l'énergie

En tant que propriétaires de bâtiments et exploitantes de régies et d'entreprises publiques, entités politiques ou soutiens d'initiatives locales, les villes et les communes disposent de nombreuses possibilités de contribuer à la transformation du système énergétique. Elles peuvent par conséquent agir en matière de planification, d'organisation et de communication – et ce, pas uniquement dans le domaine de l'énergie.

Malgré de nombreuses possibilités, les villes et les communes ont souvent du mal à mener une politique énergétique active. Outre la volonté politique, cette dernière nécessite une certaine créativité et une démarche intersectorielle. En tant que productrices et distributrices d'énergie, mais aussi comme propriétaires et utilisatrices de bâtiments, les communes disposent d'une marge de manœuvre considérable pour soutenir la transformation du système énergétique. Soutenus par le gouvernement fédéral, les programmes « Cité de l'énergie » et « Région-Energie » proposent à cet effet des échanges d'expérience et des outils de gestion pour la planification, la mise en œuvre et l'évaluation d'une politique énergétique communale ou régionale réussie.

Acteurs : milieux politiques / entreprises

Mettre en place une logistique urbaine décarbonée d'ici 2050

Un approvisionnement décarboné des agglomérations urbaines permet d'atteindre 7 % des objectifs d'efficacité de la Stratégie énergétique 2050 et près de 9 % de la réduction des gaz à effet de serre visée. Les cantons, villes et communes sont donc invités à mettre en place les conditions-cadres correspondantes et à collaborer avec les acteurs du secteur de la logistique.

Le marché de la logistique connaît une croissance ininterrompue, qui l'a fait progresser de près de 25 % en dix ans. Des tendances comme le commerce électronique, la réduction des stocks, la diminution des unités de livraison et la fréquence accrue des tournées sont les principaux moteurs de cette évolution. La majeure partie des processus logistiques est toutefois basée sur des énergies fossiles. L'objectif d'une logistique sans CO_2 est économiquement réalisable et accepté par les entreprises du secteur. Sa concrétisation ne remplit pas uniquement des objectifs énergétiques. Elle génère aussi des avantages supplémentaires pour la société en réduisant les polluants atmosphériques et les nuisances sonores dans les espaces urbains, ce qui se traduit par une amélioration globale de la qualité de vie. L'objectif d'une logistique urbaine décarbonée exige des mesures telles que des motorisations non émettrices de CO_2, une tarification de la mobilité, des conditions d'utilisation des routes, des labels d'efficacité énergétique, de la coopération, la planification de centres logistiques, etc. Il est essentiel que toutes les parties prenantes s'engagent activement et collaborent étroitement. Les autorités publiques devraient créer des conditions-cadres appropriées grâce à une planification globale de l'espace urbain, tandis que les prestataires de services logistiques et de transport devraient organiser leurs chaînes de livraison en conséquence, déterminer des emplacements appropriés pour les centres logistiques et s'équiper de véhicules non émetteurs de CO_2.

Acteurs : instances politiques / fournisseurs d'énergie

Créer des systèmes multiénergies décentralisés (DMES)

Les DMES permettent une utilisation particulièrement efficace de l'énergie produite de façon décentralisée. Pour permettre leur réalisation, la production et la fourniture d'énergie doivent être appréhendées comme un tout au aux niveaux local et régional. L'Organisation autonome et la réglementation gouvernementale doivent se compléter au mieux. Les communes, mais aussi le gouvernement fédéral et les cantons, doivent préparer le terrain en termes de planification et de législation.

Les systèmes multiénergies décentralisés (DMES) combinent intelligemment les réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur, mais aussi les moyens de stockage et les consommateurs d'énergie. L'énergie produite de façon décentralisée peut ainsi être utilisée efficacement de façon décentralisée – à l'échelle locale ou régionale, dans le quartier, le village ou le district – et bénéficie d'une bonne acceptation grâce au contexte local. Ceci permet de jongler entre les disponibilités variables des différentes sources d'énergie renouvelables. Les monopoles d'approvisionnement des fournisseurs d'énergie locaux et régionaux compliquent la mise en place de DMES. De plus, la réalisation d'un DMES nécessite une prise en compte du système énergétique global dans le contexte local et régional, c'est-à-dire un abandon de la considération séparée des différents vecteurs d'énergie ainsi que de l'approvisionnement individuel de bâtiments et d'entreprises. Les communes et leurs moyens de production sont les mieux à même d'identifier le potentiel de création de DMES et de promouvoir leur réalisation par l'intermédiaire de plans directeurs énergétiques et d'un accompagnement actif. Le gouvernement fédéral et les cantons sont chargés de leur côté d'assurer les conditions-cadres légales nécessaires (obligation de raccordement, protection des données, gestion des données, etc.).

Acteurs : administrations cantonales

Adapter le régime de l'eau résiduelle aux impératifs écologiques

La Loi sur la protection des eaux est aujourd'hui insuffisamment appliquée du point de vue des objectifs écologiques. La diversité biologique souhaitée n'est pas atteinte en aval des ouvrages de retenue. C'est pourquoi, les cantons doivent conditionner la réalisation de façon à ce que le débit d'eau résiduel puisse garantir les objectifs écologiques. Les mesures requises nécessitent davantage d'eau et réduisent la production d'électricité.

La mise en application actuelle des dispositions en matière de débits résiduels ne garantit pas les conditions écologiques nécessaires à la préservation de la diversité biologique dans les tronçons de débit résiduel. Par égard pour les intérêts économiques, les prescriptions sont trop souvent respectées a minima et des clauses dérogatoires sont appliquées. Dans les cours d'eau dont la dynamique de charriage est insuffisante, on constate une solidification du fond de lit qui n'est alors plus adapté en tant que substrat de frai. Les crues naturelles ne parviennent plus à rincer suffisamment les porosités obstruées par des sédiments fins et les apports en oxygène diminuent.
Le débit résiduel constant ne permet pas de restaurer la diversité des habitats et des êtres vivants. De fortes inondations sporadiques et une variabilité spatiale et temporelle accrue du débit permettraient de recréer une situation plus naturelle. Les crues artificielles et les mesures de gestion de la charge de sédiments sont par conséquent de plus en plus envisagées. Le renouvellement des concessions doit être mis à profit pour optimiser les conditions écologiques. Les mesures correspondantes ne sont pas sans conséquences sur la production d'électricité et ont donc un impact sur la réalisation des objectifs de la Stratégie énergétique 2050.

Acteurs : fournisseurs d'énergie

Dès le départ, impliquer activement la population dans la planification des projets d'infrastructures

La participation renforce l'identification et contribue à l'acceptation. Les initiateurs de projets doivent par conséquent adopter une organisation participative des processus de planification des projets dans le domaine des sources d'énergie renouvelables.

La culture de la participation et de la consultation est très présente en Suisse. Elle doit par conséquent être prise en compte lors de la conception de mesures politiques et de projets dans le domaine des sources d'énergie renouvelables. Les initiateurs des projets doivent notamment impliquer la population concernée dès le début dans les processus de décision. Pour une participation réussie, il s'agit toutefois de faire preuve de professionnalisme. De même, les préoccupations de la population ne doivent pas être négligées. Les souhaits émis doivent être pris au sérieux par les initiateurs des projets et pris en compte de façon juste et transparente. Il est également important de clarifier les intérêts au plus tôt et de bien documenter le processus de pondération des intérêts.

Inciter aux économies d'énergie grâce à une tarification flexible et dynamique de l'électricité, à des objectifs de récompense et à l'information

Les fournisseurs d'énergie doivent développer et appliquer des plans tarifaires flexibles et dynamiques, qui incitent à diminuer la consommation d'électricité et les dépenses d'énergie. La combinaison avec un système de bonus, récompensant la réalisation des objectifs d'économie, permet d'améliorer l'acceptation de cette tarification.

L'approche consistant à proposer des sources d'énergie renouvelables – avec le surcoût associé – en guise d'offre standard, qu'il faut expressément décliner pour bénéficier de sources d'énergie conventionnelles à un prix inférieur, fait l'objet d'une large acceptation. Les offres de ce type, appelées « green defaults » (c'est-à-dire solutions vertes par défaut), peuvent dans un premier temps être rapidement introduites par les distributeurs d'énergie. Pour faire progresser la transformation du système énergétique, d'autres nouvelles formes de tarification sont toutefois nécessaires. Les effets sont les plus marquants avec les systèmes tarifaires qui appliquent des coûts supplémentaires lorsque la consommation augmente. Ceux-ci ne sont toutefois pas très populaires auprès de la population et des milieux économiques. Des récompenses – par exemple lorsque les objectifs d'économie d'énergie sont atteints – peuvent contribuer à surmonter cet obstacle. Les fournisseurs d'énergie sont appelés à développer des modèles de tarification correspondants (systèmes de bonus-malus) pour les différents vecteurs d'énergie. Les consommateurs doivent pouvoir opter pour ces modèles tarifaires en guise d'alternative aux tarifs existants. L'objectif visé et le bonus (ou le malus) sont déterminés au cas par cas entre le fournisseur d'énergie et les consommateurs. Ces derniers se montrent bien disposés à recourir à ce type de tarifs. Ces approches contribuent également à atténuer les pointes de consommation d'électricité et à configurer le système énergétique de façon moins coûteuse. Plus le système énergétique est axé sur les sources d'énergie renouvelables et la production décentralisée d'énergie, plus la coordination entre l'offre et la demande est importante. Il s'agit de s'assurer que les signaux de prix parviennent bien aux ménages. Cela signifie également que les différences de tarif doivent être assez élevées pour que les consommatrices et les consommateurs modifient leur comportement en conséquence et acquièrent des équipements automatisés, capables d'interpréter automatiquement ces signaux.

Acteurs : fournisseurs d'énergie / administrations publiques

Transmettre des connaissances de manière neutre et ciblée

La diffusion de connaissances et d'informations doit employer des stratégies innovantes pour prendre en compte les niveaux de connaissance et de motivation variables des différents groupes de population. Les autorités fédérales et cantonales, les villes et les communes, les associations et le secteur économique doivent informer sur le fonctionnement des technologies et des instruments d'encouragement et d'incitation, et communiquer de façon convaincante sur le fait qu'une large partie du potentiel d'efficacité énergétique peut être mise à profit sans sacrifice et sans perte de confort : gagner en efficacité énergétique ne signifie pas perdre en confort.

Les citoyennes et citoyens suisses agissent à la fois comme des actrices et acteurs qui prennent au quotidien des décisions liées à l'énergie, et comme des électrices et électeurs participant activement à la politique énergétique. Pour prendre ces décisions et adopter un comportement approprié en matière d'énergie, ils doivent disposer de connaissances sur les problématiques associées à la consommation d'énergie. Or, la population souffre parfois d'un criant manque de connaissances à cet égard. Une information neutre et à long terme de la population, mais aussi des professionnels et des milieux politiques est essentielle pour permettre une analyse différenciée des projets relatifs à l'énergie. Les campagnes d'information et de sensibilisation doivent tenir compte de façon ciblée du stade où se trouve chaque groupe cible dans sa progression entre « savoir », « vouloir » et

« agir ». Une information ciblée des groupes visés apporte les connaissances requises là où un besoin existe, en fonction de chaque situation.

En raison de leur rôle déterminant dans la volonté et l'action individuelles, les pratiques et normes sociales constituent un point de départ potentiel. Une approche prometteuse est par exemple l'intégration des changements de comportement en matière d'énergie dans des communautés existantes, comme des clubs sportifs et des associations de quartier, et leur couplage à des aspects liés à la qualité de vie (« avantages connexes »). Dans tous les groupes sociaux, les modèles revêtent un rôle important dans la formation de l'opinion. Les expériences positives – si possible au plus près du milieu de vie – renforcent aussi bien l'acceptation des nouvelles technologies que la disposition à changer de comportement. Les installations pilotes exemplaires facilitent par exemple le développement de systèmes multiénergies décentralisés (DMES).

Acteurs : associations

Laisser les associations prendre davantage de responsabilités

Les associations échangent étroitement avec leurs membres et disposent de connaissances spécifiques à leur secteur, susceptibles de faire progresser la transformation du système énergétique. Elles devraient tirer profit de l'importance de leur rôle dans les processus de décision politiques pour convaincre leurs membres de soutenir des solutions développées en commun !

Les associations disposent de vastes réseaux au sein de l'économie et de la société, ainsi que d'une large confiance de la part de leurs membres. Dans le cadre de processus participatifs, de procédures de consultation, du parlement et de la démocratie directe, elles jouissent d'opportunités de participation aussi nombreuses qu'importantes. Cela leur permet de contribuer au développement de solutions prenant en compte les normes juridiques d'exploitation et de protection de l'environnement pertinentes. Pour les associations, cette participation active implique également l'obligation de répondre à des solutions développées conjointement vis-à-vis de leurs membres. Même les associations locales qui ne sont pas directement concernées par les questions énergétiques peuvent endosser un rôle important. Elles ont la capacité de sensibiliser leurs membres à l'impact énergétique de leurs actions quotidiennes et d'améliorer l'acceptation des changements de comportement.

Bibliographie

Les projets de recherche cités sont indiqués dans les notes de bas de page entre crochets.

Aarts H., Verplanken B., van Knippenberg A. (1998): Predicting behavior from actions in the past: repeated decision making or a matter of habit? Dans: Journal of Applied Social Psychology 28, 1355-1374.

AES (Association des entreprises électriques suisses) (2018): Électricité issue de la biomasse.

ARE (Office fédéral du développement territorial) (2017): Conception énergie éolienne - Base pour la prise en compte des intérêts de la Confédération lors de la planification d'installations éoliennes. ARE, Berne.

Balthasar A., Schreurs M., Varone F. (Guest Editors) (2020): Journal of Environment and Development. Special Issue on Energy Transition and Federalism, https://journals.sagepub.com/loi/jeda.

Balthasar A., Strotz C. (2017): Akzeptanz von erneuerbaren Energien: Erfolgsfaktoren für Infrastrukturprojekte. Dans: Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE, Hrsg.): bulletin.ch, 10/2017, 20-23, Aarau.

Balthasar A., Walker D. (2015): À elles seules, les taxes d'incitation ne suffisent pas. Dans: La Vie économique, 88 (6), 44-47.

Barry M., Betz R., Fuchs S., Gaudard L., Geissmann T., Giuliani G., Hediger W., Herter M., Kosch M., Romerio F., Schillinger M., Schlange L., Schuler C., Schumann R., Voegeli G., Weigt H. (2019): The Future of Swiss Hydropower: Realities, Options and Open Questions, Final Project Report.

Beck U. (1986): Risikogesellschaft: auf dem Weg in eine andere Moderne. Suhrkamp, Frankfurt a.M.

Bice D. (s.a.), dans: *EARTH 104 Energy and the Environment* (open education courseware), College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State University.

Bracco S., Delfino F., Pampararo F., Robba M., Rossi M. (2013): The University of Genoa smart polygeneration microgrid test-bed facility: The overall system, the technologies and the research challenges. Dans: Renewable Sustainable Energy Reviews 2013, 18, 442-59. doi:10.1016/j.rser.2012.10.009.

Carlisle R. P. (1997): Probabilistic Risk Assessment in Nuclear Reactors: Engineering Success, Public Relations Failure. Dans: Technology and Culture. The International Quarterly of the Society for the History of Technology 38 (4), 920-941.

Cieslik T., Knüsel P (2018): Lieber freiwillig als mit Zwang, Interview mit Andreas Meyer Primavesi und Milton Generelli. Dans: TEC21 31-32-33, 25.

Cieslik T., Knüsel P. (2018): 20 Jahre Minergie: «Lieber freiwillig als mit Zwang» (entretien avec Andreas Meyer Primavesi et Milton Generelli, association Minergie). Dans: TEC21 31-33, 25.

Conseil fédéral (2012): Rapport explicatif concernant la Stratégie énergétique 2050.

Conseil fédéral (2013): Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050. Berne.

DETEC (Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication) (2001): Plan sectoriel des lignes de transport d'électricité (PSE). Éd.: Office fédéral de l'énergie (OFEN), Office fédéral du développement territorial (ARE).

Ebers Broughel A., Stauch A., Schmid B., Vuichard P. (2019): Consumer (Co-)Ownership in Renewables in Switzerland. Dans: Lowitzsch J. (Éd.) Energy Transition, 451–476. Palgrave Macmillan, Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-93518-8

EEA (European Environment Agency) (2005): Household consumption and environment. EEA Report 11, European Environment Agency, Copenhague.

Eicher + Pauli (2018): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien. Édition 2017. Éd.: Office fédéral de l'énergie. Berne.

EKZ (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich) (2018): Energiezukunft: Grösste Batterie in Betrieb. Communiqué de presse du 15 mai 2018.

ElCom (Commission fédérale de l'électricité) (2018): System Adequacy 2025 – Étude sur la sécurité de l'approvisionnement en 2025.

EnDK (Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie) (2014): Consommation énergétique des bâtiments. Faits et chiffres. Berne. Gugerli D. (1996): Redeströme: Zur Elektrifizierung der Schweiz 1880-1914. Chronos, Zurich.

Filippini M., Blasch J., Boogen N., Kumar N. (2018): Energy efficiency, bounded rationality and energy-related financial literacy in the Swiss household sector, final report, pp. 52/53

Friedrich R., Bickel P. (2001): The Impact Pathway Methodology. Dans: Friedrich R., Bickel P. (Éd.): Environmental External Costs of Transport. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg.

Gabrielli P., Fürer F., Mavromatidis G., Mazzotti M. (2019): Robust and optimal design of multi-energy systems with seasonal storage through uncertainty analysis. Dans: Applied Energy 238, 1192-210. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.064.

Grosspietsch D., Saenger M., Girod B. (2019): Matching decentralized energy production and local consumption: A review of renewable energy systems with conversion and storage technologies. Dans: Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment 2019:e336. doi:10.1002/wene.336.

Grosspietsch D., Thömmes P., Girod B., Hoffmann V.H. (2018): How, When, and Where? Assessing Renewable Energy Self-Sufficiency at the Neighborhood Level. Dans: Environmental Science and Technology 52, 2339-2348. doi:10.1021/acs.est.7b02686.

Gugerli D. (2004): Kernenergienutzung – ein nachhaltiger Irrtum der Geschichte? Dans: Nova Acta Leopoldina 91, 331-342.

Gugerli D. et al. (2000): Kernenergie in der Schweiz 1950-1990. Dans: Bulletin SEV/VSE 21, 24-27.

Hediger, W. (2017): Nachhaltigkeitsbeurteilung (NHB) von Wasserkraftprojekten, Arbeitsdokument, Mai 2017, Zentrum für wirtschaftspolitische Forschung, HTW Coire.

Helms T. (2016): Asset transformation and the challenges to servitize a utility business model. Dans: Energy Policy 91, 98-112.

Hirschberg S., Bauer C., Burgherr P., Dones R., Simons A., Schenler W., Bachmann T., Gallego Carrera D. (2008): Final set of decision criteria and indicators for assessment of electricity supply options; NEEDS deliverable no. D3-2 – Research Stream 2b, NEEDS Project, Bruxelles.

Hirschberg S., Burgherr P. (2015): Sustainability assessment for energy technologies; in Handbook for Clean Energy Systems, John Wiley & Sons Ltd, New York.

Howlett M. (2005): What is a Policy Instrument? Policy Tools, Policy Mixes and Policy-Implementation Styles. Dans: Eliadis F.P., Hill M.M., Howlett M. (Éd.): Designing government. From instruments to governance, 31-50. McGill-Queen's University Press, Montreal.

IEA (International Energy Agency) (2016): Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems. Paris.

IES (International Energy Agency) (2018): World Energy Balances.

Iten R. Oettli B., Wunderlich A., Hammer S., Cooremans C., Schönenberger A., Ouni M. Brunner C.U., Werle R.: (2017): Management as a Key Driver of Energy Performance (Final Report), INFRAS AG, Zürich.

Kaufmann-Hayoz R. (2006): Human action in context: A model framework for interdisciplinary studies in view of sustainable development. Dans: Umweltpsychologie, 10(1), 154-177.

Kaufmann-Hayoz R., Gutscher H. (2001): Transforming towards Sustainability: An Interdisciplinary, Actor-Oriented Perspective. Dans: Kaufmann-Hayoz R., Gutscher H. (Éd.): Changing Things –Moving People: Strategies for Promoting Sustainable Development at the Local Level, 19-25, Birkhäuser, Bâle – Boston – Berlin.

Kupper P. (2003): Atomenergie und gespaltene Gesellschaft: Die Geschichte des gescheiterten Projekts Kernkraftwerk Kaiseraugst. Chronos, Zurich.

Kupper P. (2003a): Die «1970er-Diagnose: Grundsätzliche Überlegungen zu einem Wendepunkt der Umweltgeschichte. Dans: Archiv für Sozialgeschichte 43, Umwelt: 325-348.

Kupper P., Pallua I. (2016): Energieregime in der Schweiz seit 1800. Office fédéral de l'énergie, Berne; https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/45346.pdf.

Küstenmacher W.T., Seiwert L.J. (2004): Simplify your life. Einfacher und glücklicher leben. Campus, Francfort, New York.

Lange Ch. (2019): Load Shifting and Peak Shaving: Simulation, Prototype Development, Validation. Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology. https://www.energy-seeds.org/content/dam/energy-seeds/de/documents/2016-06-27_Flyer_TF5.pdf (téléchargement: mars 2019).

Linder W., Mueller S.(2017): Schweizerische Demokratie: Institutionen, Prozesse, Perspektiven. Haupt Verlag. Berne.

Linz M. (2017): Wie Suffizienzpolitiken gelingen: eine Handreichung. Wuppertal Special 52. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (Éd.), Wuppertal.

OFEN (Office fédéral de l'énergie) (2013): Perspectives énergétiques 2050. Résumé. Berne.

OFEN (Office fédéral de l'énergie) (2017). Le «Power-to-Gas». Dans: Energeia 2, 5.

OFEN (Office fédéral de l'énergie) (2018): Statistique globale de l'énergie 2017. Berne.

OFEN (Office fédéral de l'énergie) (2018a): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2017. Berne

OFEN (Office fédéral de l'énergie) (2019): www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/approvisionnement-en-electricite.html (accès le: 06.08.2019)

OFS (Office fédéral de la statistique) (2017): Bâtiments selon le système de chauffage et agents énergétiques. OFS su-f-09.02.04.02. Neuchâtel.

OFS (Office fédéral de la statistique) (2018): Statistique de la population et des ménages (STATPOP) 2017. Neuchâtel.

OFS (Office fédéral de la statistique) (2018a): Statistique des bâtiments et des logements 2017. Neuchâtel.

OFS (Office fédéral de la statistique) (2019): www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/energie.html (accès le: 11.9.2019).

OFS/OFROU (Office fédéral de la statistique/Office fédéral des routes) (2019): Parc des véhicules routiers (MFZ) 2018. Berne.

Orehounig K., Mavromatidis G., Evins R., Dorer V., Carmeliet J. (2014): Towards an energy sustainable community: An energy system analysis for a village in Switzerland. Dans: Energy and Buildings 84, 277-286. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.012.

Ott W., Jakob M., Bolliger R., Bade S., Karlegger A., Jaberg A., Berleth H. (2013): Erneuerungstätigkeit und Erneuerungsmotive bei Wohn- und Bürobauten. Éd.: Energieforschung Stadt Zürich, Bericht Nr. 12, Forschungsprojekt FP-2.2.1.

Prognos AG (2012): Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Bâle.

Prognos AG, Infras AG, TEP Energy GmbH: (2013): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2012 nach Verwendungszwecken. Éd.: Office fédéral de l'énergie (OFEN). Ittigen.

Recht der Erneuerbaren Energien, 91-106, Nomos-Verlag, Baden-Baden.

Ricci A. et al. (2009): Policy use of the NEEDS results; NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability». Bruxelles.

Roth S. Hirschberg S., Bauer C., Burgherr P., Dones R., Heck T., Schenler W. (2009): Sustainability of electricity supply technology portfolio. Dans: Annals of Nuclear Energy, 36, 409-416. DOI: 10.1016/j.anucene.2008.11.029.

Rütter H., Staub P. (2018): Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Immobilienwirtschaft. HEV Suisse, Zurich.

Sachs W. (1993): Die vier E's: Merkposten für einen massvollen Wirtschaftsstil. Dans: Politische Ökonomie 33, 69-72.

Sager F. (2014): Infrastrukturpolitik: Verkehr, Energie und Telekommunikation. Dans: Knoepfel P., Vatter A., Häusermann S., Papadopoulos Y., Sciarini P. (Éd.): Manuel de la politique suisse, 721-748, NZZ Libro, Zurich.

Sahakian M., Bertho B. (2018): L'électricité au quotidien: le rôle des normes sociales pour la transition énergétique suisse. Genève. (https://www.unige.ch/sciences-societe/socio/files/9415/3502/7352/Brochure_PNR71_DEF.pdf)

Salm S., Hille S.L., Wüstenhagen R. (2016): What are retail investors' risk-return preferences towards renewable energy projects? A choice experiment in Germany. Dans: Energy Policy 97, 310-320.

Salm S., Wüstenhagen R. (2018): Dream team or strange bedfellows? Complementarities and differences between incumbent energy companies and institutional investors in Swiss hydropower. Dans: Energy Policy 121, 476-487.

Schenler W., Hirschberg S., Burgherr P., Makowski M., Granat J. (2009): Final report on sustainability assessment of advanced electricity options, NEEDS deliverable no. D10.2-Research stream 2b, NEEDS project. Bruxelles.

Schneidewind U., Zahrnt A. (2013): Damit gutes Leben einfacher wird: Perspektiven einer Suffizienzpolitik. Oekom, Munich.

Schweizer-Ries P. (2009): Ein Verhaltensmodell zum Umdenken und Umlenken. Nachhaltige Konsummuster aus umweltpsychologischer Sicht. Dans: Müller M. (Éd.): Nachhaltigkeit: Burnout eines revolutionären Anspruchs? Umwelt-Wirtschaft-Soziales: Zuspitzung eines Dauerkonflikts, 101-116. Loccum, Rehburg.

Stadelmann-Steffen I., Ingold K., Rieder S., Dermont C., Kammermann L., Strotz C. (2018): Acceptation des énergies renouvelables. Berne.

Stengel O. (2011): Suffizienz: Die Konsumgesellschaft in der ökologischen Krise. Wuppertaler Schriften, Wuppertal.

SuisseEnergie, OFEN (Office fédérale de l'énergie) (2017): Géothermie en Suisse: Une source d'énergie polyvalente. Berne.

SuisseEnergie, OFEN (Office fédérale de l'énergie) (2018): Véhicules à haute efficacité énergétique – Tendances du marché 2018. Berne.

SuisseEnergie, OFEN (Office fédérale de l'énergie) (2018a): Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz. Édition 2017. Berne.

Thaler R.H., Sunstein C.R. (2009): Nudge. Émotions, habitudes, comportements: comment inspirer les bonnes décisions. Vuibert, Paris.

Ulli-Beer S., Hettich P., Kratz B., Krause T., Kubli M., Walther S., Kobe C. (2016): Netznutzungstarife im Zielkonflikt: Anreize für den Ausbau erneuerbarer Energien versus Verursachergerechtigkeit, SCCER CREST (Éd.) White Paper 2.

Verloop J. (2004): Insight into Innovation. Elsevier B.V.

Volkart K., Weidmann N., Bauer C., Hirschberg S. (2017). Multi-criteria decision analysis of energy system transformation pathways: A case study for Switzerland. Dans: Energy Policy, Vol. 106, 155-168. doi: 10.1007/978-3-658-27041-4_9.

Wallerand A.S., Moret S., Kantor I., Butun H., Kermani M., Santecchia. A, Maréchal F. (2018): Energy saving potentials in the Swiss industry toward the goals of ES2050, EPFL, Lausanne.

Wildi T. (2003): Der Traum vom eigenen Reaktor: Die schweizerische Atomtechnologieentwicklung 1945-1969. Chronos, Zurich.

Wissen Hayek U., Spielhofer R., Luthe T., Salak B., Hunziker M., Kienast F., Thrash T., Schinazi V., Steiger U., Grêt-Regamey A. (2019): Stratégie paysage pour systèmes d'énergies renouvelables. Résultats, conclusions et projet de recommandations. Zurich.

Wüstenhagen R., Wolsink M., Bürer M.J. (2007): Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Dans: Energy Policy 35(5), 2683-2691.

www.enff.info: https://eneff-industrie.info/quickinfos/energi-eintensive-branchen/einsparerfolge-sichtbar-gemacht.

Zoellner J., Schweizer-Ries P., Rau I. (2012): Akzeptanz Erneuerbarer Energien. Dans: Müller T. (Éd.): 20 Jahre.

Annexe

Comité de direction du PNR 70

Pr em. Dr Hans-Rudolf Schalcher, EPF Zurich (président)

Pr em. Dr Göran Andersson, EPF Zurich

Pr em. Dr René L. Flükiger, Département de Physique de la Matière Condensée (DPMC), Université de Genève

Pr em. Dr Beat Hotz-Hart, Université de Zurich (membre du Comité de direction du PNR 71 et siège au Comité de direction du PNR 70)

Dr Tony Kaiser, E-Consulting, Bülach

Pr Dr-Ing. Matthias Kleiner, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), Université de Dortmund

Pr em. Dr Martha Lux-Steiner, Centre Helmholtz de Berlin/ Université libre

Pr Dr Dimos Poulikakos, directeur du LTNT, laboratoire de thermodynamique dans les technologies émergentes EPF de Zurich (jusqu'au 30 avril 2019)

Dr Jan van der Eijk, Technology and Business Innovation Consultant, Dordrecht

Délégués de la Division Programmes du Conseil national de la recherche pour le PNR 70

Pr Dr Peter Chen, Laboratoire de chimie organique (LOC), EPF Zurich (jusqu'au 31 janvier 2015)

Pr Dr Dimos Poulikakos, directeur du LTNT, laboratoire de thermodynamique dans les technologies émergentes, EPF de Zurich (à partir du1er mai 2019)

Pr Dr Frank Scheffold, Département de physique, Université de Fribourg (du 1er février 2015 au 30 avril 2019)

Représentants de la Confédération dans le PNR 70

Dr Sebastian Friess, chef de la politique de l'innovation, Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI), Berne (jusqu'au 30 avril 2017)

Dr Rolf Schmitz, chef de la section Recherche énergétique, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne

Comité de direction du PNR 71

Pr Dr Andreas Balthasar, Département de science politique, Université de Lucerne (président)

Dr Konrad Götz, Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Francfort-sur-le-Main

Pr em. Dr Beat Hotz-Hart, Université de Zurich

Pr Dr Miranda Schreurs, Hochschule für Politik München (HfP), Technische Universität München

Pr Dr Petra Schweizer-Ries, Professorin für Nachhaltigkeitswissenschaft an der Hochschule Bochum und apl. Pr für Umweltpsychologie an der Universität des Saarlandes

Pr Dr Frédéric Varone, Département de science politique et relations internationales, Université de Genève (à partir du 1er janvier 2017)

Pr Dr Hannelore Weck-Hannemann, Professur für Politische Ökonomie, Institut für Finanzwissenschaft, Universität Innsbruck

Délégué-e-s de la Division Programmes du Conseil national de la recherche pour le PNR 71

Pr Dr Claudia R. Binder, Laboratoire de relations humaines-environnementales dans les systèmes urbains (HERUS), EPF Lausanne (à partir du 1er janvier 2017)

Pr Dr Frédéric Varone, Départementdes sciences politiques et relations internationales, Université de Genève (jusqu'au 31 décembre 2016)

Représentant de la Confédération dans le PNR 71

Dr Matthias Gysler, chef suppléant de la Division Économie, chef de la section Régulation du marché, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne

Manager des programmes PNR 70 et PNR 71

Dr Stefan Husi, Fonds national suisse, Berne

Équipe du transfert de connaissances et technologie des PNR 70 et PNR 71

Dr Andrea Leu (cheffe de l'équipe), Senarclens, Leu + Partner AG, Zurich

Theres Paulsen, réseau pour la recherche transdisciplinaire td-net, Académies suisses des sciences, Berne (jusqu'au 31 décembre 2016)

Daniel Schaller, Planair SA, La Sagne (TCT Antenne Romande/à partir du 1er janvier 2018)

Dr Oliver Wimmer, CR Kommunikation AG, Zurich

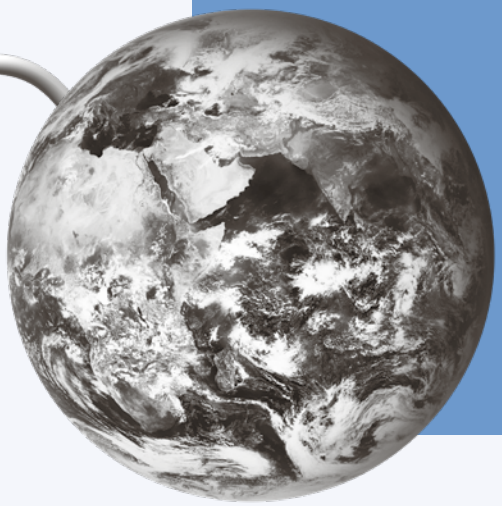
FNSNF
Fonds national suisse
de la recherche scientifique

70 PNR
Virage énergétique
Programme national de recherche

71 PNR
Gérer la consommation d'énergie
Programme national de recherche

pnr-energie.ch

ISBN 978-3-907087-44-2



FNSNF
Fonds national suisse
de la recherche scientifique

70 PNR
Virage énergétique
Programme national de recherche

71 PNR
Gérer la consommation d'énergie
Programme national de recherche