

Énergie éolienne

Document de connaissances de base, état: mars 2020

1. Synthèse

Si l'énergie éolienne dispose en Europe d'un fort potentiel de mise en œuvre, en Suisse, les possibilités d'approvisionnement en énergie par le biais de cette source sont compliquées. Certes, la Confédération a estimé que, selon la Stratégie énergétique 2050, un total de 4 TWh issus de l'énergie éolienne était un chiffre réaliste. Les technologies éoliennes actuelles peuvent facilement être utilisées aussi en Suisse, et un nombre suffisant de sites adaptés sont identifiés. Toutefois, en pratique, de nombreux projets échouent en raison du potentiel de conflit (notamment concernant la protection du paysage et de la nature). De plus, les coûts de production dans notre pays sont supérieurs aux prix du marché, tandis qu'à l'étranger, ils sont nettement plus bas pour les bons sites. La réalisation de projets nécessite donc un encouragement supplémentaire, qui passe par la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC). On s'attend à ce que les coûts se rapprochent – lentement, mais en continu – des prix du marché grâce aux innovations techniques et aux économies d'échelle.

Le futur développement de l'énergie éolienne se heurtera par conséquent à plusieurs problèmes fondamentaux, notamment les procédures d'autorisation fastidieuses, le manque partiel d'acceptation de la part de la population concernée et la rentabilité de certains projets (coûts, productivité éolienne et nombre d'heures de pleine charge). La problématique de la grande proportion d'injection d'énergie stochastique pour la gestion du réseau perd de ce fait de son importance, la précision des prévisions et les technologies de stockage en progression atténuant l'incertitude.

2. Situation actuelle en Suisse et dans le monde

2.1 Situation en Suisse

Fin 2018, la Suisse comptait 37 turbines éoliennes représentant une puissance totale de 75 MW.¹ De plus, il existe également 25 petites installations individuelles d'une puissance de moins de 150 kW chacune, qui, ensemble, ont produit moins de 0,19 GWh en 2018. Cette année-là, la production électrique issue de l'éolien s'est élevée à environ 121,7 GWh.² Cela correspond au besoin annuel en électricité d'environ 36 500 ménages, soit presque le nombre de ménages des villes de Neuchâtel et de Fribourg.³ Cependant, cela correspond à seulement 0,2% de la consommation totale d'électricité (58 TWh de consommation finale d'électricité en 2018).⁴

Les capacités ont pratiquement doublé par rapport à 2010, quand la puissance installée se montait encore à 32 MW et la production à 74 GWh. Depuis 2010/2011, 3 turbines d'une puissance de 2,3 MW chacune sont en service sur le site du Peuchapatte (JU). Fin 2011, une turbine de 2,3 MW a été construite sur le site de

¹ Source: Suisse Eole 2019a

² Source: Suisse Eole 2019

³ Source: Suisse Eole 2019a

⁴ Source: OFEN 2019

Gries (VS/Italie), et une deuxième turbine de 1 MW a été ajoutée sur le site de Feldmoss/Rengg (LU). 2012 a vu l'agrandissement du site de Gütsch-Andermatt (UR) de 0,9 MW. Le seul nouveau site construit en 2012 a été celui de Charrat (VS), avec 3 MW, et début 2013, une installation d'une puissance de 3 MW a été mise en service à Haldenstein (GR).

À Mont-Crosin (BE), 4 turbines ont été rénovées en 2013, produisant ainsi environ 5,5 MW de puissance supplémentaire. À Entlebuch (Lutersarni, LU), une turbine de 2,3 MW a été construite en 2013. En 2014, aucun projet n'a été réalisé. En 2016, 3 turbines d'une puissance totale de 7 MW ont été montées sur le col de Gries (Griespass). Le début des travaux de 5 installations, avec une puissance combinée de 11,75 MW, dans la région du Gothard (Tessin) est prévu pour 2019.⁵

La procédure de planification des centrales éoliennes comporte plusieurs étapes et s'avère relativement complexe. Ce sont les cantons et en partie les communes qui sont compétents en la matière. Cette procédure fait intervenir le plan directeur cantonal, le plan d'affectation communal, et enfin une demande d'autorisation de construire.⁶

Les intérêts de la Confédération sont définis et pris en compte via les «Recommandations pour la planification d'installations éoliennes»⁷, en vigueur depuis 2010.⁸ Ces Recommandations ont été remplacées en 2017 par la «Conception énergie éolienne» de l'Office fédéral du développement territorial (ARE). Cette «Conception énergie éolienne» a été adoptée par le Conseil fédéral en juin 2017.⁹ L'intérêt croissant pour l'énergie éolienne requiert de nouvelles approches en matière de planification des installations éoliennes. La nouvelle «Conception énergie éolienne» fournit des indications pour la pesée des intérêts en matière d'utilité et de protection.

La production d'électricité éolienne était encouragée dans le cadre de la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC), qui a été remplacée par le système de rétribution de l'injection (SRI) au 1^{er} janvier 2018, dans le cadre de la révision de la Loi sur l'énergie. Les tarifs de rétribution pour l'électricité issue d'énergies renouvelables sont fixés à l'aide d'installations de référence par technologie et par classe de puissance. La durée de rétribution est variable. En raison des progrès technologiques et de la maturité commerciale croissante des technologies, les tarifs de rétribution sont régulièrement contrôlés et adaptés. Le tarif d'injection pour le courant éolien se situe actuellement (état en 2018), en moyenne par kWh injecté pendant 15 ans, entre 23 et 13 centimes, selon le site. Pour les grandes installations éoliennes, le taux de rétribution est contrôlé après cinq ans de fonctionnement, et éventuellement adapté. Pour les installations dont le site est situé au-dessus de 1700 mètres d'altitude, un bonus de 2,5 ct./kWh est versé.

Dans le cadre de sa Stratégie énergétique, la Confédération vise une part de 7% pour 2050, ce qui correspondrait à 4000 GWh annuels. À titre de comparaison, l'énergie éolienne a atteint une part de 21% en Allemagne fin 2018, de 14% en Europe et de 3% à l'échelle mondiale. Le Danemark (avec 41%), l'Irlande

⁵ Source: Suisse Eole 2019b

⁶ Source: OFEN 2010

⁷ Source: OFEN 2010

⁸ Les Recommandations pour la planification d'installations éoliennes de 2010 mentionnent les conditions-cadre pour la planification et la construction de parcs éoliens et suivent le principe consistant à concentrer les installations éoliennes sur les sites adaptés. Parmi les critères de sélection des bons sites, on trouve les conditions de vent, l'équipement, la distance avec les constructions et l'impact sur la nature et le paysage. Le concept doit servir de base de planification pour les cantons et les communes.

⁹ Source: ARE 2017

(avec 28,0%) ainsi que le Portugal (avec 24%) sont en tête des statistiques mondiales en matière d'énergie éolienne.¹⁰

2.2 Situation dans le monde

Quelque 51 GW de puissance éolienne ont été installés en 2018, dont 23 000 MW en République populaire de Chine, 7600 MW aux États-Unis, 2400 MW en Allemagne, 2200 MW en Inde, 2000 MW au Brésil, 1600 MW en France, et environ 800 MW (chacun) au Mexique, en Grande-Bretagne et en Suède.¹¹ Le cumul des capacités installées mondiales se montait à près de 591 000 MW à fin 2018. La Chine occupe la première place avec 211 000 MW, suivie des États-Unis avec 97 000 MW, de l'Allemagne avec 59 000 MW, de l'Inde avec 35 000 MW et de l'Espagne avec 23 000 MW. La puissance installée connaît depuis près de 20 ans une forte croissance, avec une progression annuelle moyenne d'environ 13%.¹² Selon le site et la technologie (onshore/offshore), la production réelle présente cependant des niveaux très différents. Les éoliennes onshore devraient selon les estimations fonctionner environ 1300 à 2700 heures à pleine charge, les installations offshore environ 2800 à 4000 heures.¹³

Les États de l'UE possédant les plus fortes puissances installées d'énergie éolienne sont l'Allemagne (59 GW), l'Espagne (23,5 GW), la Grande-Bretagne (20,9 GW), la France (15,3 GW) et l'Italie (9,9 GW). L'Allemagne et l'Espagne ont la plus grosse puissance installée avec une part de capacité de 43% en Europe. Fin 2018, à l'échelle européenne, la puissance installée correspondait à 179 GW, avec une croissance de 8%, et présentait un potentiel de production d'électricité de 362 TWh/a, qui couvre 14% de la consommation d'électricité en Europe.¹⁴

En Allemagne, au Danemark et en Espagne, le développement de l'éolien connaît depuis des années une évolution comparable, portée par la volonté politique. Cette situation a favorisé l'émergence d'un nouveau secteur industriel dans ces trois pays ainsi qu'une utilisation accrue des technologies d'origine allemande, danoise et espagnole sur d'autres marchés au cours des dernières années. Le premier investisseur mondial dans le domaine de l'éolien est cependant la Chine.

2.3 Éolien offshore en Allemagne

Le gouvernement fédéral allemand a lancé en septembre 2010 le concept énergétique 2050, qui prévoit l'installation de 15 000 MW de puissance éolienne offshore d'ici à 2030. 6500 MW doivent être atteints dès 2020. Après quelques difficultés au démarrage, le projet a pu passer de la phase de planification à celle de la mise en œuvre.¹⁵

En juin 2017, des éoliennes d'une puissance totale de 4570 MW étaient en service dans la mer du Nord et la Baltique. En décembre 2014, pour la première fois, plus de 1 GW – plus exactement 10449,2 MW – a pu être injecté par un total de 285 installations éoliennes offshore. En octobre 2015, 4600 MW de lignes de raccordement offshore étaient achevées. La phase de retardement dans le développement du réseau offshore est terminée. À partir de 2016, le développement de l'énergie éolienne offshore a connu une nouvelle courbe de croissance constante, après avoir battu en 2015 un record de nouvelles constructions dû

¹⁰ Source: Wind Europe 2019

¹¹ Source: GWEC 2019

¹² Source: GWEC 2019

¹³ Source: Fraunhofer ISE 2013

¹⁴ Source: Wind Europe 2019

¹⁵ Source: BMWi 2017

à des effets de rattrapage imposés par le réseau. En tout, les installations d'énergie éolienne offshore raccordées au réseau ont atteint en 2018 une capacité totale de près de 970 MW.

3. État de la technologie et développement futur

Les éoliennes constituent une technologie largement développée, qui ne devrait plus connaître d'ici à 2035/2050 que des avancées graduelles, notamment dans les domaines du coût de la conception, de la technique de fabrication, du taux de rendement total ou encore des modèles d'exploitation et de maintenance.

3.1 Installations onshore

La puissance des éoliennes individuelles a fortement augmenté ces 25 dernières années, passant de 0,5 MW à 7 MW maximum aujourd'hui (illustration 1). La puissance des nouvelles éoliennes que l'on installe actuellement atteint couramment 2 à 3 MW. Le choix de la puissance et de la hauteur du mât s'effectue principalement en fonction des conditions de vent. Sur la base de la « courbe d'apprentissage » observée par le passé, on peut estimer que les améliorations techniques et les économies d'échelle aboutissent à une diminution moyenne des coûts de 3 à 7% à chaque doublement de la puissance installée mondiale.

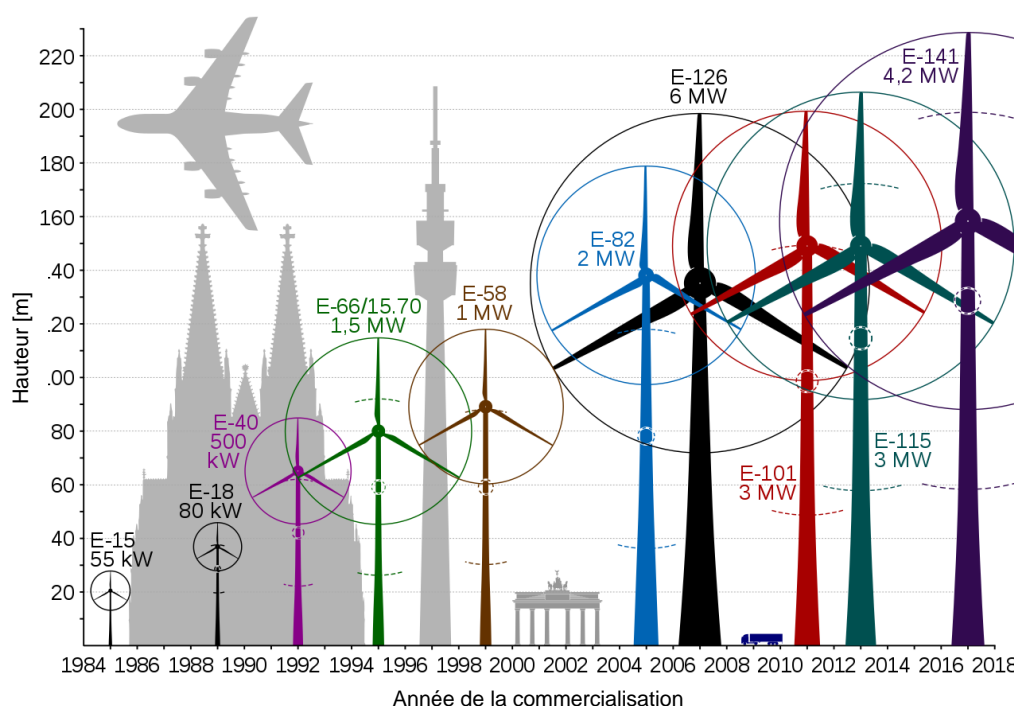


Illustration 1. Évolution des turbines éoliennes depuis 1984. Source: Wikipédia 2019.

3.2 Installations offshore

Les capacités des installations offshore se situent entre 5 et 7 MW environ. Dans ce domaine également, on table sur une diminution moyenne des coûts de 5 à 9% à chaque doublement de la puissance installée mondiale. Il convient cependant de noter que plus les éoliennes sont éloignées de la côte, plus leur prix est

élevé. Il existe également des facteurs de coût supplémentaires comme l'installation par des profondeurs plus importantes, ou le raccordement du parc éolien au réseau à très haute tension sur la terre ferme.

Les éoliennes offshore doivent présenter une stabilité d'autant plus grande que la profondeur de l'eau est importante. Elles sont censées pouvoir supporter leur propre poids, résister à des vents très forts et ne pas céder aux courants marins ou à la force des vagues.

4. Potentiel

Une méta-étude réalisée par le Trialogue Energie Suisse en 2009 a permis de synthétiser diverses estimations du potentiel des énergies renouvelables en Suisse à l'horizon 2035 et 2050.¹⁶

Les différentes études font apparaître de fortes divergences dans leurs estimations du potentiel attendu ou réalisable en 2035/2050 (tableau 1). Après les avoir toutes analysées, le Trialogue Energie Suisse table sur un potentiel d'environ 1,5 TWh en 2035 et de 2 à 3 TWh en 2050. Suisse Eole se base sur le concept d'énergie éolienne pour la Suisse et sur les planifications cantonales pour aboutir à un potentiel réalisable d'environ 4 TWh à long terme. Les perspectives énergétiques de l'OFEN anticipent également une production de près de 4 TWh en 2050.¹⁷

L'éolien présente en Suisse un potentiel théorique élevé, qui est cependant réduit par une série de critères d'exclusion: conditions de vent spécifiques, zones forestières, déclivité, propriétés du terrain et présence d'habitants. L'AES évalue le potentiel réalisable à 0,7 à 1,5 TWh en 2035, et à 2 à 4 TWh en 2050. L'exploitation réelle de ce potentiel dépendra fortement de la volonté politique, notamment de la simplification des procédures de planification et des conditions d'encouragement, ainsi que de l'acceptation de la population concernée. Dans les conditions actuelles, les acteurs du secteur n'estiment pas que le potentiel existant puisse être réalisé.

Potentiel (TWh)	2020	2035	2050
Attendu (AES)		0,7-1,5	2-4
Attendu (Trialogue Energie Suisse)		1,5 (± 0,5)	2-3
Perspectives énergétiques OFEN 2007/2011	0,6		4

Tableau 1. Potentiel de l'éolien en Suisse en 2050. Sources: AES 2012, ETS 2009, OFEN 2011.

5. Estimation de la puissance disponible et de la qualité de l'énergie

La production électrique des éoliennes varie en fonction de la vitesse du vent – plus cette dernière est élevée, plus l'énergie fournie est importante, avec une variation plus que proportionnelle. L'un des avantages de l'éolien réside dans la répartition de la production sur l'année, avec une prédominance de la période hivernale: on a constaté empiriquement que l'été comptait pour 35% et l'hiver pour 65%.¹⁸ Les pronostics de production se basent sur les prévisions météorologiques. La moindre inexactitude en la matière peut avoir de lourdes conséquences, car la production électrique est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cela signifie que lorsque celle-ci est doublée, la quantité d'énergie produite est multipliée

¹⁶ Source: ETS 2009

¹⁷ Source: OFEN 2011

¹⁸ Source: ETS 2009

par 8. La production des éoliennes est ainsi plus incertaine que celle des installations photovoltaïques. Elle est en outre moins prévisible. Mais les prévisions des vents, en se basant sur des données, gagnent toujours plus en qualité et en fiabilité. Les technologies de stockage, en progression, réduisent l'inconvénient de planification des installations éoliennes par rapport aux installations photovoltaïques quant à l'intégration des systèmes.

6. Coûts de revient

Les coûts de revient des projets actuels se fondent sur les taux de la RPC de 24 ct./kWh (rétribution initiale + surhaussement). En plus des coûts pour l'éolienne en tant que telle, les planifications chères et de longue haleine ainsi que les restrictions d'exploitation imposées par les autorités contribuent aux coûts de revient. Une légère réduction des coûts est à prévoir d'ici à 2050 en raison des améliorations techniques et des économies d'échelle. Les progrès de la technologie pourraient faire baisser les coûts jusqu'à environ 12 à 17 ct./kWh. Les coûts de revient de l'électricité ont été calculés avec un taux d'intérêt de 5% et 10%, pour une durée de vie de 20 ans, ce qui donne les fourchettes figurant dans le tableau 2. Ces estimations sont naturellement émises sous réserve d'une chute (ou d'une augmentation) exceptionnelle en cas de modification significative des coûts à l'échelle mondiale – comme celle qui s'est produite concernant la rétribution de l'électricité photovoltaïque.

Coûts	2013	2035	2050
Investissement (CHF/kW)	2000-2500	1850	1800
Exploitation et maintenance	Env. 2% des coûts d'investissement par an		
Coûts de revient (ct./kWh)	14-20	12-18	12-17

Tableau 2. Évolution des coûts prévue jusqu'en 2050. Source: OFEN 2007 et 2011, AES 2012.

Les coûts de revient actuels et escomptés sont nettement moins élevés à l'étranger en raison de conditions de vent plus favorables (production variant en fonction du cube de la vitesse du vent) ou de possibilités de transport et de montage plus simples. En 2018, des procédures d'appels d'offres ont été menées dans 8 pays européens pour l'adjudication des aides financières, avec une puissance totale de 9,3 GW. Les plus grandes quantités ont été vendues aux enchères en Allemagne (4,0 GW), en Turquie (2,1 GW), en Pologne (1 GW) et aux Pays-Bas (0,8 GW). En raison des différents systèmes d'encouragement et de rétribution, il est difficile de comparer les tarifs. En Allemagne, des primes d'injection de 38 à 63 euros/MWh ont été accordées dans le domaine de l'éolien onshore.¹⁹

¹⁹ Source: Wind Europe 2019

7. Environnement/climat

Les éoliennes ne rejettent pas de CO₂ directement. Les émissions au cours de leur cycle de vie se chiffrent à 24 g d'équivalent CO₂ par kWh.²⁰ Cependant, l'acceptation de cet équipement par les populations immédiatement concernées est plutôt faible en raison de considérations liées au paysage, à la protection des animaux et aux émissions sonores.

8. Conditions-cadre

8.1 Encouragement

L'éolien est une technique de production d'électricité donnant droit au SRI. Les critères d'exclusion cités ci-dessous servent de base pour définir les plans directeurs cantonaux et les plans des zones, qui permettent ensuite d'accorder une autorisation de construire.

Le programme de l'Office fédéral de l'énergie pour la promotion des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique a fixé en 2001 un objectif alors ambitieux: la Suisse devait produire en 2010 50 à 100 millions de kWh d'électricité d'origine éolienne. Les différentes facettes et étapes de la procédure de planification (avec le plan directeur cantonal, le plan d'affectation communal et l'autorisation de construire) ainsi que les normes de qualité du secteur et les recommandations de la Confédération garantissent que l'énergie éolienne est utilisée dans le respect des valeurs naturelles et paysagères.

8.2 L'énergie éolienne dans la planification directrice cantonale

Le plan directeur cantonal définit la façon de coordonner les activités ayant un effet sur l'organisation du territoire, compte tenu du développement souhaité, ainsi que l'ordre dans lequel ces activités sont envisagées et les moyens à mettre en œuvre (art. 8 LAT). Il traite donc la thématique de l'énergie renouvelable, et en règle générale également celle de l'énergie éolienne.

La stratégie définie par chaque canton dans ce domaine précise dans quelle mesure et dans quelles conditions l'énergie éolienne doit être encouragée à l'échelle cantonale. Dans les cantons de grande étendue, il peut être judicieux de déléguer certaines tâches de planification liées à la production d'énergie éolienne à l'échelon régional. Selon l'art. 6, al. 4 LAT, les cantons tiennent compte des plans directeurs des cantons voisins et mettent en place des coopérations efficaces entre cantons et régions. Au sens de l'art. 11 LAT, ils doivent également prendre en considération les tâches et intérêts de la Confédération.

²⁰ Source: OFEN 2012

9. Évaluation et analyse SWOT

Critère d'évaluation	2018	2035	2050
Coûts d'investissement et de revient	Coûts supérieurs au prix du marché	Coûts au niveau du prix du marché attendu	Coûts au niveau du prix du marché attendu
Compatibilité environnementale	Bonne (si on considère uniquement les émissions de CO ₂)	Bonne (si on considère uniquement les émissions de CO ₂)	Bonne (si on considère uniquement les émissions de CO ₂)
Disponibilité de l'énergie	Production stochastique (environ deux fois plus élevée durant le semestre hivernal que durant le semestre estival)	Production stochastique (environ deux fois plus élevée durant le semestre hivernal que durant le semestre estival)	Production stochastique (environ deux fois plus élevée durant le semestre hivernal que durant le semestre estival)
Potentiel de production	0,12 TWh	0,7-1,5 TWh	2-4 TWh
Acceptation sociale	Très mitigée (plus faible sur place que dans les villes)	Encore incertaine	Encore incertaine
Acceptation politique	Très mitigée (plus faible sur place que dans les villes)	Encore incertaine	Encore incertaine

Tableau 3. Évaluation de la production d'électricité éolienne suivant différents critères en 2018, 2035 et 2050.

Vert: bon niveau,

orange: niveau satisfaisant, rouge: niveau médiocre.

externe	<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réduction des coûts à long terme en Suisse d'environ -50% et plus d'ici à 2050 - Prix de revient atteignant le niveau du prix du marché vers 2035 - Amélioration de la planification grâce aux progrès dans les outils de prévision 	<p>Risques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Procédure d'autorisation fastidieuse - En Suisse, nombre limité de sites présentant de bonnes conditions de vent et conformes à l'affectation de la zone - Acceptation parfois insuffisante de la part de la population concernée
interne	<p>Points forts</p> <ul style="list-style-type: none"> - Très bon bilan environnemental - Contribution à la couverture des besoins en électricité, notamment en hiver (65% de la production) 	<p>Points faibles</p> <ul style="list-style-type: none"> - Production stochastique, la seule régulation possible est l'arrêt de l'installation - Production difficilement prévisible

Tableau 4. Analyse SWOT.

10. Sources

AES 2012	Scénarios pour l’approvisionnement électrique du futur, Rapport global, Association des entreprises électriques suisses (VSE/AES), Aarau, 2012
AIE 2013	Technology Roadmap: Wind Energy, Agence Internationale de l’Energie (AIE), Paris, 2013
ARE 2017	Concept énergie éolienne, 2017, https://www.are.admin.ch/are/fr/home/developpement-et-amenagement-du-territoire/strategie-et-planification/conceptions-et-plans-sectoriels/conceptions/conception-energie-eolienne.html
BMWi 2017	Windenergie auf See, Ziele, http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Windenergie-auf-See/Ziele/ziele.html
ETS 2009	Erneuerbare Energien: Übersicht über vorliegende Studien und Einschätzung des Energie Trialog Schweiz zu den erwarteten inländischen Potenzialen für die Strom-, Wärme- und Treibstoffproduktion in den Jahren 2035 und 2050 inklusive Berücksichtigung der Potenziale aus Abfällen, Grundlagenpapier für die Energie-Strategie 2050. Energie Trialog Schweiz (ETS), Zürich, 2009
Fraunhofer ISE 2013	Studie Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. Fraunhofer ISE, Fribourg, mai 2013
GWEC 2019	Global Wind Report 2019, Conseil mondial de l’énergie éolienne (GWEC), Bruxelles, 2019
OFEN 2007	Perspectives énergétiques 2035 – tome 5, Analyse et évaluation de l’offre d’électricité, Office fédéral de l’énergie (OFEN), Berne, juin 2007
OFEN 2010	Recommandations pour la planification d’installations éoliennes: utilisation des instruments de l’aménagement du territoire et critères de sélection des sites, Office fédéral de l’énergie (OFEN), Berne, mars 2010; http://www.bfe.admin.ch/energie/00588/00589/00644/index.html?lang=fr&msg-id=32397.com
OFEN 2011	Fondements pour la stratégie énergétique du Conseil fédéral, actualisation des perspectives énergétiques 2035 (printemps 2011), Office fédéral de l’énergie (OFEN), Berne, 2011
OFEN 2012	ESU-services, PSI, Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in der Schweiz, Office fédéral de l’énergie (OFEN), Berne, 2012
OFEN 2019	Statistique globale suisse de l’énergie 2018, Office fédéral de l’énergie (OFEN), Berne, 2019
Suisse Eole 2019a	Windenergie in der Schweiz - Zahlen und Fakten, état au 31 juillet 2019, Suisse Eole, Bâle, 2019. https://wind-data.ch/wka/list.php?lng=fr

- Suisse Eole 2019b Fiche d'information sur l'énergie éolienne en Suisse. http://www.suisse-eole.ch/media/ul/resources/Suisse_Eole_Faktenblatt_Windenergie_Zahlen_201902.pdf
- Wind Europe 2019 Wind Energy in Europe in 2018, Trends and Statistics , Wind Europe, 2019