



Plan de route Energies renouvelables Suisse

Une analyse visant la valorisation des potentiels d'ici 2050

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences

Sommaire

Résumé	4
Avant-propos	5
Energies renouvelables – une issue possible?	6
Ce qui a été calculé	7
Vue d'ensemble des technologies	
Pompes à chaleur	8
Energie solaire thermique	8
Géothermie profonde	9
Biomasse	10
Photovoltaïque	12
Energie éolienne	12
Energie hydraulique	13
Le bilan du point de vue énergétique	14
Le bilan du point de vue économique	17
Saisir activement la chance	19
Appendice	
Bibliographie recommandée	22
Glossaire	23
Impressum	23

Résumé

Un approvisionnement énergétique durable de la Suisse est possible. Il n'est cependant réalisable ni à court terme, ni facilement. Les sources d'énergie renouvelables indigènes peuvent y apporter une contribution décisive. Cette publication de la SATW indique dans quelle mesure cela est possible au vu du potentiel techniquement exploitable.

Bien souvent, le facteur contraignant n'est pas tant le potentiel lui-même qu'une rapidité de mise en œuvre justifiable au niveau économique, en particulier dans le domaine de la rénovation des bâtiments. Un approvisionnement reposant principalement sur des sources indigènes d'énergie renouvelables d'ici 2050 exige une combinaison de la mise en exploitation des potentiels ici indiqués et de la réalisation de la société à 2000 watts déclarée comme objectif stratégique par le Conseil fédéral.

La SATW

Qui sommes-nous?

En tant que société faïtière non commerciale et politiquement indépendante, l'Académie suisse des sciences techniques (SATW) réunit des personnes, institutions et sociétés techniques suisses actives dans les sciences techniques ainsi que dans leur application et leur promotion. Elle regroupe environ 240 membres individuels et 60 sociétés membres. Les membres individuels sont des personnalités éminentes du monde de l'enseignement, de la recherche, de l'économie et de la politique.

La SATW est membre de l'association faïtière «Académies suisses des sciences».

Que voulons-nous?

La SATW œuvre pour la promotion de la technologie au service de la société et pour une compréhension plus profonde de la technologie. Elle soutient ainsi la Suisse en tant que site de recherche, d'enseignement et de production, et par là-même la société, l'économie et la culture suisses.

Que faisons-nous?

La SATW organise des événements, publie des études et des périodiques, invite à des visites, prend position quant à des questions d'actualité et soutient les activités d'autres organisations.

Des informations détaillées sur la SATW sont disponibles sous: www.satw.ch



Avant-propos

La production de pétrole et de gaz naturel atteindra bientôt son point culminant avant de baisser. La seule incertitude qui demeure est de savoir si ce maximum sera déjà atteint dans dix ou seulement dans trente ans. La Suisse, comme toutes les nations industrialisées, fait donc face à un bouleversement profond de son approvisionnement énergétique.

Dans cette situation, de nombreux espoirs reposent sur une exploitation plus poussée des sources d'énergie renouvelables. Le «*Plan de route – énergies renouvelables Suisse*» élaboré par la Commission de l'énergie de la SATW examine à quel point ces espoirs sont justifiés au cas où les potentiels techniquement exploitables situés en Suisse étaient valorisés et exploités. L'étude indique que dans l'hypothèse de la réalisation du plan de route, l'offre de formes d'énergie renouvelable peut être doublée d'ici 2050. Les résultats sont tout à la fois dégrisants et encourageants.

Il est dégrisant d'apprendre que, si la consommation d'énergie reste constante au niveau actuel, les sources d'énergie renouvelables, dont l'énergie hydraulique, ne pourront couvrir qu'un bon tiers des besoins. La situation ne s'améliore pas fondamentalement en comparaison avec les perspectives énergétiques élaborées en ce moment par la Confédération: selon les scénarios, il demeure un déficit par rapport aux besoins de 50 pour cent ou plus.

La situation est en revanche encourageante en combinaison avec la vision d'une société à 2000 watts, que le Conseil fédéral s'est fixée comme objectif stratégique. Dans l'hypothèse de la réalisation conjointe du plan de route et de la société à 2000 watts, les trois-quarts de l'énergie requise pourraient être mis à disposition à base de sources renouvelables indigènes. Un approvisionnement énergétique de la Suisse stable à long terme et donc durable semble ainsi possible sans recourir à des solutions futuristes telles des réacteurs à fusion ou une économie de l'hydrogène opérée au rayonnement solaire.

La SATW œuvre de manière conséquente pour un approvisionnement énergétique durable de la Suisse. Elle a déjà montré qu'une division par deux de la consommation de vecteurs énergétiques fossiles était possible en Suisse à moyen terme sans perte de richesse. Pour des raisons présentées dans le plan de route, seule une restructuration de notre approvisionnement énergétique lancée dans un avenir proche mais répartie sur plusieurs décennies est opportune au niveau économique. Mettons-nous en route!

Professeur René Dändliker
Président de la SATW

Professeur Andreas Zuberbühler
*Président du Conseil scientifique
de la SATW*

Energies renouvelables – une issue possible?

L’approvisionnement énergétique actuel ne pourra pas être maintenu à long terme. Les sources d’énergie renouvelables permettront-elles de parer à la crise énergétique qui s’annonce? Ce plan de route indique à quel point de tels espoirs sont justifiés.

A l’échelle mondiale, l’approvisionnement énergétique repose aujourd’hui à plus de 80 pour cent sur le charbon, le pétrole et le gaz naturel. La consommation de ces ressources a augmenté de manière continue ces dernières années. Ce degré d’utilisation des vecteurs énergétiques fossiles ne pourra être maintenu à long terme. Tant dans le cas du pétrole que dans celui du gaz naturel, il apparaît que la production ne parvient pas à suivre la demande. Le fait que la plupart des vecteurs énergétiques fossiles sont produits dans des régions politiquement instables est lui aussi inquiétant. Les pays occidentaux font ainsi face à des dépendances critiques.

La durabilité comme objectif à long terme

Il est clair qu’un approvisionnement durable ne peut être atteint que grâce à une modification profonde de la production, de la transformation et de l’utilisation énergétiques actuelles.

L’utilisation de vecteurs énergétiques fossiles est par ailleurs problématique d’un point de vue écologique. Il s’agit ici principalement du changement climatique global qui se dessine de manière toujours plus précise à la suite de la concentration atmosphérique accrue de CO₂ en tant que gaz à effet de serre. Au niveau international, des efforts ont entre-temps été entrepris afin d’amener un retournement de tendance. Ainsi, le Protocole de Kyoto, que la Suisse a aussi ratifié, vise la réduction des émissions globales de six gaz à effet de serre, dont en premier lieu le CO₂, d’environ 5 pour cent par rapport à 1990 d’ici 2012. L’avenir à long terme de la politique énergétique et climatique internationale est aujourd’hui cependant incertain.

Dans sa stratégie pour un approvisionnement énergétique durable, formulée en 2002, le Conseil fédéral recommande d’axer la politique énergétique et climatique de la Suisse sur l’objectif d’une société à 2000 watts et d’émissions par tête de 1 tonne de CO₂ par an. Etant donné qu’à l’heure actuelle en Suisse, par an et par tête une puissance de 5200 watts est produite à base d’énergie primaire et plus de 6 tonnes de CO₂ sont émises, il est clair que les objectifs visés ne peuvent être atteints que grâce à une modification profonde de l’approvisionnement, de la transformation et

de l’utilisation énergétiques actuels. Des efforts sont requis dans trois domaines: premièrement, l’énergie primaire employée doit être utilisée de manière plus efficace jusqu’à la mise à disposition de prestations énergétiques; deuxièmement, l’approvisionnement énergétique doit s’appuyer de manière accrue sur des sources d’énergie à faibles émissions de CO₂; troisièmement, des changements de comportement sont requis de la part des utilisateurs.

Evaluer les répercussions

Ce rapport est consacré au deuxième champ d’action, la valorisation de formes d’énergie à faibles émissions de CO₂. A côté de l’énergie nucléaire, ce critère est rempli par toutes les sources d’énergie renouvelables. En Suisse, seules deux d’entre elles font aujourd’hui l’objet d’une exploitation d’envergure: l’énergie hydraulique et le bois. D’autres sources d’énergie renouvelables telles le vent, la géothermie, la photovoltaïque ou les autres formes de biomasse ne sont que peu exploitées. Nombreux sont ceux qui espèrent de ces sources d’énergie, souvent qualifiées de «nouvelles renouvelables», une contribution significative à la restructuration ambitionnée de l’approvisionnement en énergie.

Avec le «Plan de route – énergies renouvelables Suisse», l’Académie suisse des sciences techniques (SATW) compte indiquer à quel point de tels espoirs sont justifiés. Le rapport documente l’envergure du potentiel techniquement exploitable de sources d’énergie renouvelables en Suisse, le degré auquel celui-ci pourrait raisonnablement être valorisé au cours des 50 années à venir, et les répercussions qui en découleraient pour les coûts de revient de l’énergie.

Il ne fait cependant aucun doute que le développement des sources d’énergie renouvelables décrit ici doit s’accompagner d’une amélioration massive de l’efficacité énergétique. L’étude de la SATW «CH50% – Pour une Suisse consommant moitié moins d’énergies fossiles» a déjà démontré en 1999 que cela était réalisable – sans réduction des prestations énergétiques – avec des bâtiments et des moyens de transport optimisés au niveau énergétique.



Ce qui a été calculé

En tant que pays pauvre en matières premières, la Suisse n'a pas d'accès direct à des vecteurs énergétiques fossiles, mais dépend en ce qui les concerne d'importations. Elle peut par contre faire usage dans différents domaines de sources d'énergie renouvelables disponibles à l'intérieur du pays. Il s'agit principalement des trois formes suivantes:

- > chaleur issue de pompes à chaleur, d'énergie solaire thermique, de géothermie et de biomasse;
- > électricité issue d'énergie hydraulique, éolienne et photovoltaïque, de géothermie et de biomasse;
- > gaz et carburant liquide extraits de biomasse.

Le plan de route esquisse l'évolution de l'offre d'énergie renouvelable dans les décennies à venir dans l'hypothèse où le potentiel techniquement exploitable des énergies renouvelables en Suisse était largement valorisé. La possibilité d'une importation d'énergies renouvelables, comme par exemple de biocarburants, d'électricité issue d'énergie solaire ou éolienne ou d'hydrogène produit à base solaire, est consciemment écartée.

Le plan de route indique pour la première fois combien d'installations devraient concrètement être construites au fil du temps afin d'assurer l'exploitation du potentiel existant, quels investissements seraient requis et quelles en seraient les répercussions sur les coûts de revient de la chaleur, de l'électricité et des carburants. Une comparaison avec des scénarios de demande existants permet en outre de déduire des conclusions relatives à la contribution possible des sources indigènes d'énergie renouvelables à l'approvisionnement énergétique du pays à long terme.

Changements au fil du temps

Le plan de route est basé sur un modèle dynamique. Celui-ci prend en compte le fait que les installations présentent des caractéristiques pouvant évoluer au fil du temps. Ces caractéristiques incluent en premier lieu des aspects techniques tels la puissance moyenne resp. la production annuelle d'énergie des installations, leur durée de vie moyenne, le rendement de transformation ainsi que l'énergie requise pour la construction, l'opération et la liquidation des installations. Le potentiel techniquement exploitable d'une source d'énergie renouvelables est lié à ces caracté-

ristiques. Ce dernier indique la mesure escomptée dans laquelle une source d'énergie renouvelable peut être exploitée de manière raisonnable d'un point de vue technologique. Ce qui est considéré comme techniquement raisonnable repose entre autres sur l'estimation subjective des experts. Le potentiel est exprimé en quantité d'énergie produite ou en nombre d'installations. L'établissement du parc d'installations respectif doit s'effectuer de manière harmonieuse, avec une croissance progressive au départ, une phase de développement et une période de saturation, ainsi que l'indiquent les figures 1 à 3 (voir page 15). Il est ainsi possible d'éviter les surcapacités et d'optimiser les coûts.

Utiliser les connaissances des experts

Le modèle tient aussi compte d'aspects économiques tels les frais d'investissement pour la construction des installations ainsi que les coûts de leur opération et leur diminution avec une expérience croissante du marché (courbe d'apprentissage). Sur la base de ces indications, le modèle calcule combien d'installations devraient être mises en place par an, combien d'installations sont déjà respectivement en opération, combien d'énergie elles permettent de produire et quel est le besoin annuel en capitaux pour financer cette expansion.

Tout propos relatif à une évolution portant sur une telle durée est par nature grevé de nombreuses incertitudes. Le plan de route s'appuie sur les connaissances d'experts au sein de l'administration, d'institutions scientifiques et d'associations techniques ainsi que sur des données publiées dans la littérature spécialisée. Les données utilisées ont été compilées en coopération avec l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) et l'Institut Paul Scherrer (PSI). La qualité des données relatives aux différentes sources d'énergie s'est fortement améliorée au cours des dernières années. A l'exception de la géothermie, les sources d'énergie considérées dans le plan de route font déjà aujourd'hui l'objet d'une exploitation d'une telle envergure qu'il est possible d'évaluer de manière plus précise l'évolution future.

Vue d'ensemble des technologies

Dans ce qui suit, les hypothèses du plan de route relatives aux différentes technologies d'exploitation de sources d'énergie renouvelables sont décrites de manière séparée pour chaque forme d'utilisation. Nous indiquons respectivement la quantité d'énergie produite en 2003 et la quantité d'énergie produite en 2050 dans l'hypothèse d'une pleine exploitation des potentiels ainsi que le nombre correspondant d'installations mises en place, les frais d'investissement par unité de puissance et les frais d'exploitation et les coûts de revient par unité d'énergie produite.

Une exception est faite pour le domaine de la production de chaleur ambiante par le biais de pompes à chaleur, de chauffages au bois et de capteurs solaires, pour lequel les valeurs correspondantes sont indiquées pour l'année 2070. Étant donné que l'intégration des installations dans des bâtiments existants est souvent liée à des modifications architecturales compliquées, les potentiels ne peuvent y être exploités pleinement qu'au rythme du taux de rénovation immobilière. Une mise en exploitation complète des potentiels n'est par conséquent pas encore prévisible en 2050, mais seulement vers 2070.

Pompes à chaleur

Environ 80 000 pompes à chaleur étaient installées en Suisse en 2003, produisant dans leur ensemble 1,4 TWh de chaleur pour le chauffage ambiant et l'eau chaude sanitaire. Le rendement énergétique d'installations actuelles – exprimé par le coefficient de performance annuel – est en moyenne de 2,8. Des mesurages récents indiquent qu'entre-temps le coefficient de performance annuel de nouvelles installations se situe nettement au-delà de 3. Ce chiffre devrait encore sensiblement augmenter au cours des décennies à venir. Le plan de route part de l'hypothèse que cinq fois plus de pompes à chaleur seront installées en 2070 qu'aujourd'hui, leur puissance moyenne doublant d'environ 10 kW aujourd'hui à 20 kW, étant donné que les pompes à chaleur serviront de manière croissante à couvrir les besoins en eau chaude et à équiper les bâtiments de taille importante.

Le potentiel de la production de chaleur avec des pompes à chaleur est estimé à 15,6 TWh. Le facteur contraignant n'est pas tant la disponibilité de sources de chaleur (air, terre, eau) que l'envergure des besoins: dans quelques

	2003	2070
Production de chaleur [TWh]	1,4	15,6
Installations mises en place	80 000	400 000
Frais d'investissement [Fr/kW]	1600	1200
Frais d'exploitation [c/kWh]	10,7	6,0
Coûts de revient [c/kWh]	17,9	10,6

Chiffres clé de la production de chaleur avec des pompes à chaleur

décennies, les enveloppes de bâtiment seront nettement mieux isolées, et les chauffages au mazout et au gaz encore en usage aujourd'hui ne seront pas tous remplacés par des pompes à chaleur mais aussi en partie par des chauffages à bois et des capteurs solaires.

Un pourcentage important des frais d'exploitation de pompes à chaleur est constitué par les besoins en énergie électrique de propulsion. Le plan de route suppose un prix d'achat moyen de 15 c/kWh. En l'état actuel des connaissances, la plupart des pompes à chaleur continueront à opérer de manière électrique en 2070. Les besoins correspondants en électricité sont estimés à 3,9 TWh. Cependant, ces besoins additionnels en électricité seront compensés au moins en partie par des économies dans le domaine des chauffages à résistance conventionnels, ceux-ci se voyant remplacés par d'autres technologies.

Energie solaire thermique

Les installations solaires thermiques, souvent nommées capteurs solaires, produisent en règle générale de l'eau chaude sanitaire destinée à l'usage quotidien. Elles génèrent aussi souvent simplement de l'air chaud destiné au chauffage ambiant. Les capteurs à air utilisés pour

	2003	2070
Production de chaleur [TWh]	0,19	4,4
Installations mises en place	39 000	400 000
Frais d'investissement [Fr/kW]	1600	1150
Frais d'exploitation [c/kWh]	4,2	2,7
Coûts de revient [c/kWh]	25,2	11,4

Chiffres clé de la production de chaleur avec des capteurs solaires



le séchage du foin, qui dominent aujourd'hui de par leur nombre, n'ont pas été pris en compte dans le plan de route afin d'éviter de fausser la représentation ambitionnée de l'activité industrielle induite dans le domaine de la technologie du bâtiment.

La taille moyenne des installations augmentera d'aujourd'hui 12 à 18 m², la surface occupée par les installations de 0,5 à 7 km². Un décuplement du nombre d'installations pour atteindre 400 000 d'ici 2070 semble plausible au vu d'un parc immobilier actuel d'environ 1,5 millions de bâtiments. Le plan de route suppose donc un potentiel de production de chaleur de 4,4 TWh en 2070. Le nombre important de nouvelles installations à mettre en place aura des répercussions positives sur les frais d'investissement, étant donné que la production, aujourd'hui encore largement manuelle, sera fortement automatisée.

Géothermie profonde

La technologie d'exploitation de la géothermie profonde en Suisse repose sur le principe du Deep Heat Mining (DHM). Additionnellement, la chaleur en provenance de couches proches de la surface terrestre est utilisée à des fins de chauffage. Cette forme d'exploitation est prise en compte au chapitre consacré aux pompes à chaleur. De toutes les technologies de transformation visant l'exploitation des sources d'énergie renouvelables, le DHM est la moins éprouvée. Le potentiel théorique du DHM est considérable, mais aucune installation en fonctionnement n'existe en Suisse à cette heure. Une première installation pilote est en cours de construction près de Bâle. En raison du caractère

	Chaleur	Electricité
Production d'énergie [TWh]	2,4	2,1
Installations mises en place	Total 20	
Frais d'investissement [Fr/kW]	2500	3500
Frais d'exploitation [c/kWh]	3,3	4,3
Coûts de revient [c/kWh]	5,4	6,3

Chiffres clé de la production de chaleur et d'électricité à base de géothermie profonde en 2050

incertain des données, le plan de route repose sur une estimation prudente pour 2050. En fin d'expansion, il devrait être possible de produire annuellement en Suisse jusqu'à 6,9 TWh d'électricité sans épuiser les ressources de la géothermie profonde.

Malgré les températures d'exploitation modestes de moins de 200 °C, la combinaison de la production d'électricité avec l'utilisation de la chaleur résiduelle et la distribution correspondante de la chaleur à distance semble être la solution la plus rentable pour la géothermie profonde. Il reste cependant à débattre si la construction de nouveaux réseaux de chauffage à distance est justifiable au niveau économique étant donné les besoins en chaleur nettement moindres des bâtiments en 2050. À côté de la production combinée de chaleur et d'électricité, une production exclusive d'électricité est aussi envisageable, dans le cadre de laquelle la chaleur inutilisée serait acheminée vers un cours d'eau ou une tour de réfrigération. Dans ce cas, les coûts de revient de l'électricité devraient cependant s'avérer plus de deux fois plus élevés. Le plan de route se fonde sur l'hypothèse de respectivement 5 installations d'une puissance de 40 MW produisant exclusivement de la chaleur ou de l'électricité et 10 installations d'une puissance de 50 MW produisant une combinaison de chaleur et d'électricité.

Biomasse

De toutes les sources d'énergie renouvelables, la biomasse est la plus hétérogène. Déchets biogènes, bois usagé, bois en provenance de l'industrie forestière, plantes utiles, résidus agricoles ou restes de nourriture peuvent tous être mis à profit. Les technologies d'exploitation sont tout aussi diverses: combustion, gazéification, fermentation. La biomasse peut être utilisée pour produire de la chaleur, de l'électricité, ainsi que du carburant gazeux ou liquide. En Suisse, elle fait aujourd'hui principalement l'objet d'une utilisation à des fins de production de chaleur et d'électricité. En faible mesure, des carburants sont aussi produits à base d'éthanol, d'ester méthylique de colza et de méthane.

La rentabilité est principalement déterminée par le coût de la biomasse. La palette s'étend de compensations reçues pour l'évitement de frais de traitement des déchets, en passant par des résidus de scierie bon marché, à des plantes énergétiques coûteuses. La fermentation de déchets biogènes afin d'en tirer du méthane et de l'humus est économique et a fait ses preuves. A grande échelle, la biomasse est utilisée dans des centrales thermiques et pour la production de biocarburants. La gazéification de biocombustibles solides, ou des processus de combustion plus efficaces, permettraient de mettre en exploitation des domaines d'utilisation encore plus divers. Ces options ne sont cependant pas encore éprouvées au niveau technologique et restent relativement coûteuses.

Comme il est impossible de prédire le champ d'application principal de la biomasse en 2050 resp. 2070, nous formulons ici une simple hypothèse: un quart du potentiel existant au niveau de la biomasse non traitée (33 TWh d'énergie primaire) est respectivement utilisé pour la production de chaleur, d'électricité et de carburant liquide. Un dernier quart revient à la production de gaz, qui peut à son tour être utilisé pour la production de chaleur ou d'électricité ou comme carburant.

Chaleur issue de biomasse

La production de chaleur à base de biomasse (principalement du bois) est courante en Suisse. S'y ajoute la production de chaleur à base de déchets dans des usines d'incinération des ordures ménagères et autres installations de combustion. En 2003, 3,0 resp. 2,2 TWh de chaleur utile ont ainsi été produits dans environ 75 installations de taille im-

	2003	2070
Production de chaleur [TWh]	5,2	8,4
Installations mises en place	54 000	124 000
Frais d'investissement [Fr/kW]	1500	1100
Frais d'exploitation [c/kWh]	11,2	9,1
Coûts de revient [c/kWh]	16,1	12,8

Chiffres clé de la production de chaleur à base de biomasse

portante. On peut s'attendre à ce que les quelques 54 000 chaudières installées aujourd'hui passent à environ 124 000 d'ici 2070. Les frais d'exploitation dépendent principalement des coûts des combustibles.

Au total, il résulte pour l'année 2070 un potentiel de 8,4 TWh. La possibilité de l'utilisation de la chaleur résiduelle qui se dégage lors de la production d'électricité et de gaz et lors de la fermentation n'est pas prise en compte. Il s'agit tout de même d'une quantité de chaleur d'un volume annuel de 2 TWh.

Electricité issue de biomasse

Il existe de nombreuses manières de produire de l'électricité à base de biomasse. Selon la technologie, la biomasse est tout d'abord transformée en gaz, en carburant ou en chaleur et ensuite, par le biais de turbines ou de moteurs, en électricité. A l'avenir, il est aussi envisageable d'employer des piles à combustible. Aujourd'hui, de l'électricité est déjà produite à grande échelle dans 28 usines d'incinération des ordures ménagères.

Le plan de route ne fait pas de distinction selon que l'électricité est produite dans des centrales thermiques ou dans des centrales de gazéification ou de fermentation. Nous partons du principe que le rendement moyen peut

	2003	2050
Production d'électricité [TWh]	0,78	3,8
Installations mises en place	580	2350
Frais d'investissement [Fr/kW]	2500	2000
Frais d'exploitation [c/kWh]	13,6	9,3
Coûts de revient [c/kWh]	17,6	12,0

Chiffres clé de la production d'électricité à base de biomasse



être augmenté d'aujourd'hui 30 à 45 pour cent. Les frais d'exploitation sont estimés à environ 40 000 francs (2003) resp. 30 000 francs (2050) par installation. Les coûts des matières premières oscillent selon leur origine d'une compensation reçue pour l'évitement de frais de traitement des déchets à des coûts allant jusqu'à 10 c/kWh. L'étude repose sur l'hypothèse de coûts moyens de 6 c/kWh.

Gaz issu de biomasse

Le biogaz est obtenu par fermentation ou par gazéification. Cette première méthode est appliquée en Suisse au niveau communal à échelle industrielle depuis des années à travers le compogaz et la production de gaz de décharge. Le gaz de digestion est produit dans des stations d'épuration et dans des installations agricoles de biogaz. La gazéification, elle, n'est par contre pas encore éprouvée au niveau technologique, mais promet à l'échelle industrielle un avantage au niveau des coûts dans la valorisation de la biomasse solide sous forme de bois. Aujourd'hui, la majorité du biogaz produit est affectée à la production de chaleur et d'électricité; le reste est injecté dans le réseau de gaz et employé comme carburant.

Nous partons du principe qu'à l'avenir, à côté de nombreuses installations de petite taille, des installations à grande échelle d'une puissance de quelques 10 MW seront aussi réalisées. En conséquence, la puissance moyenne des installations augmentera fortement. Les coûts des matières premières sont déterminants aussi pour la production de gaz. Dans le cas d'installations de biogaz, les coûts de la biomasse sont pratiquement inexistantes: les agriculteurs emploient leur purin à coût nul, le compogaz bénéficie d'une

	2003	2050
Production de gaz [TWh]	0,69	5,0
Installations mises en place	70	830
Frais d'investissement [Fr/kW]	2000	1500
Frais d'exploitation [c/kWh]	10,0	11,7
Coûts de revient [c/kWh]	15,2	12,7

Chiffres clé de la production de gaz à base de biomasse

compensation pour la biomasse prise en charge et le gaz de décharge est lui aussi gratuit, car il devrait sinon être brûlé. Les opérateurs d'installations à gaz de digestion ne versent eux non plus aucun paiement pour la biomasse, mais bénéficient de compensations pour le traitement des déchets. Par conséquent, nous admettons dans les calculs pour les coûts de combustible une valeur moyenne de 1 c/kWh. D'ici 2050, ces coûts devraient passer en moyenne à 4 c/kWh, car la totalité de la production de biogaz ne reposera pas sur de telles sources bon marché. Cela sera en particulier le cas pour les grandes usines de gazéification.

Carburant liquide issu de biomasse

Deux formes principales de carburant liquide sont extraites de la biomasse: le biodiesel (principalement l'ester méthylique de colza) et l'éthanol issu de plantes saccharifères. La production d'huile de colza est fort avancée en Allemagne et l'éthanol est surtout produit au Brésil, aux Etats-Unis et en France. Le plan de route ne précise pas quelles technologies sont employées pour la production de biocarburants. Elles ont fait leurs preuves à l'étranger et peuvent être implémentées en Suisse dans des délais relativement brefs.

	2003	2050
Production de carburant [TWh]	0,021	5,8
Installations mises en place	1	50
Frais d'investissement [Fr/kW]	2500	1500
Frais d'exploitation [c/kWh]	16,0	11,2
Coûts de revient [c/kWh]	21,7	12,5

Chiffres clé de la production de carburant liquide à base de biomasse

Photovoltaïque

La photovoltaïque désigne la transformation directe de rayonnement solaire en électricité. Les installations photovoltaïques peuvent être intégrées dans l'enveloppe du bâtiment, auquel cas elles deviennent part de la technologie du bâtiment. Cependant, les installations ne produisent de l'électricité qu'une petite partie du temps. Celle-ci n'étant de plus pas librement récupérable et ne pouvant être stockée qu'indirectement par le biais du réseau.

La surface potentiellement disponible pour la production d'énergie photovoltaïque en Suisse est limitée pour l'essentiel aux enveloppes de bâtiment. Les installations de plein air devraient former une exception et ne sont donc pas prises en compte. Si l'on admet comme facteur contraignant la surface de toiture disponible offrant une orientation adéquate au soleil, il serait possible de réaliser une puissance installée de 14 000 MW. Cependant, le facteur contraignant n'est pas tant la surface disponible que l'insertion dans le réseau électrique existant, étant donné qu'en cas de rayonnement solaire insuffisant, la puissance doit être compensée par d'autres vecteurs énergétiques. Le réglage de réseau devient ainsi le facteur critique de la photovoltaïque. Les bases nécessaires à l'évaluation correcte de son potentiel font aujourd'hui encore défaut. En particulier, la corrélation dans le temps des rendements de la photovoltaïque et de ceux d'autres sources d'électricité renouvelables reste à déterminer.

Variante 1	2003	2050
Production d'électricité [TWh]	0,017	1,9
Installations mises en place	1580	80 000
Frais d'investissement [Fr/kW]	7500	2200
Frais d'exploitation [c/kWh]	5,7	3,4
Coûts de revient [c/kWh]	78,6	13,4

Variante 2	2003	2050
Production d'électricité [TWh]	0,017	5,7
Installations mises en place	1580	240 000

Chiffres clé de la production d'électricité à base d'énergie photovoltaïque: dans la variante 1, la puissance totale installée est développée jusqu'à atteindre 2000 MW, dans la variante 2 6000 MW. Les frais d'investissement et d'exploitation et les coûts de revient sont d'un montant équivalent dans les deux variantes.

Dans le cadre du plan de route, deux variantes ont donc été prises en compte:

- > Variante 1: La photovoltaïque est développée jusqu'à atteindre une puissance totale de 2000 MW. Avec la capacité de réglage et la technologie de réseau actuelles, cette quantité peut encore tout juste être absorbée en tant que puissance variable.
- > Variante 2: La photovoltaïque est développée jusqu'à atteindre une puissance totale de 6000 MW. Ce scénario prend en compte que de nouvelles sources librement disponibles telles la géothermie profonde ou la biomasse, ainsi que des rendements possibles d'énergie hydraulique et éolienne se complétant mutuellement dans le temps peuvent contribuer au lissage des fluctuations.

Le potentiel maximum admis d'environ 5,7 TWh correspond à une surface de toiture de 30 km², donc à environ 10 pour cent de la surface de toiture existant en Suisse. La puissance moyenne des installations photovoltaïques devrait passer d'environ 12 à 25 kW; d'une part, la mise en œuvre à grande échelle entraînera la construction renforcée de grandes installations, d'autre part le rendement moyen par module augmentera au cours des 50 années à venir d'aujourd'hui 13 à 21 pour cent.

Energie éolienne

A travers le monde, l'énergie éolienne a connu au cours des dernières années un essor d'une envergure inattendue. Dans des sites exceptionnels à l'étranger, il est déjà possible de produire de l'électricité à des conditions concurrentielles. Les coûts de revient de l'électricité ont baissé plus rapidement que prévu. En Suisse, l'énergie éolienne reste quasiment inexploitée. Elle présente l'avantage que les meilleures conditions prédominent au semestre d'hiver. L'énergie éolienne complète donc l'énergie hydraulique et l'électricité d'extraction solaire.

Si, pour des raisons de rentabilité économique, on se limite à considérer des sites offrant des vitesses du vent supérieures à 4,5 m/s en moyenne annuelle et une certaine sécurité de planification en raison de leur emplacement dans des zones construites, on parvient à un potentiel de 1500 centrales éoliennes. On peut distinguer deux types d'installations: parcs éoliens produisant au total 1,2 TWh



Le plan de route suppose des coûts de revient moyens de 6 c/kWh pour la grande hydraulique et de 11,6 c/kWh pour la petite hydraulique. A long terme, les coûts de production d'électricité à base d'énergie hydraulique sont déterminés par des facteurs qui se compensent partiellement. L'amortissement complet des installations et l'emploi d'installations plus performantes auront des répercussions positives sur les coûts de revient. D'un autre côté, il faut s'attendre à des exigences plus strictes quant aux débits résiduels. Le plan de route admet donc que les coûts de revient réels demeureront constants sur la période considérée.

	2003	2050
Production d'électricité [TWh]	0,005	1,2
Installations mises en place	6	650
Frais d'investissement [Fr/kW]	1900	1500
Frais d'exploitation [c/kWh]	6,7	3,8
Coûts de revient [c/kWh]	27,2	12,5

Chiffres clé de la production d'électricité à base d'énergie éolienne

et installations individuelles dans des sites spécifiques produisant au total 2,8 TWh d'électricité supplémentaire par an. En accord avec le Concept pour l'énergie éolienne, élaboré pour la Suisse au cours d'un processus de consultation à large assise, nous ne reprenons ici que le potentiel des parcs éoliens.

Energie hydraulique

Avec une production moyenne escomptée de 34 TWh, l'énergie hydraulique est sans aucun doute la source d'énergie renouvelables la plus utilisée. Cependant, son potentiel en Suisse est quasiment épuisé. Cette étude admet une croissance possible de 3 TWh d'ici 2050. Celle-ci est due d'une part à l'amélioration de l'efficacité des machines utilisées (augmentation de la production moyenne escomptée de 2 TWh), d'autre part au développement en particulier des petites centrales hydrauliques (<300 kW) à hauteur de 1 TWh. Des exigences plus strictes quant aux débits résiduels pourraient cependant mener à une augmentation moindre.

Grande hydraulique	2003	2050
Production d'électricité [TWh]	34,0	36,0
Installations mises en place	500	500
Coûts de revient [c/kWh]	6,0	6,0

Petite hydraulique	2003	2050
Production d'électricité [TWh]	0,3	1,3
Installations mises en place	1000	2000
Frais d'investissement [Fr/kW]	1800	1800
Coûts de revient [c/kWh]	11,6	11,6

Chiffres clé de la production d'électricité à base d'énergie hydraulique

Le bilan du point de vue énergétique

Les calculs indiquent que la production d'électricité, de chaleur et de carburant à base de vecteurs énergétiques renouvelables pourrait être accrue de manière significative au cours des 50 années à venir. Cela présuppose cependant des taux de croissance annuels considérables.

Quelle contribution effective à l'approvisionnement énergétique peuvent apporter d'ici 2050 les sources d'énergie renouvelables disponibles en Suisse dans l'hypothèse où elles sont mises en exploitation dans la mesure décrite plus haut? Le modèle utilisé pour cette étude calcule la dynamique temporelle de ce développement au niveau des installations individuelles mises en place par forme d'utilisation et par technologie. Il suit une représentation graphique de l'évolution des quantités d'énergie produites par ces installations et de leur coût de revient (voir page 15).

L'énergie requise pour la construction, l'exploitation et la liquidation des installations ne fait pas ici l'objet d'une

Peu d'énergie grise

A l'exception de la photovoltaïque et des pompes à chaleur, l'énergie requise pour la construction, l'opération et la liquidation des installations est faible dans la plupart des cas.

identification explicite. Dans la plupart des cas, ces besoins sont faibles et nuiraient à la clarté des graphiques. Seuls se distinguent par leur importance la quantité d'énergie nécessaire à la construction dans le cas de la photovoltaïque et les besoins en énergie d'exploitation des pompes à chaleur. Ainsi, en fin d'expansion ces dernières permettent bien d'extraire à l'environnement 15,6 TWh de chaleur renouvelable; cela requiert cependant l'injection de 3,9 TWh d'électricité, la production énergétique nette n'est donc que de 11,7 TWh.

Production d'électricité

Grâce au développement décrit par le plan de route, la production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables en Suisse augmentera d'ici 2050 de 15 TWh par rapport à aujourd'hui (figure 1). En prenant compte de la production d'électricité des centrales hydrauliques déjà existantes, la production d'électricité se montera à 50,1 TWh. Avec une part de 75 pour cent, l'énergie hydraulique conservera son rôle de fournisseur dominant d'électricité parmi les énergies renouvelables. L'électricité issue de la biomasse,

	2003	2050
Photovoltaïque	0,017	5,7
Biomasse	0,78	3,8
Géothermie	–	2,1
Energie éolienne	0,005	1,2
Petite hydraulique	0,3	1,3
Grande hydraulique	34,0	36,0
Total	35,1	50,1

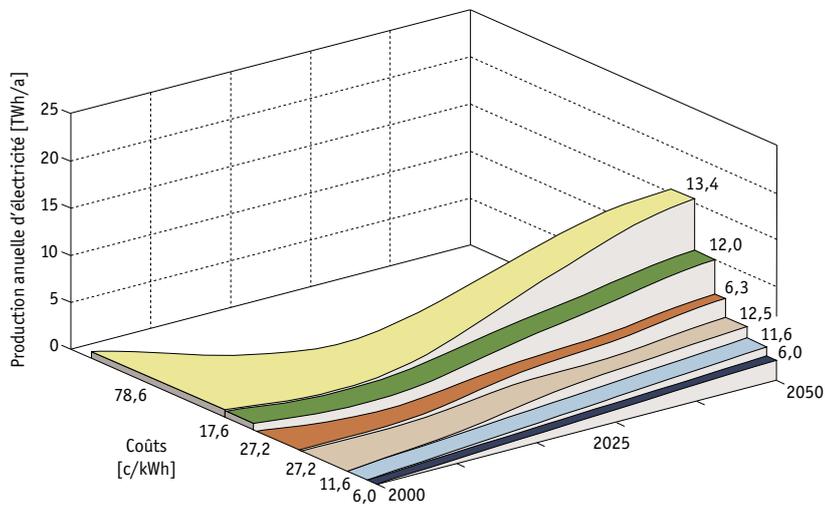
Comparaison de la production d'électricité (en TWh) issue de sources d'énergie renouvelables en 2003 et en 2050. Les chiffres relatifs à la photovoltaïque reposent sur le scénario 2 (développement de la puissance installée à 6000 MW). Les valeurs pour l'énergie hydraulique correspondent à la production moyenne escomptée.

	2003	2050
Pompes à chaleur	1,4	11,3
Biomasse	5,2	7,2
Energie solaire thermique	0,19	3,4
Géothermie	–	2,4
Total	6,8	24,3

Comparaison de la production de chaleur (en TWh) issue de sources d'énergie renouvelables en 2003 et en 2050

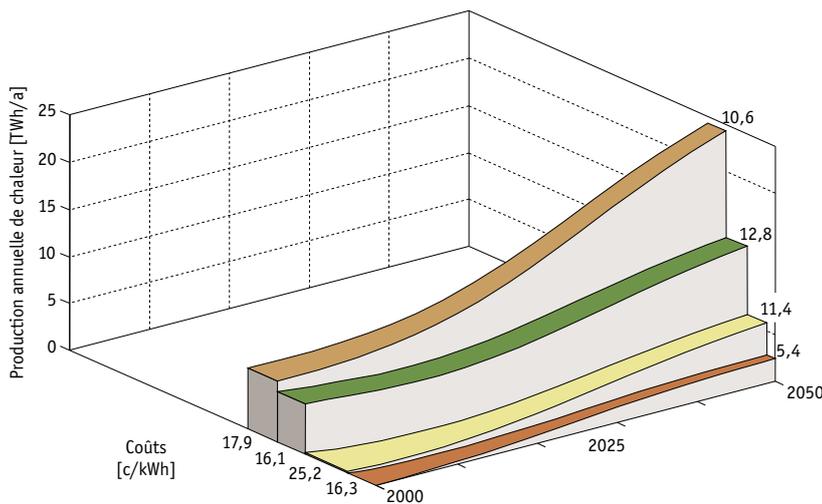
	2003	2050
Carburants liquides	0,021	5,8
Gaz	0,69	5,0
Total	0,71	10,8

Comparaison de la production de gaz et de carburant (en TWh) issus de sources d'énergie renouvelables en 2003 et en 2050



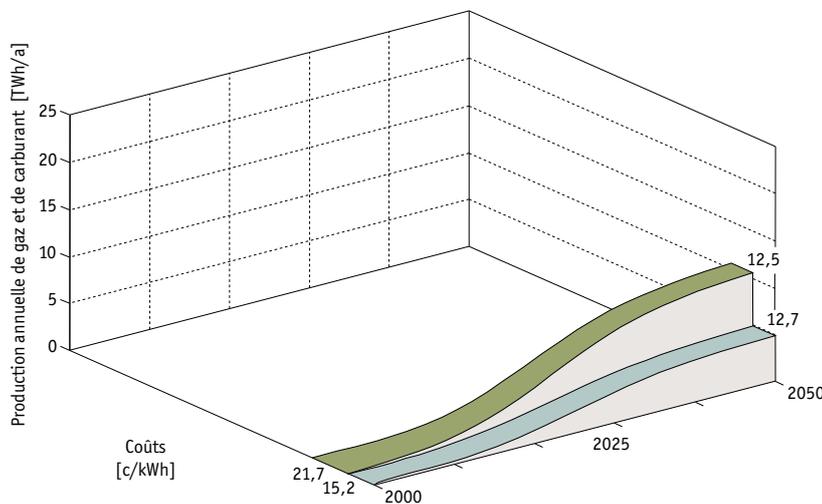
- Photovoltaïque
- Biomasse
- Géothermie
- Énergie éolienne
- Petite hydraulique
- Grande hydraulique (expansion)

Figure 1: Evolution au fil du temps de la production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. La largeur des bandes correspond aux coûts de revient. La production d'électricité représentée a lieu additionnellement à celle des centrales hydrauliques existantes.



- Pompes à chaleur
- Biomasse
- Énergie solaire thermique
- Géothermie

Figure 2: Evolution au fil du temps de la production de chaleur à base de sources d'énergie renouvelables. La largeur des bandes correspond aux coûts de revient.



- Carburants liquides
- Gaz

Figure 3: Evolution au fil du temps de la production de gaz et de carburant à base de biomasse. La largeur des bandes correspond aux coûts de revient.



de la géothermie profonde, de la photovoltaïque et de l'énergie éolienne contribue respectivement à raison de pourcentages à un chiffre. Dans le scénario d'expansion à 6000 MW, la contribution de la photovoltaïque comme variante la plus chère s'élèverait à la fin de la période d'observation à 11 pour cent.

Production de chaleur

Comme indiqué plus haut, dans le cas des pompes à chaleur, des chauffages au bois et des capteurs solaires, une mise en exploitation complète des potentiels n'est pas

Un objectif ambitieux

Les calculs indiquent que la valorisation des potentiels existants au cours des 50 années à venir est faisable d'un point de vue technologique. Des efforts considérables sont cependant requis.

prévisible pour 2050, mais seulement vers 2070. Afin de parvenir à une comparabilité des valeurs, nous partons ici de l'hypothèse que les potentiels – et donc le nombre d'installations mises en place – ne seront réalisés qu'aux trois-quarts d'ici 2050.

Selon le plan de route, la production de chaleur à base de sources d'énergie renouvelables en Suisse augmentera donc par rapport à 2003 de 17,5 TWh pour atteindre 24,3 TWh d'ici 2050 (figure 2). En fin d'expansion en 2070, la production de chaleur renouvelable se situera à 30,9 TWh. En ce qui concerne la mise à disposition de chaleur, les pompes à chaleur et la biomasse apportent la contribution la plus importante, suivies des capteurs solaires et de la géothermie profonde. Les 170 000 installations de technologie du bâtiment aujourd'hui en opération passeront d'ici 2050 à 740 000. A environ 430 000 pompes à chaleur et chaudières à biomasse s'ajouteront 310 000 installations supplémentaires de production de chaleur qui seront intégrées dans les enveloppes de bâtiment.

Carburant

La production de vecteurs énergétiques chimiques à base de sources d'énergie renouvelables est particulièrement avantageuse, car ceux-ci peuvent être facilement stockés et utilisés de manière efficiente. En 2050, une production de

5,8 TWh sera possible sous forme de carburants liquides, de même qu'une production de 5,0 TWh pour le gaz (figure 3). Ce dernier chiffre indique la teneur en énergie du gaz qui est utilisé directement comme carburant ou transformé en électricité ou en chaleur, comme c'est déjà le cas aujourd'hui avec le gaz produit principalement dans des installations à gaz de digestion. La production de gaz indiquée dans le tableau est prise en compte de manière correspondante dans les figures 1 et 2 dans la valeur initiale pour la biomasse. En 2003, le biogaz a trouvé un usage direct en tant que carburant à hauteur de seulement 0,006 TWh.

L'option à long terme de la production d'hydrogène à base de sources d'énergie renouvelables n'a pas été examinée de manière approfondie, étant donné que selon l'état actuel des connaissances elle ne promet pas de contribution significative d'ici 2050.

Aucun goulot d'étranglement n'est prévisible

Les calculs indiquent qu'une pleine valorisation des potentiels est possible d'ici 2050, resp. d'ici 2070 pour le domaine de la chaleur. Les limites de capacité dans la construction et le montage des installations, les dépenses en énergie et les besoins nets en capitaux ne représentent pas des facteurs contraignants. Les calculs indiquent cependant aussi que le développement suggéré est ambitieux et exige en partie des taux de croissance annuels considérables.

Le bilan du point de vue économique

Le développement des sources d'énergie renouvelables suggéré par le plan de route est faisable aussi d'un point de vue financier. Un délai supplémentaire dans la mise en exploitation pourrait cependant s'avérer problématique sur le plan économique.

Le plan de route se limite à modéliser l'évolution de la production d'énergie au niveau des installations. Le modèle calcule donc les coûts de revient à la « pince de remise » au consommateur resp. au réseau respectif. Les surcoûts éventuels d'une intégration de cette énergie dans des réseaux existants ou restant à construire ne sont pas pris en compte. Ne sont inclus non plus ni les coûts additionnels d'éventuelles prestations de rééquilibrage lors d'oscillations des livraisons d'électricité en provenance de sources d'énergie renouvelables, ni les coûts de la distribution de chaleur issue de la géothermie profonde.

Le plan de route suppose par ailleurs que l'énergie issue de sources d'énergie renouvelables peut être vendue aux coûts de revient respectifs, malgré le fait que ceux-ci soient du moins aujourd'hui en partie considérablement plus élevés que ceux de sources d'énergie non renouvelables. Nous partons donc du principe que les consommateurs finaux assumeront volontairement ou à la suite d'interventions étatiques les surcoûts des sources d'énergie renouvelables en acceptant de payer un prix de l'énergie plus élevé.

Toutefois, les coûts de la production d'énergie à base de sources renouvelables baisseront fortement au cours des années à venir, suivant la courbe d'apprentissage. Ainsi, dans le domaine de l'électricité, on peut s'attendre en 2050 à des coûts de revient situés entre 6 c/kWh (grande hy-

draulique) et bien 13 c/kWh (photovoltaïque). Les coûts de revient devraient aussi baisser fortement dans le domaine de la chaleur. Ils devraient se situer en 2050 entre 5 c/kWh (géothermie profonde) et 13 c/kWh (biomasse).

La photovoltaïque comme facteur critique

Les données disponibles permettent de déterminer des coûts de revient moyens pour l'électricité issue de sources d'énergie renouvelables (figure 4). Si les coûts de revient de l'électricité issue d'énergie hydraulique, solaire et éolienne ainsi que d'installations de géothermie et de biomasse sont transmis aux clients selon un calcul mixte, ceux-ci augmenteront d'ici 2035 d'au plus 2 c/kWh ou environ un tiers. Au vu de la baisse continue des coûts de revient, la surtaxe dans le calcul mixte tomberait même d'ici 2050 à 1,5 c/kWh. La photovoltaïque joue un rôle important dans ce contexte. Si le domaine de la photovoltaïque n'est développé que jusqu'à atteindre une puissance de 2000 MW plutôt que de 6000 MW, les coûts de revient moyens sur la totalité de la période d'observation n'augmenteront pas de plus de 1,5 c/kWh.

Une part des sources d'énergie renouvelables n'est disponible que de manière irrégulière. Les frais occasionnés par l'insertion de ces sources d'énergie dans le réseau électrique existant n'ont pas été examinés. Les coûts de réseau,

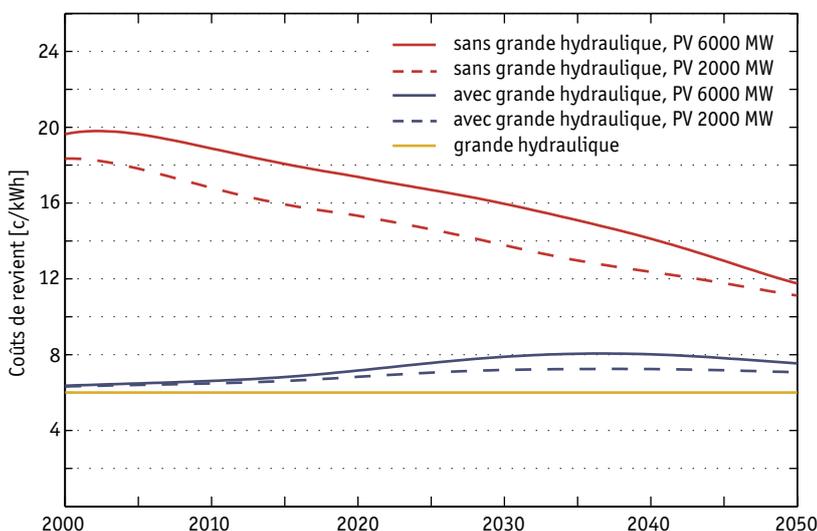


Figure 4 : Coûts de revient moyens de la production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En rouge, les coûts de revient moyens des sources d'énergie renouvelables non-encore mises en exploitation. En bleu, les coûts de revient moyens si l'on ajoute à cette électricité celle en provenance de la grande hydraulique (orange).



qui ne devraient pas baisser de manière significative à l'avenir, représentent cependant déjà aujourd'hui les deux-tiers des coûts de revient totaux de l'électricité: la mise en œuvre du plan de route ne devrait donc mener qu'à une faible augmentation du prix de l'électricité.

Ainsi que l'indiquent les figures 1 à 3, le plan de route ne suppose pas une mise en exploitation instantanée des sources d'énergie renouvelables mais plutôt un développe-

Le financement n'est pas un obstacle

Le plan de route suppose que l'expansion n'aura pas lieu de manière instantanée. C'est pourquoi les investissements nets annuellement requis sont d'un ordre de grandeur raisonnable du point de vue de l'économie nationale.

ment s'étirant sur un demi-siècle. Les investissements nets requis annuellement, calculés séparément pour chacune des technologies d'exploitation, augmenteront au total de manière continue jusque vers 2025. Pour l'année de l'expansion maximale ils comportent dans la variante 1 avec 2000 MW finaux de photovoltaïque environ 500 millions de francs, dans la variante 2 avec 6000 MW 750 millions de francs. Après 2025, les investissements nets requis diminuent à nouveau.

Eviter les surcapacités

Au total, au niveau économique le financement ne devrait pas représenter un facteur contraignant pour la valorisation des sources d'énergie renouvelables proposée par le plan de route d'ici 2050. Une mise en exploitation des énergies renouvelables plus rapide que celle esquissée par le plan de route pourrait cependant entraîner des conséquences problématiques sur le plan économique. Si le potentiel est mis en exploitation très rapidement, il en résulte après l'expansion des surcapacités dans l'industrie concernée, étant donné que les anciennes installations ne doivent pas encore être remplacées. Au vu de cet état des choses, il semble indiqué de ne pas repousser les investissements dans les énergies renouvelables mais de s'engager dans cette voie dès maintenant. Dans le cas contraire, les énergies renouvelables devraient être développées d'autant plus rapidement à une date ultérieure, avec des conséquences néfastes pour les producteurs.

		Nombre d'installations mises en place		No. max. d'inst. à mettre en place par an	Invest. nets annuels max. [millions de Fr]
		2003	2050		
Pompes à chaleur		80 000	320 000 ¹⁾	15 000	65
Energie solaire thermique		40 000	310 000 ¹⁾	15 000	50
Géothermie profonde		-	20	1-2	20
Biomasse	Chaleur	50 000	110 000 ¹⁾	8 000	60
	Electricité	600	2 300	100	25
	Gaz	70	830	65	18
	Carburant	1	50	3	30
Photovoltaïque 2000 MW		1 600	80 000	3 500	100
Photovoltaïque 6000 MW		1 600	240 000	16 000	450
Energie éolienne		6	650	70	60
Petite hydraulique		1 000	2 000	20	5

Valorisation des sources d'énergie renouvelables d'ici 2050. Les investissements nets annuels maximum tombent à des moments différents pour les différentes technologies.

¹⁾ Dans le domaine de la production de chaleur, une mise en exploitation complète des potentiels n'est prévisible que vers 2070. Dans l'éventualité de la réalisation du plan de route, à cette date respectivement 400 000 pompes à chaleur et installations solaires thermiques ainsi que 124 000 installations de production de chaleur à base de biomasse auront été mises en place.



Saisir activement la chance

La Suisse dispose bien d'un potentiel considérable dans le domaine des sources d'énergie renouvelables. Cependant, même si celui-ci est pleinement valorisé, le pays continuera à nécessiter à l'avenir des vecteurs énergétiques non renouvelables afin de parvenir à ses besoins.

Le plan de route esquissé permet une série de conclusions qui pourraient avoir des implications pour la politique énergétique suisse à long terme:

- > La Suisse dispose d'un potentiel indigène techniquement exploitable considérable de sources d'énergie renouvelables. Dans l'hypothèse d'une pleine valorisation de ce potentiel, la production de chaleur utile, d'électricité et de carburant issus de sources d'énergie renouvelables augmentera d'aujourd'hui 42,6 TWh à 85,2 TWh en l'an 2050, et même à 91,8 TWh en fin d'expansion en 2070. Sans les grandes centrales hydrauliques, la production augmentera de 7,9 TWh à 49,2 TWh. Pour autant que la consommation d'énergie persiste à son niveau actuel, même cette croissance ne permettrait cependant de mettre à disposition à base des sources d'énergie renouvelables qu'un bon tiers de l'énergie requise. Si la consommation d'énergie continue à croître au même rythme que par le passé, la quantité supplémentaire d'énergie renouvelable produite ne correspondrait même pas au surcroît de consommation. Une réduction de notre dépendance des vecteurs énergétiques non renouvelables serait dans ce cas impossible.

Un déficit demeure

- > Selon les nouvelles perspectives énergétiques élaborées par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) pour l'horizon 2035 avec quatre scénarios (I - Poursuite de la politique actuelle; II - Collaboration renforcée; III - Priorités nouvelles; IV - Transition vers la société à 2000 watts), dans le cas de la réalisation du plan de route, même en 2050 plus de la moitié de l'énergie consommée proviendra de sources non renouvelables. En effet, même dans le scénario le plus favorable, présupposant des mesures rigoureuses (scénario IV), la consommation d'énergie

ne diminue même pas d'un tiers. D'un autre côté, les perspectives supposent que, même dans le cadre du scénario IV, l'utilisation des énergies renouvelables en Suisse ne comportera qu'environ la moitié de ce que le plan de route indique être possible.

Premier problème: l'électricité

- > Les perspectives énergétiques prévoient une consommation d'électricité croissante à long terme. Dans le scénario IV, la consommation d'électricité baisse bien de 5 pour cent d'ici 2035, mais la part de la consommation d'électricité à la consommation totale d'éner-

Les besoins continueront de croître

Les perspectives énergétiques de la Confédération indiquent que la consommation d'électricité continuera de croître. Un approvisionnement à base exclusive de sources indigènes d'énergie renouvelables n'est pas réaliste dans un avenir proche.

gie passe d'environ un quart à un tiers. Même dans le cas de la mise en œuvre du plan de route, il ne sera pas possible d'ici 2050 d'assurer entièrement l'approvisionnement de la Suisse grâce à des sources indigènes d'électricité renouvelables. Afin d'assurer de manière autonome la sécurité de l'approvisionnement, une part de production d'électricité à base de vecteurs énergétiques fossiles ou d'énergie nucléaire sera inévitable.

- > La loi sur l'approvisionnement en électricité, qui fait actuellement l'objet d'une consultation parlementaire, prévoit d'augmenter d'ici 2030 de 5,4 TWh la part de la production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. Rapporté au niveau actuel de consommation d'électricité, cela représente une augmentation



de 10 pour cent des sources d'énergie renouvelables. Le plan de route indique que ces 5,4 TWh sont faisables, mais déjà ambitieux.

De bonnes perspectives dans le domaine de la chaleur

- > Selon toutes prévisions, le taux d'approvisionnement par des énergies renouvelables indigènes le plus élevé se trouvera dans le domaine de la production de chaleur. Cela est dû en premier lieu au fait que le parc immobilier sera beaucoup plus efficace au niveau énergétique d'ici 2050. Selon le scénario IV, malgré une augmentation de la superficie immobilière, les besoins en chaleur baisseront de l'ordre de 40 pour cent par rapport à leur niveau actuel d'ici 2035. Dans le cas de la mise en œuvre du plan de route, un bon 40 pour cent des besoins en

Dépendances dans le domaine des transports

Même si la demande d'énergie dans le secteur des transports diminuait au cours des années à venir, celle-ci demeurerait à long terme fortement dépendant de vecteurs énergétiques fossiles.

chaleur devraient pouvoir être mis à disposition de manière renouvelable et indigène d'ici 2050. En fin d'expansion en 2070, cette part comportera même plus de la moitié.

Deuxième problème: la mobilité

- > A côté de l'électricité, le deuxième champ problématique notoire de la discussion politique énergétique sont les transports, resp. l'énergie nécessaire à la mobilité, et en particulier la disponibilité de carburants liquides et gazeux. Le scénario IV des perspectives énergétiques du Conseil fédéral prévoit d'ici 2035 une réduction de la demande d'énergie dans le secteur des transports d'un tiers, seuls 16 pour cent de ces besoins en énergie pouvant être couverts de manière renouvelable. Selon le plan de route, rapporté au niveau de consommation du scénario IV, un quart peut être couvert de manière indigène et renouvelable, pour autant que le gaz produit à base de biomasse soit affecté dans sa totalité aux transports. Même à long terme, le domaine des transports continuera à dépendre fortement de la disponibilité de

vecteurs énergétiques fossiles, à moins de développer un système de transports radicalement différent.

L'objectif à long terme de la société à 2000 watts

- > Si la consommation d'énergie en l'an 2050 correspondait à la société à 2000 watts ambitionnée par le Conseil fédéral, les besoins pourraient être couverts environ aux trois-quarts par des sources indigènes d'énergie renouvelables. Seul un quart resterait à produire de manière non renouvelable, probablement à base de pétrole pour les carburants liquides en particulier dans le domaine des transports aériens, à base de gaz naturel ainsi qu'à base de combustibles nucléaires pour l'électricité issue d'énergie nucléaire. Chaque TWh additionnel produit à base de sources indigènes d'énergie renouvelables nous rapproche de 16 watt d'un approvisionnement énergétique durable. Un approvisionnement énergétique durable, reposant principalement sur des sources d'énergie renouvelables, n'est donc possible qu'avec un niveau de consommation d'énergie bien inférieur au niveau actuel. La valorisation des sources d'énergie renouvelables présentée ici doit donc s'accompagner d'une amélioration massive de l'efficacité énergétique.

Les importations – une alternative?

- > La possibilité de l'importation de vecteurs énergétiques renouvelables a été consciemment omise de ces considérations. Les importations d'énergie issue de sources renouvelables sont en partie meilleur marché que la production indigène. Cela est valable en particulier pour les biocarburants et l'est peut-être aussi pour les importations d'électricité «vertes» en provenance d'installations éoliennes. Le potentiel de l'utilisation de sources d'énergie renouvelables est donc plutôt plus élevé que ne l'indique le plan de route.

Les objectifs climatiques ne seront pas atteints

- > L'indicateur principal des répercussions écologiques du plan de route est l'envergure des émissions de CO₂ évitées. Afin de pouvoir déterminer leur volume, il faut formuler une hypothèse pour les émissions de CO₂ dans le cas de référence où le plan de route n'était pas réalisé. Deux cas limite sont envisageables: soit la totalité



de l'électricité produite de manière non renouvelable en Suisse en 2050 proviendra de centrales à turbine gaz-vapeur (TGV) opérées au gaz naturel, soit de centrales nucléaires (CN).

Dans le premier cas, les émissions de CO₂ seront de l'ordre de 50 millions de tonnes – pour autant que la consommation d'énergie reste constante et qu'un léger déplacement s'opère de l'huile de chauffage vers l'électricité. Dans le deuxième cas (CN), les émissions de CO₂ en 2050 seront de l'ordre de 39 millions de tonnes. Avec la mise en œuvre du plan de route, les émissions de CO₂ se monteraient à environ 38 millions de tonnes dans le cas de TGV, et environ 32 millions de tonnes dans le cas de CN. Cela correspond à une réduction de 24 resp. 18 pour cent, donc une contribution non négligeable. Celle-ci ne suffit cependant pas à atteindre l'objectif indiqué de protection climatique à long terme d'une tonne d'émissions de CO₂ par tête, donc environ 7 millions de tonnes d'ici 2050. Cela est valable même dans le cas d'un recul de la consommation d'énergie selon le scénario IV des perspectives énergétiques en combinaison avec la mise en œuvre du plan de route.

Il faut agir urgemment

- > La réalisation du plan de route entraîne des surcoûts qui peuvent être qualifiés de raisonnables sur le plan de l'économie nationale. Au niveau du décideur économique individuel, les vecteurs énergétiques renouvelables demeurent cependant coûteux par rapport aux vecteurs énergétiques conventionnels. Même le scénario d'un prix du pétrole brut de 100 dollars par baril n'entraîne pas de changement fondamental, comme l'ont dévoilé les travaux sur les perspectives énergétiques. En l'absence de mesures politiques d'accompagnement, le potentiel esquissé dans le plan de route ne sera probablement mis en exploitation qu'en petite partie ou alors avec des délais, soumis à une pression plus élevée et avec des conséquences économiques indésirables.

Un défi politique

Le plan de route ne s'exprime pas quant aux conditions cadre politiques qui seraient requises ou même seulement avantageuses afin de pouvoir exploiter pleinement d'ici

2050 de la manière esquissée le potentiel de valorisation des sources d'énergie renouvelables disponibles en Suisse. Il indique simplement les conséquences technologiques et économiques qui découleraient d'une décision de la part de la Suisse de faire usage des possibilités existantes. Ainsi que le laissent présager les perspectives énergétiques de la Confédération, un véritable faisceau de mesures politiques d'accompagnement sera requis s'il s'agit de réaliser le plan de route présenté ici. Une politique énergétique active et efficace est nécessaire maintenant et dans les années à venir afin de saisir la chance qui s'offre d'assurer à long terme un approvisionnement énergétique adéquat, économique et écologique sur la base de sources d'énergie renouvelables.

Source des données

Cette brochure est basée sur l'étude «Plan de route pour les énergies renouvelables en Suisse jusqu'en 2050 – Une analyse des potentiels des énergies renouvelables et de leur valorisation en Suisse», mandatée par la Commission de l'énergie de la SATW, rédigé par Dr Markus Real, Zurich.

Les personnes suivantes ont collaboré à cette étude:

- > Simulations, méthodologie de l'analyse dynamique et son dépouillement: Dr Hans-Peter Bader, Ruth Scheidegger, EAWAG, Dübendorf
- > Compilation des dépenses énergétiques cumulées: Mireille Faist Emmenegger, Dr Rolf Frischknecht, esu Services, Uster
- > Collaboration scientifique: Dr Andreas Gut, Office fédéral de l'énergie, Berne; Professeur Alexander Wokaun, Institut Paul Scherrer, Villigen
- > Graphiques: Thomas Bosshard, ETH Zurich

Suite à des discussions internes avec d'autres experts, la Commission de l'énergie de la SATW est parvenue à des résultats légèrement divergents dans le cas de certains chiffres et valeurs.

Bibliographie recommandée

- Bader, H.P., Scheidegger, R., Real, M.: Global renewable energies: A dynamic study of implementation time, greenhouse gas emissions and financial needs. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 6 (2), 73–148 (2004).
- Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R.: Anteil erneuerbarer Energien an einer zukünftigen Energieversorgung der Schweiz – KEA (nicht erneuerbar) und CO₂-Emissionen. Rapport interne ESU-Services, mandaté par le projet Plan de route énergies renouvelables Suisse de la SATW (2004).
- Hirschberg S. et al.: BFE-Energieperspektiven: Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen (2004).
- Jochem, E. et al.: Steps towards a 2000 Watt-Society – Developing a White Paper on Research & Development of Energy-Efficient Technologies. CEPE/ETH and novatlantis, Zurich (2002).
- Kiener, E.: Nachhaltige Energieversorgung. Bericht zur SATW Jahrestagung 2004. Cahier SATW n°38 (2005).
- Kunz, S. et al.: Concept d'énergie éolienne pour la Suisse. Bases pour la localisation de parcs éoliens. Ed.: OFEN, OFEFP, ARE (2004).
- Oettli, B. et al.: Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz. Rapport final. Publication OFEN (2004).
- Office fédéral de l'énergie (OFEN): Statistique suisse de l'électricité 2003. N° de commande 805.005.03 (2004).
- Office fédéral de l'énergie (OFEN): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2003. N° de commande 805.520.7D (2004).
- Pabst, B.: Deep Heat Mining: Potenzialstudie für die Schweiz (2000).
- Real, M.: A methodology for evaluating the metabolism in the large scale introduction of renewable energy systems. Diss. ETH Zurich 12937 (1998).
- Rognon, F.: Energetische Potenziale von Wärmepumpen kombiniert mit Wärme-Kraft-Kopplung. Rapport final. Publication OFEN 250044 (2005).
- SATW: CH50% – Pour une Suisse consommant moitié moins d'énergies fossiles. Cahier SATW n°30 (1999).

Glossaire

> **Coûts de revient**

Coûts de production annuels d'une installation de production (rapportés à la quantité moyenne nette d'énergie produite). Ils se composent de la somme des frais d'exploitation et des coûts du capital (amortissements et paiements d'intérêts annuels) divisée par la quantité nette d'énergie produite. Les bénéfices ne sont pas pris en compte dans les coûts de revient.

> **Energie nette**

Energie produite annuellement par une installation déduction faite des dépenses énergétiques occasionnées en amont par les pièces de remplacement et l'opération.

> **Frais d'exploitation**

Dépenses annuelles nécessaires à l'opération d'une installation de production (rapportées à la quantité d'énergie produite moyenne). Celles-ci incluent de manière typique les frais de personnel, le remplacement éventuel de pièces de l'installation, les combustibles resp. les énergies auxiliaires (p.ex. électricité pour les pompes à chaleur) ou les redevances pour les droits d'usage d'une ressource (p.ex. redevances hydrauliques).

> **Frais d'investissement**

Coûts de fabrication d'une installation de production (rapportés à l'unité de puissance). Ceux-ci comprennent les coûts de planification, de construction et de mise en opération de l'installation.

> **Investissements nets**

Besoins annuels en capitaux pour le développement et le renouvellement du parc d'installations déduction faite du produit fourni par les installations qui sont déjà amorties mais n'ont pas encore atteint leur durée de vie. Il est supposé que le produit est réinvesti dans sa totalité.

> **Plan de route**

Représentation d'un développement optimisé de la valorisation du potentiel techniquement exploitable des énergies renouvelables.

> **Potentiel techniquement exploitable**

Celui-ci indique l'ampleur escomptée avec laquelle une source d'énergie renouvelable peut être exploitée de manière raisonnable d'un point de vue technologique. Ce qui est considéré comme techniquement raisonnable repose entre autres sur l'estimation subjective des experts. Le potentiel est exprimé en quantité d'énergie produite ou en nombre d'installations mises en place.

Impressum

Cahier SATW n° 39

Zurich, décembre 2006

Editeur

Académie suisse des sciences techniques SATW, Case postale, 8023 Zurich

Auteurs

Dr Marco Berg, Dr Markus Real

Rédaction & mise en page

Dr Felix Würsten, Zurich

Traductions

Maud Capelle, The Language Studio, Londres

Impression

DAZ – Druckerei Albiesrieden AG, 8047 Zurich

Illustrations

Couverture: Montage de turbine éolienne, Entlebuch (Suisse Eole); p. 5: Barrage de la centrale électrique Wildegg-Brugg (Axpo Holding AG); p. 7 gauche: Maison de retraite Sur Falveng, Domat/Ems; p. 7 droite: Stade de Suisse, Berne (Agence Solaire Suisse); p. 7 centre: Swiss Mill Tower, Zurich (EWZ, Zurich); p. 9 haut: UIOM Thun; p. 9 bas: Centrale de cogénération STEP Werdhölzli, Zurich (SuisseEnergie pour les installations d'infrastructure); p. 11: Installation de biogaz agricole, Visp (BiomassEnergie); p. 13 haut: Turbine éolienne Entlebuch; p. 13 bas: Turbine éolienne Gütsch, Andermatt (Suisse Eole); p. 16: Centrale hydraulique Oederlin, Obersiggenthal; p. 18: Centrale au bois Kleindöttingen (Proma Energie AG); p. 19: Forage profond centrale géothermique Bâle, Kleinhüningen (Geopower Basel AG); p. 20: Installation de biogaz para-agricole, Herisau (agrenum, Ing. Büro HERSENER, Wiesendangen); p. 21: Installation de combustion de bois, Wilderswil (Schmid AG Holzfeuerungen, Eschlikon); dos de couverture gauche: Barrage Panix; dos de couverture droite: Centrale Mapragg (Axpo Holding AG).

Tirage

3500 ex. D, 1500 ex. F, 500 ex. E

Le rapport peut être téléchargé sous forme de fichier pdf sur la page d'accueil de la SATW: www.satw.ch

ISBN: 3-908235-13-8



SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences