Akademien der Wissenschaften Schweiz
Académies suisses des sciences
Accademie svizzere delle scienze
Academias svizras da las scienzas
Swiss Academies of Arts and Sciences

Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse?

Synthèse






Sommaire

Avant-propos 3

Résumé 4

Une tâche urgente et difficile 6

L'évolution de la demande 8
- Scénarios de la demande d'électricité 12

Les options de la production d'électricité 13
- Comparaison des différentes technologies 17

Transport et stockage de l'électricité 18

Concrétiser la notion de durabilité 23
- Les décisions politiques de principe du Conseil fédéral et du Parlement 27

La position des Académies suisses 29

Conclusion 38

Références 39

La science au service de la société

Les Académies suisses des sciences regroupent les quatre académies scientifiques suisses: l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), l'Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH), l'Académie suisse des sciences médicales (ASSM) et l'Académie suisse des sciences techniques (SATW). Elles englobent également le Centre d'évaluation des choix technologiques (TA-SWISS), Science et Cité, et d'autres réseaux scientifiques.

Les académies scientifiques suisses s'engagent de façon ciblée pour un dialogue paritaire entre la science et la société, et conseillent la politique et la société sur les questions à fondement scientifique qui sont de conséquence pour la société. Elles représentent les sciences de manière transinstitutionnelle et transdisciplinaire. Leur ancrage dans la communauté scientifique leur donne accès à l'expertise et à l'excellence, leur permettant d'apporter un savoir spécialisé au cœur de questions politiques cruciales.

Avant-propos

La Suisse fait face à un problème d'approvisionnement en électricité. Cela est connu depuis longtemps, mais parce que le problème ne se manifestait pas souvent par des événements dramatiques, sa pleine complexité a pendant des décennies été ignorée par la population et les décideurs. De nombreux experts avaient tôt signalé les conséquences de l'inaction, mais leurs mises en garde ont été soit ignorées, soit récupérées de manière sélective à des fins de positionnement politique. L'avarie de la centrale nucléaire Fukushima Daiichi au Japon en mars 2011 a soudainement exacerbé la situation: la sortie du nucléaire semble largement scellée, et la disparition d'une part considérable de l'approvisionnement suisse en électricité qui découle de cette décision oblige le gouvernement, la politique et l'industrie de l'électricité à s'accorder sur une stratégie globale, afin d'assurer la sécurité de l'approvisionnement avec des mesures coordonnées sur le long terme. Comme les conséquences seront considérables pour l'ensemble de la population, une information détaillée et une formation d'opinion démocratique sont indispensables.

Les Académies suisses des sciences souhaitent remplir leur mission de passeurs de savoir indépendants, en présentant et en analysant avec un regard neutre des évolutions possibles à moyen et plus long terme. Dans la mesure du possible, tous les aspects relatifs à l'électricité sont considérés: sa production et son importation, son transport, son stockage et sa consommation. En outre, l'accent est mis sur les critères de la durabilité.

Trois membres des Académies suisses des sciences, l'Académie suisse des sciences techniques (SATW), principale instigatrice, l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) et l'Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH) ont formé un groupe de travail commun, qui s'est consacré au sujet et a rédigé le présent rapport. Vous remarquerez qu'il n'a pas toujours été possible de parvenir à une pleine convergence des opinions. Comme il est d'usage dans le discours public, différents scénarios ont donc été formulés et comparés. L'articulation et la mise en œuvre de solutions garantes de réussite requièrent expertise scientifique, ouverture d'esprit et flexibilité, afin de pouvoir réagir aux influences extérieures changeantes, aux évolutions diverses et aux avancées dans la connaissance.

Ulrich W. Suter
Président de la SATW

Heinz Gutscher
Président des Académies suisses des sciences

> Les hommes comprennent en général très difficilement l'importance d'un petit sacrifice en faveur d'un grand avantage; il est rare de tendre vers un but sans dédaigner les moyens qui peuvent y conduire.
> Johann Wolfgang von Goethe, Les affinités électives, première partie – chapitre VI, 1809 (traduction par Aloïse de Carlowitz, 1844)

Résumé

L'approvisionnement de la Suisse en énergie en général et en électricité en particulier représente pour notre société un défi immense. Les besoins importants de modernisation et d'extension en matière de production et de transport laissent présager un remaniement en profondeur du système électrique. La décision du Conseil fédéral et des Chambres fédérales de sortir progressivement de l'énergie nucléaire et de mettre en œuvre la nouvelle Stratégie énergétique 2050 accentue encore le problème.

Du point de vue des Académies suisses des sciences, ce remaniement doit satisfaire aux critères de durabilité que sont le bien-être humain, la sécurité de l'approvisionnement, la minimisation des risques écologiques, l'efficience économique et l'évitement de risques critiques. En raison des horizons impliqués, des investissements très coûteux doivent être réalisés dans un contexte de grande incertitude. Il faut donc aussi prendre en compte les critères de la flexibilité et de la diversité: le système doit pouvoir être adapté et s'appuyer sur différents piliers.

Par principe, le remaniement du système électrique doit s'opérer tant du côté de la demande que du côté de l'offre sur la base de signaux-prix corrects. Pour ce faire, les prix de l'électricité doivent inclure tous les coûts externes. Les prescriptions légales et les incitations financières ne doivent être utilisées que dans la mesure où les forces du marché ne suffisent pas à atteindre l'objectif.

Les Académies soutiennent les deux objectifs de la nouvelle politique énergétique de la Confédération d'utiliser l'énergie de manière plus efficiente et de développer la production d'électricité renouvelable. Il faut par ailleurs viser une intégration plus poussée de l'approvisionnement en électricité de la Suisse dans le marché européen. En revanche, les avis divergent au sein des Académies quant à savoir si l'énergie nucléaire doit continuer à être utilisée à plus long terme ou non.

Dans le cadre de la présente étude, les Académies traitent des aspects suivants de la politique électrique:

Evolution de la demande

Même si les besoins en électricité devraient continuer à augmenter, il faut ambitionner une évolution de la demande telle qu'elle est postulée dans le scénario «Nouvelle politique énergétique» de la Confédération (voir page 12). La consommation doit être endiguée le plus fortement possible par le biais de mesures d'efficience. En règle générale, plus la consommation d'électricité est faible, plus l'approvisionnement est fiable, économique et respectueux de l'environnement.

Approvisionnement en électricité renouvelable

La Suisse doit faire avancer la production d'électricité renouvelable. Il ne suffit cependant pas de développer les capacités de production. Le rôle de sources d'énergie fluctuantes étant appelé à augmenter, il faut aussi développer les capacités de stockage et adapter le réseau électrique.

Stratégies d'encouragement pour les énergies renouvelables

La rétribution à prix coûtant du courant injecté doit être aménagée de manière plus efficiente et, à moyen terme, complétée par des modèles d'encouragement qui présentent une plus grande proximité au marché et un effet d'incitation à l'innovation plus important.

Aspects d'un approvisionnement en électricité renouvelable à l'étranger

Il est à prévoir que la Suisse demeurera pour un certain temps encore un importateur net d'électricité. Dans la mesure du possible, l'électricité importée doit provenir de sources renouvelables. Afin que les investissements d'entreprises électriques suisses dans des installations à l'étranger puissent se répercuter sur l'approvisionnement de la Suisse, il faut des capacités d'acheminement suffisantes, un marché européen de l'électricité intégré et un accord sur l'électricité avec l'UE.

Production d'électricité fossile

Dans la mesure du possible, il faut renoncer à la construction de centrales fossiles en Suisse. Si elles devaient tout de même être construites, leurs émissions de CO_2 devraient être entièrement compensées, afin que la Suisse puisse atteindre ses objectifs climatiques. Les investissements dans des centrales fossiles à l'étranger ne sont pas judicieux.

Energie nucléaire

Afin que les centrales nucléaires suisses puissent continuer à opérer en toute sécurité jusqu'à leur mise hors service, il faut poursuivre les recherches en matière de sécurité. Ceci vaut aussi pour la recherche en matière de stockage final des déchets radioactifs. Si toutes les options doivent être maintenues, il faut aussi poursuivre la recherche nucléaire, en particulier s'agissant de nouveaux concepts de réacteurs.

Réseau électrique

Le réseau présente aujourd'hui déjà un grand besoin d'extension et de modernisation. La nouvelle politique énergétique crée des exigences supplémentaires. Afin de pouvoir agir à temps, les procédures d'autorisation doivent être raccourcies.

Stockage de l'électricité

Si les nouvelles sources d'énergie renouvelable doivent contribuer en plus large mesure à l'approvisionnement, il faut créer les possibilités de stockage nécessaires. L'accent doit être mis sur le développement des bassins d'accumulation et de l'accumulation d'énergie par pompage. Afin de pouvoir exploiter de manière optimale la production d'électricité décentralisée, il faut aussi poursuivre le développement des autres technologies de stockage.

Efficience et sobriété

Un système électrique durable ne peut être réalisé qu'avec des gains substantiels d'efficience et de sobriété. La Confédération et les cantons doivent créer avec les acteurs impliqués les conditions cadre appropriées.

Libéralisation du marché de l'électricité

L'ouverture du marché pour toutes les catégories de clients doit être mise en œuvre le plus rapidement possible. La société d'exploitation du réseau Swissgrid doit être dotée d'une structure d'entreprise indépendante.

L'approvisionnement en électricité de la Suisse dans le contexte européen

Dans l'intérêt de l'approvisionnement fiable et économique du pays, le système électrique suisse doit rester intégré dans le système européen. Il faut tout mettre en œuvre pour que la Suisse soit raccordée à un éventuel futur réseau européen à très haute tension (super grid). Pour cela, un accord sur l'électricité avec l'UE est indispensable.

Réorientation des entreprises d'approvisionnement en électricité

Les EAE doivent développer de nouvelles stratégies commerciales qui découplent le rendement et la quantité d'électricité vendue. Il faut pour cela des activités et des services axés sur l'efficience.

Recherche, développement et enseignement

La recherche, le développement et l'enseignement relatifs à l'énergie doivent être renforcés. Il faut aussi développer la recherche socio-économique.

Défis

Les Académies signalent que le remaniement du système électrique représente un immense défi économique et socio-politique. L'approvisionnement en électricité n'est pas le seul à devoir être refondu sur une base renouvelable; les combustibles et les carburants fossiles, qui couvrent aujourd'hui la majeure partie de la consommation d'énergie, doivent eux aussi être remplacés. Il n'existe pas de chemin clairement tracé, et toutes les options présentent des avantages et des inconvénients. Afin d'accomplir la tâche qui nous incombe, il faut un dialogue à large assise et des processus d'apprentissage, pour que la nouvelle politique énergétique et les interventions qu'elle implique soient portées par la société de manière collective.

Une tâche urgente et difficile

Dans les années à venir, l'approvisionnement suisse en électricité fait face à un bouleversement fondamental. La production d'électricité indigène et le réseau électrique doivent être modernisés et développés à grande échelle, et adaptés à des circonstances nouvelles. Avec la décision prise l'année dernière par le Conseil fédéral et le Parlement de sortir progressivement de l'énergie nucléaire et de mettre en œuvre la nouvelle Stratégie énergétique 2050, l'urgence et la difficulté de la tâche ont encore augmenté.

C'est aujourd'hui en Suisse un objectif politique communément reconnu qu'à plus long terme, l'approvisionnement en énergie doit être aménagé de manière plus durable. Cependant, la notion de durabilité est influencée par nos valeurs et nos attitudes respectives. Les conceptions concrètes d'un approvisionnement durable en énergie sont donc fort disparates. Etant donné que les répercussions des décisions prises aujourd'hui se feront encore sentir dans un avenir lointain, il nous faut urgemment établir ce que signifie un approvisionnement durable en énergie et comment il peut être atteint.

L'aspiration à une vie décente pour tous mène d'un point de vue global à plus de développement économique et donc à une demande accrue d'énergie. Les sources d'énergie fossiles, qui sont encore majoritairement utilisées pour satisfaire à cette demande, sont les principales responsables du changement climatique d'origine humaine. La demande d'énergie ne peut donc être satisfaite de manière durable et respectueuse du climat que si l'approvisionnement en énergie et l'utilisation d'énergie sont remaniés en profondeur.

Deux axes d'action sont à privilégier: premièrement, la demande d'énergie doit être réduite de manière substantielle par une utilisation plus efficiente et une parcimonie volontaire (sobriété); deuxièmement, l'approvisionnement en énergie doit à l'avenir s'appuyer sur des sources d'énergie renouvelables. Les investissements requis par ce remaniement du système énergétique sont énormes, et il changera en profondeur le secteur de l'énergie et les structures de consommation. Il faut pour cela des conditions cadre politiques accordées à l'international.

Le rôle central de l'approvisionnement en électricité

La Suisse doit urgemment faire face à la question de savoir comment l'approvisionnement en énergie pourrait être organisé sur une base durable. L'approvisionnement en électricité joue dans ce contexte un rôle central: dans les décennies à venir, les centrales nucléaires suisses atteindront la fin de leur durée de vie en termes de sécurité des installations, et les droits de prélèvement d'électricité auprès de centrales nucléaires françaises arriveront à échéance – avec de faibles perspectives de renouvellement. Environ la moitié de l'offre actuelle d'électricité ne sera alors plus disponible. En parallèle, et ce malgré des améliorations de l'efficience, la demande devrait continuer d'augmenter, en raison de l'utilisation de nouvelles technologies nécessitant de l'électricité, de la croissance démographique, de possibilités accrues de consommation, et de la substitution de sources d'énergie fossiles dans les domaines du chauffage (pompes à chaleur) et de la mobilité (véhicules électriques).

L'accident dans la centrale nucléaire japonaise de Fukushima en mars 2011 a donné une nouvelle urgence à la question de savoir comment la Suisse compte assurer son approvisionnement en électricité. La technologie nucléaire a – du moins pour le moment – perdu en acceptation; la disposition à entamer le «tournant énergétique» semble avoir augmenté. Afin de réussir ce tournant énergétique, il faut cependant prendre des décisions sous incertitude. Il faut toujours encourir certains risques, et il n'est pas clair comment réagira le système dynamique constitué par l'être humain et son environnement. Les décisions doivent donc être prises de

telle manière que l'approvisionnement en électricité d'une part demeure assuré et d'autre part puisse être adapté à des conditions cadre modifiées.

De nombreuses questions encore sans réponse

Un certain nombre de questions concrètes se posent: avec quelle offre couvrir la demande à l'avenir? La Suisse souhaite-t-elle construire de nouvelles capacités de production dans le pays même, ou alors faire appel à plus d'importations? Quelles en sont les conséquences pour l'infrastructure de réseau? Et comment la production d'électricité, qui aujourd'hui ne génère en Suisse pratiquement aucune émission de CO_2, peut-elle à l'avenir aussi être conciliée avec les objectifs de politique climatique? Comment encourager les énergies renouvelables de manière efficace et efficiente? Le chemin sur lequel s'engagera la Suisse est-il compatible avec l'évolution au sein de l'UE?

Il faut aussi répondre à des questions d'ordre économique: comment sont réalisés les investissements dans un marché de l'électricité libéralisé, dans lequel production, transport et distribution sont dissociés? A quoi ressemblent les modèles commerciaux futurs des entreprises d'approvisionnement en électricité, si ceux-ci doivent être compatibles avec une production d'électricité décentralisée et renouvelable, une utilisation plus efficiente de l'électricité par les consommateurs, et la maintenance resp. le développement de l'infrastructure de réseau? La Suisse pourra-t-elle continuer à entretenir un commerce d'électricité intense avec l'UE dans ce nouveau contexte?

Contribution à la formation d'opinion

L'approvisionnement en électricité futur de la Suisse dépend en grande partie d'évolutions techniques et économiques dont la Suisse ne peut influencer le cours que de manière restreinte. Les préférences des consommateurs d'électricité individuels et le comportement des producteurs d'électricité et des gestionnaires de réseau en termes d'investissements jouent de même un rôle central. Enfin, les décisions politiques et juridiques influent aussi sur l'avenir de l'approvisionnement en électricité. Ces décisions concernent par exemple l'utilisation efficiente de l'électricité, la production d'électricité renouvelable, la problématique du réglage et du stockage, l'extension du réseau ou la libéralisation du marché de l'électricité.

Les décisions des mois et des années à venir influenceront l'approvisionnement en électricité sur des décennies. La question se pose donc de savoir sur quelles bases poser les prochains jalons. Dans ce contexte, les Académies suisses des sciences entendent assumer le rôle de passeur de savoir indépendant. Avec le présent document, elles souhaitent contribuer à la formation d'opinion, en esquissant les évolutions à moyen et à long terme.



L'évolution de la demande

Ces dernières années, l'électricité est devenue pour notre société un vecteur énergétique toujours plus important. En conséquence, la consommation d'électricité a augmenté de manière continue. La réduction de la demande ambitionnée par le Conseil fédéral dans le cadre de la nouvelle stratégie énergétique ne peut être atteinte que si les différents facteurs techniques, économiques, sociaux et psychologiques qui gouvernent l'évolution de la demande sont influencés avec des mesures efficaces.

Ces dernières années, la consommation d'électricité a augmenté de manière continue. La Suisse a besoin aujourd'hui de 2,4 fois plus d'électricité qu'il y a 40 ans (voir figure 1). Ceci correspond à une progression annuelle d'un peu plus de 2%. Au cours de la dernière décennie, la consommation a augmenté en moyenne de 1,3% par an. Outre la consommation en termes absolus, c'est aussi l'importance relative de l'électricité qui a augmenté: en 2010, sa part à la consommation d'énergie finale était de 23,6%, par rapport à seulement 15,4% en 1970. Cette tendance devrait se maintenir dans les années à venir, étant donné que l'électricité est attrayante pour de nombreuses applications: les appareils et les moteurs électriques présentent une vaste palette d'utilisations, sont sophistiqués au niveau technique, efficients en termes énergétiques, et leur opération est pratiquement exempte d'émissions.

Des facteurs d'influence multiples

La manière dont évoluera la demande dans les années à venir est une question centrale de la politique énergétique. Afin de pouvoir apprécier cette

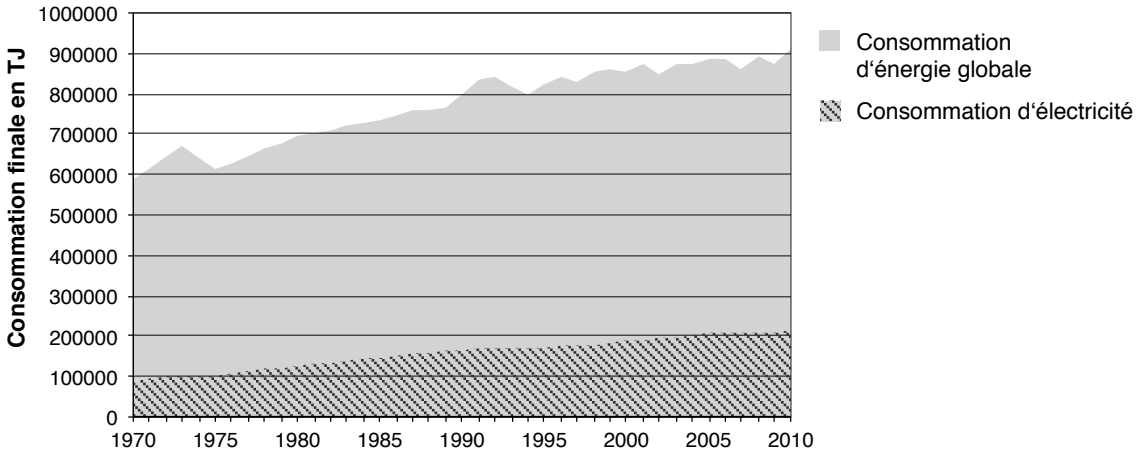


Figure 1: Evolution de la consommation d'électricité et d'énergie globale 1970–2010 (OFEN). Entre 1970 et 1985, les chiffres ne sont pas disponibles pour chaque année; ils ont été établis par extrapolation.

évolution, il faut prendre en compte, en plus de facteurs techniques, des aspects économiques et sociaux.

Facteurs économiques

Pour l'électricité comme pour les autres biens, la demande est influencée par le prix. A court terme, les hausses de prix n'ont qu'un effet limité, étant donné que le seul moyen de réaliser des économies d'électricité est d'utiliser les appareils de manière moins intensive. A plus long terme, les hausses de prix font que les appareils à forte consommation d'électricité sont remplacés par des modèles plus efficients. Toutefois, des prix de l'électricité plus élevés ne mènent pas nécessairement à une demande plus faible. En effet, si les prix des autres vecteurs énergétiques augmentent encore plus, il peut même résulter une demande accrue d'électricité. S'il s'agit de réduire la consommation d'électricité par le biais du prix, le prix de l'électricité devrait donc augmenter plus fortement que celui des autres vecteurs énergétiques.

Les prix actuels de l'électricité ne tiennent pas compte de manière adéquate des coûts externes, comme par exemple les atteintes à l'environnement et à la santé humaine. Les prix ne contiennent pas non plus les préjudices potentiels de centrales nucléaires et de barrages insuffisamment assurés, ou les coûts externes des matériaux utilisés. Ceci revient à accorder une subvention: l'électricité est vendue trop peu chère et donc consommée en quantité plus grande que ne le justifieraient les considérations économiques.

L'électrification croissante et l'augmentation de la production d'électricité renouvelable laissent présager une hausse des prix de l'électricité, tout comme le besoin d'investissements dans le réseau et l'internalisation des coûts externes. Une augmentation réelle des prix de 10% d'ici 2020, 30% d'ici 2035, et 50% d'ici 2050 entraînerait un recul de la demande de 6, 18 resp. 30%. Dans le cas le moins favorable, les consommateurs réagiraient seulement avec un recul de la demande de 3, 9 resp. 15%.

A côté du prix, les revenus, qui augmentent avec la croissance économique, influencent aussi la demande. En Suisse, les revenus ont augmenté au cours des dernières décennies de presque 1% par habitant et par an en termes réels. Si cette tendance se maintenait, la demande d'électricité augmenterait d'ici 2050 de 5 à 10% rien qu'en raison de l'évolution du revenu par habitant. En comparant différents pays, il apparaît cependant qu'un produit intérieur brut élevé n'entraîne pas obligatoirement une consommation d'électricité plus forte, parce qu'il peut être intéressant pour les ménages et l'industrie de passer à des processus moins intenses en énergie.

Facteurs techniques

L'évolution technique influence la demande d'électricité dans deux directions inverses: d'une part, les nouvelles technologies rendent les appareils et les moteurs électriques plus efficients. D'autre part, les nouvelles technologies mènent à de nouvelles applications électriques.

Les différentes applications disposent de potentiels d'efficience très différents. Pour certaines, la technologie disponible aujourd'hui permettrait déjà de réduire les besoins en électricité de jusqu'à 80%. Les produits intermédiaires électrivores pourraient aussi être substitués dans une mesure considérable. Les potentiels d'efficience sont généralement réalisés au fil des cycles de réinvestissement, qui s'échelonnent cependant en partie sur des dizaines d'années. Au total, il résulte un potentiel d'économies annuel estimé de 1,0 à 1,5%, pour autant que les obstacles sociaux et psychologiques soient éliminés.

L'électricité joue un rôle prééminent pour notre société. L'automatisation et la mécanisation de l'économie, les exigences plus élevées en matière de qualité et de confort, ainsi que le vieillissement de la population, mènent à une hausse de la consommation d'électricité. A ceci s'ajoutent des effets de substitution, p.ex. lorsque des chauffages fossiles sont remplacés par des pompes à chaleur. Ces différentes influences devraient générer au total une augmentation des besoins annuels de 0,4 à 0,6%.

Dans le secteur de la mobilité, il y aura une substitution partielle du moteur à combustion par le moteur électrique. En outre, la consommation

d'électricité augmentera en raison du transfert ambitionné de la route au rail.

Facteurs psychologiques

Les individus ne prennent pas toujours leurs décisions de manière rationnelle et cohérente au sens de l'économie classique. Les alternatives d'action, l'environnement social ou le comportement d'acteurs importants peuvent influer sur le comportement de l'individu. De manière intuitive, on pourrait supposer que les personnes à forte conscience écologique utilisent moins d'électricité. Mais ceci n'est pas forcément le cas. L'impact de la conscience écologique sur la consommation d'électricité est ainsi souvent surestimé. Cependant, la probabilité d'une utilisation économe de l'électricité augmente si les acteurs sont informés.

Les individus sont plus fortement disposés à réduire leur consommation d'électricité lorsqu'ils ont le sentiment de contribuer à la réduction de la demande d'électricité. Ils agissent lorsqu'ils se sentent responsabilisés et disposent d'une marge de manœuvre et d'alternatives d'action. Ceci n'est pas toujours le cas: ainsi, les locataires n'ont généralement pas d'influence sur le type d'appareil électroménager qui est acheté.

Le fait que les applications électriques efficientes permettent de réaliser des économies donne lieu à un paradoxe: ces économies libèrent des moyens pour la consommation d'autres biens – ce qui peut déclencher une demande supplémentaire d'énergie. De tels effets de rebond apparaissent presque toujours lorsque des services énergétiques sont fournis de manière plus efficiente. En moyenne, ils réduisent les effets d'économie d'au moins 10%.

Finalement, l'actualisation – c.a.d. le fait d'attribuer aux coûts et aux utilités futurs une valeur moindre qu'aux coûts et aux utilités actuels – influe aussi de manière défavorable sur la réalisation des potentiels d'efficience. Plus le taux d'actualisation est élevé, moins la propension à investir dans des mesures d'efficience électrique est grande. En général, le taux d'actualisation diminue à mesure qu'augmentent les revenus. Les ménages aisés sont donc plus prêts à investir dans des économies d'énergie.

Facteurs sociaux

Les normes sociales influent fortement sur les consommateurs. Elles déterminent donc aussi si l'énergie est utilisée de manière efficiente. La propension à utiliser l'électricité de manière économe dépend de l'existence d'exemples crédibles. Les tendances sociales peuvent être des moteurs importants de la consommation d'électricité: la généralisation d'ordinateurs de tous types ou les activités de loisirs énergivores en sont quelques exemples. La régulation étatique n'a qu'une influence restreinte sur ces tendances. Il faut donc tabler sur des processus d'apprentissage sociaux, qui peuvent être encouragés par des conditions cadre étatiques. Ces processus d'apprentissage incluent aussi la sobriété, qui vise la modification des habitudes de consommation. La sobriété implique le choix volontaire et conscient d'options économes en énergie.

Les répercussions des facteurs psychologiques et sociaux sont difficiles à appréhender de manière quantitative. En supposant que l'efficience, la sobriété, ainsi que des structures et des technologies axées sur la durabilité s'imposeront, le recul de la demande d'électricité qui en résulte peut être estimé d'ici 2035 à 20% et d'ici 2050 à 30%. Dans le cas le moins favorable, d'ici 2050 il ne s'effectuera aucun processus d'apprentissage ayant un effet sur la consommation.

Facteurs socio-démographiques

Ces dernières décennies, la croissance démographique a contribué de manière significative à l'augmentation de la demande d'électricité, et elle devrait demeurer un facteur important. Par ailleurs, la structure de la population va se modifier: la part des personnes âgées augmente, le nombre de membres par foyer diminue, et la surface d'habitation par habitant progresse. Tous ces facteurs tendent à accroître la consommation d'électricité. Il faut s'attendre à une augmentation de 14 resp. 17% d'ici 2035 resp. 2050.

Facteurs environnementaux

La consommation d'électricité est aussi influencée par l'environnement naturel, par exemple la

température ambiante. Si les conditions atmosphériques se modifient dans les années à venir, cela se répercutera aussi sur la quantité d'électricité demandée et sa répartition saisonnière. Certaines applications électriques devraient fortement se généraliser, p.ex. les installations de climatisation et d'irrigation en été ou les installations d'enneigement en hiver.

Fléchissement de la demande d'électricité

La demande d'électricité est donc influencée par de nombreux facteurs. La mise à disposition des prestations énergétiques avec un déploiement d'énergie aussi minime que possible est un objectif central de la politique énergétique. En principe, ceci vaut aussi pour l'électricité. Cependant, une utilisation plus importante d'électricité peut éventuellement mener au bout du compte à une consommation totale d'énergie et à des émissions de CO_2 moindres, p.ex. lorsque des pompes à chaleur opérant à l'électricité remplacent des chauffages fossiles.

Jusqu'à présent, la Suisse n'a guère fait usage du prix de l'électricité comme instrument de restriction de la consommation. Il contient bien des redevances aux collectivités publiques sous forme de tarifs de concessions, de redevances hydrauliques et de redevances promotionnelles. Mais ces redevances ont principalement été introduites pour des raisons financières. La politique pourrait influencer le prix de l'électricité de manière directe par le biais d'impôts sur l'énergie, de redevances ou de subventions, afin de guider la demande. La demande pourrait par ailleurs être mieux adaptée à l'offre au moyen d'une structure tarifaire flexible. De manière très simple, c'est aujourd'hui déjà le cas avec les tarifs heures pleines et heures creuses.

De nouveaux modèles commerciaux pourraient aussi influer de manière positive sur la demande. Des raisons financières comme des exigences de rendement élevées, des budgets d'investissement restreints ou des restrictions de crédit empêchent régulièrement la mise en œuvre de mesures d'amélioration de l'efficience énergétique. Un instrument permettant de faire face à ces difficultés est le contracting, dans le cadre duquel le consommateur final confie à un tiers la gestion de l'énergie.

Un autre obstacle financier est le dilemme de l'investisseur-utilisateur. Si l'utilité d'un investissement visant à économiser de l'énergie ne revient pas à l'investisseur, comme c'est p.ex. le cas pour les appartements de location, l'investisseur n'a que peu d'incitation à acquérir des appareils plus efficients mais plus chers. Un manque de connaissances chez les architectes, les planificateurs et les maîtres d'ouvrage mène aussi à des investissements énergétiquement non efficients. Dans ces cas, des normes énergétiques minimales ainsi que des labels comme l'étiquette-énergie peuvent se révéler efficaces. Les interdictions (p.ex. d'ampoules à incandescence ou d'installations fixes de chauffages à résistance) peuvent aussi influer sur la demande d'électricité.

Si l'utilisation efficiente de l'électricité doit être encouragée de manière résolue, des mesures individuelles ne suffisent pas. Il faut une stratégie globale combinant différents instruments: prescriptions et interdictions, instruments de marché, incitations financières et campagnes d'information.

Scénarios de la demande d'électricité

Ces dernières années, différents scénarios concernant l'évolution de l'approvisionnement en électricité ont été élaborés, en particulier par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Après la catastrophe de Fukushima, l'OFEN a présenté des scénarios révisés. Ceux-ci ont formé la base de la décision du Conseil fédéral de procéder à plus long terme à une sortie du nucléaire.

En ce qui concerne la demande, l'OFEN prend comme point de départ deux variantes de politique: dans la variante «Poursuite de la politique actuelle», les mesures actuelles de politique énergétique sont maintenues. La variante «Nouvelle politique énergétique» est quant à elle axée sur l'objectif de la société à 2000 watts. Elle part du principe que la politique va prendre des mesures fortes, en particulier une taxe d'incitation avec des taux élevés. Il en résulte deux possibilités d'évolution pour la consommation finale d'électricité (voir tableau 1): dans le scénario «Poursuite de la politique actuelle», la demande augmentera d'un tiers d'ici 2050, dans le scénario «Nouvelle politique énergétique», après une augmentation initiale, la demande diminuera d'ici 2050 d'environ 6% par rapport à 2010.

Dans le cadre du projet «Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse?», les Académies ont procédé à leur propre estimation de l'évolution de la consommation (voir tableau 1). Elles aussi ont établi deux évolutions possibles: dans le scénario «Evolution de référence», les facteurs déterminants de la demande d'électricité ne sont pas modifiés par la politique. Le scénario «Evolution guidée», en revanche, suppose l'introduction d'instruments politiques supplémentaires visant à réduire la demande. Dans la variante «Evolution de référence», il faut s'attendre d'ici 2050 à une augmentation de la consommation de 14%; dans la variante «Evolution guidée», la consommation diminuera légèrement d'ici 2035, et remontera d'ici 2050 environ à son niveau actuel.

Les estimations des Académies se situent donc pour l'évolution de référence nettement en dessous du scénario correspondant de l'OFEN. Ceci s'explique en premier lieu par l'hypothèse que les prix de l'électricité augmenteront de toute manière dans les années à venir et qu'une mutation sociale va s'opérer. En revanche, l'estimation «Evolution guidée» correspond tout à fait au scénario «Nouvelle politique énergétique» de l'OFEN.

Tableau 1: Evolution de la demande d'électricité d'ici 2050.

Consommation finale d'électricité (TWh)	2010	2020	2035	2050
Scénarios OFEN				
Poursuite de la politique actuelle	60	66	72	79
Nouvelle politique énergétique	60	62	59	56
Scénarios Académies suisses				
Evolution de référence	60	62	64	68
Fourchette		58–64	54–69	52–76
Evolution guidée	60	57	56	58
Fourchette		55–62	50–65	50–75



Les options de la production d'électricité

Dans son approvisionnement en électricité, la Suisse s'appuie aujourd'hui principalement sur les deux piliers de l'énergie hydraulique et du nucléaire. Comme le potentiel de l'énergie hydraulique est déjà largement exploité et que l'énergie nucléaire n'est pas supposée être disponible à plus long terme, d'autres formes de production devront à l'avenir combler ce déficit. Les alternatives possibles présentent toutes des avantages et des inconvénients spécifiques, et requièrent des ajustements conséquents du système électrique.

La production d'électricité en Suisse repose aujourd'hui principalement sur les deux piliers de l'énergie hydraulique, qui contribue environ 56% à la production totale, et de l'énergie nucléaire, qui représente une part de production de presque 40% (voir figure 2). En revanche, les nouvelles énergies renouvelables – photovoltaïque, éolien, biomasse (déchets compris) – ne contribuent encore qu'environ 2%. Le reste revient à des centrales thermiques conventionnelles et autres.

Jusque récemment, la Suisse était un exportateur net d'électricité, produisant donc sur une année plus d'électricité qu'elle n'en consommait. Ces dernières années, la Suisse devient de plus en plus un importateur d'électricité, et ce non pas comme depuis un certain temps déjà en hiver, mais sur l'ensemble de l'année. D'ici 2050, la situation va encore s'exacerber: les centrales nucléaires existantes seront mises hors service. En outre, les droits de prélèvement privilégiés auprès de centrales nucléaires françaises ne pourront plus être exercés. Il est donc prévisible qu'il faudra mettre à disposition d'importantes nouvelles capacités de production.

Si la décision de principe du Conseil fédéral et du Parlement de sortir du nucléaire est mise en œuvre, un moyen de production jusqu'à présent central ne sera plus disponible à long terme. Les alternatives

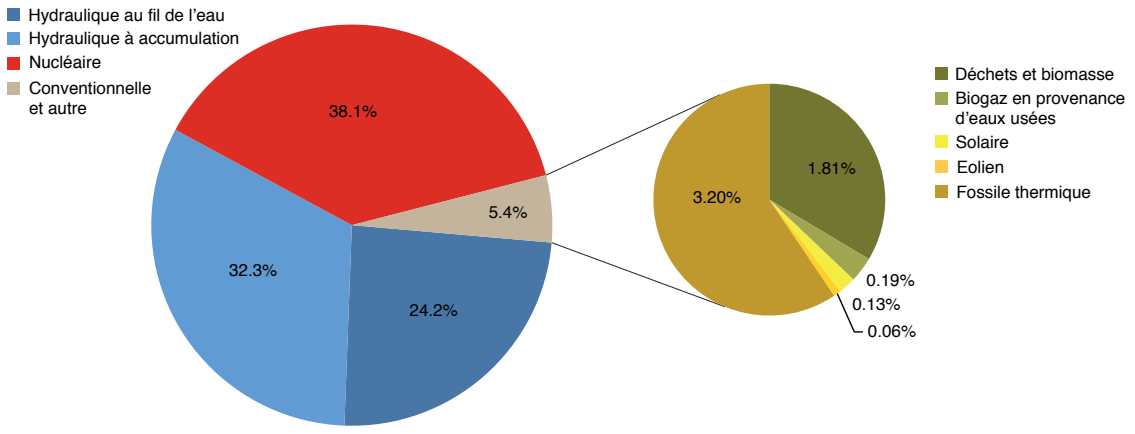


Figure 2: Production d'électricité en Suisse en 2010 (OFEN 2011).

sont le développement de l'énergie hydraulique, la production d'électricité à base de nouvelles sources renouvelables, les centrales fossiles et le couplage chaleur-force. La production d'électricité suisse ne génère aujourd'hui pratiquement pas d'émissions de CO_2. Il dépend des technologies qui seront choisies qu'il en reste ainsi ou non. Le Conseil fédéral soutient sur le principe l'objectif de politique climatique visant à limiter l'augmentation de la température moyenne globale à +2 °C par rapport au niveau préindustriel. A cet effet, les pays industrialisés doivent réduire leurs émissions d'au moins 80% d'ici 2050. Pour la Suisse, cela signifie qu'une bonne moitié de la consommation totale d'énergie doit être économisée ou fournie par des énergies non fossiles. Si les centrales nucléaires étaient remplacées par des centrales fossiles sans que le CO_2 produit puisse être capté et stocké, la production d'électricité émettrait à l'avenir 20% des émissions actuelles de CO_2, et accaparerait ainsi l'ensemble du contingent de CO_2 disponible en 2050.

Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est la plus importante source indigène d'énergie renouvelable et la technologie de production d'électricité avec les émissions de CO_2 les moins élevées. Les centrales au fil de l'eau contribuent environ un quart de la production d'électricité, les centrales à accumulation presque un tiers. Environ 60% de la production est générée en été. La puissance installée de l'ensemble des centrales hydroélectriques est de 14,3 GW, la production d'énergie annuelle moyenne d'environ 36 TWh. L'énergie hydraulique joue un rôle important dans l'économie nationale, en particulier pour les cantons (alpins). A l'avenir, elle pourrait contribuer à équilibrer la production fluctuante d'installations éoliennes et solaires. Cependant, les centrales de pompage-turbinage ne sont rentables que si les déperditions énergétiques de 15–25% peuvent être compensées par des différentiels de prix assez importants.

Comme toute forme de production d'énergie, l'énergie hydraulique présente elle aussi des inconvénients écologiques. Ce sont les répercussions sur les eaux qui pèsent le plus lourd, car les installations d'accumulation modifient le comportement d'écoulement des fleuves. Néanmoins, dans l'ensemble, l'hydraulique se révèle plutôt avantageuse.

Son potentiel techniquement exploitable est estimé à 42 TWh, dont environ 85% (36 TWh) sont déjà utilisés. En tenant compte du fait que la loi sur la protection des eaux exige lors du renouvellement de concessions une augmentation du débit résiduel, le potentiel de développement est de 2 TWh. Le Conseil fédéral vise nouvellement une augmentation de 3,2 TWh. Il faudrait pour cela aussi développer la petite hydraulique, qui pèse plus lourd sur l'environnement par rapport à la puissance installée.

Biomasse

La biomasse (déchets compris) contribue aujourd'hui à la production d'électricité de la Suisse à hauteur d'environ 2% et forme donc la principale nouvelle source d'électricité renouvelable. La majeure partie de l'électricité produite à base de biomasse provient d'usines d'incinération des ordures ménagères (part de la biomasse: environ 50%). L'utilisation de biomasse issue de déchets ou de cultures extensives présente un bilan carbone quasiment neutre. Cependant, cet avantage peut être réduit à néant par des polluants à incidence sur le climat. Comme les coûts de production dépendent fortement du type d'installation, du taux d'utilisation et du combustible, il n'est pas possible de se prononcer de manière générale quant à la rentabilité.

La biomasse peut être utilisée pour la production d'électricité, de chaleur et de biocarburants. Dans les nouvelles perspectives énergétiques de l'OFEN, environ un tiers du potentiel de la biomasse est affecté à la transformation en électricité, sa contribution étant estimée à 3,8 TWh (voir aussi couplage chaleur-force).

Photovoltaïque

La photovoltaïque contribue encore peu à la production d'électricité en Suisse (0,13% en 2010). Elle est actuellement de loin la forme de production la plus chère, mais présente à moyen terme le potentiel techniquement réalisable le plus important. La plupart des cellules sont aujourd'hui produites à base

de silicium cristallin et atteignent des taux de rendement du module de 15–20%. Elles sont concurrencées de manière croissante par des cellules photovoltaïques à couche mince, moins chères et plus respectueuses des ressources. Leur taux de rendement se situe cependant pour le moment seulement autour de 10%. La production annuelle de 1 TWh d'énergie électrique requiert dans le Mittelland environ 7 km^2 de modules. Dans les Alpes, le rendement est nettement plus élevé et par ailleurs mieux réparti au fil des saisons.

La photovoltaïque n'émet pas de CO_2 et pas de polluants atmosphériques lors de l'exploitation. La faible densité d'énergie du rayonnement solaire rend nécessaires des quantités importantes de matériaux, qui sont en partie problématiques en termes écologiques. La fabrication des composantes génère des émissions et des déchets hautement toxiques. La rentabilité de la photovoltaïque s'améliore continuellement. L'industrie solaire s'attend à ce que d'ici 2020 les coûts de production correspondent au prix de l'électricité non renouvelable pour les ménages.

Le potentiel technique de la photovoltaïque est énorme. Les surfaces de bâtiment s'y prêtant sont estimées à 100 à 150 km^2. La technologie actuelle permettrait d'y produire 12 à 18 TWh d'électricité solaire par an. La variante d'offre «Renouvelable» des nouveaux scénarios énergétiques de la Confédération suppose une production d'électricité solaire de 10,4 TWh, nécessitant environ 80 km^2 de modules. A plus long terme, on peut aussi imaginer l'utilisation de surfaces d'infrastructure et de surfaces libres.

Electricité solaire thermique

Contrairement à la production solaire thermique d'eau chaude, déjà utilisée en Suisse, la production solaire thermique d'électricité ne devrait y jouer qu'un rôle mineur en raison de la faiblesse relative du rayonnement solaire direct. En revanche, l'importation d'une telle électricité en provenance de l'espace méditerranéen pourrait fournir une contribution importante au bouquet énergétique futur. Grâce à des accumulateurs de chaleur, les centrales solaires thermiques – réparties sur plusieurs fuseaux horaires et reliées entre elles par des réseaux performants – peuvent livrer de l'électricité pratiquement à toute heure selon les besoins.

Energie éolienne

Au niveau global, l'éolien est aujourd'hui la plus importante nouvelle source d'électricité renouvelable. Début 2011, 28 grandes et 19 petites installations étaient en place en Suisse, présentant une puissance totale de 42,3 MW et une production annuelle escomptée de 0,074 TWh.

Les émissions de CO_2 sont relativement faibles. En revanche, les répercussions sur les paysages, les nuisances sonores et les effets stroboscopiques sont considérés comme problématiques. Les coûts de production dépendent fortement des régimes locaux des vents.

Le potentiel de développement de l'éolien en Suisse est estimé à 4 TWh; il doit être mis en exploitation d'ici 2050 avec 800 installations à grande échelle. C'est aussi ce montant qui est supposé dans la variante d'offre «Renouvelable» des nouveaux scénarios énergétiques de la Confédération. L'éolien peut donc aussi fournir en Suisse une contribution considérable à l'approvisionnement en électricité. Cependant, l'injection est fluctuante, avec pour conséquence que les autres installations de production doivent opérer de manière plus flexible. Ceci nécessite des capacités de stockage, de transport et de réglage.

Géothermie

La Suisse dispose d'un potentiel élevé de production d'électricité au moyen de la géothermie. Cependant, les installations nécessaires n'existent pas encore. Des forages visant la mise en exploitation de ressources géothermiques profondes sont toutefois en cours. La géothermie profonde conventionnelle utilise l'eau chaude souterraine pour produire de l'électricité. Dans le Mittelland, ceci requiert des forages d'environ 3 km. A des profondeurs de forage de 5 km, les températures peuvent atteindre environ 200 °C et le taux de rendement électrique est d'environ 15%. S'il n'y a pas de couches rocheuses aquifères, il faut réaliser deux forages et fracturer la

roche sèche qui les sépare. Un premier projet de ce genre à Bâle a toutefois dû être interrompu à la suite de secousses telluriques.
Les répercussions écologiques se manifestent principalement lors de la construction, en particulier lors de la mise en place du réservoir. Selon la situation géologique, l'eau qui circule peut par ailleurs entraîner des substances toxiques ou radioactives souterraines. Faute d'expériences, il est difficile d'estimer la rentabilité. Le potentiel théorique de la géothermie est très élevé. Le potentiel exploitable de manière rentable est en revanche bien plus faible; d'ici 2050, il devrait se monter à 1,5 à 3,5 TWh.

Energie nucléaire

Les cinq centrales nucléaires suisses fournissent 26 TWh de charge de base par an; à ceci s'ajoutent 17 TWh issus de participations dans des centrales nucléaires françaises. Les centrales nucléaires suisses sont des réacteurs à eau légère de seconde génération mis à niveau en termes de sécurité. Après l'accident de Fukushima, elles ont été soumises à une vérification supplémentaire de leur sécurité. Des installations de troisième génération, dont le design est axé de manière conséquente sur la protection contre les conséquences d'incidents graves, sont en construction dans certains pays. Les réacteurs de quatrième génération font aujourd'hui l'objet de recherche et de développement. Si l'opération des réacteurs ne génère pratiquement aucune émission de CO_2, tel n'est pas le cas des processus situés en amont et en aval visant le conditionnement et la gestion des combustibles.
Les réacteurs nucléaires contiennent un inventaire important de substances radioactives. Vu l'état d'avancement de la technologie, le risque d'accidents graves est faible. Néanmoins, l'envergure potentielle d'un accident majeur est toujours immense, comme l'ont montré les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima. Ceci crée des problèmes d'acceptation au sein de la population. A ceci s'ajoutent les éléments combustibles radioactifs usés et les déchets de leur traitement, qui doivent être stockés de manière sûre et durable. Avec le stockage en profondeur prescrit par la loi, il existe un concept de gestion sûre de ces déchets.

Production d'électricité fossile thermique

Au niveau global, la majeure partie de l'électricité est produite à base d'énergies fossiles, en premier lieu à base de charbon. En Suisse, il n'existe que quelques centrales industrielles fossiles destinées aux besoins propres. Les centrales à gaz à cycle combiné atteignent des taux de rendement élevés allant jusque 60%. Ceux-ci peuvent être augmentés si une partie de la chaleur est exploitée. Les centrales à gaz à cycle combiné peuvent être utilisées tant pour couvrir la charge de base que pour équilibrer la fluctuation d'énergies renouvelables. Les fortes émissions de CO_2 représentent l'inconvénient principal de la production d'électricité fossile. Tant que le captage et le stockage du CO_2 («carbon capture and storage (CCS)») n'est pas encore possible, elles ne se laissent guère réduire.
Les centrales à gaz à cycle combiné présentent de faibles coûts d'investissement. Leur rentabilité dépend fortement des prix des combustibles et des coûts éventuels du CO_2. Le potentiel technique est limité par la capacité des conduites d'alimentation en gaz. Le gazoduc actuel suffit à couvrir les besoins prévisibles de la Suisse. En raison du manque actuel de réservoirs à gaz, les interruptions d'alimentation en gaz en provenance de l'étranger ne peuvent être compensées que pour quelques heures.

Couplage chaleur-force

Le couplage chaleur-force (CCF) produit en même temps de l'électricité et de la chaleur. Le taux de rendement global élevé qui peut en résulter présuppose une reprise assurée de l'électricité et une reprise de chaleur suffisante. Le CCF est fort répandu à l'étranger, mais en Suisse seule environ 2,5% de l'électricité est produite ainsi. Actuellement, 38% de l'énergie nécessaire à l'opération des installations provient de sources d'énergie régénératives. Il est impossible d'indiquer pour le CCF des paramètres écologiques et économiques universellement valables, car il utilise une grande variété de technologies, de combustibles, de tailles d'installation et de formes de production.

Comparaison des différentes technologies

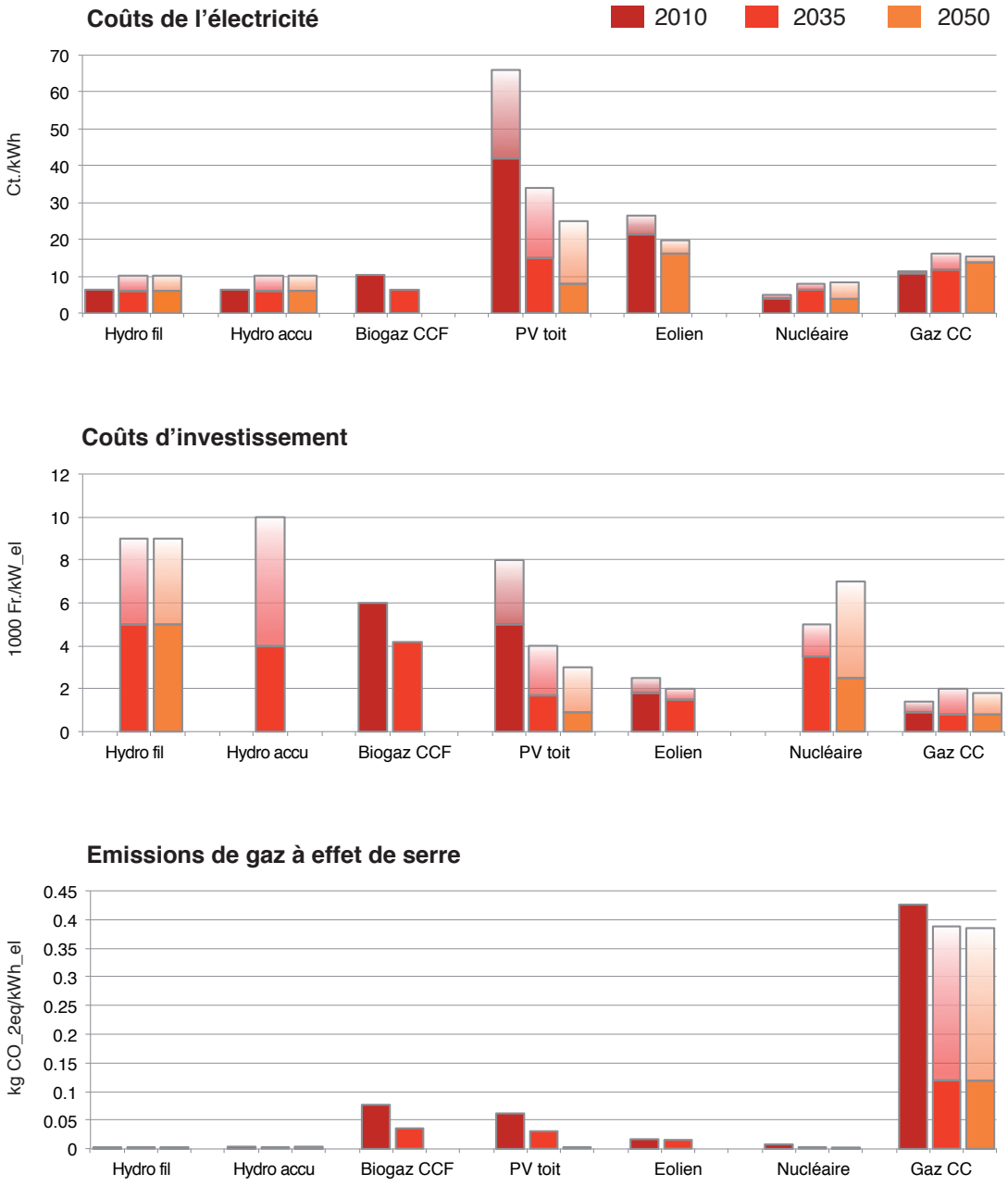


Figure 3: Comparaison de formes de production d'électricité sélectionnées du point de vue des coûts de l'électricité, des coûts d'investissement et des émissions de gaz à effet de serre pour les années 2010, 2035 et 2050. Les nuances plus claires indiquent la fourchette de qualité des installations. Les coûts de l'électricité, les coûts d'investissement et les émissions de gaz à effet de serre actuels et escomptés des principales formes de production d'électricité en Suisse sont basés sur des analyses de cycle de vie. Les faibles taux d'émission des centrales à gaz à cycle combiné (Gaz CC) à partir de 2035 et les coûts plus élevés qui leur correspondent incluent le captage et le stockage du CO_2. Les paramètres d'une installation spécifique peuvent fortement dévier des valeurs indiquées selon son site d'implantation, son taux d'utilisation, sa durée de vie, ses taux d'intérêts, ou en raison de retards dans sa construction. Chaque forme de production présente par ailleurs des caractéristiques de production tout à fait spécifiques. Alors que la consommation d'électricité est la plus élevée en hiver, l'énergie hydraulique et la photovoltaïque produisent le plus en été. L'électricité issue de la photovoltaïque et de l'énergie éolienne est générée de manière fluctuante. Selon le type d'installation, d'autres installations sont par ailleurs nécessaires, comme des réservoirs ou des lignes de courant. (Source: Hirschberg 2010)



Transport et stockage de l'électricité

Le réseau de transport et de distribution de l'électricité joue un rôle central dans le système électrique. Il permet de fournir à l'économie et à la société l'électricité nécessaire et de pratiquer le commerce d'électricité avec l'étranger, si important pour la sécurité de l'approvisionnement. Aujourd'hui déjà, le réseau électrique présente un grand besoin de modernisation et d'extension. A ceci s'ajoute qu'à l'avenir, en raison de la modification des circonstances de production, le réseau devra répondre à des exigences tout à fait nouvelles.

Jusque récemment, la discussion de l'approvisionnement futur en électricité ne mentionnait guère les questions de réseau. Tout au plus des projets isolés de lignes à haute tension faisaient-ils parler d'eux. Aujourd'hui encore, les problèmes sont perçus en premier lieu dans la production et dans les coûts de l'électricité. Mais sans réseau performant, l'économie et la société ne peuvent pas être approvisionnées en électricité. Non seulement le réseau électrique forme la base technique du transport de l'électricité des centrales vers les consommateurs, mais il permet aussi le commerce d'électricité avec l'étranger, si important pour un approvisionnement fiable. Le réseau électrique, qui se compose du réseau de transport et du réseau de distribution, doit pouvoir gérer à tout instant et sans surcharge les flux d'électricité donnés, et les gestionnaires de réseau doivent faire en sorte que l'électricité soit à la disposition des consommateurs à tout moment avec la tension et la fréquence requises.

La mise en œuvre de la nouvelle stratégie énergétique est un défi tout particulier en ce qui concerne le réseau, défi qui ne pourra être relevé qu'au prix d'importants efforts: la consommation finale et la puissance demandée tendent à la hausse, la production s'effectue de manière de plus en plus décentralisée et fluctuante, et dans le contexte de la libéralisation du marché de l'électricité, le commerce d'électricité va continuer à s'intensifier. En outre, il existe aujourd'hui déjà un important besoin de développement et d'ajustement, tant pour le réseau de distribution que pour celui de transport.

Besoin d'extension

La longueur totale du réseau électrique suisse est aujourd'hui d'environ 250 000 kilomètres. Le réseau de transport (220 kV et 380 kV) fait environ 6800 kilomètres de long et forme la colonne vertébrale de l'approvisionnement en électricité. A l'origine, il servait à transporter l'électricité des centrales aux consommateurs. A partir du milieu du 20ème siècle, on a aussi construit de plus en plus de lignes électriques transfrontalières pour l'échange d'énergie avec les pays environnants. Ces lignes permettent le commerce de l'électricité avec l'étranger et sont donc aussi importantes pour la sécurité de l'approvisionnement.

Le réseau de transport, dont la construction remonte en partie à plus de 50 ans, ne répond plus aux exigences actuelles. Tant le réseau d'approvisionnement général que le réseau électrique des CFF doivent être modernisés et développés. Le Conseil fédéral a fixé dans le Plan sectoriel des lignes de transport d'électricité (PSE) les lignes stratégiques pour l'approvisionnement général en

électricité et l'alimentation du réseau ferroviaire, ainsi que les projets d'extension à réaliser de manière urgente.

Le plan du réseau montre les principaux points faibles du réseau de transport (voir figure 4): il manque des liaisons performantes est-ouest, la capacité dans le Valais ne suffit pas au transport de l'électricité qui y est produite, et d'autres lignes doivent elles aussi être renforcées. L'extension du réseau conformément au PSE permet de remédier à certaines congestions essentielles, mais pas à toutes. Les coûts estimés se montent à 6 milliards de francs. Etant donné que le courant est injecté par les installations photovoltaïques au niveau inférieur (local) du réseau et par les centrales éoliennes au niveau du réseau régional, les réseaux de distribution régionaux et locaux doivent eux aussi être développés et ajustés aux nouvelles exigences.

Environ la moitié des coûts assumés aujourd'hui par les ménages pour l'électricité sont des coûts de réseau, la majeure partie générée par les réseaux de distribution. Les modernisations requises entraîneront des coûts supplémentaires, mais elles sont indispensables à un approvisionnement fiable en électricité.

Ce sont surtout les lignes à très haute et à haute tension qui font débat. Elles altèrent les paysages et engendrent des champs électromagnétiques, et se heurtent donc la plupart du temps à la résistance de la population, ce qui mène à des procédures d'autorisation très longues. Souvent, l'exigence se fait entendre de câbler les lignes à haute tension, comme c'est déjà le cas en majeure partie pour les niveaux de tension moindres. De fait, l'étendue du champ électromagnétique est plus faible pour les câbles enterrés que pour les lignes aériennes. Mais le câblage souterrain d'une ligne à haute tension représente également une intervention massive dans le paysage. Dans les discussions, les responsables de projet invoquent généralement le fait que les coûts d'investissement d'un câble excèdent d'un multiple ceux d'une ligne aérienne. En 2011, le Tribunal fédéral a cependant établi qu'il ne fallait pas prendre en compte seulement les coûts d'investissement, mais que les coûts devaient être considérés sur l'ensemble de la durée d'exploitation de la ligne.

Libéralisation du marché de l'électricité

La libéralisation du marché de l'électricité initiée par l'UE, engagée en Suisse en 2008 pour les gros

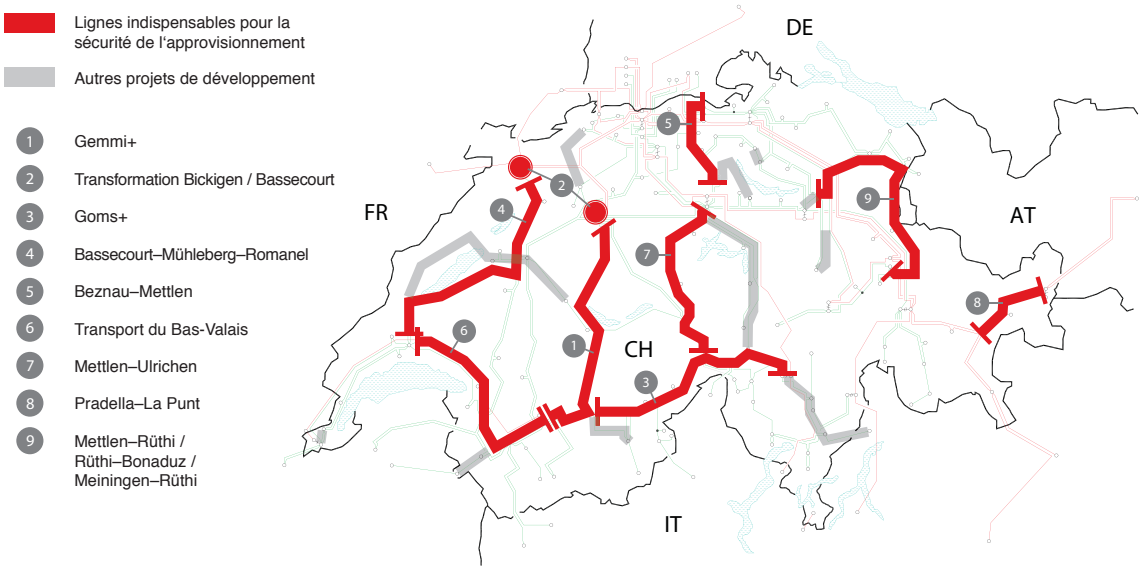


Figure 4: Projets de modernisation et de développement urgents du réseau électrique (Septembre 2011, source: Swissgrid).

consommateurs avec la loi sur l'approvisionnement en électricité, a des répercussions importantes sur l'approvisionnement en électricité. Comme par principe l'accès au marché doit être accordé à tous les intéressés, des congestions peuvent se produire dans les réseaux, qui doivent être gérées par le biais d'enchères. Dans le cadre européen, à l'avenir le commerce simultané d'énergie et de capacités de transport doit permettre une formation commune des prix (enchère implicite). Ceci permet de mieux exploiter les capacités de réseau.

Dans le couplage de marchés, les différents marchés sont regroupés. Les fournisseurs nationaux accordent ensemble l'offre et la demande pour le marché regroupé; la concertation ne s'effectue donc plus comme avant de manière bilatérale à la frontière. L'allocation des capacités transfrontalières s'effectue dans le respect des limites physiques des réseaux et d'une marge de sécurité spécifique à la frontière. Si des congestions apparaissent lors de l'optimisation, des ajustements de prix sont possibles. Un développement plus avancé du couplage de marchés est l'allocation des capacités de réseau basée sur les flux (flow-based). L'avantage de ce type d'allocation est que les marges de sécurité peuvent être réduites, permettant d'augmenter la capacité de réseau transfrontalière disponible et la fiabilité de l'ensemble du réseau. Comme la planification du réseau et l'organisation du marché sont liées, elles ne devraient pas être considérées de manière séparée.

Afin que les consommateurs puissent véritablement déterminer eux-mêmes leurs fournisseurs, il faut séparer la production, le négoce et la commercialisation de l'électricité de son transport. Les consommateurs et les producteurs ont besoin d'un accès non discriminatoire au réseau. Pour la concurrence en matière d'électricité, il est déterminant que le réseau de distribution et de transport, en tant que monopole naturel, fonctionne de manière indépendante des producteurs d'électricité. C'est pourquoi la société nationale (indépendante) d'exploitation du réseau Swissgrid est responsable de l'exploitation et du développement du réseau de transport. Tous les acteurs du marché doivent pouvoir utiliser le réseau à tous les niveaux à des conditions équitables. En même temps, les gestionnaires de réseau doivent être commercialement à même d'opérer le réseau de manière sûre et fiable, et de le développer pour répondre aux besoins; pour cela, les taxes d'utilisation du réseau doivent leur assurer un rendement adéquat. La Commission fédérale de l'électricité (ElCom) est chargée de faire respecter ces règles du jeu. Elle surveille le libre accès au réseau, les tarifs d'utilisation du réseau et la sécurité de l'approvisionnement.

La libéralisation du marché de l'électricité a entraîné un découplage des flux effectifs d'électricité et des flux commerciaux d'électricité. Les flux effectifs d'électricité sont aujourd'hui déterminés de manière croissante par le commerce de l'électricité, qui se base sur les prix de production et de vente et non sur les circonstances physiques. A ceci s'ajoutent d'autres défis: certains pays et régions dépendent fortement d'importations, les grands parcs éoliens régionaux produisent une électricité irrégulière etc. Comme, ces dernières années, les réseaux de transport n'ont été développés de manière suffisante ni en Suisse ni dans le reste de l'Europe, les réseaux opèrent de plus en plus souvent à la limite de leurs capacités physiques, augmentant le risque de pannes, au pire même de blackouts.

Echange et commerce d'électricité

L'échange international d'électricité est de grande importance pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse. En raison du profil saisonnier du débit des eaux, la production d'électricité varie au fil de l'année: en été, la Suisse exporte en règle générale de l'électricité, en hiver elle présente un déficit de production. L'échange d'électricité permet aux entreprises électriques d'exploiter les centrales de manière optimale et de minimiser les capacités de réserve. Pendant longtemps, la Suisse a pu exporter ses excédents de production, et elle profite aujourd'hui encore du commerce d'électricité, en important de l'énergie en période de charge faible et en exportant en contrepartie de l'énergie de pointe. En raison de l'injection croissante d'électri-

cité solaire en Allemagne, ceci n'est plus possible aux périodes où beaucoup d'électricité solaire est générée. Malgré tout, la Suisse joue encore un rôle important dans le contexte européen. Mais à plus long terme, elle ne peut maintenir cette position que si l'électricité peut bel et bien être transportée.

Ces dernières années, le commerce d'électricité avec l'étranger a rapporté au secteur électrique suisse des revenus nets de plusieurs milliards par an. L'intégration de la Suisse dans le réseau d'interconnexion européen est importante non seulement pour l'économie nationale, mais aussi pour la sécurité de l'approvisionnement. La Suisse a grand intérêt à ce que son secteur électrique puisse jouer un rôle important au sein du commerce européen de l'électricité. Ceci présuppose que le réseau de transport suisse demeure intégré dans le réseau européen. Les plans de développement de la Suisse doivent donc être intégrés dans le processus de planification européen.

Toutefois, de plus en plus de décisions importantes pour le secteur électrique suisse ne sont plus prises en Suisse ou dans les comités spécialisés du secteur électrique européen, mais dans les comités de l'UE. Tant que la Suisse n'aura pas conclu d'accord bilatéral sur l'électricité avec l'UE, elle ne sera pas représentée dans tous les comités européens pertinents. Les négociations pour un tel accord avancent difficilement, bien que l'UE ait aussi intérêt à ce qu'elles soient couronnées de succès.

Intégration dans le réseau de l'électricité issue de sources renouvelables

Les nouvelles énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et solaire, fourniront à l'avenir une contribution plus importante à l'approvisionnement en électricité. Elles détermineront donc aussi la structure des réseaux. L'injection des énergies renouvelables s'effectue de manière décentralisée et, pour autant qu'il s'agisse d'électricité d'origine photovoltaïque et éolienne, fluctuante. Dans des sous-réseaux à haute injection décentralisée, les flux de courant peuvent même s'inverser. Ceci pose de nouvelles exigences en matière de gestion des réseaux. Pour les centrales solaires, la puissance dépend de manière linéaire du rayonnement solaire, pour les centrales éoliennes elle augmente à la troisième puissance de la vitesse du vent. Par ailleurs, pour les centrales éoliennes, à des vitesses du vent d'environ 90 km/h, il faut s'attendre à un délestage soudain.

Il n'est possible d'intégrer dans le réseau des quantités importantes d'électricité solaire ou éolienne que s'il existe des capacités de stockage suffisantes. Afin de générer autant d'électricité avec de telles sources d'énergie qu'avec des centrales fossiles ou nucléaires, il faut installer environ quatre fois plus de puissance pour les centrales éoliennes, et environ dix fois plus de puissance pour les installations photovoltaïques. Selon les conditions météorologiques, les centrales photovoltaïques et éoliennes injectent dans le réseau presque rien ou presque 100% de la puissance totale installée. Le réseau doit donc être conçu de manière à pouvoir absorber ces énormes fluctuations de puissance. En outre, il faut disposer de centrales de back-up ou de possibilités de stockage afin d'équilibrer les fluctuations.

En Suisse, lorsque la photovoltaïque et l'éolien produisent peu d'électricité, des centrales à accumulation peuvent produire l'énergie manquante. A l'inverse, lorsque la production dépasse la demande, la puissance excédentaire peut être absorbée par le pompage d'eau, le ralentissement des centrales à accumulation, le déplacement dans le temps de la consommation d'électricité, ou l'exportation. Si cela ne s'avère pas suffisant, les installations photovoltaïques ou éoliennes doivent être déconnectées du réseau. Plus la quantité d'électricité produite de manière fluctuante est élevée, plus tôt le système électrique actuel parviendra aux limites de sa flexibilité si l'accumulation d'énergie par pompage n'est pas développée à grande échelle.

Moyens de stockage

Le stockage d'électricité excédentaire entraîne en tous les cas des coûts et des déperditions d'énergie considérables. Malgré des efforts intenses pour développer de nouvelles technologies de stockage, c'est dans un premier temps toujours l'accumulation

d'énergie par pompage qui représente la solution la plus économique. Autres moyens de stockage: les batteries, les supercondensateurs, la transformation d'électricité en air comprimé, en hydrogène, en vecteurs énergétiques artificiels liquides ou gazeux, ou en énergie mécanique. Toutes ces technologies de stockage ont leurs domaines d'application spécifiques, qui pourraient gagner en importance en cas d'avancées techniques.

Innovations en matière de technologie de réseau

Les réseaux électriques actuels sont principalement des réseaux à courant alternatif. Les gestionnaires de réseau n'ont donc que des moyens limités de contrôler les flux de courant. Ceci peut avoir pour conséquence que certaines lignes de transport soient en surcharge alors que d'autres lignes dans la même zone travaillent en sous-capacité. A l'aide de systèmes de transmission flexible en courant alternatif (dispositifs FACTS, Flexible Alternative Current Transmission Systems), les flux de courant peuvent être influencés de manière active. Ceci permet d'éviter les surcharges des lignes et les déperditions de transport.

Les systèmes à courant continu fournissent une alternative aux systèmes à courant alternatif. En particulier, le courant continu haute tension (CCHT) est utilisé pour les transports d'électricité sur de longues distances, pour les câbles sous-marins et pour l'interconnexion de réseaux asynchrones. Le CCHT requiert toutefois des stations de conversion coûteuses et encombrantes. Comme le maillage est beaucoup plus difficile à opérer pour le courant continu que pour le courant alternatif, le CCHT est aujourd'hui utilisé principalement pour les transports point à point. La transmission à courant continu est aujourd'hui rentable à partir de distances de 500 kilomètres et pour les câbles sous-marins elle peut se justifier à partir de 40 kilomètres. Des systèmes récemment développés réduisent le seuil de rentabilité à environ 150 kilomètres. Des vérifications sont actuellement en cours pour mettre en place un nouveau réseau européen à très haute tension (European DC Super Grid) opéré principalement avec du courant continu. Le raccordement à un tel réseau à très haute tension serait essentiel pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse. Un tel réseau permettrait aussi de transporter vers l'Europe de l'électricité produite par des centrales solaires à grande échelle dans les déserts nord-africains.

Un élément important du réseau électrique futur sera le «smart grid», qui met en réseau la production, la consommation et le stockage d'électricité, augmentant ainsi l'efficience énergétique du réseau. Cependant, il ne s'agit pas à proprement parler d'une révolution, car le réseau actuel comprend déjà de nombreuses composantes «intelligentes». L'intégration d'installations de production d'électricité décentralisées dans des réseaux intelligents permettra au secteur électrique d'accorder la demande à la production fluctuante au moyen de signaux-prix. Les clients auront la possibilité de réagir aux signaux-prix par des reports de consommation dans le temps. L'utilisation de compteurs intelligents (smart metering) permet aux fournisseurs d'électricité de mieux piloter la demande et de parvenir à un lissage de la demande allant au-delà des moyens actuels tels le tarif de nuit et le contrôle radio.



Concrétiser la notion de durabilité

La durabilité est aujourd'hui dans une large mesure reconnue comme objectif de la politique énergétique. Il n'est cependant pas si simple de définir ce que signifie concrètement la notion de durabilité. Le rôle de la science n'est donc pas de donner des recommandations concrètes, mais d'élaborer des évaluations de durabilité qui permettent des décisions rationnelles. Ce faisant, il faut tout particulièrement garder à l'esprit que nous prenons toujours nos décisions dans un contexte d'incertitude.

La durabilité est aujourd'hui reconnue comme un principe directeur politique et social. Le terme «durabilité» a été défini pour la première fois en 1987 dans le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Rapport Brundtland). La durabilité comprend ainsi la justice intra- et intergénérationnelle, un rapport équilibré entre bien-être humain et ressources écologiques limitées et fragiles, ainsi que le maniement conscient des incertitudes et des risques.
La question se pose donc de savoir quels objectifs découlent de cette définition pour l'aménagement du système électrique futur et comment les différents aspects de la durabilité peuvent être utilisés comme base d'évaluation en vue de décisions politiques et sociales.

Considérations de principe

Le Rapport Brundtland ne définit que des objectifs généraux: une société (globale) est durable lorsqu'elle permet à tous les hommes une vie digne et décente, et lorsque cet objectif est réalisé de telle manière que les sociétés futures ne sont pas confrontées à des risques injustifiables lors de la réalisation de leurs propres objectifs. En termes des critères qui en résultent pour l'approvisionnement futur en électricité, les Académies suisses des sciences retiennent comme essentielles les considérations suivantes:

1. Malgré sa définition ouverte, le terme de durabilité ne peut pas être utilisé comme bon le semble. Les évaluations de durabilité évoluent donc dans un cadre plus ou moins étroitement circonscrit. Si l'on suit l'idée établie au Sommet de la Terre de Rio en 1992, il s'agit du bien-être de tous, considération prise de la fragilité et de la finitude des écosystèmes. Les aspects socio-culturels et institutionnels ne peuvent donc pas être exclus de telles évaluations.

2. En ce qui concerne la dimension écologique de la durabilité, il existe aujourd'hui des règles de base bien établies: à long terme, il faut utiliser en premier lieu des ressources renouvelables. Celles-ci doivent être utilisées dans les limites de leur taux de régénération, le rejet de produits de conversion comme par exemple les gaz d'échappement ne devant pas excéder la faculté de régénération des écosystèmes. L'utilisation de ressources non renouvelables est légitime si une substitution adéquate est possible. Les risques majeurs pouvant mener à des dommages irréparables à long terme sont à éviter.

3. La durabilité et donc les évaluations de durabilité s'accompagnent toujours d'incertitude. Les systèmes énergétiques sont complexes, dynamiques

et présentent des effets de feedback (réactions sociales, évolution des technologies, mécanismes de marché, instruments politiques de pilotage, maillage international, comportements individuels). Les processus d'apprentissage sociaux montrent de manière particulièrement évidente comment ces incertitudes limitent les évaluations de durabilité: il est pratiquement impossible de prévoir quels processus d'apprentissage auront lieu dans les domaines de l'évolution des technologies, des instruments de pilotage ou des comportements. Les processus d'apprentissage peuvent s'effectuer de manière itérative ou procéder par avancées révolutionnaires.

4. Même si la définition générale de la durabilité est relativement claire, il reste de grandes marges d'interprétation, comme le montre la discussion sur le nucléaire. Les évaluations de durabilité ne peuvent donc que fixer certains repères. La «certitude» si souvent exigée par la politique ne peut pas être atteinte, même avec le meilleur procédé d'évaluation.

5. Le fait que la durabilité est sujette à l'incertitude ne doit pas mener à la conclusion que l'inaction est la meilleure solution. La conséquence en est bien plus qu'il faut aussi satisfaire à l'exigence de la flexibilité et de la diversité: les décisions sont à prendre de telle manière qu'elles n'entravent pas les innovations et les processus d'apprentissage futurs.

Si la durabilité s'accompagne d'incertitude et si les objectifs de durabilité peuvent être soumis à différentes interprétations, alors la science ne peut pas fournir à la société de recommandations concrètes. Le rôle de la science est plutôt d'analyser de manière critique les objectifs de durabilité négociés au sein de la société et d'en proposer éventuellement encore d'autres. Son rôle est aussi d'identifier, de qualifier et de quantifier les risques, et de proposer des mesures permettant de les minimiser. La science signale par ailleurs les limites des systèmes d'évaluation et d'objectifs, tendant ainsi à un maniement non dogmatique de ces instruments.

Critères de l'évaluation de durabilité

Pour les considérations ultérieures, les Académies suisses des sciences se sont fixé les critères suivants en guise d'aide générale à l'orientation:

- **Bien-être humain:** Le système électrique doit contribuer à la qualité de vie de l'individu. L'accès à l'approvisionnement en électricité est accordé à tous, l'électricité peut être utilisée pour la réalisation de biens matériels et immatériels importants, et les atteintes à la santé sont évitées. Les risques sont répartis de manière équitable entre les générations: la génération actuelle ne devrait pas prendre de décision dont elle serait seule à bénéficier, tandis que les générations à venir en assument les risques. La participation sociale étant un élément constitutif du bien-être, un système électrique durable présuppose son acceptation sociale.

- **Sécurité de l'approvisionnement:** Un approvisionnement en électricité sûr et fiable est une préoccupation centrale de la politique énergétique suisse. A cet effet, les vecteurs énergétiques, les installations de production et les matériaux nécessaires doivent être disponibles en quantités suffisantes. Par ailleurs, le réseau doit demeurer stable si la centrale ou la ligne la plus importante devaient tomber en panne, ou si de grandes quantités d'électricité fluctuante sont injectées.

- **Tolérabilité écologique:** Un système énergétique durable tient compte des risques écologiques. Une place de premier plan revient à la protection du climat: si le changement climatique doit être limité à un degré gérable, les émissions globales de CO_2 doivent être réduites d'ici la fin du siècle à seulement 1 tonne par an et par personne. Pour la Suisse, cela signifie que d'ici 2050 les émissions annuelles de CO_2 provenant de l'utilisation d'énergie doivent dimi-

nuer d'aujourd'hui environ 6 tonnes par habitant (hors trafic aérien) à 2 tonnes (trafic aérien compris).

- **Efficience économique:** L'électricité est à la fois facteur de production et bien de consommation. L'économie et les consommateurs ont un intérêt à ce que l'électricité soit peu coûteuse. Du point de vue de la durabilité, l'électricité ne devrait cependant pas simplement être proposée le moins cher possible. Le prix de l'électricité devrait plutôt refléter les coûts effectifs, y compris les risques. L'efficience économique présuppose d'une part la vérité des coûts et d'autre part que les conditions cadre ne créent pas de distorsions et que la régulation du marché soit aménagée de manière neutre en termes de concurrence.

- **Evitement de risques critiques mettant en danger le système:** Chaque système électrique présente des risques spécifiques. Il relève de la responsabilité de chaque génération de décider de manière autonome du maniement de ces risques. Il ne faut cependant pas s'exposer à des risques qui pourraient entraîner un effondrement du système social.

Etant donné que les décisions en matière d'infrastructure dans le domaine de l'énergie ont une portée de 40 à 50 ans et comportent donc des incertitudes, il faut par ailleurs tenir compte de deux exigences supplémentaires:

- **Flexibilité:** Les chemins sur lesquels nous nous engageons aujourd'hui ne doivent pas exclure des chemins futurs meilleurs. Comme nous ne connaissons pas encore ces chemins meilleurs, le système doit pouvoir être adapté de manière flexible aux nouveaux développements.

- **Diversité:** Comme un système est par principe plus facile à modifier s'il repose sur de nombreux piliers, il faut veiller à assurer la diversité dans l'approvisionnement futur en électricité.

Evaluation quantitative de la durabilité de la production d'électricité

Ces dernières années, la science a développé différents systèmes permettant d'évaluer la durabilité de technologies de production d'électricité. A ce jour, la tentative la plus complète est celle du projet européen «NEEDS», qui porte sur la période allant jusque 2050, examinant les centrales fossiles (houille, lignite et gaz naturel) et les technologies nucléaires (réacteurs à eau pressurisée et surgénérateurs) ainsi que plusieurs ressources régénératives (biomasse, solaire et éolien). Au total, 26 technologies ont été examinées selon leurs circonstances en Allemagne, en France, en Italie et en Suisse. Une étude à large assise a tout d'abord défini une série de critères et d'indicateurs, avant de les quantifier et de les pondérer:

- 11 indicateurs écologiques relatifs aux domaines suivants: ressources énergétiques et richesses du sous-sol, changement climatique, répercussions sur l'écosystème en fonctionnement normal et dans le cas d'un accident grave, ainsi que déchets chimiques spéciaux et déchets à radioactivité moyenne et élevée.

- 9 indicateurs économiques relatifs aux répercussions pour les clients (prix de l'électricité), pour l'économie dans son ensemble (emploi, autonomie de production d'électricité) et pour les fournisseurs d'énergie (risques financiers, exploitation).

- 16 indicateurs sociaux relatifs aux domaines suivants: sécurité et fiabilité, stabilité et légitimité politique, perception des risques (fonctionnement normal et accidents), menace terroriste et qualité de l'environnement de vie (paysages, nuisances sonores).

L'évaluation des technologies de production d'électricité à l'aide de ces indicateurs permet de dégager clairement quelques grandes lignes:

- Aspects écologiques: Les coûts externes totaux sont les plus faibles pour l'énergie hydraulique,

l'énergie nucléaire et l'énergie éolienne. L'énergie nucléaire est cependant contestée en raison des déchets radioactifs et des accidents possibles; les aspects d'aversion au risque et de perception des risques réduisent son acceptation.

- Aspects économiques: Du point de vue des clients et dans les conditions régnant en Suisse, l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique produisent l'électricité la moins chère. Les coûts d'investissement élevés représentent cependant un risque pour les investisseurs. Certaines des nouvelles énergies renouvelables sont commercialement prometteuses, mais soit présentent un potentiel relativement faible (biogaz), soit ne sont pas encore parvenues à maturité (géothermie profonde).

- Aspects sociaux: Ce sont l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire et l'énergie éolienne qui ont le moins de répercussions sur la santé. La photovoltaïque bénéficie de la plus grande acceptation publique et crée le plus d'emplois directs par kilowatt-heure produit, même si tel n'est pas le cas pour tous les secteurs: dans les secteurs à haute intensité énergétique, l'effet peut aussi être négatif.

Au vu des décisions qui nous attendent, les évaluations globales pondérées sont d'un intérêt tout particulier. Elles se laissent par exemple établir à l'aide d'analyses multicritères (MCDA). Selon la pondération des indicateurs, l'évaluation de la durabilité livre des résultats différents; il n'existe donc pas de résultats «justes» ou «faux». La pondération plus forte des aspects économiques se fait en règle générale au détriment des énergies renouvelables. Une pondération plus forte des aspects écologiques se fait en revanche aux dépens des énergies fossiles. Et finalement, l'accentuation des aspects sociaux est défavorable à l'énergie nucléaire.

L'influence de l'évaluation des risques par le cerveau humain

Un facteur décisif du choix entre différentes technologies est la divergence des perceptions des opportunités et des risques dans la population et la politique. L'évaluation d'alternatives et l'opération d'un choix entre elles présupposent en règle générale la considération de critères qui se contredisent en partie.

Lors de ce processus, les spécificités du traitement de l'information par le cerveau humain jouent un rôle central. La recherche psychologique distingue entre un «mode viscéral» rapide (système I) et un «mode analytique» opérant plus lentement (système II). Dans le système I, le traitement de l'information s'effectue automatiquement et mène à des évaluations très rapides, intuitives et émotionnelles. Il est très ancien en termes de notre histoire évolutive et sert en premier lieu à assurer la sécurité personnelle de l'individu en l'aidant à reconnaître et à éviter immédiatement les risques. Des études montrent que l'attention et la crédibilité accordées aux informations concernant les risques sont particulièrement grandes, et que ces informations restent donc mieux ancrées dans la mémoire.

Le système analytique II, dans lequel les faits sont soupesés et soumis à un examen logique, opère consciemment et lentement. Dans de nombreux cas, le système I domine le système II, plus récent en termes de notre histoire évolutive. C'est la raison pour laquelle les individus se trompent souvent dans leurs préoccupations. Cela explique aussi pourquoi les décisions sont parfois prises rapidement sans tenir compte de manière suffisante des conséquences, ou pourquoi les risques à long terme comme le changement climatique apparaissent moins menaçants par rapport à d'autres priorités.

Les décisions rationnelles reposent sur la complémentarité des deux systèmes. Dans les décisions que doivent prendre la population ou la politique, les deux types de traitement de l'information jouent donc un rôle non négligeable.

Les décisions politiques de principe du Conseil fédéral et du Parlement

L'année dernière, le Conseil fédéral et le Parlement ont pris une importante décision de principe: premièrement, l'électricité doit être utilisée de manière plus efficiente et la consommation influencée en direction du scénario «Nouvelle politique énergétique». Deuxièmement, les centrales nucléaires suisses existantes ne doivent pas être remplacées à la fin de leur durée d'exploitation techniquement sûre et fiable.

Pour la production future d'électricité, le Conseil fédéral a défini les trois variantes d'offre «Fossile centralisé et renouvelable», «Fossile décentralisé et renouvelable» et «Renouvelable». Le Conseil fédéral préconise par conséquent un développement de la production d'électricité à base de sources renouvelables ainsi que, si besoin est, de la production d'électricité fossile (en premier lieu les installations de couplage chaleur-force, en second lieu les centrales à gaz à cycle combiné) et des importations. Les trois sous-variantes prévoient le même développement massif de la production d'électricité à base de sources renouvelables, supposant la mise en exploitation quasi complète des potentiels techniques.

Pour les Académies suisses des sciences, la question se pose de savoir comment interpréter cette décision de principe quant aux objectifs de durabilité formulés dans les pages précédentes.

- **Bien-être humain:** Malgré la réduction de la demande qu'il vise, le scénario «Nouvelle politique énergétique» ne doit pas nécessairement signifier un sacrifice en matière de bien-être, pour autant que celui-ci ne soit pas défini de manière purement quantitative par la consommation matérielle. En ce qui concerne les variantes d'offre, il faut prendre en compte les répercussions sur la santé et les paysages, ainsi que les aspects économiques et sociaux indirects. Si la production d'électricité s'appuie majoritairement sur les énergies renouvelables, il faut s'attendre à des prix de l'électricité en général plus élevés et à des pics de prix plus marqués. Par ailleurs, dans l'éventualité d'une structure de réseau inchangée, le risque de pannes de courant augmente. Quant à la production d'énergie fossile, elle ne bénéficie pas d'une acceptation à assez large assise, ce qui devrait mener à des conflits sociaux et politiques. Cependant, les instruments de politique énergétique avec lesquels doit être réduite la consommation selon le scénario «Nouvelle politique énergétique» présentent eux aussi un potentiel de conflit non négligeable.

- **Sécurité de l'approvisionnement:** Pour le moment, il n'est pas clair comment la «Nouvelle politique énergétique» impacterait la sécurité de l'approvisionnement. L'objectif ambitionné d'un bilan énergétique national équilibré ne sera probablement pas atteint. Il reste en particulier à déterminer dans quelle mesure la «Nouvelle politique énergétique» présuppose des importations d'électricité et dans quelle mesure elle entrave ou favorise le commerce d'électricité. Et finalement, il n'est pas clair à quel prix les besoins d'importation prévus peuvent être satisfaits sur le marché européen.

- **Tolérabilité écologique:** Selon les calculs de l'Office fédéral de l'énergie, la variante d'offre «Renouvelable» obtient les meilleurs résultats, avec des émissions de CO_2 en Suisse de seulement 1 million de tonnes en 2050. Si une partie de l'électricité est produite de manière décentralisée dans des installations de couplage chaleur-force, les émissions de CO_2 augmentent à 3 à 4 millions de tonnes. Avec des centrales à gaz à cycle combiné, les émissions de CO_2 passeraient à 5 à 6 millions de tonnes.

- **Efficience économique:** Les répercussions économiques de la «Nouvelle politique énergétique» n'ont jusqu'à présent été que grossièrement estimées. Le Conseil fédéral a ainsi

chiffré les surcoûts économiques d'un renoncement à de nouvelles centrales nucléaires à 0,4 à 0,7% du produit intérieur brut par an, comparé au scénario «Poursuite de la politique actuelle» avec remplacement des centrales nucléaires existantes. Il reste à préciser quels instruments permettraient de réaliser la «Nouvelle politique énergétique». Les variantes qui hâtent le développement des énergies renouvelables comportent le risque d'un versement de subventions entraînant des effets de distorsion sur la concurrence. Il reste également à déterminer dans quelle mesure des solutions de transition doivent être trouvées pour les secteurs à haute intensité énergétique.

- **Evitement de risques critiques mettant en danger le système:** Lors de l'évaluation des risques d'une technologie énergétique, il faut envisager si celle-ci peut représenter une mise en danger du système. Un exemple de risque systémique est un accident nucléaire grave. Une augmentation moyenne de la température de nettement plus de 2 °C représente aussi un risque pour le «système Suisse». Cependant, ces deux risques sont tellement différents qu'ils peuvent à peine être comparés. La mise hors service des centrales nucléaires suisses permet d'exclure la survenue d'un accident nucléaire grave en Suisse. Par contre, la Suisse n'a qu'une faible influence directe sur le changement climatique. Du point de vue de la durabilité, il est problématique d'imposer aux générations futures des risques considérables: ainsi, les déchets nucléaires produits devront en tous les cas être gérés, et le changement climatique touchera les générations futures plus fortement que celle d'aujourd'hui. Par principe, chaque technologie présente des risques: l'énergie hydraulique, par exemple, comporte un potentiel de dégâts important, même s'il est circonscrit dans l'espace et dans le temps. Et les énergies renouvelables entraînent des risques écologiques tels les déchets spéciaux, dont la portée ne peut pas encore être mesurée.

L'évaluation de la décision politique de principe à l'aide des objectifs de durabilité livre un résultat disparate. Il est incontestable que, du côté de la demande, la stratégie d'efficience de la «Nouvelle politique énergétique» concorde avec l'objectif de durabilité visant à utiliser les ressources de manière aussi respectueuse que possible. Cependant, il n'est pas encore clair quelle politique concrète permettrait de la réaliser. Dans ce contexte, il ne faut pas oublier que, si la Suisse présente par rapport à d'autres économies développées une consommation d'énergie et une atteinte à l'environnement et au climat faibles, ce bilan est trompeur: si l'on tient aussi compte de la consommation d'énergie liée aux importations de matières premières, de matériaux et de produits finis, la Suisse se révèle en fait être une société à 9000 watts resp. à 10 tonnes de CO_2.
Le tableau est moins clair du côté de l'offre: les différentes variantes du Conseil fédéral présentent par rapport aux objectifs de durabilité définis des forces et des faiblesses spécifiques. Il reste également largement à déterminer comment mettre en œuvre les différentes variantes d'offre. Et finalement, il n'est pas clair dans quelle mesure la décision politique de principe tient compte de l'aspect central de l'incertitude et dans quelle mesure il satisfait à l'exigence de diversité et de flexibilité. Le remaniement requis du système électrique suisse doit cependant tenir compte de cette ouverture: les décisions que nous prenons aujourd'hui sont des décisions sous incertitude. Même les feuilles de route axées de manière conséquente sur la notion de durabilité et sur ses critères ne sont pas exemptes de risque.



La position des Académies suisses

Les Académies suisses des sciences saluent le fait que la Confédération souhaite créer un cadre clair pour la politique énergétique des années à venir. Elles soutiennent sur le principe l'orientation de la nouvelle politique énergétique visant à utiliser l'énergie de manière plus efficiente et à développer la production d'électricité renouvelable. Un autre objectif important est l'intégration de l'approvisionnement suisse en électricité dans le marché européen. Le renoncement à de nouvelles centrales nucléaires fait l'objet de controverses.

La discussion de l'approvisionnement futur en électricité ne tient généralement compte que de la production d'électricité. Et pourtant, ceci ne prend pas la pleine mesure de la complexité du problème. Des facteurs tels les structures de la demande, le réseau électrique et les relations extérieures déterminent tout autant l'avenir de l'électricité que les nombreuses dépendances et effets de feedback au sein du système électrique.

Les Académies suisses des sciences signalent les défis immenses liés à la nouvelle politique énergétique et attirent tout particulièrement l'attention sur le problème de la mise en œuvre. Elles plaident en faveur d'un dialogue social à large assise, afin de pouvoir élaborer une nouvelle politique énergétique portée par l'ensemble de la communauté. Ce qui suit éclaire certains aspects essentiels – sans ambition d'exhaustivité.

Evolution de la demande

Une évolution de la demande telle qu'elle est postulée dans le scénario «Nouvelle politique énergétique» doit être ambitionnée indépendamment du renoncement décrété à de nouvelles centrales nucléaires.

Pour une structure de production donnée, l'approvisionnement en électricité tend à être plus fiable, plus économique et plus respectueux de l'environnement en cas de faible consommation d'électricité qu'en cas de consommation élevée. En plus de mesures percutantes pour la mise à disposition efficiente d'énergie – qui implique souvent l'utilisation d'électricité – l'atteinte d'une faible consommation requiert aussi des changements de comportement profonds. Mais ceci ne doit pas nécessairement entraîner une diminution de la qualité de vie.

A l'avenir, l'électricité jouera un rôle encore plus important qu'aujourd'hui pour l'approvisionnement en énergie. Afin que la «Nouvelle politique énergétique» puisse se solder par un succès, la demande d'électricité doit reculer resp. nettement moins augmenter que ce ne serait le cas dans l'hypothèse d'une extrapolation de l'évolution passée. Ceci n'est possible que si le prix augmente sensiblement. On peut partir du principe qu'à l'avenir, les prix des vecteurs énergétiques fossiles vont augmenter en termes réels. Ceci devrait aussi se répercuter sur le prix de l'électricité en Suisse. Il n'est cependant pas certain que cette hausse (combinée à d'autres mesures comme p.ex. des prescriptions) suffira à atteindre les objectifs visés. Si cela n'était pas le cas, le prix devrait être augmenté de manière supplémentaire à l'aide d'impôts ou de taxes.

Avec sa décision du 18 avril 2012, le Conseil fédéral a défini un premier faisceau de mesures d'efficience. Aux yeux des Académies suisses des sciences, elles vont dans la bonne direction, en particulier parce qu'elles ne concernent pas seulement l'utilisation d'électricité mais aussi les bâtiments, l'industrie, les services et la mobilité. Cependant, les économies d'électricité ambitionnées par la «Nouvelle politique énergétique» ne sont ainsi atteintes qu'à 55% d'ici 2050. Des mesures supplémentaires sont donc nécessaires. C'est dans cette direction que tend l'examen annoncé d'une taxe sur l'énergie.

Approvisionnement en électricité renouvelable

Les besoins en électricité doivent dans la mesure du possible être couverts par des sources renouvelables. A cet effet, il faut exploiter de manière complète les potentiels suisses de production d'énergie renouvelable écologiquement et économiquement justifiables. Le rôle de sources d'énergie fluctuantes étant appelé à augmenter, il faut aussi développer les capacités de stockage et adapter le réseau électrique.

La mise en place d'un approvisionnement en électricité qui s'appuie en majeure partie sur les énergies renouvelables est un projet ambitieux. Ceci vaut tant pour le développement de l'énergie hydraulique que pour celui des nouvelles énergies renouvelables, dont l'essor ne fait que commencer. Si l'approvisionnement en électricité relevait jusqu'à présent de la seule responsabilité de l'industrie électrique, avec le développement des énergies renouvelables décentralisées, les particuliers sont de plus en plus nombreux à devenir des fournisseurs d'électricité – avec toutes les conséquences que cela entraîne pour le système électrique. Au vu des potentiels techniques existants, un plein approvisionnement de la Suisse à base de sources renouvelables est en principe possible. Mais il ne suffit pas simplement de mettre à disposition certaines quantités d'énergie. La production fortement fluctuante doit aussi pouvoir être intégrée dans le réseau.

Les résistances au sein de la population représentent un défi. Il est à craindre qu'elles ne se renforcent fortement lorsqu'il s'agira de construire des installations éoliennes et photovoltaïques à grande échelle. Si nous ne parvenons pas à élaborer une stratégie portée par la majorité de la population, le remaniement ambitionné du système énergétique est condamné à l'échec.

Le prix de l'électricité attendu pour l'avenir est aussi déterminant pour l'évolution de l'offre. A terme, les nouvelles énergies renouvelables ne s'imposeront à large échelle que lorsqu'elles seront concurrentielles. Il serait économiquement injouable de vouloir parvenir à force de subventions au plein approvisionnement à base de sources renouvelables. Les prix de l'électricité influencent aussi les investissements dans le développement de ces technologies. Sans la perspective d'une hausse des prix future, il n'existe guère d'incitation à l'investissement, avec pour conséquence que certaines réductions possibles des coûts ne sont même pas réalisées.

L'injection croissante d'électricité issue de sources fluctuantes a de fortes répercussions sur le système électrique. Jusqu'à présent, l'offre d'électricité était axée sur les besoins: les centrales au fil de l'eau et les centrales nucléaires couvraient la charge de base, les centrales à accumulation la charge moyenne et la charge de pointe. Avec la hausse de l'injection fluctuante, la part de charge de base diminue. Dans l'éventualité d'un approvisionnement en électricité majoritairement renouvelable, les centrales de charge de base ne peuvent plus produire avec une puissance régulière. Il faut donc des centrales qui puissent être utilisées de manière flexible: à côté des centrales à accumulation, cela inclut surtout les centrales à gaz à cycle combiné et les turbines à gaz. Cependant, l'utilisation flexible réduit leur temps d'exploitation annuel et donc leur rentabilité. Si les installations de back-up ne se justifient pas commercialement, le risque existe qu'on n'y investisse pas assez.

Lors de la législation et de l'organisation du marché de l'électricité, il faut donc garder à l'esprit qu'à l'avenir, l'approvisionnement en électricité reposera en grande partie sur une injection fluctuante.

Stratégies d'encouragement pour les énergies renouvelables

La rétribution à prix coûtant du courant injecté doit être continuellement ajustée aux coûts de production du moment. A moyen terme, elle doit être complémentée, par exemple par un dispositif de quotas avec commerce de certificats ou par un système d'appels d'offres, qui présentent une plus grande proximité au marché et un effet d'incitation dynamique à l'innovation plus important.

Le remaniement du système énergétique est hautement exigeant envers l'instrumentaire de la politique énergétique. A côté d'impôts, de taxes d'incitation et de prescriptions, celui-ci inclut aussi des instruments d'encouragement permettant de soutenir de manière ciblée les énergies renouvelables. Aujourd'hui, en Suisse et dans différents pays européens, c'est la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) qui est établie; elle est efficace pour donner une impulsion initiale aux technologies, mais elle n'est pas efficiente en termes économiques. Les Académies suisses des sciences soutiennent les propositions du Conseil fédéral du 18 avril 2012 visant l'ajustement de la RPC et d'autres mesures d'encouragement des énergies renouvelables.

A moyen terme, il est décisif que l'instrument d'encouragement sélectionné accélère le développement technique et la maturité commerciale des technologies. C'est un dispositif de quotas (avec commerce de certificats) qui permet le mieux d'atteindre cet objectif. Un système d'appels d'offres serait aussi envisageable. Par ailleurs, il faudrait récompenser les formes de production d'énergie qui génèrent une électricité continue ou disponible de manière flexible. A côté du soutien des installations concrètes, il faut continuer à investir dans la recherche et le développement.

Aspects d'un approvisionnement en électricité renouvelable à l'étranger

Dans la mesure du possible, les importations d'électricité doivent provenir de sources renouvelables. Afin que les investissements des entreprises électriques suisses dans des installations à l'étranger puissent véritablement se répercuter sur l'approvisionnement en électricité de la Suisse, il faut des capacités d'acheminement suffisantes, un marché européen de l'électricité intégré et un accord sur l'électricité adéquat avec l'UE.

De plus en plus, la Suisse devient un importateur d'électricité, et ce non pas comme depuis un certain temps déjà en hiver, mais sur l'ensemble de l'année. Ces besoins d'importation vont encore se maintenir pour un certain temps, comme le confirment aussi les scénarios énergétiques du Conseil fédéral. Le renoncement de l'Allemagne, de l'Autriche et de l'Italie à l'énergie nucléaire et la réduction ambitionnée de la production d'électricité fossile en raison du changement climatique permettent de supposer qu'à l'avenir, l'électricité va se raréfier en Europe. Que ce soit pour des raisons de coûts ou de sécurité d'approvisionnement, il n'est donc pas recommandé que la Suisse comble son déficit d'électricité par le seul biais d'importations.

Lorsque les importations sont inévitables, elles ne doivent pas provenir de types d'installations qui ont été rejetés en Suisse. Avec la sortie du nucléaire, l'importation d'électricité nucléaire est aussi peu crédible que l'importation d'électricité de production fossile. Par principe, il faut donc importer de l'électricité de production renouvelable.

Les investissements dans des installations solaires thermiques en Europe du Sud ou dans des parcs éoliens en Europe du Nord deviennent donc – dans la mesure de leur disponibilité – une option méritant réflexion pour les entreprises électriques suisses. Afin que de tels investissements puissent effectivement contribuer à l'approvisionnement en électricité de la Suisse, plusieurs conditions doivent cependant être remplies: il faut des capacités d'acheminement de l'électricité vers la Suisse,

le marché européen de l'électricité doit être intégré, et l'accès aux installations de production en question doit être assuré par un accord bilatéral sur l'électricité. Celui-ci doit tenir compte du fait que la directive européenne sur la promotion des énergies renouvelables (RES) prescrit aux différents pays des objectifs de développement ambitieux. Comme l'UE va exiger des efforts équivalents de la part de la Suisse, l'accord bilatéral sur l'électricité doit reconnaître l'électricité provenant d'investissements suisses dans l'espace européen en tant que production d'origine suisse.

Production d'électricité fossile

Dans la mesure du possible, il faut renoncer à la construction de centrales fossiles en Suisse. Si elles devaient tout de même être construites pour des raisons de stabilité du réseau, leurs émissions de CO_2 doivent être entièrement compensées, afin de ne pas remettre en cause l'atteinte des objectifs climatiques suisses. Les investissements dans des centrales fossiles à l'étranger ne sont pas judicieux.

La Stratégie énergétique 2050 de la Confédération indique que, dans tous les scénarios, il se creuse un déficit d'électricité, qui ne se laisse pas entièrement combler, même par l'action conjuguée de fortes mesures de réduction de la demande et d'un encouragement massif des énergies renouvelables. Comme il est prévu de renoncer à la construction de nouvelles centrales nucléaires, les producteurs d'électricité suisses pourraient se sentir obligés de remplacer les centrales nucléaires par de nouvelles centrales à gaz à cycle combiné ou installations fossiles de couplage chaleur-force.
Les Académies suisses des sciences tiennent une telle esquive pour erronée; elles soutiennent plutôt le développement conséquent de la production d'électricité renouvelable. De leur point de vue, les centrales fossiles sont envisageables seulement comme solution de dernier recours et ne sont admissibles que si elles ne compromettent pas l'atteinte des objectifs climatiques suisses. Pour ce faire, les émissions de CO_2 doivent être pleinement compensées, comme l'exigent la loi sur le CO_2 en vigueur et le Conseil fédéral. Les Académies suisses des sciences doivent cependant prendre acte du fait que, dans son communiqué du 18 avril 2012, le Conseil fédéral juge nécessaire la production d'électricité fossile en vue d'assurer la sécurité de l'approvisionnement.
Les investissements dans des centrales fossiles étrangères représentent une délocalisation de la responsabilité pour le climat et l'environnement, et doivent donc être rejetés d'un point de vue éthique.

Energie nucléaire

Afin que les centrales nucléaires suisses puissent continuer à opérer en toute sécurité jusqu'à leur mise hors service, il faut poursuivre les recherches en matière de sécurité et mettre en œuvre les mesures qui en découlent. Ceci vaut aussi pour la recherche concernant le stockage final des déchets radioactifs et pour les préparatifs de mise en œuvre des concepts de stockage correspondants. L'exigence de diversité et de flexibilité implique également que la recherche nucléaire se poursuive, en particulier s'agissant du développement de nouveaux concepts de réacteur. Elle sert aussi à la formation du personnel spécialisé nécessaire.

La Suisse, densément peuplée, ne peut en aucun cas se permettre un accident de réacteur à répercussions critiques pour le système. Les investissements dans la recherche et les mises à niveau doivent aider à maintenir à un faible niveau les risques des centrales actuelles. Les installations de génération III/III+ sont considérées comme beaucoup plus sûres, mais en raison des décisions politiques de principe et du manque d'acceptation supposé dans la population, elles ne représentent du moins à moyen terme pas une option.
Les déchets radioactifs produits par les centrales nucléaires doivent être confinés pendant très longtemps. Avec le stockage en profondeur, il existe en principe un concept de gestion de ces déchets.

Mais les recherches demeurent nécessaires aussi dans ce domaine.

Réseau électrique

Le réseau présente aujourd'hui déjà un grand besoin d'extension et de modernisation. La nouvelle politique énergétique crée des exigences supplémentaires. Afin de pouvoir agir à temps, les procédures d'autorisation doivent être raccourcies.

Pour la sécurité de l'approvisionnement, un réseau performant est tout aussi important que la production d'électricité, et revêt donc une importance économique considérable. Une résignation consciente aux points faibles du réseau serait irresponsable.
En ce qui concerne le réseau de transport, il existe en raison de l'âge avancé des installations un grand besoin d'investissement dans des modernisations. Des extensions sont par ailleurs nécessaires afin de pouvoir intégrer de nouvelles centrales de pompage-turbinage et remédier à certaines congestions. Le Conseil fédéral a fixé les projets urgents de construction de ligne dans le Plan sectoriel des lignes de transport d'électricité. Ces projets doivent maintenant être réalisés rapidement. Afin de pouvoir procéder à temps aux extensions nécessaires, la procédure d'autorisation doit être raccourcie.
L'intégration efficiente et fiable des injections d'électricité décentralisées et partiellement fluctuantes nécessite d'une part l'extension du réseau existant et d'autre part le développement d'un réseau intelligent (smart grid) au niveau de la distribution. Par ailleurs, avec l'injection croissante dans les niveaux de réseau inférieurs, la coordination entre le réseau de transport et les réseaux de distribution devient plus importante.

Stockage de l'électricité

Si la production d'électricité à base de nouvelles sources renouvelables doit contribuer plus largement à l'approvisionnement en énergie, il faut créer les possibilités nécessaires de stockage centralisé et décentralisé.

La production d'énergie éolienne et photovoltaïque ne fait le plus souvent pas écho à la demande. Etant donné qu'injection et consommation doivent concorder à tout moment, un approvisionnement en électricité qui repose majoritairement sur des sources renouvelables ne peut être réalisé que s'il existe aussi des capacités de stockage suffisantes. Les centrales à accumulation et les centrales de pompage-turbinage joueront donc aussi à l'avenir un rôle important pour l'approvisionnement en électricité. Après la réalisation des installations en cours de construction ou d'étude, la puissance de pompage disponible sera d'environ 5 GW. Dans l'éventualité d'un approvisionnement en électricité pleinement renouvelable, ceci ne suffit pas encore pour valoriser les excédents de puissance issus de l'énergie éolienne et de la photovoltaïque. En outre, il faut à l'avenir transposer plus d'énergie de l'été à l'hiver. Il faut donc augmenter non seulement la capacité de production mais aussi la capacité de stockage.
L'accumulation d'énergie par pompage est aujourd'hui l'option la moins coûteuse de stockage d'électricité. Cependant, son utilisation se modifie: jusqu'à présent, elle servait en premier lieu à valoriser de l'électricité bon marché en provenance de centrales à charbon et de centrales nucléaires. A l'avenir, il s'agira de résorber les excédents de puissance difficilement prévisibles issus de l'énergie éolienne et de la photovoltaïque, et d'injecter une plus grande puissance de réglage. Les conditions économiques de l'accumulation d'énergie par pompage évoluent donc.
D'autres technologies de stockage comme le stockage d'énergie par air comprimé, la production et le stockage d'hydrogène par électrolyse ou les accumulateurs ne sont aujourd'hui concurrentiels que dans des cas particuliers. Le stockage thermique de l'énergie (réservoir de chaleur) est utilisé en standard dans les centrales solaires thermiques et permet de produire de l'électricité pratiquement à toute heure. En cas de production d'électricité fortement décentralisée, un stockage décentralisé semble en principe judicieux.

Efficience et sobriété

La réalisation d'un système électrique durable présuppose une efficience nettement améliorée et une sobriété plus élevée. La Confédération et les cantons doivent créer avec les acteurs impliqués les conditions cadre appropriées.

Si le système électrique doit être refondu sur la base de vecteurs énergétiques renouvelables, l'électricité doit être utilisée de manière nettement plus efficiente qu'aujourd'hui. Afin que la croissance économique, la croissance démographique et l'électrification dans le secteur de la chaleur et des transports n'entraînent pas une hausse de la consommation, il faut dans la mesure du possible réaliser les gains d'efficience et de sobriété. Les facteurs suivants jouent un rôle important dans ce contexte:

- Prix de l'électricité: Si le prix de l'électricité demeure au niveau actuel, les potentiels d'efficience et de sobriété ne seront guère réalisés. Une augmentation marquée des prix est déjà à prévoir lorsque les distorsions du marché auront été éliminées. Si les utilisateurs savent qu'à plus long terme les prix vont augmenter de manière substantielle, ils ont une incitation à investir dans des mesures d'efficience. Cependant, un prix élevé de l'électricité peut aussi mener à un transfert vers les vecteurs énergétiques fossiles.

- Habitudes de consommation: La modification des habitudes de consommation peut contribuer de manière essentielle à une utilisation plus efficiente de l'électricité. A côté de prix de l'électricité plus élevés, une telle modification peut aussi être obtenue par de nouvelles prestations électriques, le «smart metering», ou une évolution des routines quotidiennes et des attitudes sociales.

- Processus d'apprentissage sociaux: Efficience et sobriété n'appartiennent pas encore aux normes sociales fondamentales. Les objectifs visés en matière d'efficience et de sobriété ne pourront cependant pas être atteints sans la formation de nouvelles normes. Ceci est possible à différents niveaux: la qualité de vie n'est plus définie principalement par la consommation de biens, les comportements sobres se voient attribuer un statut social plus prestigieux et les labels énergétiques incitent à utiliser l'énergie de manière économe.

- Instruments politiques: Il n'est possible ni de contrôler ni de prévoir quels processus d'apprentissage sociaux auront lieu. Mais il est possible d'encourager les processus d'apprentissage par des conditions cadre appropriées. En outre, il est aussi possible de mettre en œuvre des mesures ciblées: renforcement continu des normes applicables aux appareils, interdiction de certaines applications électriques ou fléchissement direct de la consommation d'électricité par le biais d'une taxe d'incitation.

Libéralisation du marché de l'électricité

L'ouverture du marché pour toutes les catégories de clients doit être mise en œuvre le plus rapidement possible. La société d'exploitation du réseau suisse Swissgrid doit être dotée d'une structure d'entreprise indépendante.

Depuis 2008, l'accès libre au marché est possible en Suisse pour les gros consommateurs. Il reste maintenant à ouvrir le marché pour tous les autres consommateurs. Il ne s'agit pas seulement de pouvoir librement choisir son fournisseur. Le marché de l'électricité ne peut fonctionner sans distorsions que si les prix de l'électricité reflètent les coûts véritables. Les coûts externes jusqu'à présent non pris en compte doivent donc être intégrés à la formation des prix. C'est ainsi qu'est créée la base économique de la «nouvelle politique énergétique».
La libéralisation du marché de l'électricité requiert la séparation de la production et du réseau, car ce dernier représente un monopole naturel qui doit être

réglementé. La société nationale d'exploitation du réseau Swissgrid entrera en possession du réseau de transport au plus tard en 2013. Afin que le marché fonctionne, il est important que Swissgrid puisse à l'avenir agir indépendamment des producteurs d'électricité et des distributeurs régionaux.
La libéralisation a des répercussions considérables pour le secteur électrique. Avec la mise à part du réseau de transport, sa structure se modifie. La pleine ouverture du marché entraîne de nouvelles relations commerciales entre les fournisseurs et les consommateurs d'électricité, entre autre aussi parce que les consommateurs doivent à l'avenir avoir la possibilité de réagir à des signaux-prix. Et finalement, au vu de la libéralisation et de l'injection croissante d'électricité décentralisée, la question se pose de savoir si l'organisation à très petite échelle du secteur électrique, avec de nombreuses petites entreprises d'approvisionnement en électricité, a un avenir.

L'approvisionnement en électricité de la Suisse dans le contexte européen

Dans l'intérêt d'un approvisionnement fiable et économique du pays, le système électrique suisse doit rester intégré dans le système européen. A cet effet, un accord sur l'électricité avec l'UE est indispensable.

Aujourd'hui, le système électrique suisse fait partie intégrante du marché de l'électricité européen. Pour des raisons techniques, économiques et politiques, ce dernier va fortement évoluer. Ce qui aura aussi des conséquences pour la Suisse: l'évolution au sein de l'UE n'influence pas seulement la législation suisse, mais aussi la sécurité de l'approvisionnement, les flux d'électricité et donc les exigences en matière de réseau de transport. Il est important pour la Suisse d'être raccordée à un futur réseau européen à très haute tension (super grid). Mais la dépendance n'est pas unilatérale: de son côté, le réseau d'interconnexion européen est aussi tributaire d'un système électrique suisse performant.

La Suisse et l'UE ont donc toutes deux un intérêt à collaborer de manière étroite. L'accord bilatéral mentionné plus haut est nécessaire afin que les entreprises électriques et les autorités suisses puissent participer au développement ultérieur du réseau d'interconnexion européen. Si cet accord ne devait pas aboutir, la Suisse ferait face à des risques considérables. Les négociations pour un tel accord sur l'électricité sont en cours mais avancent difficilement. La Suisse n'a ainsi pour l'instant pas réalisé la libéralisation du marché exigée par l'UE. A ceci s'ajoutent deux autres points contentieux: l'acheminement prioritaire d'électricité en provenance de centrales nucléaires françaises à destination de la Suisse et l'adoption de la directive européenne sur la promotion des énergies renouvelables (RES).

Réorientation des entreprises d'approvisionnement en électricité

Les entreprises d'approvisionnement en électricité doivent développer de nouvelles stratégies commerciales qui découplent le rendement et la quantité vendue. Il faut pour cela des domaines d'activité et des services axés sur l'efficience.

Pour réussir, les acteurs économiques doivent savoir s'adapter aux nouvelles conditions cadre. Si le système électrique est remanié de manière à atteindre d'ici 2050 les objectifs formulés au début de ce rapport, les entreprises d'approvisionnement en électricité (EAE) font face à une vaste mission d'ajustement. Même si, en fin de compte, chaque entreprise devra trouver sa propre solution, les points suivants doivent être considérés:

- Structures: On peut se demander si les ajustements nécessaires peuvent être réalisés au sein de la structure existante du secteur électrique, car tant la diversification de la production que l'intégration dans le marché de l'électricité européen entraîneront une modification des conditions cadre.

- Modèles commerciaux: Toutes les EAE doivent se préparer à deux défis majeurs: la libéralisation du marché de l'électricité va se poursuivre. Et si efficience et sobriété deviennent des objectifs centraux, à l'avenir les EAE ne réaliseront plus leurs bénéfices principalement par le biais de la quantité d'électricité vendue, mais grâce à de nouveaux modèles de prestations et de relations clients.

- Investissements: Sans aucun doute, les EAE devront effectuer une grande partie des investissements pour le remaniement du système électrique. La question de savoir où, dans quelles installations et avec quelles stratégies elles investiront demeure au final – dans le cadre fixé par l'Etat – une décision commerciale.

Recherche, développement et enseignement

La recherche, le développement et l'enseignement relatifs à l'énergie doivent être renforcés. Il faut en particulier aussi développer de manière substantielle la recherche socio-économique.

Les considérations précédentes établissent clairement que le remaniement du système électrique nécessitera plusieurs décennies. Les avancées des sciences et de la technologie jouent dans ce contexte un rôle déterminant. Plus on fait avancer la recherche et le développement de manière efficace, plus le processus de remaniement peut s'effectuer de manière économique et écologique.
Il s'agit tout d'abord d'aspects relevant des sciences naturelles et techniques, par exemple de technologies améliorées d'utilisation de l'énergie (photovoltaïque, biomasse) ou de technologies qu'il reste à développer (stockage d'électricité, smart grid, géothermie, réacteurs nucléaires de quatrième génération). Le progrès technique est une condition nécessaire mais non suffisante pour pouvoir améliorer l'infrastructure de mise à disposition et d'utilisation de l'électricité en termes économiques et écologiques.

C'est pourquoi le remaniement du système électrique requiert d'un autre côté aussi une amplification massive de la recherche en sciences économiques et sociales. Les questions d'ordre économique concernent par exemple les répercussions sur l'économie nationale, l'internalisation des coûts externes, ou l'aménagement optimal de mesures d'incitation ou du marché de l'électricité. Les questions relevant des sciences sociales sont tout aussi pertinentes, touchant par exemple au comportement des consommateurs, au maniement de l'incertitude et du risque, à l'acceptation de nouvelles technologies, à l'organisation sociale (autarcie des régions, capacité d'innovation des entreprises) ou aux processus d'apprentissage sociaux. L'aspect systémique est lui aussi important: il s'exprime par exemple dans la problématique des réseaux et dans le maillage international. Il s'agit de comprendre la complexité du système socio-technique «approvisionnement en électricité» dans son ensemble, y compris ses effets de feedback.
En particulier, il existe un besoin concret de recherche sur les points suivants:

- Elaboration d'un modèle de système énergétique qui englobe tous les types de production, le transport et le stockage de l'électricité, les importations et les exportations ainsi que la consommation, et qui prenne en compte les coûts, les risques, l'acceptation, la consommation de ressources, les répercussions économiques et les atteintes à l'environnement

- Elaboration de scénarios de mise en œuvre sociale, économique et politique d'objectifs concrets (disponibilité d'électricité et de chaleur, prix, exigences écologiques), compte tenu de l'évolution internationale possible

- Stockage de l'électricité et stockage thermique resp. thermochimique de l'énergie: développement, analyse de cycle de vie, coûts et risques

- Optimisation des flux de matériaux, tant des matériaux courants que des matériaux rares.

Avec les deux EPF, les universités et les hautes écoles spécialisées, une économie novatrice, et des institutions d'encouragement qui ont fait leurs preuves (Fonds national suisse FNS, Commission pour la technologie et l'innovation CTI, recherche de l'administration fédérale), la Suisse dispose d'une base excellente pour réaliser les progrès urgents et indispensables. Un encouragement continu et renforcé de la recherche et du développement s'impose non seulement dans le but de remanier le système électrique de manière aussi économique que possible, mais aussi parce qu'il contribue à un climat d'innovation et soutient ainsi l'industrie suisse (en particulier la cleantech). Les Académies suisses des sciences saluent donc le fait que, selon sa décision du 18 avril 2012, le Conseil fédéral compte à nouveau déployer plus de moyens pour les installations pilotes et de démonstration.

Le remaniement et l'extension du système électrique dans son ensemble exigent dans la recherche, le développement et la mise en œuvre un nombre suffisant de personnel qualifié – qu'il s'agisse d'ouvriers ou de chercheuses. L'apprentissage et la formation sont des facteurs décisifs pour le succès de la Stratégie énergétique 2050 et devraient donc être renforcés à tous les niveaux d'éducation.

Conclusion

Le remaniement ambitionné du système électrique est un défi gigantesque. La tâche est encore compliquée par le fait que ce n'est pas seulement l'approvisionnement en électricité qui doit être refondu sur la base de sources renouvelables, mais que les combustibles et les carburants fossiles, qui couvrent aujourd'hui la majeure partie de la consommation d'énergie, doivent à terme eux aussi être remplacés par des énergies renouvelables. Le passage à des sources d'énergie renouvelables est une tâche qui nécessitera plusieurs décennies et des investissements importants. Elle est d'autant plus difficile à exécuter qu'on repousse sa mise en œuvre. La transformation requise n'est pas seulement d'ordre technologique, mais aussi social.

Le présent rapport a abordé des domaines d'action cruciaux et esquissé des options possibles. Il montre qu'il n'existe pas de chemin unique clairement tracé et que toutes les options présentent des avantages et des inconvénients. La tâche principale consiste à trouver un équilibre entre les avantages et les inconvénients. Il est impossible d'échapper à des conflits d'objectifs. Ceci ne concerne pas seulement les technologies, mais aussi les individus, qui attendent à juste titre une répartition équilibrée des bénéfices et des charges. Etant donné que, dans un pays démocratique, un remaniement social ne peut s'opérer que de manière librement consentie, la Suisse n'aura pas d'autre choix que d'élaborer pour ce remaniement un «contrat social» – comme elle l'a déjà fait avec succès lors de la mise en place de la prévoyance vieillesse, lors de la péréquation financière nationale ou lors de la réalisation des grands projets ferroviaires. Un projet de cette envergure ne nécessite pas seulement une volonté politique forte, mais aussi des conditions cadre appropriées et la volonté de nombreux acteurs de contribuer de manière concrète à l'atteinte de l'objectif commun.

Références

Académies suisses des sciences, «Repenser l'énergie», 2007, Berne

Académie suisse des sciences techniques, «Plan de route: Energies renouvelables Suisse», Cahier SATW n° 39, 2006, Zurich

Académie suisse des sciences techniques, «Comment encourager la production d'électricité renouvelable?», Brochure, 2012 (en production), Zurich

Académie suisse des sciences techniques, «Energies renouvelables: Les défis jalonnant le chemin vers un plein approvisionnement», Cahier SATW n° 42, 2011, Zurich

Hirschberg S., Bauer C., Schenler W., Burgherr P., «Nachhaltige Elektrizität: Wunschdenken oder bald Realität», Energie-Spiegel (ISSN 1661-5115), n° 20, juin 2010

Office fédéral de l'énergie OFEN, «Perspectives énergétiques 2035 tomes 1 – 5», 2007, Berne

Office fédéral de l'énergie OFEN, «Statistique suisse de l'électricité 2010», 2011, Berne

Office fédéral de l'énergie OFEN, «Bases pour la stratégie énergétique du Conseil fédéral – Actualisation des perspectives énergétiques 2035», 2011, Berne

Simmons-Süer, B., Atukeren, E., Busch, C., «Elastizitäten und Substitutionsmöglichkeiten der Elektrizitätsnachfrage», Etudes KOF n° 26, EPF Zurich, 2011, Zurich

De la genèse du rapport

L'élaboration du rapport s'est effectuée sous la direction d'un comité directeur de neuf membres institué par les Académies. Au total, plus de 50 expertes et experts du monde scientifique, des milieux économiques et de l'administration ont rédigé les bases des différents chapitres. Les connaissances scientifiques ont été prises en compte en leur état actuel d'avancement. Il a été renoncé à réaliser des travaux de recherches propres. A côté de la présente synthèse (disponible en allemand et en français), il existe une version longue disponible exclusivement en ligne et en allemand.

La synthèse et les chapitres 1 et 6 de la version longue ont été rédigés par le comité directeur du projet. Les chapitres 2 à 5 de la version longue ont été composés en étroite collaboration avec les expertes et les experts. Ceux-ci ont contribué de manière et à des degrés de profondeur variés.

La synthèse et la version longue ont été soumises à plusieurs passages en comité de lecture dans le cadre d'ateliers organisés en juillet 2011 et en janvier 2012.

Disclaimer

Les auteurs de la version longue et les experts ne peuvent être tenus pour responsables du contenu et des conclusions du synthèse.

Impressum

Comité directeur / auteurs
Irene Aegerter, Marco Berg, Paul Burger, Heinz Gutscher, Stefan Hirschberg, Eduard Kiener, Gebhard Kirchgässner, Christoph Ritz, Andreas Zuberbühler

Relecture
Felix Würsten, Beatrice Huber

Experts
Reza Abhari, Göran Andersson, Silvia Banfi, Bruno Bébié, Konstantinos Boulouchos, Lucas Bretschger, Ulrich Bundi, Paolo Burlando, Rudolf Dinger, Christof Duthaler, Daniel Favrat, Klaus Fröhlich, Werner Graber, Maxi Grebe, Lino Guzzella, Matthias Gysler, Peter de Haan, Walter Hauenstein, Sandra Hermle, Michael Höckel, Peter Houzer, Peter Jansohn, Eberhard Jochem, Klaus Jorde, Tony Kaiser, Wolfgang Kröger, Kurt Küffer, Filippo Leuchthaler, Marco Mazzotti, Anton Meier, Martin Michel, Rudolf Minder, Peter Molinari, Andrew Neville, Stefan Nowak, Hans Pauli, Michel Piot, Christian Plüss, Horst-Michael Prasser, Reto Rigassi, Christian Schaffner, Anton Schleiss, Ulrich Schmocker, Hans-Jörg Schötzau, Renate Schubert, Heinrich Schwendener, Gunter Siddiqi, Michael Siegrist, Aldo Steinfeld, Samuel Stucki, Bernadette Sütterlin, Renato Tami, Jakob Vollenweider, Marcel Wickart , Alexander Wokaun, Hansruedi Zeller, Niklaus Zepf, Pieter Zuidema

Maquette
Esther Volken, ProClim–

Images
KWO, R. Bösch; Christoph Ritz, ProClim–; Christoph Kull, OcCC; Fotolia

Académies suisses des sciences: Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse?
1ère édition, juillet 2012
ISBN 978-3-907630-32-4

Le synthèse et la version longue (en allemand) sont disponibles sous www.akademien-schweiz.ch