

Objectif de l'étude

L'Académie suisse des sciences techniques (SATW) s'emploie à placer sur le terrain de l'objectivité le débat crucial portant sur la production électrique de demain, fournissant les bases d'une discussion ouverte, factuelle et axée sur l'avenir parmi les acteurs sociaux, politiques et économiques. A cet effet, la chaire de politique énergétique de l'ETH Zurich a été chargée de déterminer et de représenter de manière comparable les bilans énergétiques globaux de différentes formes de production d'électricité. Il s'agissait par ailleurs de préciser l'évolution future des technologies concernées. Les investissements dans la production d'électricité engageant à long terme: au-delà de la situation actuelle, ce sont donc aussi les perspectives d'évolution à moyen terme qui importent. L'étude fera l'objet d'une mise à jour régulière.

Arrière-plan

Les efforts de réduction des émissions de CO₂ entraînent partout dans le monde des bouleversements majeurs dans la production d'électricité. Les nouvelles formes renouvelables de production d'électricité sont partout les grands porteurs d'espoir pour couvrir les besoins croissants en électricité tout en remplaçant progressivement les combustibles fossiles. En Suisse aussi, les nouvelles énergies renouvelables peuvent jouer un rôle déterminant. En amont de la votation concernant la nouvelle loi sur l'énergie le 21 mai 2017, il est pourtant une nouvelle fois apparu qu'il existait de grandes incertitudes concernant l'adéquation des différentes formes de production d'énergie et que les arguments avancés ne se fondaient pas toujours assez sur des faits. Une nouvelle étude portant sur les coûts et les émissions produites sur l'ensemble du cycle de vie¹ a contribué à placer le débat sur des bases plus solides en précisant par exemple les potentiels de réduction des coûts et des gaz à effet de serre jusqu'en 2050 (p.ex. pour le photovoltaïque). Mais jusqu'à présent, le bilan énergétique global de différentes technologies n'avait pas encore été clairement présenté.

¹ Bauer, C., et al (2017). Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies, Office fédéral de l'énergie OFEN, Ittigen, 01.11.2017

Impressum

Auteurs de l'étude: Bjarne Steffen, Dominique Hischier et Tobias S. Schmidt (chaire de politique énergétique de l'ETH Zurich)
Groupe de suivi: Willy R. Gehrler, Rolf Hügli et Ulrich W. Suter (SATW)
Rédaction: Beatrice Huber et Adrian Sulzer (SATW)
Photographie: Swisswinds / Olivier Maire

Principales conclusions de l'étude

- L'étude confirme de manière éloquentes le bilan énergétique global positif de l'énergie hydraulique. Mais le photovoltaïque et surtout l'éolien présentent également un bon bilan. Il est toutefois impressionnant de constater à quel point l'énergie hydraulique devance les autres formes de production d'électricité en termes de taux de retour énergétique.
- L'efficacité du photovoltaïque et de l'éolien a nettement progressé ces dernières années et on peut s'attendre à l'avenir à des améliorations continues. Contrairement à ce qu'affirment certains, la sortie du nucléaire a le potentiel d'améliorer le bilan énergétique global et ainsi la durabilité et la pérennité de la production électrique en Suisse.
- Le remaniement du système d'approvisionnement énergétique suisse entraîne une hausse continue de la part aléatoire – c.a.d. fluctuante – de production d'électricité à base d'énergie photovoltaïque et éolienne. Le rôle de la technologie de stockage en tant qu'énergie de réglage ira donc croissant.
- En ce qui concerne les technologies de stockage d'électricité, les centrales hydrauliques à accumulation présentent un net avantage par rapport aux procédés power-to-gas-to-power et aux batteries. Malgré la situation économique actuellement difficile de l'énergie hydraulique, du point de vue du bilan énergétique global la Suisse devrait donc maintenir son statut de principal pilier de l'approvisionnement en électricité.
- Bien que contestés, les programmes d'encouragement étatiques tels la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) ont fortement stimulé l'innovation dans le secteur de l'énergie. Ils incitent à la mise en place de capacités plus élevées, accélérant ainsi le développement technologique au fil de la courbe d'apprentissage.
- D'autres formes d'énergie renouvelable non aléatoire comme la géothermie peuvent également jouer un rôle important à l'avenir. La politique devrait donc étudier la mise en place d'un mécanisme d'encouragement pour ces technologies.
- Enfin, les résultats de l'étude étayent aussi du point de vue du bilan énergétique global l'approche adoptée par le Conseil fédéral et le Parlement avec la Stratégie énergétique 2050, qui prévoit un développement important des nouvelles énergies renouvelables en Suisse.



Synthèse d'étude

Production d'électricité: les renouvelables à la pointe

Une nouvelle étude établit un excellent bilan énergétique global pour l'énergie hydraulique et les nouvelles énergies renouvelables en Suisse.

Pour le compte de l'Académie suisse des sciences techniques (SATW), des spécialistes de la chaire de politique énergétique de l'ETH Zurich ont pour la première fois analysé le bilan énergétique global des principales formes de production d'électricité en Suisse suivant une méthodologie uniforme. A cet effet, ils ont calculé deux indicateurs:

- **Demande cumulée d'énergie (non renouvelable)** ou «Non-Renewable Cumulative Energy Demand», soit les besoins cumulés en énergie non renouvelable pour la construction et le démantèlement d'une installation et pour la production électrique proprement dite. Pour les procédés de production fossile, il s'agit pour l'essentiel de l'énergie du combustible concerné (gaz, charbon, uranium).
- **Taux de retour énergétique** ou «Energy Return on Energy Investment» (EROI), qui décrit le ratio entre l'électricité produite et l'énergie investie («grise») sur l'ensemble de la durée de vie d'une installation et devrait toujours être supérieur à 1.

Ces indicateurs permettent de parvenir à des conclusions concernant le **bilan énergétique global**:

- Le bilan énergétique global de l'énergie hydraulique est excellent.
- L'analyse renforce l'argument en faveur du maintien impératif de l'énergie hydraulique en tant que principal pilier de l'approvisionnement en électricité de la Suisse.
- Les nouvelles énergies renouvelables obtiennent également de bons résultats.
- En raison de la courbe d'apprentissage technologique, le taux de retour énergétique des nouvelles énergies renouvelables a fortement augmenté au cours des dix dernières années, tendance qui se maintiendra à l'avenir.
- Le mix électrique suisse prévu par la Confédération dans la Stratégie énergétique 2050 devrait mener à une amélioration continue du bilan énergétique global.
- Les programmes d'encouragement publics contribuent de manière significative au développement positif des nouvelles énergies renouvelables (et d'autres technologies), y compris en ce qui concerne leur bilan énergétique global.

Etat des lieux du bilan énergétique global

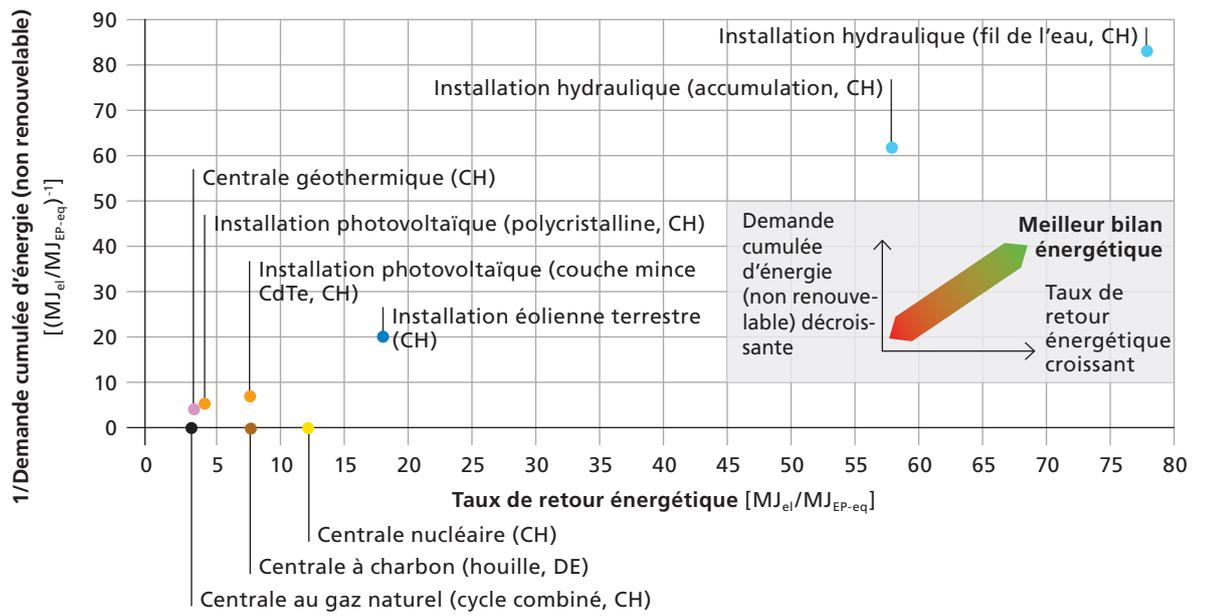


Figure 1: Le bilan énergétique global, déterminé à partir des indicateurs «Demande cumulée d'énergie (non renouvelable)» et «Taux de retour énergétique (EROI)», montre clairement que l'énergie hydraulique devance largement toutes les autres formes de production d'électricité. Cependant, les énergies photovoltaïque et éolienne se placent également en bonne position.

Parmi les procédés de production d'électricité utilisés en Suisse, c'est l'énergie hydraulique qui obtient de loin les meilleurs résultats en termes de bilan énergétique global, les centrales au fil de l'eau devançant les centrales à accumulation. Elles présentent la plus faible demande cumulée d'énergie non renouvelable et le taux de retour énergétique de loin le plus élevé. Etant donné que le mix électrique suisse compte environ 60% d'énergie hydraulique, ce résultat est réjouissant. L'énergie éolienne occupe la deuxième po-

sition en termes de bilan énergétique global, et ce malgré les conditions de vent du pays. En raison du combustible utilisé, la demande cumulée d'énergie non renouvelable est par nature plus élevée pour les technologies fossiles que pour les énergies renouvelables, ce qui se répercute sur leur bilan énergétique global. Dans ce groupe, c'est l'énergie nucléaire qui présente le taux de retour énergétique le plus élevé, suivie des centrales à charbon. Mais toutes deux sont nettement devancées par l'énergie éolienne.

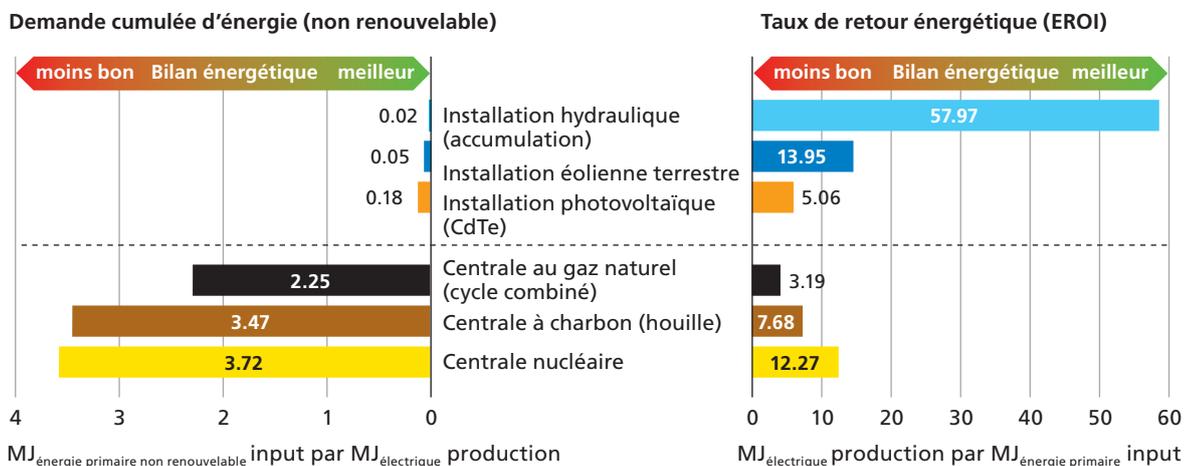


Figure 2: Les résultats en termes de demande cumulée d'énergie et de taux de retour énergétique font clairement apparaître la nette supériorité de l'énergie hydraulique.

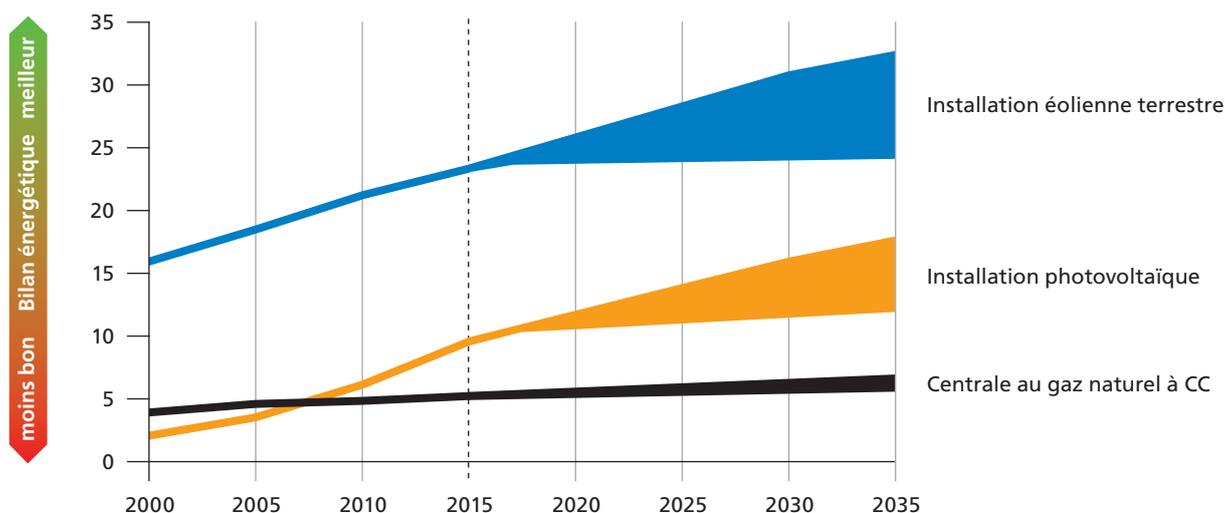
Taux de retour énergétique: l'éolien et le photovoltaïque ont réalisé d'importants progrès

L'efficacité d'une technologie s'améliore au fur et à mesure de sa diffusion et de l'expérience accumulée. Différentes études ont établi de tels effets de courbe d'apprentissage pour le secteur de l'énergie. Par le passé, le photovoltaïque et l'éolien ont ainsi réalisé d'importants progrès en matière de coûts mais également de taux de retour énergétique. Afin de pouvoir pronostiquer les évolutions futures, les auteurs ont développé un taux de retour énergétique dynamique. A cet effet, ils ont analysé et extrapolé des courbes d'apprentissage historiques pour des sites typiques d'Europe centrale, tenant compte des principales incertitudes concernant la puissance installée future et les effets d'apprentissage, mais non d'évolutions technologiques disruptives. Quatre procédés de production électrique ont été étudiés: gaz naturel (centrales au gaz à cycle combiné), photovoltaïque, éolien et houille. Comme les centrales à charbon ne concernent pas la Suisse, nous n'en tenons pas compte dans ce contexte.

En raison du manque de données et des fortes variations dans le cycle du combustible nucléaire (en particulier concernant l'extraction et l'enrichissement de l'uranium) ainsi que des grands écarts de dépenses énergétiques lors de la construction de centrales hydrauliques à accumulation selon leur site d'implantation, il n'a pas été possible de calculer un taux de retour énergétique dynamique pour les deux principaux modes de production d'électricité en Suisse. Cependant, étant donné que la sortie du nucléaire a fait l'objet d'une décision politique et que le potentiel d'expansion de l'énergie hydraulique est limité, l'étude indique de manière valable quelles seraient les alternatives les plus avantageuses d'un point de vue énergétique afin de compenser à l'avenir le déclin de l'énergie nucléaire et de couvrir une éventuelle augmentation des besoins en électricité.

Taux de retour énergétique (EROI)

$MJ_{\text{électrique}} \text{ production par } MJ_{\text{énergie primaire}} \text{ input}$



Remarque: En raison de la disponibilité limitée de données historiques en provenance de Suisse, la simulation a été effectuée pour des sites d'implantation typiques d'Europe centrale (qui présentent en moyenne de meilleures ressources éoliennes que les installations suisses existantes)

Figure 3: Evolution passée et attendue du taux de retour énergétique de l'énergie éolienne terrestre, de l'énergie photovoltaïque et des centrales au gaz à cycle combiné. La trajectoire projetée présente une amplitude de variation croissante, sans toutefois modifier sur le fond les tendances et le classement des différentes technologies.

Selon le scénario, les calculs indiquent pour l'éolien terrestre une amélioration du taux de retour énergétique à 25–30 d'ici 2035. Cette évolution s'explique par des installations plus grandes avec une puissance et un rendement énergétique plus élevés, l'utilisation de nouveaux matériaux et des améliorations dans les composants standard (p.ex. transformateurs et convertisseurs de tension). Le taux de retour énergétique du photovoltaïque devrait quant à lui augmenter à 12–17 en raison de modules plus efficaces, de meilleures méthodes de production et d'économies

d'échelle dues à une fabrication en plus grandes quantités. Comparativement, les modes étudiés de production d'électricité à base de combustibles obtiennent des résultats inférieurs. En 2035, les centrales au gaz à cycle combiné – technologie la plus pertinente pour la Suisse – devraient présenter un taux de retour énergétique de l'ordre actuel de 5–6. Par nature, ce type de prévisions est sujet à de grandes incertitudes. Mais la prise en compte de différents scénarios ne modifie de manière significative ni le classement des technologies ni l'envergure des gains d'efficacité à escompter.

Base de données

L'analyse s'est fondée principalement sur les données fournies par ecoinvent (www.ecoinvent.ch), leader international dans le domaine des données d'analyse de cycle de vie. Ce faisant, les besoins en énergie ont été pris en compte sur l'ensemble de la durée de vie des installations de production, de leur construction à leur démantèlement et à l'enlèvement des déchets. Pour les formes de production d'énergie non applicables à la Suisse, il a été fait appel à des chiffres en provenance d'autres pays européens tels l'Allemagne (houille) ou le Danemark (éolien offshore). Là où ecoinvent ne pouvait pas fournir de données, il a été fait appel à d'autres sources telles l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ou l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA).

Evaluation des technologies de stockage

Une autre partie de l'étude est consacrée aux différentes possibilités de stockage de l'électricité. Les auteurs utilisent à cet effet l'indicateur «Energy Stored on Energy Investment (ESOI)», qui établit un rapport entre la quantité totale d'énergie stockée au long du cycle de vie et l'énergie investie pour la production du moyen de stockage. Le résultat est particulièrement mauvais pour les batteries au plomb. Leur ESOI est de 1: au cours de leur durée de vie, elles ne stockent donc au total que le montant d'énergie que nécessite leur propre production. L'ESOI est déjà nettement plus élevé pour les batteries lithium-ion (facteur 7) ou les procédés power-to-gas-to-power (facteur 23). Avec un ESOI de 186, ce sont cependant les centrales hydrauliques à accumulation qui s'avèrent leader incontesté des technologies de stockage. Là aussi, c'est donc l'énergie hydraulique qui occupe la première place. De nombreuses technologies de stockage n'en sont cependant qu'au début de leur courbe d'apprentissage, ce qui ouvre la perspective de nettes améliorations.
