

PLAN EOLIEN POUR LE CLIMAT : LA SOLUTION ÉNERGETIQUE HIVERNALE

Analyse et actualisation du potentiel de
l'énergie éolienne en Suisse

Table des matières

1. RESUME	4
2. INTRODUCTION	7
3. ENERGIE EOLIENNE : CONTEXTE	8
3.1 DANS LE MONDE	8
3.2 EN EUROPE	11
3.3 DANS LES REGIONS VOISINES	12
3.4 PARCS EOLIENS SUISSES A L'ETRANGER	13
3.5 EN SUISSE	14
4. EVOLUTION TECHNOLOGIQUE	19
4.1 EVOLUTION DURANT LA DERNIERE DECENNIE	19
4.2 PERSPECTIVES	22
5. SITUATION EN SUISSE	23
5.1 BILAN DU DEVELOPPEMENT EOLIEN	23
5.2 CAUSES DES DELAIS ET BLOCAGES	25
5.3 MISE EN PERSPECTIVE DU DEVELOPPEMENT EN SUISSE	27
6. ANALYSE DU POTENTIEL EOLIEN SUISSE	28
6.1 MISE A JOUR DU POTENTIEL	28
6.2 MISE EN PERSPECTIVE	31
6.3 LES ATOUTS DE L'EOLIEN	31
6.4 NOUVEL OBJECTIF POUR L'EOLIEN SUISSE	33
6.5 MISE EN PERSPECTIVE AVEC LA PLANIFICATION EN SUISSE	34
7. SCENARIO ENERGETIQUE SUISSE EOLE – LA NECESSITE DE L'ENERGIE EOLIENNE	35
7.1 HYPOTHESES DE BASE ET REFERENCES	36
7.2 SCENARIO A	38
7.3 SCENARIO B	39
7.4 SCENARIO C	40
7.5 CONCLUSIONS DES SIMULATIONS	41
8. CONCLUSION	42
REFERENCES	43

Auteurs :

Suisse Eole

Avec la collaboration de :

SuisseEnergie



Office Fédéral de l'Énergie (OFEN)

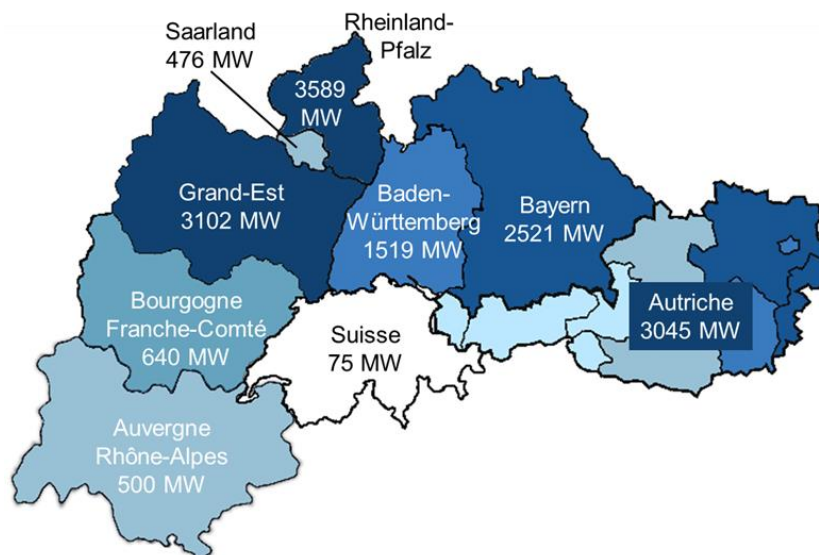


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

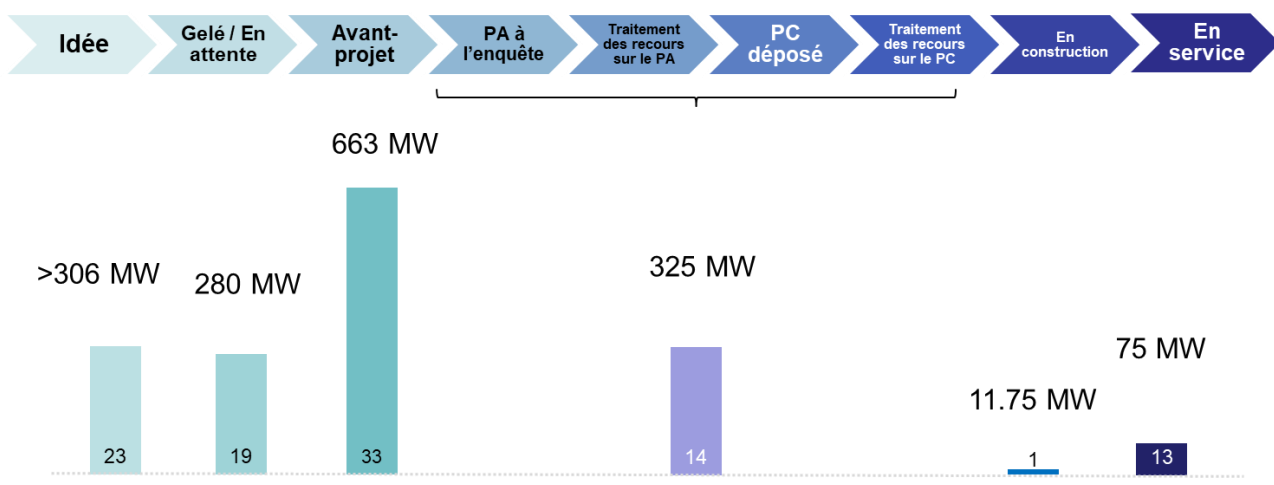
1. Résumé

Les recherches effectuées par Suisse Eole dans le cadre du **Plan éolien pour le climat : la solution énergétique hivernale** ont permis de dresser un bilan global et local de l'énergie éolienne et de son potentiel. Au niveau mondial, les analyses de contexte ont démontré que l'énergie éolienne a dépassé tous ses objectifs de réalisation : elle couvre par exemple aujourd'hui jusqu'à 115% de la consommation au Danemark certains jours de grand vent ! Sa croissance est continue, avec un doublement de la capacité installée tous les trois ans¹. L'éolien fait désormais partie des formes d'énergies les plus compétitives et est voué à devenir la première source d'électricité en Europe dans moins d'une décennie.



Capacité éolienne installée en Suisse et dans les régions voisines [Suisse Eole]

Lorsqu'on s'intéresse à la situation en Suisse, le constat est malheureusement moins rose : le développement de l'énergie éolienne stagne depuis plus de dix ans, et les projets peinent à avancer dans leur planification complexe ou devant les tribunaux. Les objectifs fixés pour 2020 auraient été atteints, mais les projets sont bloqués par des procédures ; malgré une haute acceptation générale, les recours systématiques de certains individus et associations entravent la transition énergétique souhaitée par les citoyens suisses. Parmi les projets qui ont démarré les procédures vers l'obtention de leur permis de construire, près de 4 MW sur 5 sont actuellement bloqués devant les instances judiciaires avec comme conséquence la non-atteinte dans les temps des buts 2020 fixés par la Confédération.

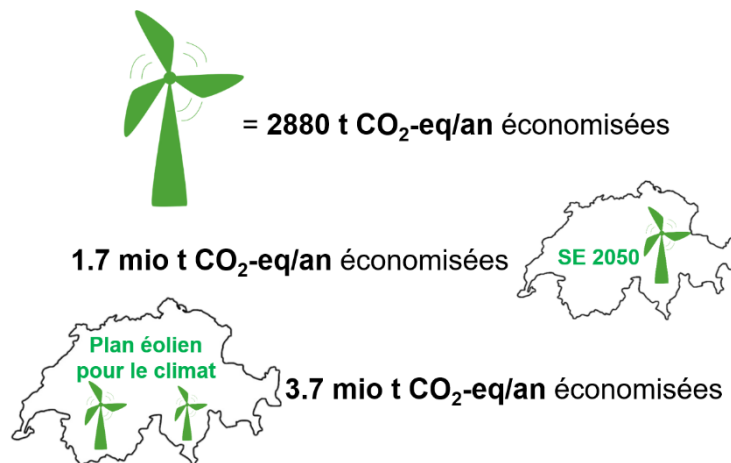


Etat des planifications de projets d'énergie éolienne en Suisse, fin 2019 (puissance planifiée et nombre de projets) [Suisse Eole]

¹ <https://gwec.net/>

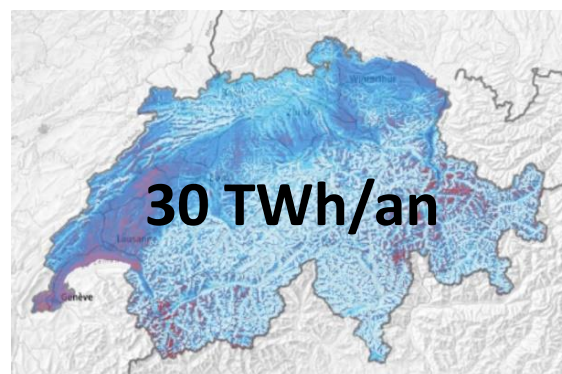
Cette lenteur des procédures contraint les développeurs suisses à se tourner vers l'étranger pour atteindre leurs buts de développement renouvelable, et représente un énorme manque à gagner en Suisse alors que la volonté est là – l'objectif 2035 peut être dépassé avec les projets en planification, qui représentent près de 1000 MW – et alors que les compétences et les connaissances liées à cette énergie verte sont présentes.

On sait par exemple qu'avec ses 15 g CO₂-eq/kWh, l'éolien présente le meilleur écobilan des nouvelles énergies renouvelables et économise 412 g CO₂-eq/kWh par rapport au mix énergétique importé. Son impact global sur l'environnement figure également parmi les plus faibles.



Quantités de CO₂ économisées grâce à l'énergie éolienne [Suisse Eole]

On sait également que les conditions de vents sont excellentes en Suisse – les Atlas suisse et européen le prouvent – et qu'elles n'ont rien à envier à celles des pays voisins. De plus, les développements technologiques depuis le début du millénaire permettent aujourd'hui de rendre accessibles et économiques de nombreux sites à potentiel éolien sans augmenter de manière disproportionnée les impacts dus à l'implantation de turbines. Malgré certaines limitations réglementaires ou techniques, les performances et la productibilité des installations sont en forte hausse et permettent de revoir le potentiel éolien à la hausse également. Ainsi, le potentiel éolien durablement réalisable en Suisse est de 30 TWh/an. Il a significativement augmenté avec l'évolution technique et la meilleure connaissance des conditions de vents à haute altitude.

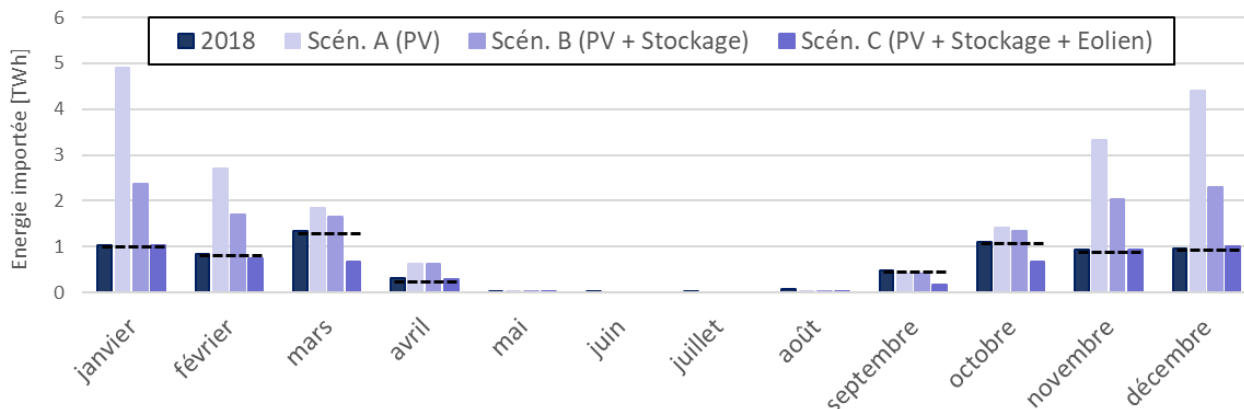


Potentiel éolien durable en Suisse [Suisse Eole]

Suisse Eole a pu déterminer que l'utilisation de 30% de ce potentiel sera nécessaire : un objectif de 9 TWh d'énergie éolienne en 2050 est réaliste pour la Suisse, et ce sans avoir à augmenter le nombre d'éoliennes prévues par la Confédération. Par des simulations horaires de différents scénarios énergétiques, la nécessité de se tourner vers l'énergie éolienne a été démontrée puisque celle-ci possède des atouts précieux qui contribueront à la diversité du mix énergétique et à la sécurité d'approvisionnement en Suisse. Notamment, l'éolien a une complémentarité unique en Suisse : une complémentarité non seulement saisonnière – les éoliennes produisent deux tiers de leur énergie pendant la période hivernale (octobre à mars), au moment où les besoins sont justement les plus importants – mais également une complémentarité territoriale – les

régimes des vents dans les différentes régions de Suisse permettent d'avoir en permanence une production éolienne, et donc de l'électricité d'origine éolienne est injectée sur le réseau en tout temps. Cela en fait une source d'énergie unique et précieuse, complémentaire aux autres énergies renouvelables et au stockage saisonnier. L'éolien, avec l'apport du solaire et l'hydraulique et combiné au stockage saisonnier, permettra à la Suisse de ne pas augmenter sa dépendance envers l'étranger en maintenant les importations au niveau actuel.

Importation nette mensuelle



Place de l'éolien dans le mix énergétique Suisse : seul l'apport hivernal de l'énergie éolienne permettra de maintenir les importations de courant étranger à leur niveau actuel [Suisse Eole]

Ce nouvel objectif de 9 TWh/an d'énergie éolienne – dont 6 TWh hivernaux – contribuera de façon significative à la transition énergétique suisse et au respect des engagements de Paris signés en 2016. Mais pour atteindre cet objectif, la Suisse a besoin de conditions cadres adaptées et de processus courts et clairs.

2. Introduction

Dans les rues du monde entier, jeunes et moins jeunes défilent pour le climat en réclamant une action politique rapide, forte et cohérente ; et la Suisse ne fait pas exception à la règle. Le moment est venu pour la Suisse de faire le point sur sa situation énergétique et climatique.

Parmi les thèmes de discussions et de débats, l'approvisionnement en énergie occupe une place importante. Entre efficacité énergétique, sortie du nucléaire, transformation des réseaux électriques et énergies renouvelables, le peuple suisse a déjà souhaité tracer la voie en acceptant la Stratégie énergétique 2050 proposée par le Conseil fédéral en 2017. Si d'aucuns mettent en doute le réalisme des objectifs à l'horizon 2050, de nombreux exemples attestent cependant que la Suisse est déjà sur la bonne voie, et que ces objectifs sont atteignables – voire même largement dépassables pour certains – au vu de l'évolution technologique et des mentalités. Ces objectifs peuvent donc se réaliser, à condition que la Confédération mette rapidement des moyens en œuvre vers une transition énergétique.

L'un des moyens prévus pour atteindre les buts de la stratégie est notamment l'accélération des procédures liées au déploiement des nouvelles énergies renouvelables et à la rénovation du réseau électrique. Pour l'énergie éolienne, cette accélération des procédures est d'autant plus essentielle que certains projets de parcs éoliens encore en procédure ont démarré il y a plus de 20 ans ! Cela alors qu'on constate un soutien majoritaire à cette source d'énergie dans la population. La Suisse atteint aujourd'hui le premier jalon 2020 fixé dans les scénarios énergétiques retenus par la Confédération, avec un objectif initial de 4400 GWh produits par les nouvelles énergies renouvelables², dont plus de 600 GWh d'énergie éolienne³. Avec les 130 GWh qui sont actuellement produits par les 37 installations éoliennes suisses, il reste du travail pour rattraper le retard accumulé depuis le début de ce millénaire.

À l'heure où les améliorations technologiques ouvrent de nouvelles perspectives et où la connaissance des vents progresse chaque année, il est temps aux yeux de Suisse Eole de dresser un bilan de la situation et de redéfinir les objectifs en actualisant l'état des connaissances dans le domaine de l'énergie éolienne. Ce document vise à dresser un tableau réaliste de la situation actuelle, du potentiel de développement de l'énergie éolienne et des mesures à prendre rapidement afin de ne pas rater le tournant énergétique. En outre, Suisse Eole présente un nouveau scénario énergétique et réaffirme la place essentielle qu'occupe l'énergie éolienne, grâce à ses atouts uniques, dans le mix énergétique suisse. De par sa parfaite complémentarité avec les autres énergies renouvelables, l'énergie éolienne est une des énergies clé pour parvenir à limiter le niveau des importations d'électricité et donc des émissions de CO₂, notamment en hiver.

²[La stratégie énergétique 2050 après l'entrée en vigueur de la nouvelle loi sur l'énergie](#)

³[Perspectives énergétiques 2050 - Résumé](#)

3. Energie éolienne : contexte

L'utilisation de l'énergie du vent par l'être humain remonte à l'Antiquité, notamment en Mésopotamie puis en Perse et en Chine, en lien avec l'agriculture. Mais l'énergie éolienne à proprement parler n'apparaît cependant que vers la fin du 19^e siècle avec la construction de la première éolienne entièrement automatisée pour la production d'électricité aux Etats-Unis. Un siècle plus tard, en 1980, c'est l'installation des premières éoliennes de 55 kW au Danemark dans le cadre d'un programme de recherche national qui marque le véritable début du développement de l'énergie éolienne.

Depuis, la technologie et le marché n'ont eu de cesse d'évoluer et de s'adapter aux besoins de la société. Presque quarante ans plus tard, la puissance installée éolienne totale mondiale avoisine les 600 GW et contribue à près de 6% de la production d'électricité mondiale (2018). La baisse constante des coûts et l'évolution de la technologie, ainsi que les nouveaux modèles économiques, contribuent à placer cette source d'énergie renouvelable parmi les plus compétitives.

Ce chapitre vise à donner un aperçu de la situation globale autant que locale, avec un résumé des chiffres clés pour le monde, l'Europe et la Suisse.

3.1 Dans le monde

3.1.1 Statistiques

Fin 2018, l'énergie éolienne a contribué à couvrir près de 6% de la consommation d'électricité mondiale grâce à une capacité installée totale de 591 GW dans plus de 100 pays, dont 51.3 GW mis en service en 2018. Il faut relever une certaine stabilité avec plus de 50 GW installés chaque année depuis 2014, et une tendance prévue d'ici à 2023 de plus de 55 GW par année⁴.

Historic development of total installations
GW

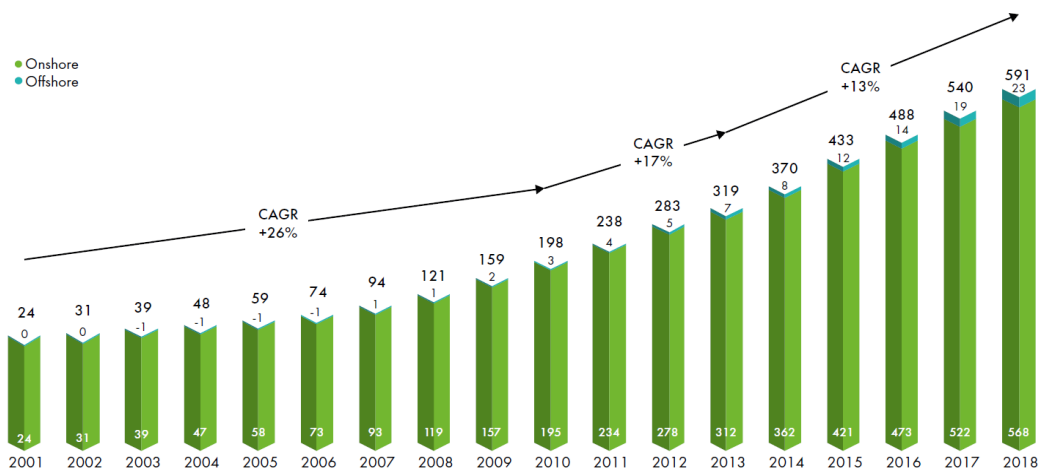


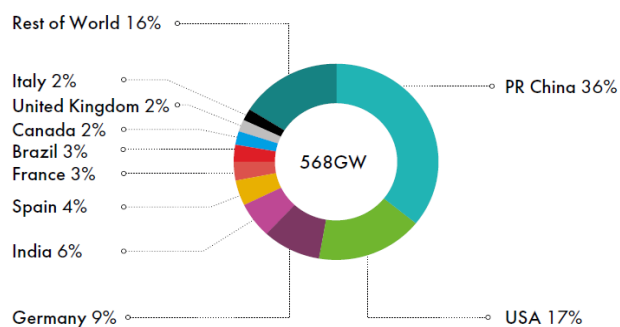
Figure 1 : évolution de la capacité éolienne totale installée dans le monde au 21^e siècle avec taux de croissance annuel composé [2]

Les leaders mondiaux dans le domaine sont la Chine, les Etats-Unis, l'Allemagne et l'Inde suivie de près par l'Espagne, qui totalisent à eux 5 plus de 70% de la capacité installée onshore. Le Royaume-Uni se démarque par sa puissance installée offshore de près de 8 GW et demeure le leader devant l'Allemagne et la Chine⁵. Si on regarde la capacité éolienne installée par habitant, on constate même que des pays de taille comparable à la Suisse ont rejoint le top 5 : Danemark, Irlande, Allemagne, Suède et Portugal [1].

⁴ data.worldbank.org, yearbook.enerdata.net, REN21 [1]

⁵ GWEC, "Global Wind Report 2018", 2019

Total installations onshore



Total installations offshore

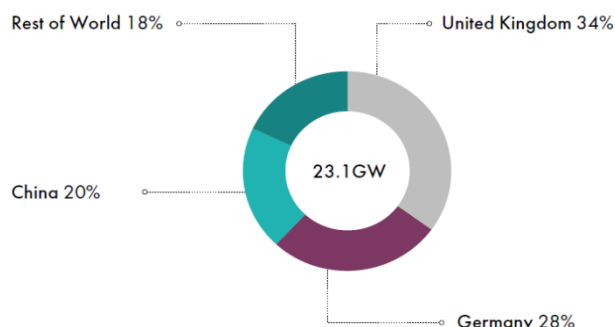


Figure 2 : répartition de la capacité éolienne installée dans le monde [2]

L'énergie éolienne est en pleine expansion et représente une solution adaptée pour la production d'électricité renouvelable et locale dans de nombreuses régions du globe. Dans au moins 12 pays, l'électricité d'origine éolienne a couvert en moyenne plus de 10% de la consommation 2018, atteignant presque 50% au Danemark. Les jours les plus venteux, l'éolien danois a même couvert jusqu'à 115% de la consommation nationale ! Ceci démontre que des mix énergétiques avec une part élevée d'éolien sont, déjà aujourd'hui, tout à fait réalisables [1].

3.1.2 Considérations économiques

La tendance concernant les coûts de l'éolien, onshore comme offshore, est à la baisse. Parmi les facteurs déterminants pour l'évolution, on peut citer l'adaptation des *business models* des différents acteurs de l'industrie éolienne pour entrer dans la transition énergétique, l'évolution des modèles de commercialisation vers des *corporate PPAs* (contrats d'achat d'électricité entre producteurs et consommateurs) plutôt que des tarifs de rachat par les distributeurs, ainsi que des performances plus élevées grâce à des améliorations dans le design des éoliennes, les matériaux utilisés et l'automatisation. La combinaison de ces facteurs a conduit à une baisse globale du coût actualisé de l'électricité éolienne (LCOE) de 66% par rapport à 2009 [2].

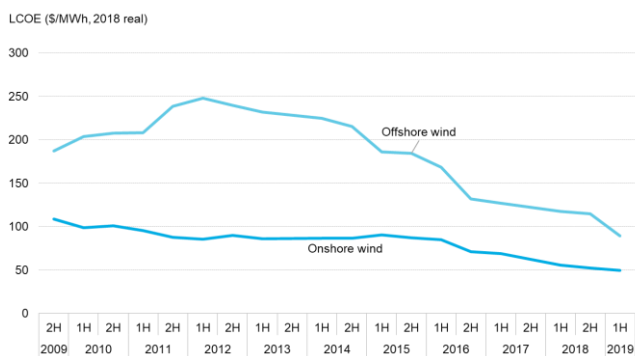


Figure 3a : évolution du LCOE pour l'énergie éolienne, 2018 [13]

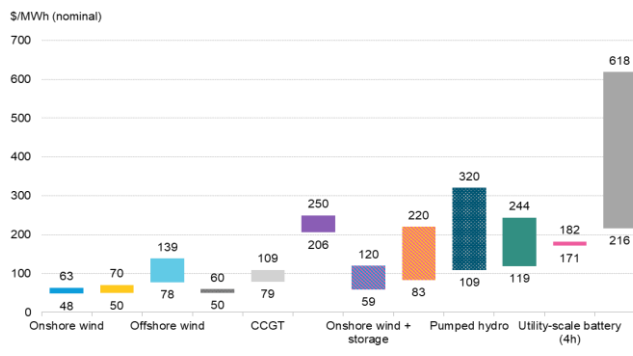


Figure 3b : comparaison LCOE pour différentes sources d'énergie au 1er semestre 2019 en Allemagne [13]

En comparaison avec les autres énergies renouvelables, l'éolien onshore se situe déjà parmi les sources d'électricité les plus compétitives au niveau économique. En 2017, l'éolien a même battu le record mondial de prix toutes énergies confondues en remportant un appel d'offre à 17.70 USD/MWh⁶ !

Selon le Laboratoire National des Energies Renouvelables (NREL), le coût actualisé de l'électricité éolienne pourrait même diminuer encore de moitié à l'horizon 2030, notamment grâce à cinq facteurs clés, listés ci-après par ordre d'importance :

1. Augmentation de la performance des éoliennes par les avancées technologiques (cf. section 0)
2. Réduction de l'amortissement grâce à une durée de vie prolongée

⁶<https://www.greenunivers.com/2017/11/mexique-mwh-eolien-bat-solaire-record-mondial-toutes-categories-172341/>

3. Réduction du CAPEX par des économies d'échelle, l'utilisation de moins de matériaux et des procédés de fabrication plus efficaces
4. Réduction de l'OPEX grâce à des stratégies de maintenance améliorées
5. Réduction des coûts du capital par une réduction des risques

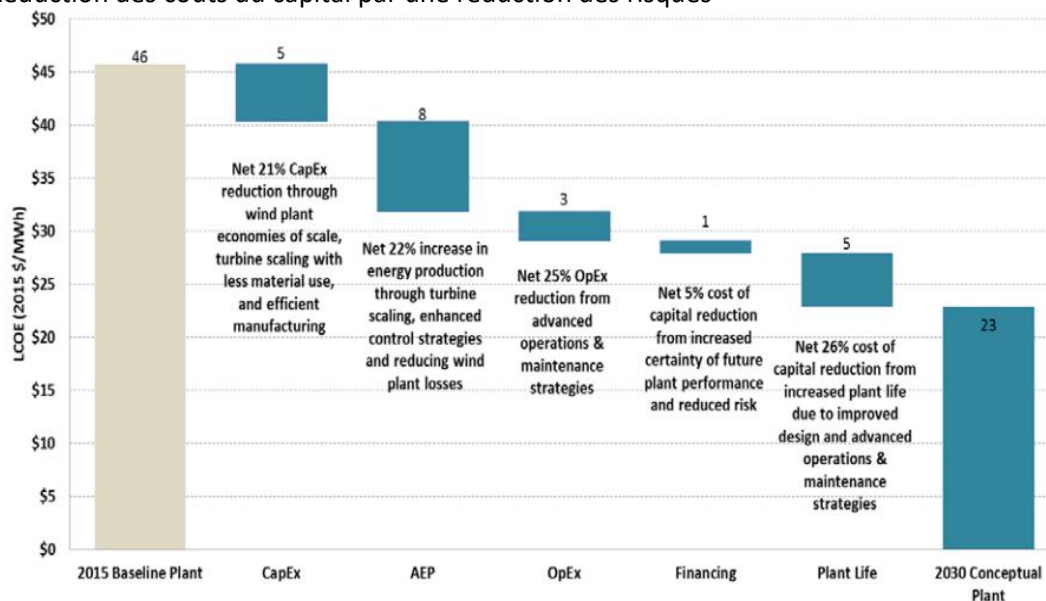


Figure 4 : vers une réduction du LCOE de 50% d'ici à 2030 pour l'énergie éolienne [NREL]

Si la tendance globale ne peut pas être ignorée, il est important de garder à l'esprit que ces prix ne sont pas valables pour toutes les régions du globe à l'heure actuelle, puisque chaque pays et technologie a ses propres potentiels de ressources de vent, conditions de financement et modèles d'enchères. Une perspective pour la Suisse est proposée dans la section 3.5.

3.1.3 Considérations écologiques

Au niveau mondial, une récente étude de l'institut de recherche sur les incidences climatiques de Potsdam (PIK) a comparé l'impact de trois stratégies de transition vers une décarbonisation de l'énergie par rapport à la situation de base :

1. Full Technology : mix des différentes technologies existantes
2. Conventional Technology : captage et stockage de CO₂ combiné à l'utilisation d'énergies fossiles, avec un recours limité aux nouvelles énergies renouvelables
3. New Renewables : recours aux énergies éolienne et solaire principalement, sortie du nucléaire

L'impact global de chaque technologie a été considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, incluant tant l'exploitation que l'empreinte liée à la construction et au démantèlement [3].

Les conclusions de l'étude du PIK montrent que la troisième solution de transition réduirait de plus de 80% les impacts négatifs sur la santé humaine, notamment grâce à la réduction de la pollution atmosphérique. La chaîne d'approvisionnement pour l'énergie éolienne est également beaucoup plus propre que l'extraction de carburants fossiles, par exemple. Par contre, le passage d'un système énergétique fossile à un système renouvelable nécessitant plus de terrain et de ressources minérales pour le stockage nécessaire demandera des choix stratégiques pour aborder au mieux les nouveaux paradigmes créés par ce changement⁷.

3.1.4 Considérations sociales

Plus de 1.16 million d'emplois (directs et indirects) pour 591 GW de puissance installée, c'est l'estimation du groupe REN21 pour l'année 2018. La tendance mondiale est à la hausse, même si le marché européen a connu un ralentissement durant les dernières années [1].

⁷ Communiqué de presse du PIK, 19.11.2019

3.2 En Europe

3.2.1 Statistiques

En 2018, grâce aux 189 GW installés en Europe, 14% de la consommation d'électricité de l'Union Européenne était couverte par l'énergie éolienne. La couverture record a pour l'instant été observée le 14.12.2019, journée lors de laquelle plus d'un quart de la demande d'électricité fut couverte par l'éolien⁸ ! En termes de puissance installée, c'est la deuxième source de production européenne d'énergie, et celle qui connaît la plus forte progression. L'IEA prédit même qu'en 2027, l'éolien deviendra la première source d'énergie en Europe.

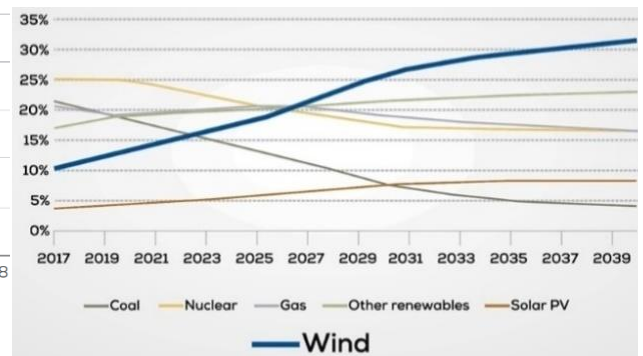
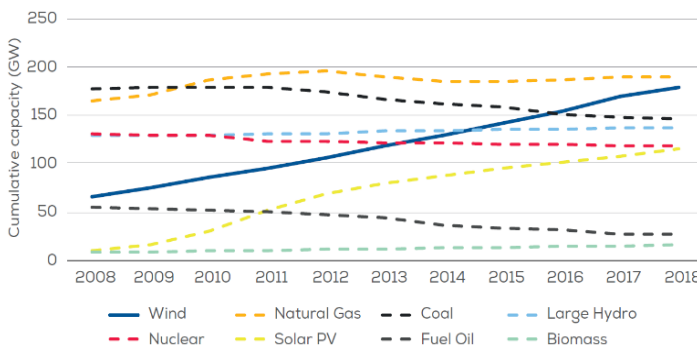


Figure 5 : capacité installée totale dans l'UE par source d'énergie [14]

Figure 6 : part de la production d'électricité dans l'UE par source d'énergie 2017 - 2040 [WindEurope, IEA]

La part d'éolien dans le mix électrique est très élevée dans certains pays. Au Danemark cette part avoisine 50%, alors qu'elle atteint presque les 30% en Irlande. En Allemagne et au Portugal, elle se monte à plus de 20%. Comme on peut le constater dans la Figure 7, la Suisse fait figure de mauvais élève, reléguée avec la Slovénie et la Slovaquie parmi les trois pays couvrant moins de 1% de leurs besoins grâce aux éoliennes.

3.2.2 Considérations sociales

En Europe, entre fabrication, distribution, maintenance, opération, etc. l'énergie éolienne occupait plus de 260'000 travailleurs (emplois directs et indirects, équivalents plein temps) en 2016 [4].

Ce chiffre est en augmentation depuis avec le développement de l'énergie éolienne, avoisinant les 300'000 emplois en 2019⁹.

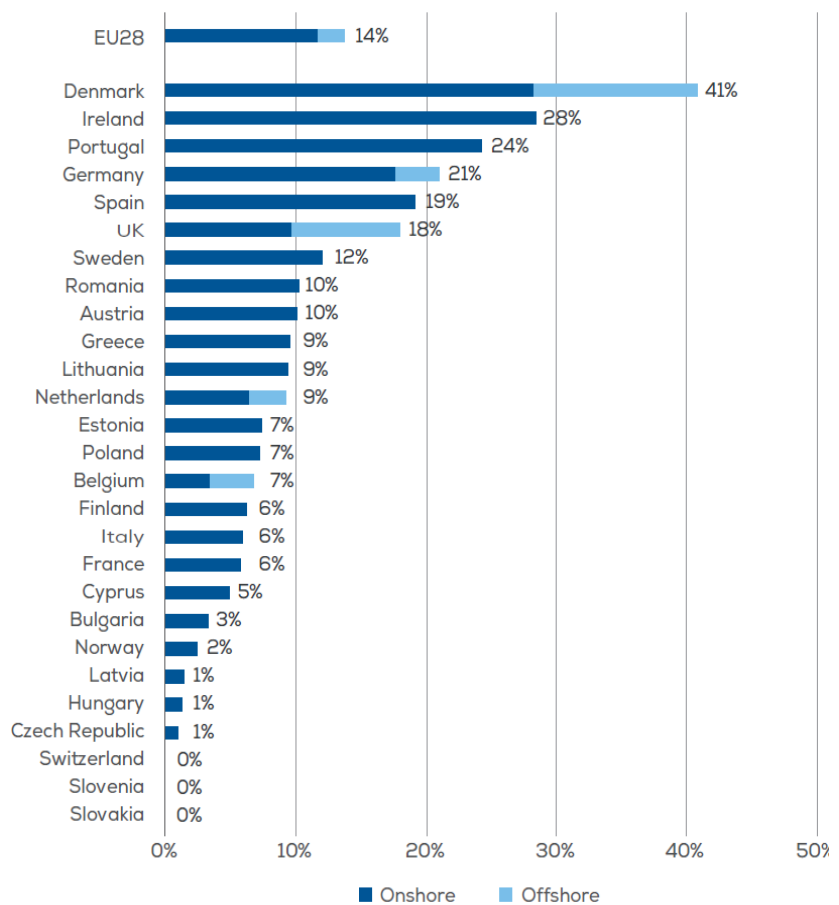


Figure 7 : consommation d'électricité couverte par l'énergie éolienne en 2018 [14]

⁸ <https://windeurope.org/about-wind/daily-wind-archive/2019-12-14/>

⁹ <https://windeurope.org/about-wind/campaigns/local-impact-global-leadership/>

3.3 Dans les régions voisines

Fin 2018, on dénombrait en France 15'108 MW installés, en Allemagne 52'931 MW onshore et en Italie 9'958 MW. En Autriche, on comptait 1'313 éoliennes, soit 3'045 MW de puissance installée qui ont permis de fournir 1,9 million de ménages en électricité propre¹⁰.

Si on examine les régions adjacentes à la Suisse, on se rend compte que plus de 15 GW de capacité d'énergie éolienne sont installés, alors que la plupart de ces régions possèdent des conditions de vent similaires au Plateau suisse ! La Figure 8 illustre particulièrement bien la situation. Par exemple, aujourd'hui déjà, le Land de Rhénanie-Palatinat, ayant une topographie comparable au Plateau Suisse avec la moitié de surface et de population suisse, couvre 20% de sa consommation d'électricité avec du courant éolien, soit deux fois plus que l'objectif fixé par le Conseil fédéral pour la Suisse à l'horizon 2050.

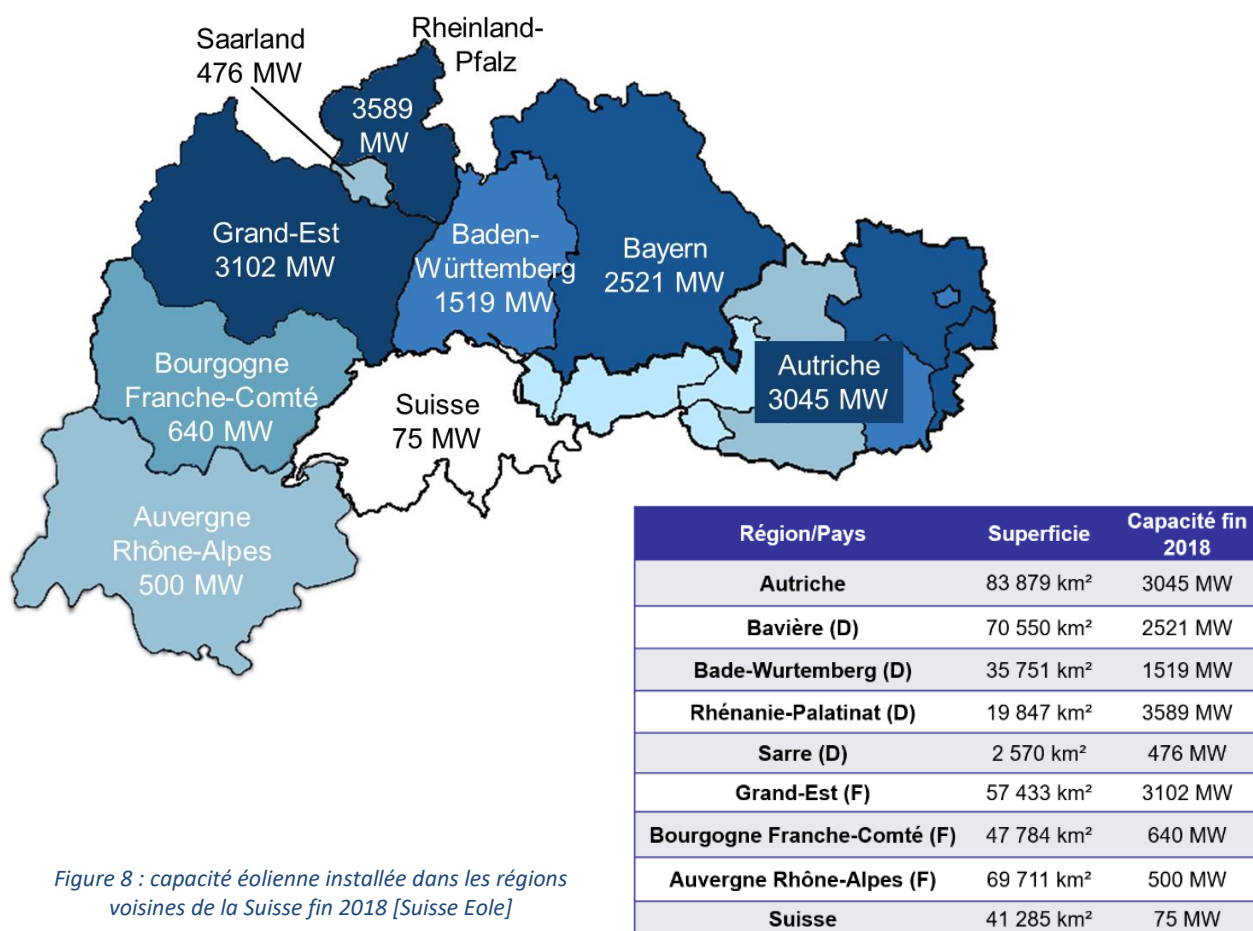


Figure 8 : capacité éolienne installée dans les régions voisines de la Suisse fin 2018 [Suisse Eole]

L'enjeu représenté par le développement éolien en Suisse est grand puisque l'énergie éolienne figure parmi les formes d'énergies les plus étudiées en Suisse, mais que son potentiel est encore loin d'être réalisé. Le manque à gagner pour l'économie suisse est donc important. Ceci alors que les fournisseurs d'électricité suisses possèdent de l'expérience dans le domaine éolien, comme en témoigne la section 3.4.

¹⁰ jgwindkraft.at ; wind-energie.de ; rte-france.com

3.4 Parcs éoliens suisses à l'étranger

Les distributeurs suisses, ayant l'obligation d'augmenter significativement leur part d'approvisionnement en énergie renouvelable et ne pouvant pas le faire en Suisse, se sont tournés vers l'étranger. Selon un rapport d'Energie Zukunft Schweiz publié en 2016, des fournisseurs suisses d'énergie produisaient déjà davantage d'énergie éolienne à l'étranger que ce que projette la Confédération à l'horizon 2050 en Suisse : des installations représentant une puissance de 2500 MW produisaient plus de 5 TWh de courant éolien par année en dehors de la Suisse. A titre de comparaison : les éoliennes helvétiques produisent actuellement autour de 0.13 TWh/an. Selon l'étude, les décisions stratégiques de certains distributeurs indiquaient également que la tendance continuerait d'être à la hausse [5].

Trois ans plus tard, cette hypothèse s'est révélée être exacte puisque d'après une mise à jour effectuée en 2019 par la SRF, la puissance éolienne installée à l'étranger a augmenté de 32% pour atteindre 3300 MW, produisant plus de 7 TWh par année. Le montant des investissements à l'étranger dans les parcs éoliens est difficile à chiffrer, mais atteindrait les 6 milliards de francs suisses depuis le début du millénaire¹¹ !

Les principales raisons de ces importants investissements de la part des fournisseurs suisses d'énergie à l'étranger sont les conditions cadres qui y règnent, à savoir une rétribution attractive, un meilleur soutien politique, la rapidité d'exécution des projets de construction et une planification moins onéreuse. Ce constat alors que les sites éoliens à l'étranger ne sont pas plus appropriés, puisque la productivité des installations suisses, hors du pays, selon le rapport d'Energie Zukunft Schweiz se situe à un niveau qui est également atteint par de nombreux nouveaux projets d'énergie éolienne en Suisse [5].

Les moyens et la volonté de développer l'énergie éolienne sont donc bien présents chez les développeurs suisses, mais les conditions cadres helvétiques actuelles ne les encouragent pas à investir dans leur pays et ainsi à générer des retombées locales qui seraient précieuses pour la population, le climat, la sécurité d'approvisionnement et l'économie suisse. Seule une stratégie claire et des décisions efficaces mèneront le développement des nouvelles énergies renouvelables à décoller en Suisse, enfin.

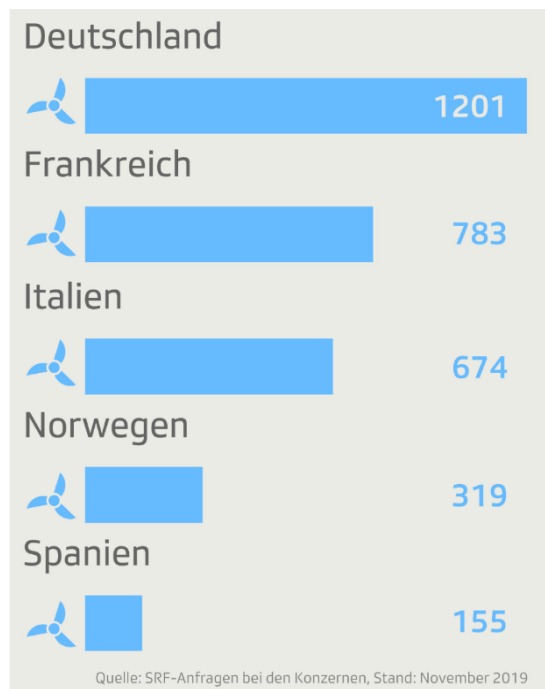


Figure 9 : puissance éolienne installée à l'étranger, chiffres en MW [SRF]

¹¹<https://www.srf.ch/news/schweiz/7-milliarden-franken-schweizer-energieversorger-investieren-lieber-im-ausland>

3.5 En Suisse

3.5.1 Statistiques

En Suisse, on compte à ce jour 37 grandes éoliennes totalisant 75 MW de puissance installée. La production éolienne actuelle est autour 130 GWh par an, soit près de 0,2% de la consommation d'électricité totale de notre pays, ce qui correspond à la consommation de 36'500 ménages suisses types.



Figure 10 carte des installations éoliennes de Suisse, état en 2018 [Suisse Eole]

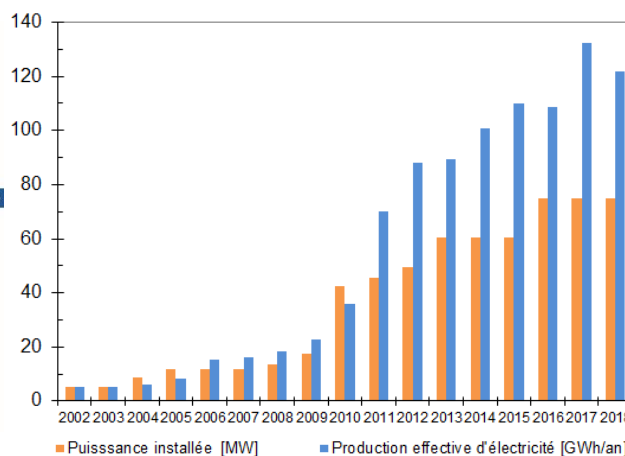


Figure 11 : évolution de la puissance installée et de la production effective éolienne en Suisse [Suisse Eole]

En 2019, la construction du parc éolien du Gothard a débuté, avec cinq nouvelles éoliennes prévues pour une puissance totale de 11.75 MW. La production prévue est de 20 GWh par année, soit l'équivalent de la consommation de 5'700 ménages type.

3.5.2 Considérations économiques

En Suisse, le marché éolien est encore dans une dynamique de lancement, typiquement observée dans d'autres pays pour les premiers 100-200 MW installés. Dans cette phase, des coûts plus élevés sont généralement observés, puisque le cadre légal entourant l'énergie éolienne est en cours de développement et que des économies d'échelle sont encore difficilement réalisables. En particulier, la longueur des procédures et les nombreuses études requises lors de la planification d'un projet en Suisse augmentent de manière considérable les coûts actualisés de production d'électricité d'origine éolienne. A moyen terme, certaines considérations économiques s'appliquant aux niveaux mondial et européen devrait également être valables pour la Suisse.

Un rapport établi par le Paul Scherrer Institut (PSI) sur mandat de l'OFEN en 2017 et mis à jour en 2019 va dans la même direction en estimant une réduction des coûts de production pouvant aller jusqu'à plus de 50% d'ici à 2050 par rapport à la situation actuelle, l'énergie éolienne figurant parmi les sources d'énergie les plus compétitives. Les auteurs du rapport décrivent les éoliennes comme une technologie avancée et mature, qui possède un bon potentiel en Suisse. Pour ceux-ci, le développement de l'énergie éolienne dépendra surtout du cadre législatif et des mesures de soutien financier [6].

Une étude de l'université de Saint-Gall ayant observé ces mêmes phénomènes – surcoûts de 15-50% dus à une planification complexe et des procédures durant en moyenne plus d'une décennie, soit deux fois plus que la moyenne européenne de 4.5 ans – conclut que le développement de l'énergie éolienne en Suisse ne se fera que suite à une réduction des risques pour les investisseurs par le biais d'une simplification des procédures d'autorisation, d'une clarification du cadre légal et de l'introduction de procédures accélérées devant les tribunaux [7].

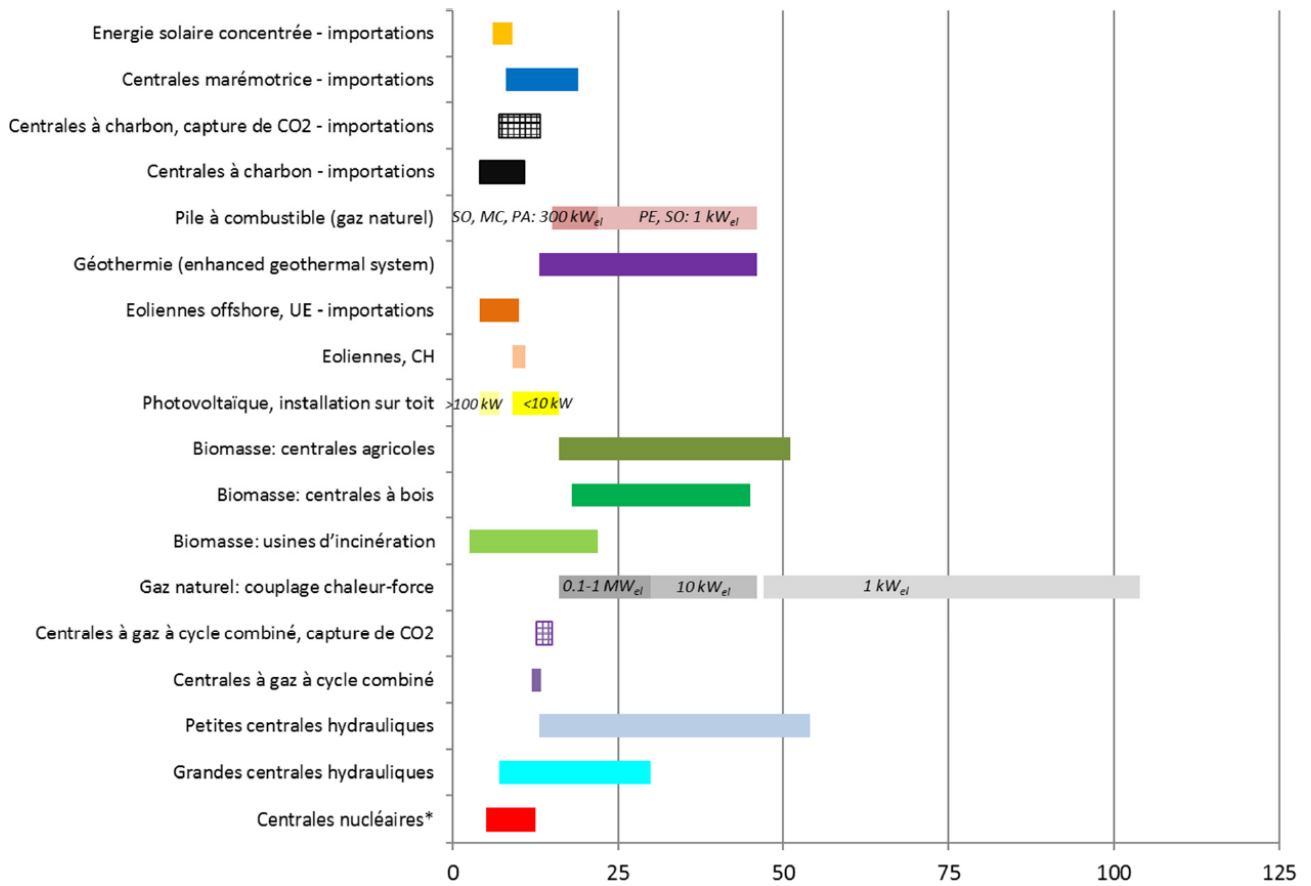


Figure 12 : estimation des coûts de la production d'électricité en 2050, en ct./kWh [6]

3.5.3 Considérations écologiques

Parmi les sources d'énergie les plus propres

L'énergie éolienne, avec la force hydraulique, sont les sources d'énergie causant le moins de dommages à l'environnement et rejetant le moins de CO₂. La méthode dite de la « saturation écologique » comme décrite par ESU-services¹² et publiée en 2006 déjà confirme que les impacts de l'énergie éolienne et de l'énergie hydraulique sur la nature sont bien moins élevés que les autres sources d'énergie (voir la Figure 13).

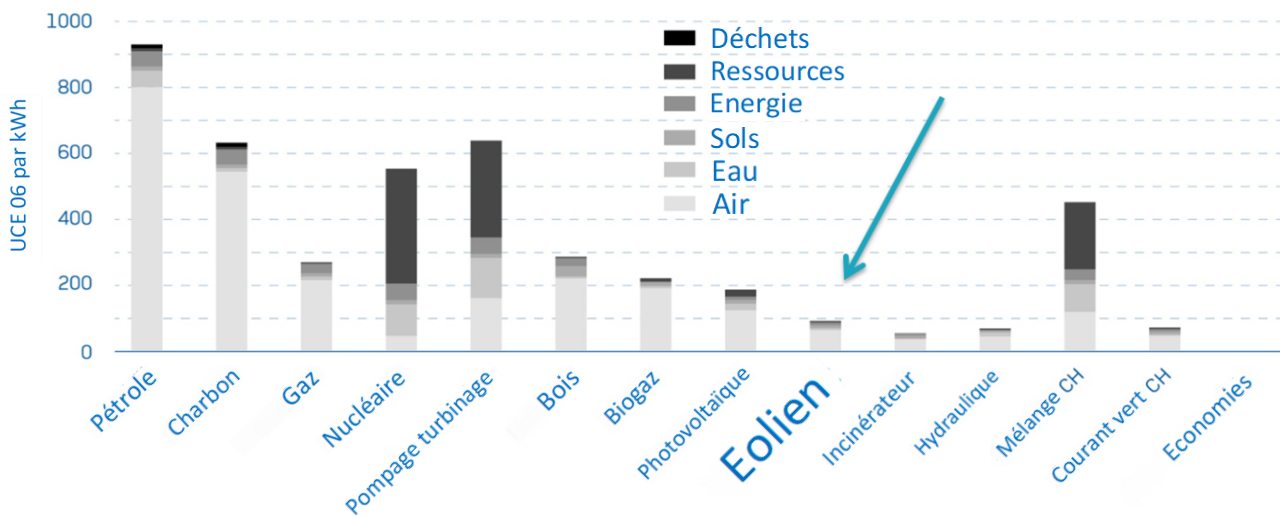


Figure 13: Unités de charge écologique (UCE) par kWh des différentes sources d'énergie [eolien-factuel.ch]

¹² <http://esu-services.ch/fr/projects/ubp06/>

Outre sa charge écologique réduite, l'énergie éolienne figure aussi parmi les sources d'énergies émettant le moins de CO₂ par kilowattheure, comme confirmé dans plusieurs études. Dans la Figure 14, l'OFEN illustre l'excellent bilan de l'énergie éolienne, qui est la meilleure source d'énergie d'un point de vue écologique possédant un grand potentiel de développement en Suisse.

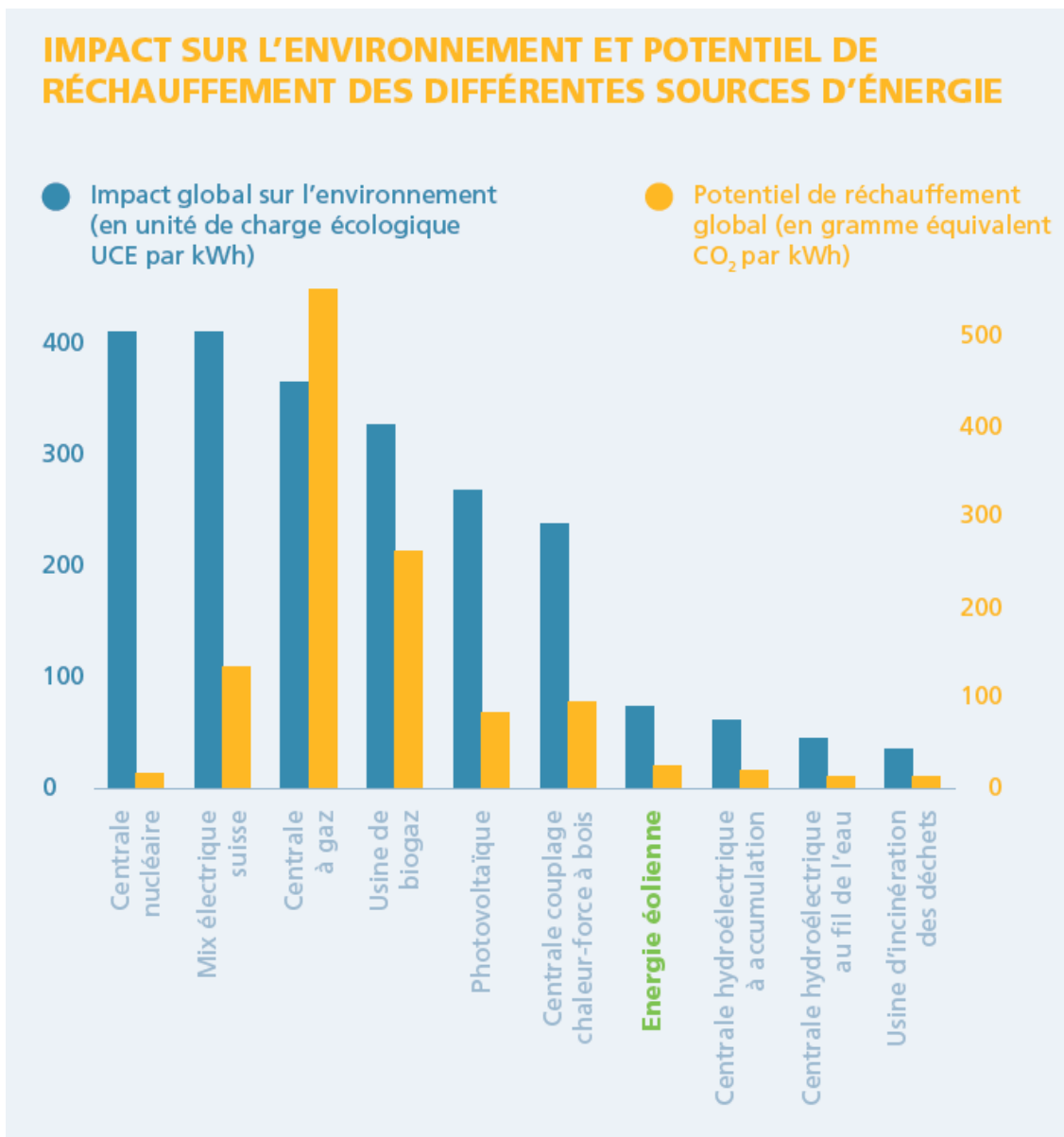


Figure 14: Impact sur l'environnement et potentiel de réchauffement des différentes sources d'énergie [OFEN, 2019]

Remplacement de l'électricité importée supplémentaire par de l'énergie éolienne indigène propre

L'énergie éolienne contribuera significativement à combler un futur manque d'électricité, en réduisant, voire même remplaçant des importations d'énergie souvent issue du charbon, du gaz ou du nucléaire. Avec les faibles émissions de CO₂ de l'éolien (estimation haute : 25.9 g CO₂-eq/kWh), les économies de CO₂ sont donc de l'ordre de 412 g CO₂-eq/kWh selon les dernières études publiées [8].

Ces résultats pourront être encore quantifiés de manière plus fine avec la prise en compte horaire de l'impact climatique de la consommation d'électricité suisse, comme le montre la Figure 15¹³.

¹³ <http://www.expert-ise.ch/emissions-de-co2-en-suisse-impact-reel-des-echanges-delectricite>

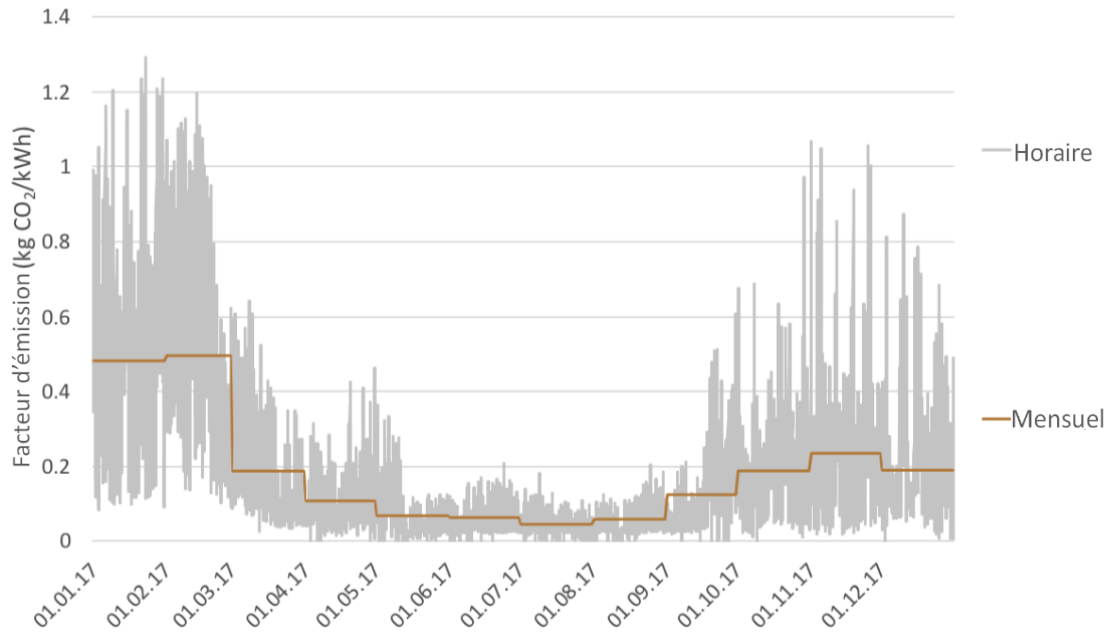


Figure 15 : émissions horaires de CO₂ (année 2017) liées à la demande suisse [Université de Genève]

En utilisant le chiffre cité ci-dessus, une éolienne standard de 3 MW permet une économie annuelle de plus de 2800 tonnes de CO₂. Lorsque l'objectif visé par la Stratégie énergétique 2050 sera atteint, la Suisse économisera annuellement plus de 1.7 millions de tonnes de CO₂ par rapport à la situation actuelle. En considérant le potentiel actualisé par Suisse Eole comme décrit dans le chapitre 6.4, ce chiffre se monterait à plus de 3.7 millions de tonnes de CO₂ par année !

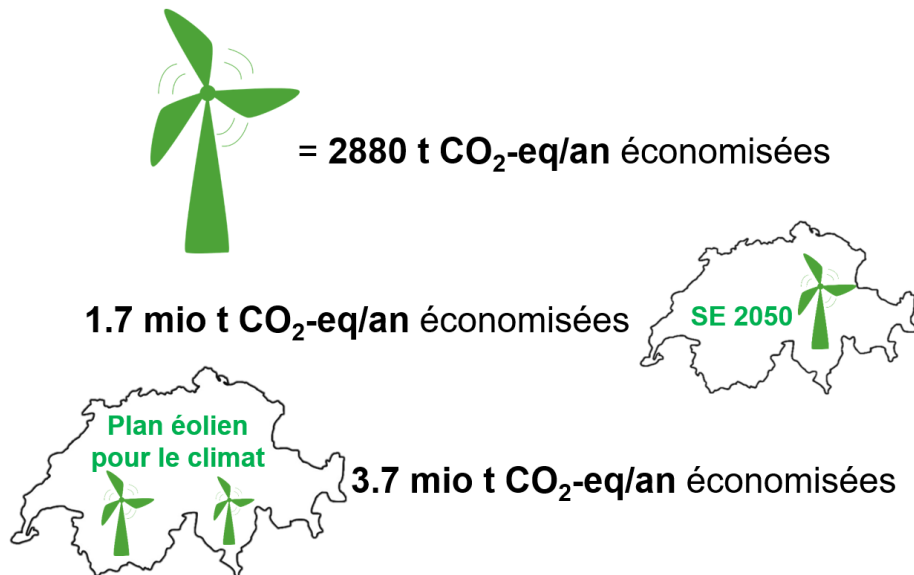


Figure 16 : économies de CO₂ réalisables par le développement éolien [Suisse Eole]

Il faut noter ici que ces chiffres ont été calculés sur la base d'un écobilan moyen annuel, qui sous-estime largement la valeur réelle d'un remplacement des importations par de l'énergie éolienne propre. En effet, l'écobilan de l'énergie importée atteint des sommets en hiver, lorsque les besoins sont élevés. Une analyse journalière, voire horaire, de l'écobilan des importations permettrait une évaluation plus précise des économies de CO₂ réalisables. Une étude en cours de la HEIG-VD pourrait contribuer à cette évaluation dès 2020.

Remplacement de la mobilité

En substituant les voitures à combustion polluantes par des véhicules électriques rechargés au courant éolien, on pourrait remplacer 3 millions de véhicules et économiser ainsi jusqu'à 5.85 millions de tonnes de CO₂ par année si le potentiel éolien durable estimé par Suisse Eole était réalisé !



Figure 17 : Economies de CO₂ par un remplacement de la mobilité [8]

3.5.4 Considérations sociales

En se basant sur une valeur moyenne de 1'500 emplois pour 1 GW de puissance installée (équivalents temps-plein, correspond à la moyenne autrichienne), l'énergie éolienne occupera en 2050 plus de 3000 personnes si l'objectif de la SE 2050 est atteint, et plus de 6'000 pour le nouvel objectif de Suisse Eole¹⁴.

A l'heure actuelle, la Suisse possède déjà une place importante dans la chaîne de valeur européenne puisque plusieurs entreprises suisses ont une participation active en tant que sous-traitants dans le marché européen de la fabrication d'éoliennes¹⁵. Cela représente aujourd'hui plusieurs centaines de postes, auxquels s'ajoutent encore environ 150 postes dans la branche (études et planification d'environ 1'000 MW sur les dix dernières années) et une centaine de chercheurs dans 5 universités et hautes écoles suisses rassemblés dans le Swiss Wind Energy R&D Network¹⁶. A noter que l'installation d'une turbine emploie environ 20 personnes pour l'ériger et la connecter au réseau, et que le parc éolien actuellement en construction au Saint-Gothard compte cinq turbines.

On peut donc estimer le nombre total d'emplois liés à l'énergie éolienne en Suisse à plus de 500 en 2019.

¹⁴ [Windfakten Österreich](#)

¹⁵ Les entreprises suisses Schweiter et Gurit, par exemple, produisent matériaux et moules pour la fabrication des pales.

¹⁶ [wedowind.ch](#)

4. Evolution technologique

Depuis les débuts du développement de l'énergie éolienne, la recherche n'a eu de cesse d'augmenter les performances des éoliennes. En particulier dans la dernière décennie, des avancées technologiques rendent économiques des sites avec des conditions de vents moins favorables. La section suivante explique comment cela est possible, et quelle évolution est prévue d'ici à 2050.

4.1 Evolution durant la dernière décennie

Les progrès techniques continus dans les domaines des matériaux, de l'aérodynamique, de la maintenance et logistique ainsi que du monitoring et contrôle à distance ont permis aux constructeurs d'éoliennes de proposer des machines toujours plus performantes depuis le début du 21^e siècle. De même, les fabricants se sont adaptés au marché puisque de plus en plus d'éoliennes ont été développées pour les régions où la vitesse du vent n'est pas très élevée. Durant la dernière décennie, la puissance moyenne des éoliennes a augmenté de plus de 60%, alors que la taille du rotor et la hauteur au moyeu de seulement 47.5%, respectivement 33%. La puissance spécifique¹⁷ est ainsi passée de 0.4 kW/m² à 0.3 kW/m² de surface de pale

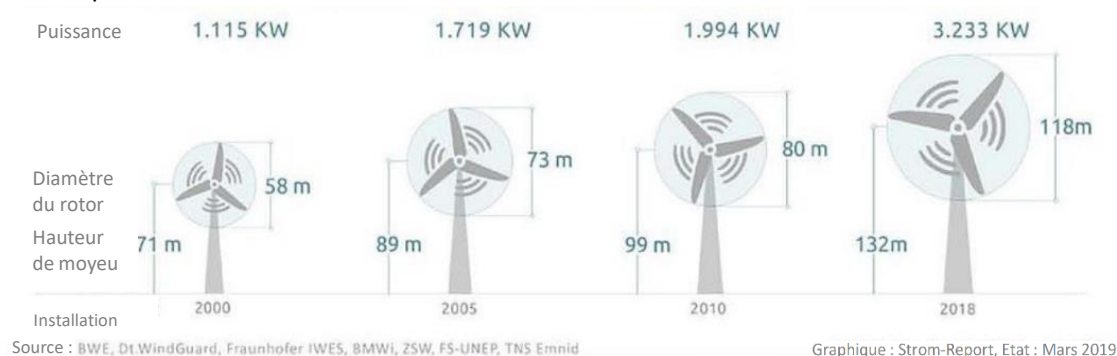


Figure 18 : Evolution de la taille et puissance des éoliennes terrestres 2000-2018 [15]

Le Laboratoire National des Energies Renouvelables (NREL), aux Etats-Unis, constate lui-aussi cette évolution et prédit même qu'elle continuera vers des éoliennes de future génération qui atteindront des facteurs de charge de l'ordre de 50%¹⁸ ! En plus d'améliorer les performances, ces améliorations contribuent également à diminuer les coûts et à augmenter la fiabilité et la durée de vie des différents composants [9].

La différence d'impact sur le paysage, l'environnement et les riverains entre une éolienne d'ancienne et une de nouvelle génération n'est pas significative, alors que le gain énergétique est substantiel. A l'échelle d'un parc, l'impact global peut même être réduit puisque le nombre de machines diminue en en installant de plus puissantes : une éolienne de nouvelle génération produirait autant que trois éoliennes actuelles dans les mêmes conditions de vent.

A l'échelle européenne, WindEurope dresse le même constat dans une analyse du repowering d'installations éoliennes arrivant au terme de leur durée de vie : tandis que le nombre de turbines diminue, la puissance nominale des machines et la capacité du parc éolien augmentent de manière significative.

En installant des éoliennes de dernière génération, on réalise donc une densification énergétique par rapport à l'impact des parcs.

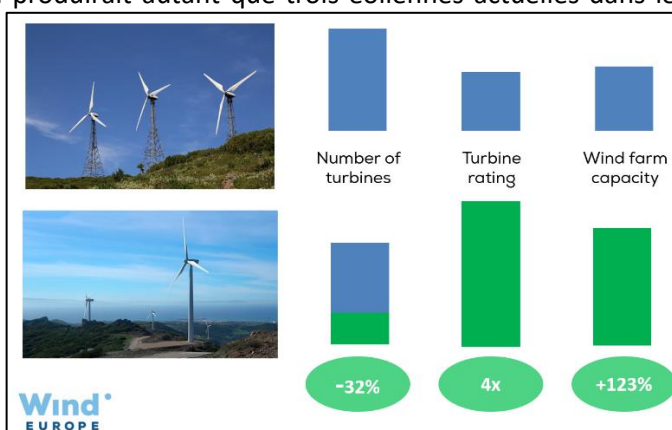


Figure 19 : effets du repowering sur un parc éolien type [WindEurope]

¹⁷ Rapport de la puissance nominale sur la surface balayée par le rotor

¹⁸ <https://readersupportednews.org/news-section2/318-66/45471-wind-power-costs-could-see-another-50-reduction-by-2030>

4.1.1 Dimensionnement et design du rotor améliorés

Les évolutions dans le design aérodynamique et mécanique des pales ont permis de travailler avec des vitesses de vent inférieures sans toutefois augmenter de manière démesurée le diamètre et la hauteur totale des installations. Cette tendance vers des rotors plus grands permet d'améliorer les performances pour des basses vitesses et d'augmenter ainsi la disponibilité et la productibilité de chaque éolienne. La ressource de vent est donc davantage utilisée, et de manière plus efficace. La performance améliorée des éoliennes pour des vents plus faibles s'illustre par un déplacement des courbes de puissance des éoliennes récentes vers la gauche, pour une puissance nominale identique (Figure 20).

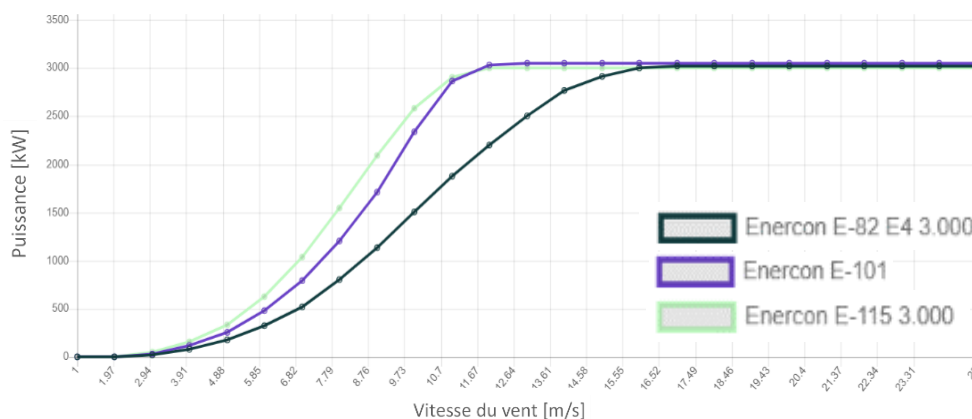


Figure 20 : Courbes de puissance pour des éoliennes Enercon de différentes générations
[<https://en.wind-turbine-models.com/powercurves>]

4.1.2 Meilleure mise en valeur des vents

Augmenter la hauteur du moyeu permet d'accéder à des ressources de vent plus régulières et uniformes car subissant moins d'influence du sol et de sa rugosité, d'avoir des meilleurs rapports de vent et d'augmenter la vitesse moyenne au moyeu. Des nouveaux développements dans le design des mâts permettra d'atteindre des hauteurs supérieures à 150m tout en réduisant les coûts associés (voir section 4.1.4). En Suisse, ce n'est pas la technique mais plutôt les contraintes réglementaires qui limitent actuellement la hauteur des éoliennes (voir section 6).

4.1.3 Réduction des émissions sonores

Le volume des émissions sonores d'une éolienne dépend de sa taille ; une éolienne plus grande et plus puissante générera des émissions plus importantes. Même si celles-ci sont généralement couvertes par le bruit du vent dans les arbres et sur les bâtiments environnants, des techniques existent pour réduire les émissions sonores d'une éolienne. Un exemple inspiré du plumage des hiboux consiste à fixer des peignes sur le bord de fuite des pales. Ce système installé en 2017 sur les deux éoliennes de Saint-Brais, dans le Jura, a contribué à diminuer de moitié les émissions sonores des installations¹⁹.



Figure 21 : système de peignes installé sur une pale d'éolienne [Suisse Eole]

¹⁹ <https://www.suisse-eole.ch/fr/news/2018/6/13/un-nouveau-developpement-technique-rend-les-eoliennes-beaucoup-plus-silencieuses-271/>

4.1.4 Nouvelles technologies pour l'éolien alpin

Les défis principaux pour le développement de l'énergie éolienne en milieu alpin sont liés à l'acheminement des composants et à l'érection des turbines sur des mâts tubulaires, en acier, en béton ou mixtes de plus de 100 mètres de hauteur. Les développeurs d'éoliennes l'ont compris, et de nouvelles solutions spécifiques mieux adaptées aux Alpes émergent, réduisant la complexité logistique et présentant de nombreux autres avantages.

Mâts modulaires

Certaines solutions sont déjà commercialisées, comme celle d'une entreprise germano-suisse qui propose désormais un modèle d'éolienne montée sur une « K-Tower²⁰ » (voir la Figure 22). Ses avantages principaux vis-à-vis d'une éolienne conventionnelle sont les suivants :

- Montage et démontage simplifiés avec haute valeur ajoutée locale
 - Transport possible en poids-lourd ordinaire
 - Réduction du volume des fondations puisque réparti sur 3 à 4 pieds
- ➔ Coûts d'installation réduits jusqu'à 40%

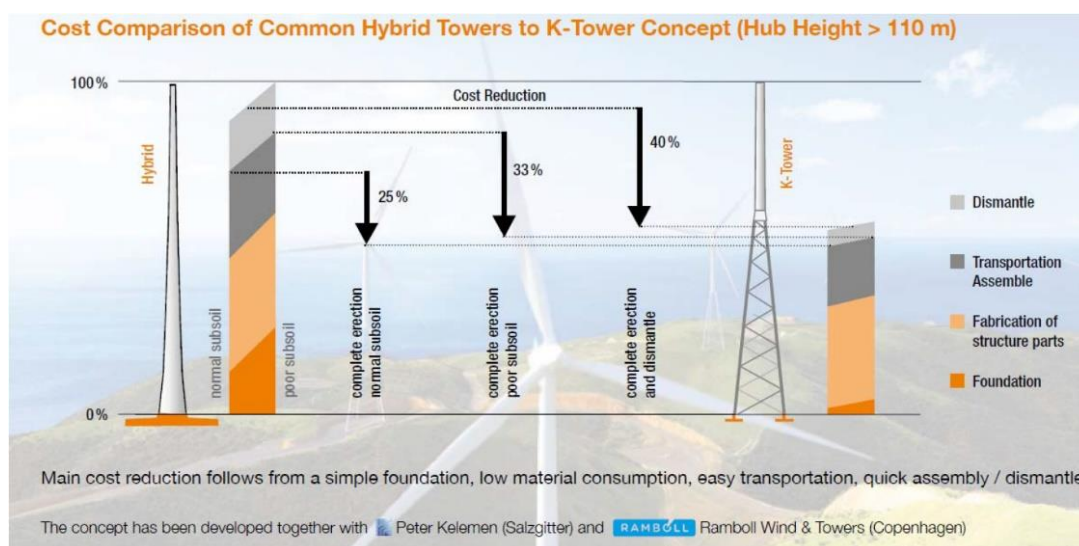


Figure 22: réduction des coûts pour une K-Tower [Salzgitter]

Matériaux et géométries innovants

D'autres solutions sont en cours d'étude à l'EPFL, notamment l'utilisation de géométries et de matériaux innovants comme le CFUP (composite cimentaire fibré à ultra haute performance) plus adapté à des mâts de grande hauteur, plus durables et modulaires que les mâts conventionnels²¹.

²⁰ <https://www.szmr.de/en/supply-program/system-solutions/k-tower.html>

²¹ Thèse de master à l'EPFL ENAC (laboratoires MCS et SGC)

4.2 Perspectives

4.2.1 A court terme

Les effets des évolutions technologiques ont également été constatés en Suisse par BKW sur le site du Mont-Crosin, qui a vu la productibilité de ses éoliennes augmenter drastiquement suite au repowering terminé en 2016. De 13% en moyenne, le facteur de charge est passé à 22% soit un productible de près de 2000 heures pour des machines dont la hauteur totale ne dépasse pas les 150m²².

A court terme, le facteur de charge pourrait encore augmenter jusqu'à atteindre 25-30% selon les sites (équivalent 2200-2600 heures à pleine charge). En utilisant des machines plus performantes et plus grandes, comme prévoient de le faire plusieurs projets de parcs actuellement en procédure qui ont l'autorisation d'atteindre les 210 mètres de hauteur totale selon leur plan d'affectation, la productibilité des parcs suisses n'aurait rien à envier aux parcs terrestres étrangers. A noter que certains parcs suisses placés sur des sites particulièrement favorables comme c'est le cas dans le coude du Rhône ont atteint des facteurs de charge de 28% en 2018 !

Les éoliennes d'hier, qui produisaient 3 GWh d'électricité verte chaque année, font maintenant place à des machines modernes capables de produire entre 8 et 10 GWh annuels sans multiplier les impacts.

Bien entendu, plusieurs facteurs réglementaires, sociaux et techniques contribuent à limiter les hauteurs maximales possibles et chaque site doit faire l'objet d'une évaluation minutieuse afin de déterminer la machine la plus adaptée.

4.2.2 A long terme

Les perspectives à long terme sont encore plus favorables : demain, une éolienne pourrait même produire jusqu'à 15 GWh/an ! Des machines déjà disponibles sur le marché comme l'éolienne E-160 EP5 d'Enercon ou l'éolienne V150-4.2 MW de Vestas, qui atteignent une hauteur totale avoisinant les 200 mètres selon la hauteur choisie du moyeu, seraient techniquement en mesure d'atteindre cette valeur de production avec les conditions de vent qui règnent en Suisse.

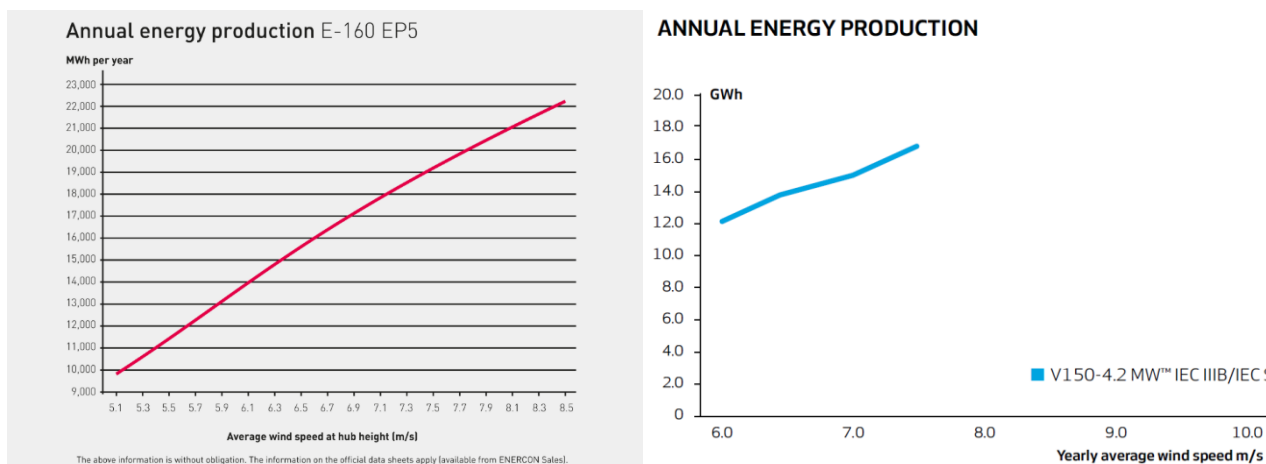


Figure 23 : courbes de puissance de deux éoliennes pouvant atteindre 15 GWh/an avec des conditions de vent en Suisse

²² <https://blog.bkw.ch/fr/dans-quelle-mesure-les-sites-suissees-sont-ils-adaptes-a-leolien/>

5. Situation en Suisse

La première éolienne suisse raccordée au réseau, d'une puissance de 28kW, fut installée en 1986 déjà à Langenbruck (BL). De nombreux projets ont également démarré vers le milieu des années 90, et quelques éoliennes isolées et parcs éoliens ont pu voir le jour, alors que la majorité reste encore en développement ou bloquée par des procédures pendant de nombreuses années. La Stratégie énergétique 2050 votée en 2017 était censée donner un coup de fouet au développement des énergies renouvelables, dont l'énergie éolienne avec un objectif intermédiaire de 624 GWh/an en 2020²³. Or, à la veille d'atteindre cette étape, la production annuelle des 75 MW installés en Suisse se monte à 132 GWh/an.

L'analyse établie ci-après a pour but de dresser un bilan du développement éolien et des facteurs d'influence principaux, et permettra d'identifier les causes des blocages ainsi que les bonnes pratiques décisives.

5.1 Bilan du développement éolien

On dénombre fin 2019 une centaine de projets éoliens en Suisse, à des stades d'avancement différents. La frise ci-après représente la procédure à suivre pour chaque projet éolien, de l'idée à la construction en passant par les autorisations nécessaires, et illustre pour chacun des stades la puissance planifiée et le nombre de projets qui s'y trouvent actuellement.

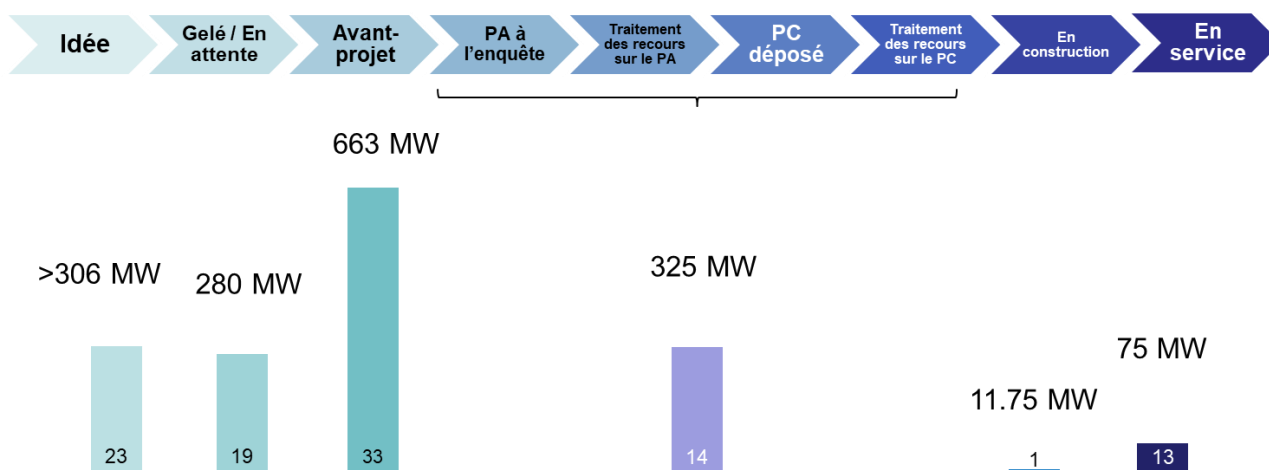


Figure 24 : Etat des planifications éoliennes en Suisse, fin 2019 (puissance planifiée et nombre de projets) [Suisse Eole]

Deux constats principaux ressortent de la Figure 24 :

1. 14 projets se trouvent actuellement en procédure (à l'enquête ou devant les instances juridiques)

La puissance totale planifiée se trouvant actuellement bloquée par des procédures se monte à 325 MW, avec une production estimée de 680 GWh/an. C'est déjà plus que l'objectif intermédiaire pour 2020 fixé par la Confédération, sans compter les 152 GWh/an qui sont déjà en service ou en construction.

Les plus anciens projets de cette catégorie ont démarré il y a plus de 20 ans, ce qui démontre la lenteur et la complexité du système actuel. Dans la majorité des cas, malgré une conformité exemplaire avec les normes et exigences en vigueur et malgré une bonne acceptation de la majorité de la population locale, les recours systématiques de quelques privés ou associations peuvent retarder la réalisation d'un parc durant de nombreuses années. Les procédures sont encore très lourdes avec des décisions juridiques lentes, ce qui pénalise la transition énergétique et les citoyens suisses, malgré une volonté claire de la Confédération de développer les énergies renouvelables.

2. La majorité des projets se trouve actuellement encore en planification (avant-projet ou en attente)

²³ Perspectives énergétiques 2050

Si les éoliennes dans le pipeline venaient à se concrétiser, d'autres suivraient pour atteindre l'objectif 2050. Plus de 900 MW sont actuellement en attente ou en avant-projet, et ne représentent même pas toutes les zones propices au développement de l'énergie éolienne identifiées par les cantons. Le reste des idées de projet est difficile à chiffrer pour le moment, mais la puissance installée potentielle est en tout cas supérieure à 300 MW.

Ce bilan constitue la preuve que la stratégie d'incitation de l'OFEN a fonctionné et que le potentiel est bien existant. Ce qui est nécessaire à l'heure actuelle est une simplification et une accélération des procédures par une clarification des conditions cadres.

5.1.1 Projets réalisés

13 parcs de 1 à 16 éoliennes, totalisant 75.1 MW de puissance installée pour 37 éoliennes, sont en service en Suisse à ce jour. Les éoliennes de petite taille ne sont pas incluses dans ce chiffre. Un parc de 5 éoliennes est en construction au Saint-Gothard, ajoutant 11.75 MW à la puissance totale nationale.

5.1.2 Projets actuellement en procédure

Les projets actuellement en procédure sont les suivants :

Parc	Canton	Dépôt PA	Stade de procédure	Instance	Remarques
Sainte- Croix	VD	2010	Recours sur le PA	TF	
EolJorat Sud	VD	2014	Recours sur le PA	TF	Recours rejetés
Sur Grati	VD	2014	Recours sur le PA	TF	Recours rejetés
Bel Coster	VD	2018	PA approuvé	-	Par le canton
Eoljoux	VD	2014	Recours sur le PA	TC	
Mollendruz	VD	2015	Recours sur le PA	TC	
Crêt-Meuron	NE	2002	PC déposé	TF	
Montagne de Buttes	NE	2016	Recours sur PA/PC	TC	
Schwyberg	FR	2009	Recours sur le PA	TF	En attente PDCn
Montagne de Tramelan	BE	2014	Recours sur PA/PC	TC	
Montagne de Granges	SO	2014	Recours sur le PA	TF	
Charrat	VS	2012	Recours sur le PA	TC	En attente PDCn
Dents du Midi	VS	2008	Recours sur le PA	TC	Retour au canton
Mont d'Ottan	VS	2012	PA en traitement	-	PA de la commune
Combe de Barasson / Bourg-St-Bernard	VS	2016	Recours sur le PA	TC	En attente PDCn

Tableau 1 : projets éoliens en procédure en Suisse en 2019

Si certains projets sont en procédure depuis plus d'une décennie, les projets les plus anciens ont quant à eux démarré avant le début du millénaire. Ceci atteste et de la complexité de la planification, et de la lenteur des décisions.

5.1.3 Projets en planification

On dénombre 33 projets en planification (avant-projet) ainsi que 19 projets en attente ou gelés. Le tout représenterait une production potentielle de plus de 1.6 TWh/an, et ce en prenant les performances d'éoliennes actuelles sans tenir compte des progrès technologiques.

Si ces projets en planification venaient à se réaliser d'ici à 2035 suite à un allègement des procédures et à une jurisprudence établie, le deuxième objectif intermédiaire fixé par la Confédération à 1.7 TWh/an serait à nouveau atteint, et largement dépassé en utilisant des éoliennes plus performantes. Le potentiel est donc vraiment présent, et les développeurs, la population ainsi que la Confédération ont la volonté de l'utiliser. Le sort de ces projets dépendra pour beaucoup des décisions sur les projets actuellement en procédure ou devant les tribunaux suite à des recours, dont beaucoup sont attendues pour le début 2020.

5.1.4 Projets abandonnés

Quelques projets, non représentés dans la Figure 24, ont été abandonnés majoritairement à cause de conditions de vent insuffisantes. Tous les autres sites identifiés, actuellement en planification ou en procédure, ont donc fait l'objet d'évaluations des conditions de vent validées par des campagnes de mesures.

5.1.5 Idées de projets

Il existe encore de nombreuses autres idées de projet dont la planification n'a pas encore été commencée. Leur nombre correspond en général aux sites identifiés dans les plans directeurs cantonaux, qui peuvent être mis à jour dans le futur.

Les chiffres publiés par Pronovo dans son Cockpit SRI (système de rétribution de l'injection, anciennement RPC)²⁴ peuvent donner une première idée du volume d'idées de projets, et confirment le potentiel éolien existant en Suisse en plus d'illustrer la volonté des développeurs de produire de l'énergie renouvelable grâce au vent : 62 MW éoliens bénéficiant de la RPC sont actuellement en fonctionnement, 1014 MW ont déjà reçu une décision positive pour le SRI alors que 843 MW figurent sur la liste d'attente. Cela la représente au total une production potentielle annoncée de plus de 3.2 TWh/an, dont la concrétisation stagne du fait des conditions cadres manquantes et des procédures longues et incertaines liées au développement éolien. Les progrès techniques cités dans le chapitre 0 laissent même envisager que l'objectif de 4.3 TWh/an serait atteint sans augmenter le nombre d'installations.

5.2 Causes des délais et blocages

5.2.1 Une opposition systématique

Parmi les 17 parcs recensés ayant fait l'objet de recours ou d'oppositions (14 en procédure, 1 en construction et 2 en planification), les délais provenaient des catégories d'opposants suivantes :

- Privés et associations locales : dans 65% des cas
- Associations pour la protection du paysage : dans 40-50% des cas
- Associations pour la protection de la faune et de la flore : dans 30-35% des cas
- Communes : dans 18% des cas
- Autres ONGs, OFEV : dans 6% des cas

Concernant les sujets évoqués de manière récurrente dans les oppositions et les recours, ils peuvent être regroupés en six thèmes selon une étude d'argumentaire menée par Suisse Eole. Ces thèmes sont, par ordre d'importance :

1. Emissions sonores
2. Ombres projetées
3. Impact paysager
4. Impact sur la faune (majoritairement avifaune et chauves-souris)
5. Production d'énergie et efficacité
6. Dangers liés au givre et à la glace

²⁴ [Fonctionnement du SRI, Pronovo](#)

Suivent l'impact sur l'environnement (eau, flore), l'affectation des surfaces, l'impact sur les prix de l'immobilier²⁵ et les aspects financiers liés aux projets. L'impact sur le tourisme et les loisirs n'est que rarement évoqué.

Le constat principal lorsqu'on examine ces thèmes est que l'aspect de gêne, souvent subjectif et très émotionnel, est central dans les recours. Les aspects plus techniques sont tous déjà adressés de manière efficace soit par le respect de normes édictées (émissions sonores, ombres projetées, projections de glace) soit par des mesures de protection et de compensation (faune et environnement). De leur côté, les griefs liés à la production sont souvent infondés, puisqu'un projet doit figurer dans le plan directeur cantonal et bénéficier de conditions de vent suffisantes pour être poursuivi en premier lieu.

Les tribunaux cantonaux ont abondé dans ce sens en 2019²⁶ et Suisse Eole espère que les décisions encore attendues établiront une jurisprudence en faveur de la transition énergétique et de la protection du climat.

5.2.2 Peu de problèmes d'acceptation locale

Lorsque la population locale est consultée sur des projets, on constate qu'une majorité soutient l'énergie éolienne. Dans les 22 cas concrets où un vote pour ou contre le plan d'affectation d'un parc éolien a été soumis au peuple, il a dit oui dans 86% des cas. L'idée répandue par certaines associations d'opposants à l'éolien qui prétendent représenter la majorité de la population lorsqu'elles s'opposent ou font recours à des projets de parcs éoliens est donc totalement fautive. La majorité de la population, lorsqu'elle est bien informée, soutient l'énergie éolienne.

Dans les communes de Collonges et Dorénaz, dix ans après la mise en service des éoliennes, les prix des terrains avaient plus que doublé et la population augmenté de près de 40 %²⁷. Ces chiffres attestent que la présence d'éoliennes dans les communes n'a ni conduit à une dévaluation des terrains, ni découragé de nouvelles personnes à s'y établir.

La population locale est largement favorable aux projets éoliens !

Votations intervenues sur des plans d'affectation jusqu'à ce jour (19/22):



Court BE: 70% Non (mars. 19)	Vallorbe VD: 58% OUI (juin 16)
Kienberg SO: 60% OUI (déc. 18)	Charrat VS: 60 % / 66% OUI (fév. 14 / juin 16)
Ballaigues VD 73% OUI (mars 18)	Grenchen SO : OUI (juin 15)
Lignerolle VD 91% OUI (mars 18)	Vaulion VD : OUI (avril 15)
L'Abergement 88% OUI (mars 18)	Premier VD : OUI (avril 15)
La Praz VD 65% Non / 55% OUI (jan. / mars 18)	Saicourt BE: 59% OUI (mars 15)
Juriens VD: 92% OUI (jan. 18)	Tramelan BE: 60% OUI (mars 15)
Mont-La-Ville VD: 58% OUI (jan. 18)	Canton de Neuchâtel: 65% OUI (mai 14)
Val-de-Travers NE: 59% OUI (sep. 16)	Saxon VS: 60% Non (fév. 14)
Le Chenit VD: 63% OUI (sep. 16)	Sainte-Croix VD: 53% OUI (fév. 12)

Figure 25 : liste et résultats des votations sur des PA, état fin 2019 [Suisse Eole]

²⁵ Un étude de Wüest Partner de 2019 n'a pas constaté de baisse de la valeur immobilière à proximité des parcs et projets de parcs éoliens en Suisse ([lien](#))

²⁶ [Suisse Eole news](#)

²⁷ Chiffres des communes mis à disposition de Suisse Eole

5.3 Mise en perspective du développement en Suisse

Le développement suisse peut être mis en perspective avec celui de son voisin autrichien, dont le territoire est deux fois plus grand pour une population similaire. L'Autriche, pays montagneux comme la Suisse et possédant une activité touristique importante, a su développer l'énergie éolienne depuis le début du millénaire pour atteindre 1313 machines totalisant une puissance installée de 3045 MW à fin 2018, soit quarante fois plus que la Suisse !

Si l'on compare l'état de la planification suisse actuelle comme cela est fait dans la Figure 26, la quantité de projets en procédure et les buts fixés par la Confédération (les chiffres exacts sont mentionnés dans ce chapitre), on remarque que la Suisse a actuellement environ 20 ans de retard par rapport à l'historique de la planification autrichienne !

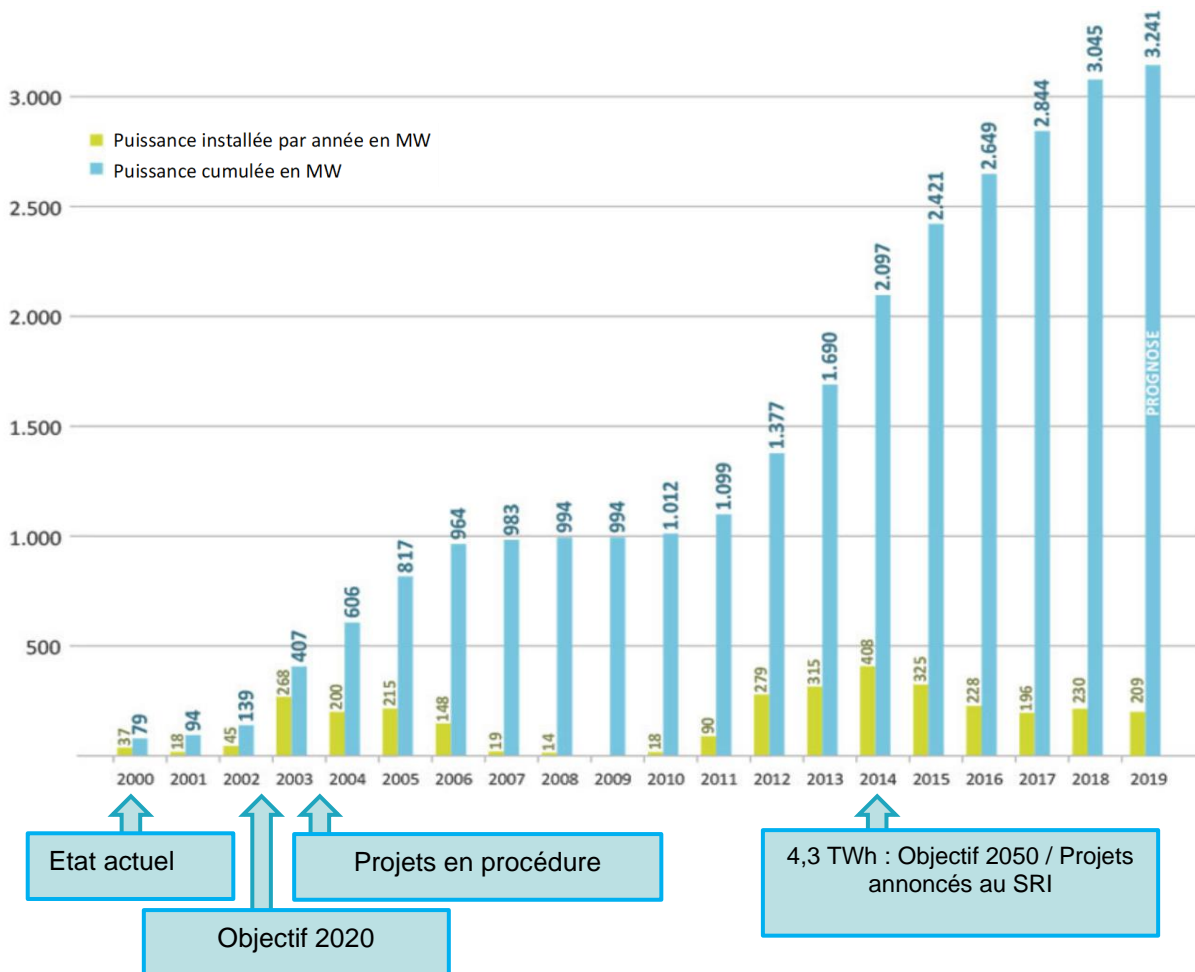


Figure 26 : Comparaison de la planification d'installations éoliennes en Suisse par rapport au développement de l'énergie éolienne en Autriche depuis le début du millénaire [Suisse Eole]

On remarque donc que, pour des conditions relativement proches des conditions suisses, le développement autrichien a connu un avancement beaucoup plus grand puisque la production éolienne autrichienne couvrait en moyenne 10% de la consommation d'électricité en 2018, contre 0.2% en Suisse. Certes, si une grande part des installations éoliennes se trouvent plutôt en plaine, l'Autriche a su lancer le développement de son potentiel alpin, sur lequel elle mise pour l'atteinte de ses objectifs 2030. Les conditions cadres favorables et la rapidité des procédures ont joué un rôle important, et l'Autriche continue de développer son cadre légal pour favoriser le développement de l'éolien alpin.

6. Analyse du potentiel éolien suisse

L'une des évaluations qui servent de base à la Confédération pour fixer son objectif de 4.3 TWh/an à l'horizon 2050 est une estimation du potentiel éolien effectuée dans une étude de Meteotest sur mandat de l'OFEV en 2012. Celle-ci estimait un potentiel durable (voir Figure 27) en appliquant des critères stricts et des estimations relativement prudentes comme relevé par les auteurs en avant-propos [10].

Le présent chapitre a pour but premier d'analyser succinctement le potentiel éolien estimé par Meteotest en 2012. Au vu de l'évolution de la technique et de l'état des connaissances sept ans après cette première évaluation, il est également indispensable d'actualiser les données de bases désormais dépassées et de mettre à jour le potentiel éolien durable suisse. Sur les parcs existants, les valeurs de vent sont généralement supérieures aux valeurs de la carte des vents utilisée.

Une prise en compte du potentiel alpin, largement sous-estimé à ce jour, et une mise en évidence des atouts de l'énergie éolienne et de sa complémentarité avec les autres sources d'énergie sont également effectuées dans ce chapitre. La place de l'énergie éolienne est précisée pour chaque région géographique.

Comme aboutissement de l'actualisation du potentiel éolien, pour Suisse Eole, un nouvel objectif de 9 TWh/an est réaliste, dont 6 TWh produits pendant le semestre d'hiver. Cet objectif prend notamment en compte, outre les avancées technologiques rendant économiques des sites présentant des vitesses de vents moins élevées que la moyenne globale, le déblocage du potentiel des forêts ainsi que la véritable pesée des intérêts désormais possible grâce à l'introduction d'un intérêt national pour les nouvelles énergies renouvelables.

6.1 Mise à jour du potentiel

6.1.1 Bases

Le potentiel durable calculé par Meteotest en 2012, dont les hypothèses et les critères de sélection sont listés dans un rapport séparé [11], se montait à 18.2 TWh/an, comme illustré dans le Tableau 2.

CH	Windgeschwindigkeit > 4.5 m/s	Windgeschwindigkeit > 5.0 m/s
Szenario 1 (heute) Nabenhöhe 100 m Rotordurchmesser 100 m	10.6 TWh	6.6 TWh
Szenario 2a 2b (morgen) Nabenhöhe 100 / 120 m Rotordurchmesser 128 m	14.3 / 18.2 TWh	8.8 / 10.7 TWh
Szenario 3 (wie 2b) jedoch ohne Ausschluss von Schutzgebieten	26.8 TWh	17.3 TWh

Tableau 2 : potentiel éolien 2050 durable pour divers scénarios calculés par Meteotest en 2012. Le scénario "2b (morgen)" découle des hypothèses et critères listés plus haut [10]

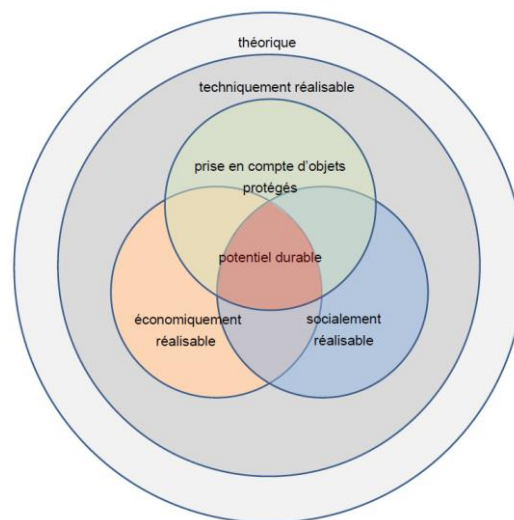


Figure 27 : schéma des différents potentiels [10]

En 2019, le cadre légal, la technique et les connaissances ayant continué d'évoluer, il est nécessaire de revoir ces critères et les données sur lesquelles ils se basent. Les corrections à appliquer aujourd'hui selon Suisse Eole touchent principalement les trois aspects suivants :

- **Meilleures connaissances des conditions de vents**

Les données de la carte des vents 2011 de Meteotest ne sont plus à jour depuis plusieurs années. En plus de nouvelles mesures de vents effectuées sur des mâts atteignant jusqu'à 130 mètres de haut, l'augmentation de la fiabilité des modèles météorologiques a fait l'objet d'un grand travail au niveau suisse et européen. On dispose aujourd'hui d'une meilleure estimation des vitesses de vent moyennes sur l'ensemble du territoire, par exemple avec le New European Wind Atlas (NEWA), décrit ci-après.

La mise à jour des vitesses de vent prises comme référence dans l'évaluation du potentiel est donc nécessaire : puisqu'on sait aujourd'hui que conditions de vent sont bonnes à excellentes en Suisse, les zones à potentiel économiquement intéressant sont plus nombreuses, et la production d'électricité plus élevée qu'on l'estimait en 2011.

- **Progrès technologiques de l'énergie éolienne**

L'évolution technologique rend les éoliennes toujours plus performantes pour des vitesses de vent moins élevées. Les nouveaux modèles de machines permettent donc une production plus élevée par éolienne et par an, avec les mêmes conditions de vent et sans devoir augmenter significativement la hauteur totale ou le diamètre des éoliennes. De nouvelles technologies ont également fait leur apparition, rendant un développement de l'éolien possible dans les Alpes (voir chapitre 4.1.4).

- **Prise en compte de l'intérêt national dans la pesée des intérêts**

L'exclusion complète des zones IFP, ISOS et IVS n'est plus applicable. Avec la LEnE du 30 septembre 2016 et l'OEne du 1^{er} janvier 2017, entrées en vigueur le 1^{er} janvier 2018, ces zones sont désormais « zones avec pesée des intérêts en présence d'un intérêt national », intérêt que revêt un parc éolien à partir d'une production de 20 GWh/an. Cela débloque une portion supplémentaire du potentiel éolien suisse puisqu'il est désormais possible d'envisager une dérogation à la règle suivant laquelle un objet inscrit dans l'inventaire doit être conservé intact²⁸.

Nouvel outil : New European Wind Atlas

Publié en 2019, le nouvel atlas des vents européen (NEWA²⁹) provient d'un consortium d'instituts de recherche en collaboration avec Vestas et est le fruit d'un projet EU de plus de 13 millions d'Euros. Les données à l'échelle micro possèdent une résolution de 50 m, soit deux fois plus que l'Atlas des vents de la Suisse. Pour Suisse Eole, la carte des vents suisses devrait être mise à jour en utilisant également le NEWA comme outil officiel de la Confédération.

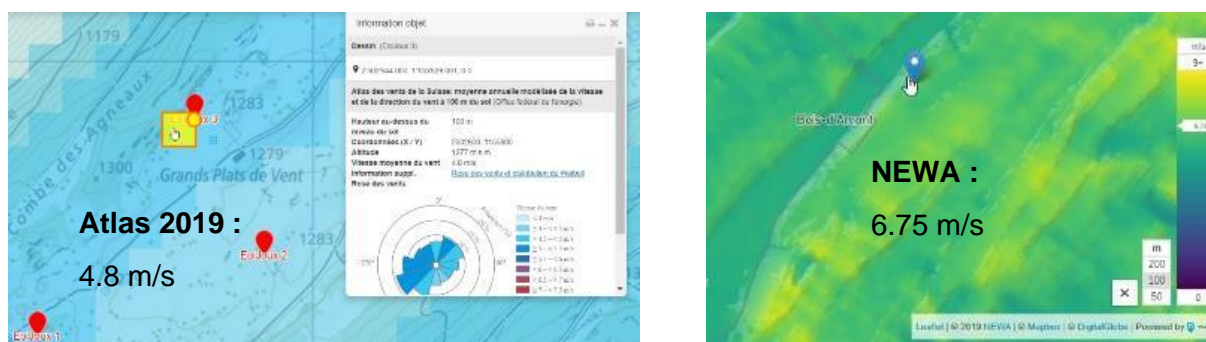


Figure 28 : comparaison entre l'Atlas des vents de la Suisse 2019 et le NEWA pour le site d'Eoljoux à 100m au-dessus du sol. Les mesures de vent sur site sont plus proches de la valeur du NEWA [Suisse Eole]

²⁸ [LEne du 30 septembre 2016, OEne du 1^{er} janvier 2017](#)

²⁹ <https://map.neweuropeanwindatlas.eu>

Selon une étude menée par Suisse Eole sur un échantillon de 30 sites éoliens répartis en Suisse, le NEWA présente des valeurs considérablement plus élevées que celles présentées dans l'Atlas des vents de la Suisse 2019. Une majorité de ces valeurs sont en outre confirmées par les mesures de vent sur les différents sites éoliens ; dans l'Atlas des vents de la Suisse 2019³⁰, ces valeurs sont nettement sous estimées.

En définitive, il est important d'être conscient que les valeurs présentées par les différents atlas, qui sont des valeurs indicatives et non absolues, peuvent fortement varier selon les données et les modèles utilisés, le budget à disposition et le nombre d'acteurs impliqués dans leur établissement. Pour l'estimation du potentiel éolien d'un site précis, seules les mesures de vent sur sites font foi, comme le rappelle l'OFEN dans sa prise de position vis-à-vis de l'Atlas des vents de la Suisse 2019 : « Les mesures de vent effectuées in situ doivent dans tous les cas prévaloir sur les données de l'Atlas des vents et ne doivent en aucun cas être remises en cause par d'éventuels écarts par rapport à celui-ci ».

6.1.2 Nouveau potentiel éolien de la Suisse

Grâce à l'actualisation des hypothèses et données de base citées ci-dessus et sur la base de l'étude menée par Meteotest en 2012, Suisse Eole a effectué une nouvelle estimation du potentiel durable éolien en Suisse à l'horizon 2050. Celui-ci se monte désormais à 30 TWh/an !

Ce potentiel ne correspond toutefois pas à l'objectif de développement que Suisse Eole fixe pour 2050, qui est expliqué en détail dans la section 6.4.

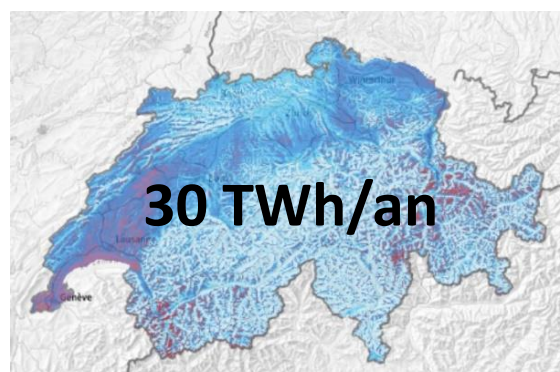


Figure 29 : potentiel éolien durable en 2050 [Suisse Eole]

Suisse	Potentiel des sites avec une vitesse des vents moyenne > 4.5m/s	Potentiel des sites avec une vitesse des vents moyenne > 5 m/s
Scénario 1 (aujourd'hui, 2020) Hauteur de mât 120 m Diamètre du rotor 128 m	20 TWh	12 TWh
Scénario 2 (demain, 2050) Hauteur de mât 135 m Diamètre du rotor 150 m	30 TWh	20 TWh
Scénario 3 (demain élargi) En incluant l'entier du potentiel des zones de protection	50 TWh	35 TWh

Tableau 3 : potentiel éolien 2050 durable pour différents scénarios pour la Suisse

Ces estimations du potentiel éolien suisse se basent sur une partie des hypothèses émises par Meteotest dans sa première étude ainsi que sur les corrections effectuées pour Suisse Eole³¹. Ces chiffres qui sous-estiment probablement encore le potentiel réel ; ils devront être actualisés sur la base des hypothèses contenues dans le présent chapitre.

³⁰ Rapport Suisse Eole sur l'atlas des vents de la Suisse 2019, Mai 2019

³¹ Voir [10]

6.2 Mise en perspective

6.2.1 Potentiel alpin encore largement sous-estimé

Contrairement à la grande majorité des sites où l'énergie éolienne est actuellement utilisée dans le monde, la Suisse présente un terrain alpin complexe où de nombreux effets spatiaux et temporels d'accélération des vents se produisent, de par la topographie unique et les phénomènes thermiques de vallée et de montagne. Les modèles numériques actuels généralement utilisés pour générer les atlas des vents ne possèdent pas une résolution assez élevée pour réussir à capturer ces phénomènes locaux, ce qui a mené jusqu'à aujourd'hui à une large sous-estimation du potentiel éolien suisse (y compris dans le cas d'une réévaluation du potentiel comme suggéré dans la section 6.1.2).

Or, le déficit d'énergie hivernale ne pourra pas être compensé par le développement accru du solaire PV seul. La relation entre la vitesse du vent et l'énergie produite n'étant pas linéaire, et il n'est pas suffisant de se baser sur des vitesses moyennes de vent annuelles pour estimer la production d'origine éolienne puisqu'elles ne prennent pas en compte des effets temporels dynamiques. Il est donc capital d'identifier rapidement des sites à fort potentiel éolien hivernal.

C'est dans le but de combler cette lacune que l'EPFL développe actuellement un nouveau modèle dans le cadre du projet MaxWEP, soutenu par l'OFEN³². Celui-ci vise à estimer de manière plus exacte le potentiel éolien alpin avec une résolution de 100m, qui permettra d'établir précisément une liste de sites alpins à haut potentiel pour l'érection de parcs éoliens. Les résultats des simulations seront validés par des mesures LIDAR et comparés aux résultats des modèles numériques actuels afin de corriger l'atlas des vents de la Suisse, ce qui permettra de mettre à jour le potentiel éolien en terrain complexe.

6.3 Les atouts de l'éolien

6.3.1 L'éolien présente un excellent écobilan

Suisse Eole tient à réitérer ici l'excellent écobilan de l'énergie éolienne, remarquable en termes d'émissions CO₂ mais aussi en termes d'impact sur l'environnement (lire la section 3.5.3 pour les chiffres exacts).

6.3.2 Complémentarité territoriale : il y a toujours une production éolienne en Suisse

C'est le résultat d'une analyse de Suisse Eole à partir des données de production horaire de 26 des 37 éoliennes suisses, représentant environ les trois-quarts de la puissance installée en Suisse et les 80% de l'énergie produite annuellement³³. Les données normalisées des différents parcs actuellement en service ont permis d'établir le profil de production d'une éolienne type en Suisse, et de vérifier si les régimes de vent dans les différentes régions étaient complémentaires. En d'autres mots : les éoliennes suisses produisent-elles toutes en même temps, ou alors à différents moments ?



Figure 30 : part temporelle de production d'électricité éolienne (injection sur le réseau) en Suisse en 2018 [Suisse Eole]

³² <https://people.epfl.ch/michael.lehning>

³³ Données 2018 pour les parcs suivants : Mont-Crosin, Peuchappatte, Coude du Rhône (Dents du Midi, Courtis-Neufs, Charrat), Entlebuch (Lutersarni, Rengg) et Gütsch

La réponse est sans appel : les régimes de vent se complètent de manière optimale en Suisse ! Alors qu'une éolienne seule injecte de l'électricité sur le réseau 85% du temps, cette valeur augmente lorsqu'on considère un parc dans son ensemble, pour atteindre les 100% du temps lorsqu'on regarde toutes les éoliennes suisses ! On constate que l'énergie éolienne produit de l'électricité en tout temps en Suisse, et qu'elle satisfait une partie de la demande en ruban. Pour comparaison, cette valeur plafonne autour de 50% dans le cas de l'énergie solaire (production de jour uniquement).

6.3.3 Les éoliennes suisses produisent de l'électricité quand les éoliennes européennes ne le font pas

Une étude publiée récemment par l'ETH Zürich a analysé les principaux régimes de vents régnant en Europe et comparé le facteur de charge moyen dans différentes régions ou pays pour chacun des 7 régimes. Au total, ce sont 23 régions européennes qui ont été comparées à la Suisse pour constater qu'il existe une complémentarité entre les régions d'Europe, et qu'il est judicieux d'exploiter le potentiel éolien de chacune d'entre elles pour assurer une production régulière d'énergie d'origine éolienne en Europe.

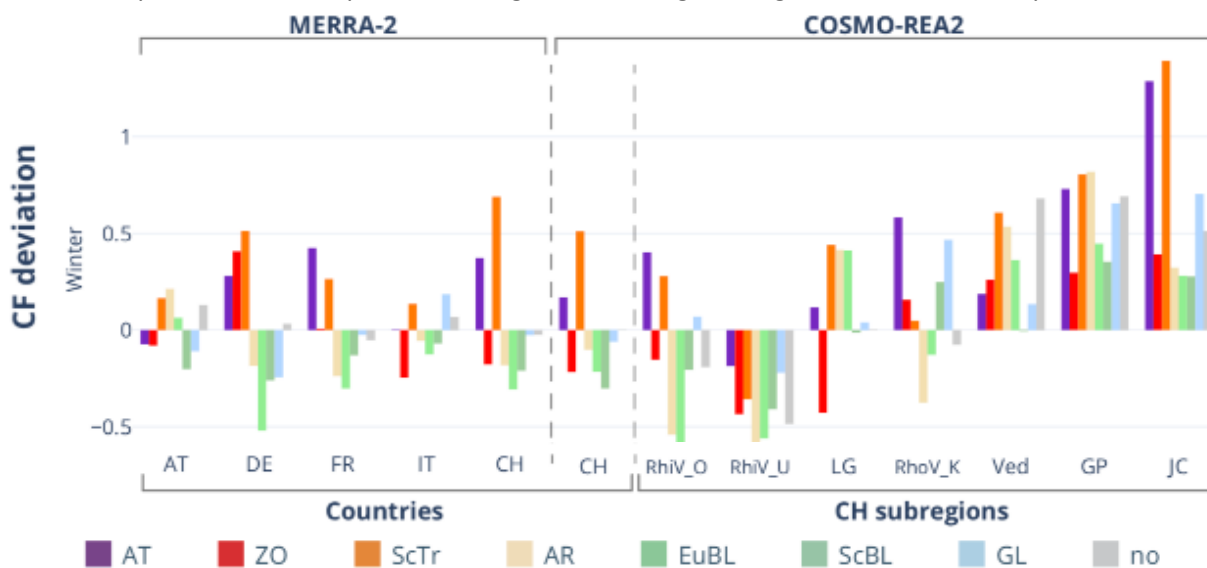


Figure 31 : déviation par rapport au facteur de charge moyen dans les différentes régions de Suisse comparées aux pays voisins [17]

L'étude s'est également concentrée sur la Suisse en analysant la complémentarité des vents dans 14 régions du pays à l'aide d'un modèle avec une haute résolution. A nouveau, les résultats sont sans appel et viennent confirmer l'observation faite par Suisse Eole sur une fraction des zones à potentiel éolien en Suisse (section 6.3.1) : il existe une complémentarité spatiale au sein même de la Suisse, particulièrement en hiver ! L'utilisation de l'énergie éolienne dans l'ensemble du pays est donc stratégiquement souhaitable et contribue à une production d'énergie en ruban. De ce fait, elle contribue pleinement à la sécurité d'approvisionnement.

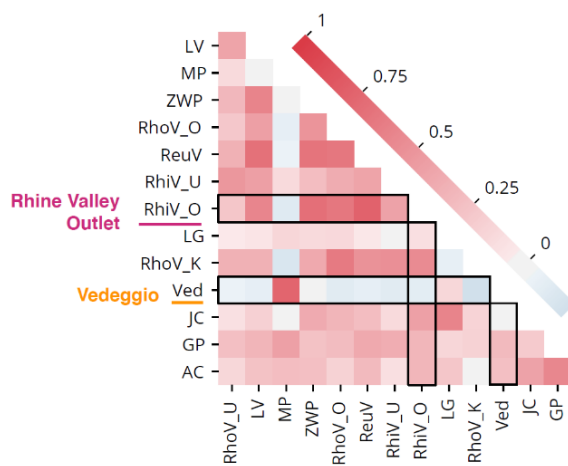
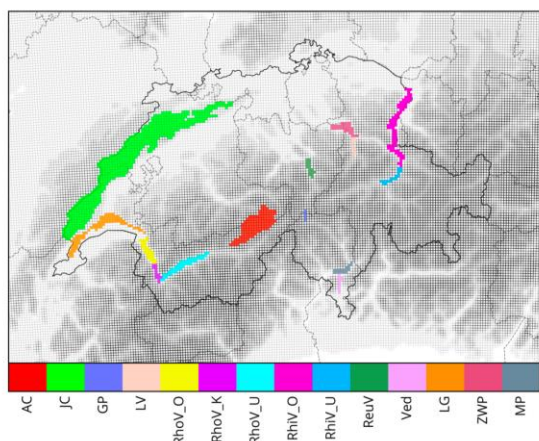


Figure 32 : régions de Suisse considérées et corrélation des régimes de vents. Les vallées alpines du nord sont bien corrélées, tandis que le sud des Alpes est anti-corrélé avec le nord. [17]

6.3.4 Complémentarité saisonnière : une contribution hivernale précieuse de l'énergie éolienne

En plus de son analyse sur la complémentarité spatiale des éoliennes, Suisse Eole a examiné la répartition saisonnière de la production d'électricité sur la base des données de production de différents parcs en Suisse³⁴. Constat : en moyenne, les deux tiers de l'énergie produite par une éolienne le sont durant la saison froide, exactement au moment où la consommation d'électricité est la plus élevée. Une exception : le coude du Rhône, du fait des vents thermiques exceptionnels qui dopent la production en été.

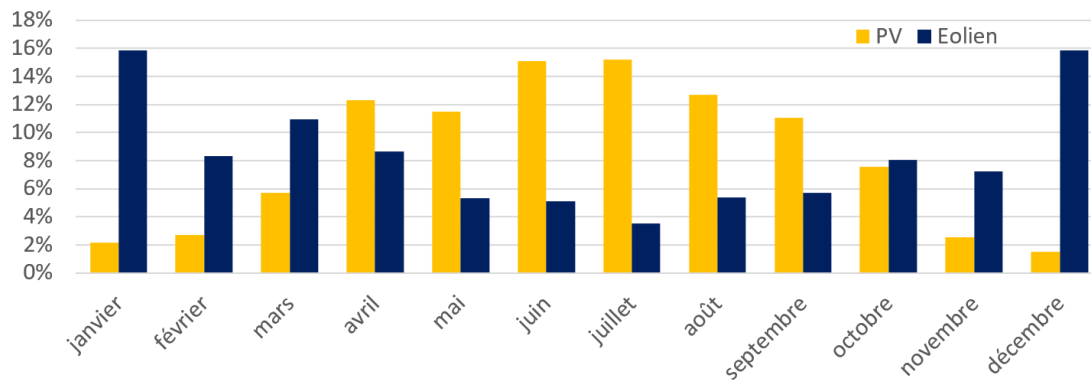


Figure 33 : répartition mensuelle de la production d'énergie pour une éolienne comparée au photovoltaïque [Suisse Eole]

L'énergie éolienne est donc parfaitement complémentaire aux autres sources d'énergie renouvelable, comme cela est expliqué plus en détails dans le chapitre 7.

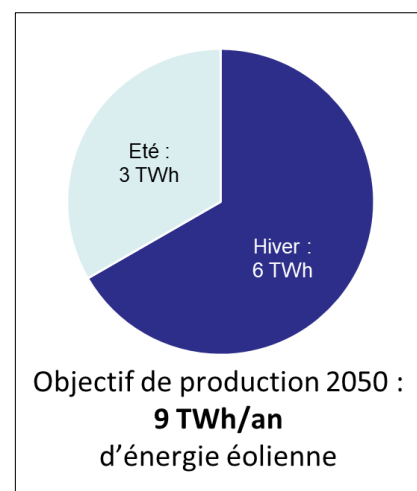
6.4 Nouvel objectif pour l'éolien Suisse

La Stratégie énergétique 2050, qui vise un objectif de 4.3 TWh/an en 2050, a été établie avec une production de 3 GWh/an par éolienne (correspond à une puissance nominale de 2 MW et un productible de 1500 h). Or, aujourd'hui, les machines de dernière génération ont une puissance référence de 4.2 MW (jusqu'à 6 MW) et peuvent atteindre des équivalents pleine charge de l'ordre de 2'400h. Cela représente donc plus du triple de production annuelle par machine (10 GWh/an) !

Cet objectif pourrait donc être théoriquement réévalué à 14 TWh/an pour l'année 2050. Cependant, plusieurs facteurs influençant ce chiffre vers le haut ou vers le bas sont à prendre en compte pour obtenir une estimation réaliste du potentiel. Pour ce qui est des contraintes, certaines limitations d'ordre technique ou réglementaire ne permettent pour l'instant pas d'installer des éoliennes de dernière génération sur tous les sites à potentiel éolien.

Dans les hypothèses qui impliquent que ce potentiel doit être revu à la hausse figurent notamment la meilleure connaissance des conditions de vent qui mettent en valeur le potentiel du Plateau et de l'Arc jurassien, la meilleure performance des machines rendant économiques des sites avec des vents plus faibles ainsi que le statut récent de l'énergie éolienne en tant qu'intérêt national, qui permet une réelle pesée des intérêts et non plus une exclusion systématique de certaines zones présentant un fort potentiel éolien. La prise en compte du potentiel des forêts contribue également à l'augmentation du potentiel.

C'est pourquoi Suisse Eole estime tout à fait réaliste la réalisation de 9 TWh d'énergie éolienne annuels à l'horizon 2050, dont une production hivernale de 6 TWh, sans devoir augmenter le nombre de machines prévues à l'heure actuelle.



³⁴ Mêmes données analysées que dans la section 6.3.1

6.5 Mise en perspective avec la planification en Suisse

La valeur haute de la Conception énergie éolienne 2019 de la Confédération avoisine déjà 7.5 TWh/an, sur la base de la planification actuelle et de machines moins performantes que les éoliennes modernes disponibles aujourd'hui. Un objectif de 9 TWh/an est donc parfaitement réaliste, avec un périmètre de planification inchangé mais avec une production plus élevée.

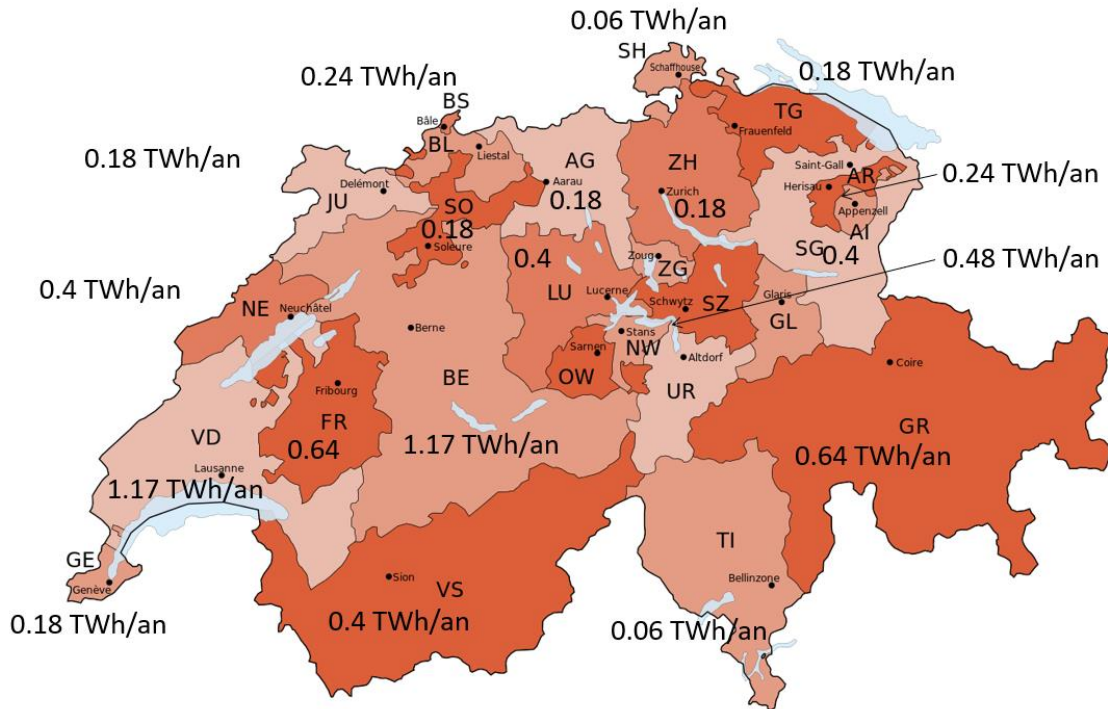


Figure 34 : potentiel de développement éolien dans les cantons suisses selon la Conception énergie éolienne 2019 (valeur haute), en TWh/an [OFEN]

7. Scénario énergétique Suisse Eole – la nécessité de l'énergie éolienne

En 2018, la Suisse a connu huit mois de dépendance de l'étranger car la production indigène n'était pas suffisante pour couvrir les besoins en énergie du pays ; au total, environ 7 TWh d'énergie ont dû être importés, avec une puissance de pointe de 4 GW. Sur les 63.5 TWh produits en Suisse en 2018, 24.4 TWh provenaient de l'énergie nucléaire [12] et 39.1 TWh des énergies thermiques et renouvelables déjà installées³⁵. Suite à l'acceptation de la Stratégie énergétique 2050, cette production nucléaire devra impérativement être remplacée par d'autres formes d'énergie, notamment les nouvelles énergies renouvelables. Au cas où celles-ci ne suffiraient pas, la Suisse sera contrainte d'acheter du courant étranger, surtout durant les mois les plus froids. Cependant, l'électricité importée provient majoritairement de sources de production à base d'énergie fossile en hiver, créant en Suisse la responsabilité d'un fort impact climatique aux moments où l'énergie éolienne apporte la majorité de sa contribution.

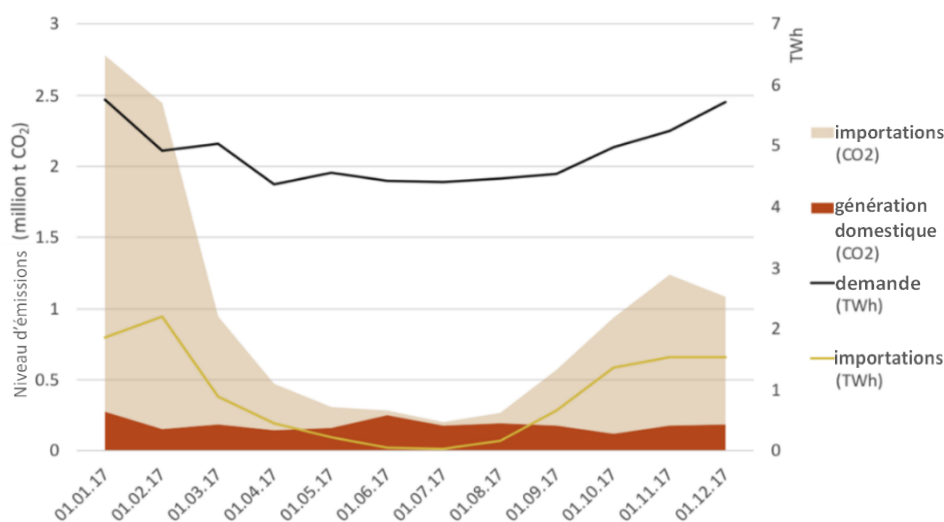


Figure 35 : émissions de CO₂ liées à la production locale et aux importations
[Université de Genève]

En plus des aspects moraux liés à l'augmentation de la dépendance au courant étranger produits avec des énergies fossiles, une telle dépendance est indéniablement liée à un risque substantiel pour la sécurité d'approvisionnement énergétique de la Suisse : des périodes de pénurie en Europe avec peu d'énergie disponible quand nous en avons besoin pourraient mener à un blackout partiel ou complet – comme ce fut presque le cas lors de l'hiver 2016/2017 – avec des conséquences humaines et sécuritaires catastrophiques. De plus, les accords avec l'Europe qui sécuriseraient la situation dépendront de la politique et des accords-cadres entre la Suisse et l'Union européenne, ce qui pourrait remettre en cause l'autonomie énergétique de la Suisse.

Des énergéticiens et politiciens se sont naturellement penchés sur la question et, parmi les scénarios proposés, celui qui a retenu le plus d'attention en 2019 se base sur un recours massif à l'énergie solaire photovoltaïque, avec un stockage journalier et saisonnier pour compléter le stockage hydraulique par accumulation saisonnière et pompage-turbinage, ainsi que le recours à des centrales thermiques (gaz) pour combler le manque hivernal³⁶.

La finalité de ce chapitre est de démontrer, par une analyse horaire pour trois scénarios différents grâce à l'outil GridView développé par Planair SA³⁷, que l'énergie éolienne apporte une solution réaliste et économique aux problèmes de dépendance à l'étranger et de renforcement du réseau électrique suisse nécessaire pour absorber les pics de puissance manquante. Ainsi, la période critique hivernale peut être abordée avec des risques réduits et dans le respect de l'environnement.

³⁵ SwissGrid

³⁶ Roger Nordmann, « Le plan solaire et climat », 2019 [16]

³⁷ www.gridnewdeal.com

Les hypothèses de base et les références seront d'abord expliquées, puis trois scénarios seront comparés :

- A. Sortie du nucléaire, électrification de la mobilité et du chauffage des bâtiments, réalisation du potentiel solaire photovoltaïque et stockage court terme grâce à des batteries
- B. Scénario A avec ajout de stockage saisonnier pour valoriser l'excédent estival
- C. Scénario B avec déploiement d'énergie éolienne

Seul le scénario C permet de réduire notablement la puissance manquante et de couvrir ainsi le manque d'énergie sans devoir renforcer les raccordements vers l'étranger, tout en améliorant l'autonomie énergétique de la Suisse et en réduisant la dépendance de l'étranger durant les mois d'hiver.

7.1 Hypothèses de base et références

Le rôle du *Plan éolien pour le climat* n'étant pas de réinventer les scénarios énergétiques existants, il se base sur des hypothèses connues et crédibles pour les étoffer avec la contribution de l'énergie éolienne. Il est important de noter que les données présentées ci-après et utilisées dans les simulations de scénarios énergétiques sont des données horaires, toutefois représentées ci-dessous généralement sous forme de répartition mensuelle, par souci de clarté.

7.1.1 Consommation électrique 2050

L'estimation de la consommation finale 2050 se base sur les hypothèses suivantes³⁸ :

- Consommation finale 2018 (61.9 TWh)
- Transfert vers les pompes à chaleur (PAC) pour le chauffage des bâtiments (6 TWh saisonniers)
- Electrification de la mobilité (17 TWh) soit le tiers de consommation énergétique fossile pour la mobilité actuelle.

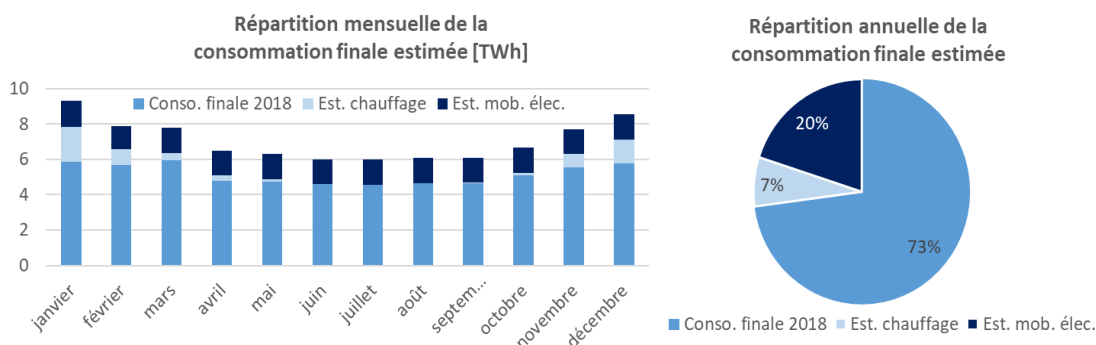


Figure 36 : consommation suisse finale estimée pour 2050, en TWh, et répartition annuelle

7.1.2 Production de base 2018

La production grâce au thermique classique, à l'hydraulique et aux autres énergies renouvelables déjà installées en 2018 se monte à 39.1 TWh. La répartition mensuelle est présentée à la Figure 37³⁹.

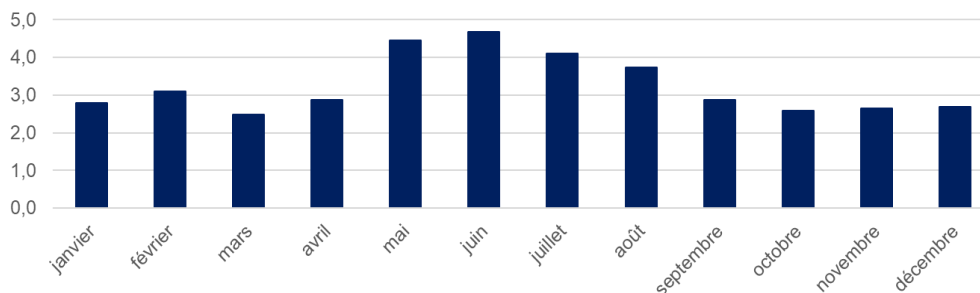


Figure 37 : répartition mensuelle de la production suisse 2018 sans le nucléaire, en TWh [SwissGrid]

³⁸ Hypothèses tirées de la statistique suisse de l'électricité, détaillées dans R. Nordmann « Le plan solaire et climat », 2019 [16]

³⁹ SwissGrid

7.1.3 Production photovoltaïque

Grâce à l'agrégation pondérée de productions réparties géographiquement en Suisse, une répartition de la production photovoltaïque type a pu être établie⁴⁰.

La production annuelle se monte à environ 1030 MWh produits par MW installé, soit un facteur de charge de 12%. La production est majoritairement estivale, comme cela est visible dans la Figure 38.

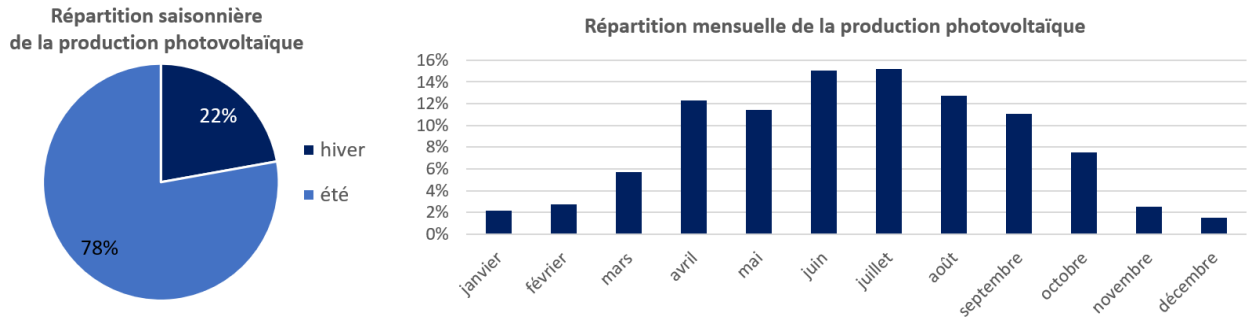


Figure 38 : répartition saisonnière et mensuelle de la production photovoltaïque suisse [Basler & Hofmann]

7.1.4 Production éolienne

Suisse Eole a agrégé les données quart-horaires de 26 des 37 éoliennes suisses, représentant environ 75% de la puissance installée en Suisse et les 80% de l'énergie produite annuellement⁴¹, données mises à disposition par la branche. Ces données sont validées par Pronovo.

La production annuelle actuelle est d'un peu plus de 1800 MWh par MW installé, soit un facteur de charge de 21%. On notera ici que les données utilisées sont celles d'éoliennes actuelles. Les performances des éoliennes futures sont décrites dans le chapitre 4.2 ; la production est donc sous-estimée, et les scénarios conservateurs. La production est majoritairement hivernale (Figure 39).

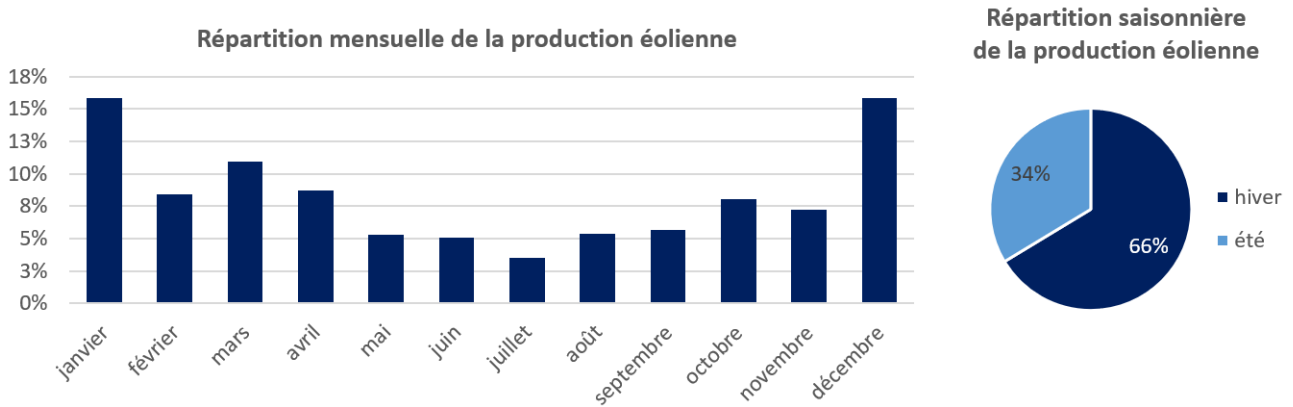


Figure 39 : répartition mensuelle et saisonnière de la production éolienne type en Suisse [Suisse Eole]

⁴⁰ Echantillon créé par Basler & Hofmann, scénario « Zubau wie bisher »

⁴¹ Données 2018 pour les parcs de Mont-Crosin, Peuchappatte, Coude du Rhône (Dents du Midi, Courtis-Neufs, Charrat), Entlebuch (Lutersarni, Rengg) et Gütsch (partiellement), fournies par la branche et validées par Pronovo

7.2 Scénario A

7.2.1 Hypothèses

Le scénario A se base sur les hypothèses de consommation ci-dessus et intègre les deux éléments suivants :

- Réalisation du potentiel solaire photovoltaïque suisse : 50 GWp⁴²
 - Pas d'écrtage (*curtailment/shaving*) simulé pour visualiser l'énergie excédentaire
- Stockage journalier grâce à des batteries : 50 GWh⁴³
 - Correspond à environ un tiers de la production photovoltaïque journalière moyenne
 - Sert uniquement à l'autoconsommation
 - Rendement du cycle complet : 81% (90% pour la charge et pour la décharge)

Le but de l'optimisation effectuée par l'outil GridView est de minimiser l'énergie manquante et la puissance manquante qui doivent être comblées par des importations pour satisfaire la consommation.

7.2.2 Résultats et interprétation

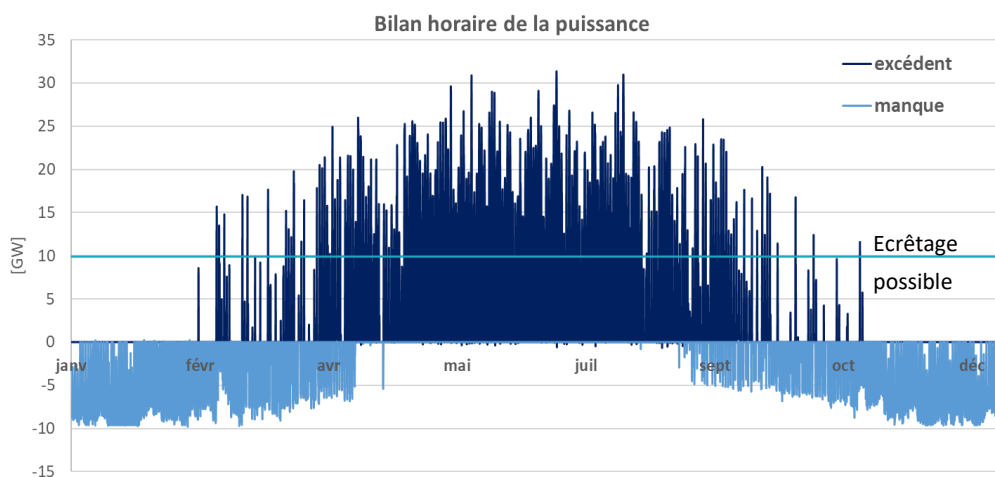


Figure 40 : bilan horaire de la puissance (manque et excédent) pour le scénario A, en GW

	Manque	Excédent
Energie [TWh]	19.7	20.6
Pic de puissance [GW]	9.61	31.35

Tableau 4 : bilan de l'énergie et de la puissance pour le scénario A

Les résultats de la simulation sont visibles dans la Figure 40 et reportés dans le Tableau 4. On y constate un fort manque entre novembre et février, avec une énergie de 20 TWh qui devrait être importée donc produite en plus par des centrales thermiques – importations en 2018 : 7 TWh – et une puissance nécessaire de presque 10 GW – contre 4 GW en 2018. Les connexions du réseau vers l'étranger nécessiteraient donc d'être renforcées pour acheminer les importations hivernales.

En été, c'est la situation contraire avec un large excédent solaire que la consommation et le stockage journalier ne parviennent pas à absorber entièrement. Afin de ne pas surcharger le réseau suisse, cette énergie pourrait en partie être exportée et, comme déjà actuellement, la production estivale des centrales thermiques réduite. Dans ce scénario, cette énergie devrait être écrêtée, ce qui est techniquement faisable. La rentabilité du système serait donc diminuée. On constate que l'excédent estival dépasse le manque hivernal, la mise en place d'un stockage saisonnier permettrait d'équilibrer la situation sur l'année. C'est ce qui est simulé dans le scénario B.

⁴² Roger Nordmann, « Le plan solaire et climat », 2019 [16]

⁴³ Soit environ un tiers de la puissance des batteries des véhicules électriques en circulation selon notre hypothèse.

7.3 Scénario B

7.3.1 Hypothèses

Le scénario B consiste à compléter le scénario A avec du stockage saisonnier pour absorber l'excédent de production solaire estivale. Celui-ci est effectué par stockage hydrogène, avec une efficacité du cycle de 35% – 70% pour la charge (électrolyse de l'eau vers de l'hydrogène et de l'oxygène grâce à l'électricité) et 50% pour la décharge (pile à combustible convertissant eau et hydrogène en électricité). Comme hypothèse, le stockage saisonnier est chargeable et déchargeable sur le réseau suisse, et comporte un bilan annuel nul (toute l'énergie stockée en été est restituée en hiver).

C'est le scénario sur lequel se base Roger Nordmann dans son « Plan solaire et climat », le stockage saisonnier étant développé ici au-delà de 6 TWh. La simulation horaire effectuée au moyen de l'outil GridView est une plus-value pour définir les aspects liés à la puissance et consolider la faisabilité de ces scénarios.

7.3.2 Résultats et interprétation

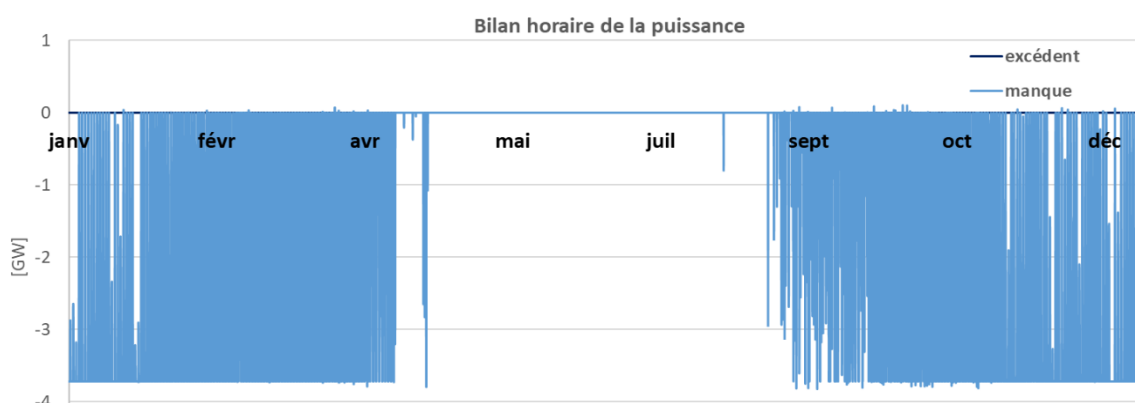


Figure 41 : bilan horaire de la puissance (manque et excédent) pour le scénario B, en GW

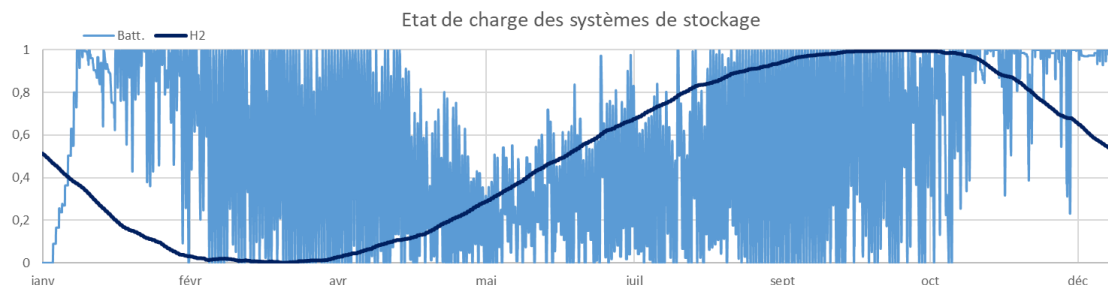


Figure 42 : état de charge relatif des systèmes de stockage journalier et saisonnier pour le scénario B

	Manque	Excédent
Energie [TWh]	12.5	0
Pic de puissance [GW]	3.7	0

Tableau 5 : bilan de l'énergie et de la puissance manquante pour le scénario B

On remarque dans le scénario B que l'ajout de stockage permet de valoriser l'excédent estival, qui est entièrement stocké pour être distribué en hiver, mais que le rendement du cycle n'est pas suffisamment élevé pour satisfaire les besoins hivernaux. Le manque hivernal est donc réduit – encore 12.5 TWh d'énergie manquante et 3.7 GW de puissance manquante – mais reste toutefois supérieur à la situation actuelle ; une augmentation des importations serait donc nécessaire.

Les deux systèmes de stockage sont complémentaires : l'un lisse les pics journaliers (batteries), l'autre permet de fournir l'excédent estival en hiver (hydrogène).

L'apport d'une source d'énergie hivernale est donc nécessaire et contribuera à réduire les manques. L'énergie éolienne représenterait une solution adéquate.

7.4 Scénario C

7.4.1 Hypothèses

Le scénario C apporte la solution aux problèmes constatés dans le scénario B en y ajoutant de l'énergie éolienne. La réalisation de l'objectif éolien de Suisse Eole de 9 TWh (voir la section 6.4 pour les calculs détaillés) permettrait de réduire significativement le manque hivernal.

7.4.2 Résultats et interprétation

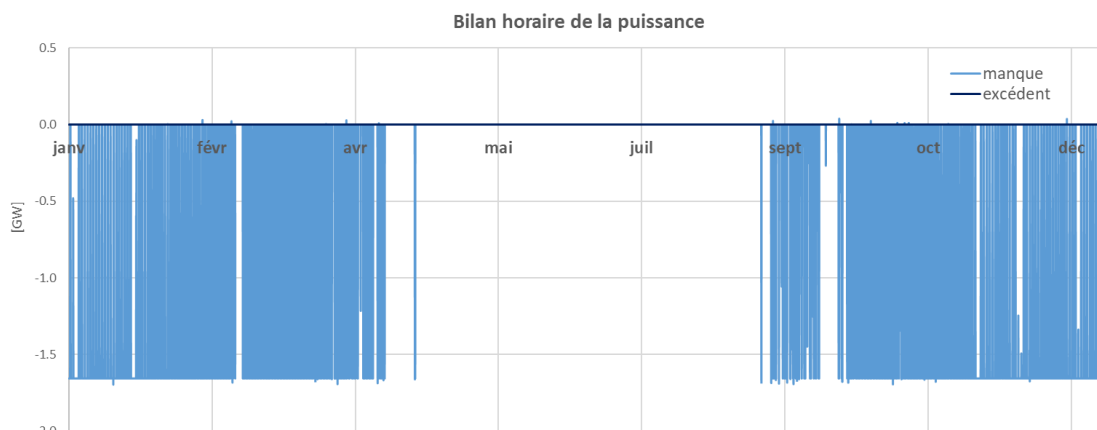


Figure 43 : bilan horaire de la puissance (manque et excédent) pour le scénario C, en GW

	Manque	Excédent
Energie [TWh]	5.5	0
Pic de puissance [GW]	1.7	0

Tableau 6 : bilan de l'énergie et de la puissance pour le scénario C

On constate tout d'abord que l'ajout d'énergie éolienne permet de réduire de 45% le manque hivernal en termes de puissance, de 3.7 GW à 1.7 GW, et que grâce au complément d'énergie stockable, les besoins en énergie sont massivement réduits de 12.5 TWh à 5.5 TWh par rapport au scénario B. Une source d'énergie produisant majoritairement en hiver est donc capitale pour réduire la dépendance de l'étranger et renforcer la sécurité d'approvisionnement.

7.5 Conclusions des simulations

Les résultats des trois simulations sont rassemblés dans le Tableau 7, qui montre la différence en termes de puissance et d'énergie manquantes de chaque scénario par rapport à la situation 2018. On constate que seul le dernier scénario, incluant 9 TWh d'énergie éolienne, permet de réduire la puissance manquante et de diminuer en 2050 les importations par rapport au niveau de 2018. La sécurité d'approvisionnement et l'environnement en seront les bénéficiaires.

	2018	Scén. A	Scén. B	Scén. C
Energie manquante / importée	7.06 TWh	+12.64 TWh	+5.44 TWh	-1.56 TWh
Puissance manquante / importation nette	4.06 GW	+5.55 GW	- 0.34 GW	- 2.40 GW

Tableau 7 : récapitulatif des scénarios en comparaison avec la situation actuelle (2018) en termes de puissance et énergie manquantes

En résumé, la **réalisation du potentiel éolien**, conjointement à un stockage saisonnier, est nécessaire pour :

- **Réduire le pic de puissance manquante** à une valeur inférieure au pic d'importation actuelle. Le manque pourrait ainsi être assuré par l'importation sans besoin de renforcement des capacités d'interconnexion ni mise en service de nouvelles centrales thermiques en Suisse.
- **Augmenter l'autonomie énergétique de la Suisse** diminue sa dépendance aux énergies fossiles, grâce à l'énergie éolienne hivernale et à un couplage avec du stockage saisonnier permettant de valoriser le surplus solaire estival.
- **Eviter une augmentation des importations** en les maintenant à un niveau comparable voire inférieur à celui d'aujourd'hui grâce au courant éolien hivernal supplémentaire, et cela malgré la hausse de la consommation due à l'électrification de la mobilité et au chauffage des bâtiments par des PAC.
- **Renforcer la sécurité d'approvisionnement.** La Suisse accroissant sa production d'électricité éolienne, limitant les importations, limite ses émissions de CO₂. La sécurité d'approvisionnement est ainsi renforcée.

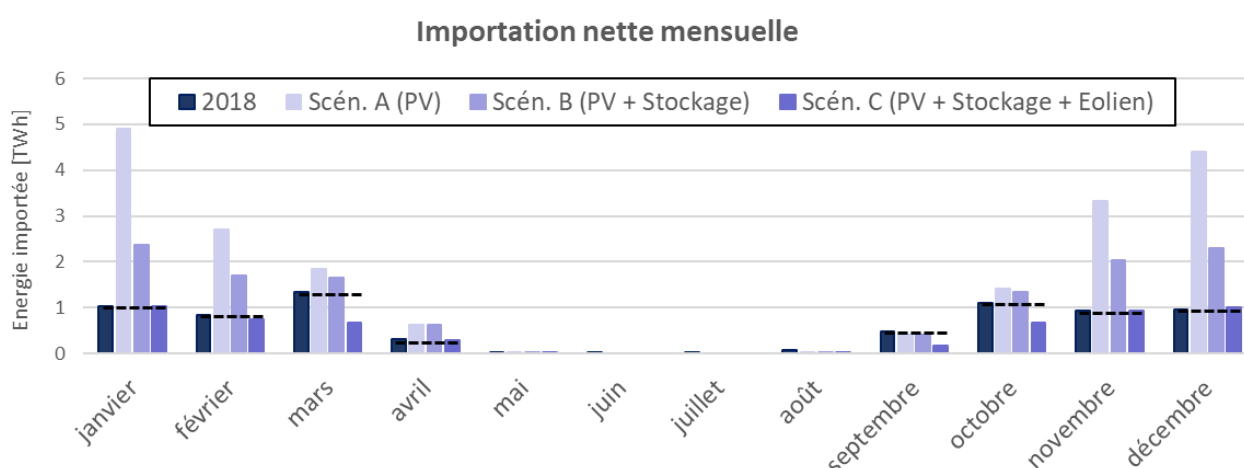


Figure 44 : comparaison des importations d'énergie nettes mensuelles pour les trois scénarios. Seul le scénario C, avec 9 TWh d'énergie éolienne, permet de ne pas dépasser le niveau des importations actuelles [Suisse Eole]

8. Conclusion

Le présent rapport a contribué à actualiser le potentiel éolien en Suisse et à fixer un objectif réaliste pour la production d'énergie d'origine éolienne d'ici à 2050. Suisse Eole a pu démontrer que la technologie éolienne est mature depuis de nombreuses années, et qu'elle contribue de manière croissante à couvrir les besoins en électricité dans de nombreux pays du globe. Les évolutions techniques de la dernière décennie ont introduit une tendance globale rendant rentable l'utilisation de l'énergie éolienne pour des vitesses de vents moyennes. Cette tendance, avec une meilleure connaissance des conditions de vents en altitude grâce à de nouvelles mesures sur le long terme et à du développement dans les modèles météorologiques, ont permis d'augmenter de manière considérable le potentiel durable de l'éolien suisse : il est estimé à 30 TWh/an.

Les caractéristiques de l'éolien en font une forme d'énergie précieuse, indispensable pour réussir la transition énergétique. En effet, de par sa complémentarité saisonnière – les deux tiers de l'énergie fournie par une turbine éolienne sont produites durant le semestre d'hiver – elle vient compléter de manière optimale le solaire et l'hydraulique au fil de l'eau, qui fournissent de l'énergie majoritairement en été tandis que des importations sont nécessaires pour couvrir les besoins hivernaux. L'éolien possède aussi en Suisse une complémentarité territoriale puisque, du fait des régimes de vents complémentaires dans les différentes régions du pays, de l'électricité d'origine éolienne peut être injectée sur le réseau 100% du temps.

Ainsi, un nouvel objectif réaliste de 9 TWh pour 2050 a été fixé par Suisse Eole, avec le même nombre d'éoliennes déjà prévues dans la Stratégie énergétique 2050, du fait de l'augmentation de l'efficacité et la puissance des turbines modernes. Des simulations ont confirmé que la réalisation de cet objectif est indispensable pour maintenir les importations de courant hivernal chargé en CO₂ à leur niveau actuel, en combinaison avec du stockage saisonnier pour valoriser l'excédent estival de l'énergie solaire. Le développement de l'énergie éolienne évitera d'une part la construction de centrales thermiques polluantes, et d'autre part un renforcement du réseau d'interconnexion pour renforcer l'énergie d'hiver.

Ce nouvel objectif de 9 TWh/an d'énergie éolienne – dont 6 TWh hivernaux – contribuera de façon significative à la transition énergétique suisse et au respect des engagements de Paris signés en 2016, puisque l'énergie éolienne présente le meilleur écobilan des nouvelles énergies renouvelables en termes d'impact global sur l'environnement et d'émissions CO₂. Toutefois, pour atteindre cet objectif, la Suisse a besoin de conditions cadres adaptées et de processus courts et clairs pour faire avancer et réaliser les projets actuellement bloqués par des procédures, dont certains depuis plus de 10 ans !

Si Suisse Eole devait résumer ses conclusions quant à l'énergie éolienne en un paragraphe, ce serait le suivant : **la technique est prête, l'acceptance locale est haute, le potentiel est présent et la nécessité est démontrée. La stratégie énergétique doit maintenant être claire et efficace : des processus simplifiés, des conditions-cadre stables et un soutien aux acteurs locaux engagés sont la clé d'une transition réussie.**

Lors du Congrès éolien suisse 2019, le président de l'AEE Suisse, Gianni Operto, a rappelé cette citation de Georg Christoph Lichtenberg (1742 - 1799) : « Je ne suis pas certain que ça ira mieux si ça change, mais je suis certain qu'il faut que ça change pour que ça aille mieux ! ».

La Confédération répondra-t-elle à l'appel des générations futures ?

Auteur

Superviseur

Nicolas El Hayek
Chef de Projet

Lionel Perret
Directeur de Suisse Eole

Références

- [1] REN21, «Renewables 2019 - Global Status Report,» 2019.
- [2] GWEC, "Global Wind Report 2018," 2019.
- [3] Luderer et al., *Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies*, 2019.
- [4] Deloitte for WindEurope, «Local impact, global leadership,» 2017.
- [5] Energie Zukunft Schweiz, «Investitionen in Erneuerbare-Energien-Anlagen von Schweizer Energieversorgern und Investoren,» 2016.
- [6] Bauer et al., PSI, OFEN, «Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies - An update of electricity generation costs and potential,» 2019.
- [7] Wüstenhagen et al., *Lowering the Financing Cost of Swiss Renewable Energy Infrastructure: Reducing the Policy Risk Premium and Attracting New Investor Types*, 2017.
- [8] Planair SA sur mandat de l'OFEN, «Berücksichtigung der Klimawirkung von erneuerbaren Energien in der Interessensabwägung,» 2019.
- [9] IEA Wind Task 26, «Forecasting Wind Energy Costs & Cost Drivers,» 2016.
- [10] Meteotest, «Energiestrategie 2050 - Berechnung der Energiepotentiale für Wind- und Sonnenenergie,» 2012.
- [11] Suisse Eole, *Analyse du potentiel éolien suisse*, 2020.
- [12] OFEN, *Statistique suisse de l'électricité 2018*.
- [13] BloombergNEF, «New Energy Outlook 2019,» 2019.
- [14] WindEurope, «Wind Energy in Europe in 2018,» 2019.
- [15] Strom-Report, «WINDENERGIE IN DEUTSCHLAND,» 2019.
- [16] R. Nordmann, *Le plan solaire et climat*, Lausanne: Editions Favre SA, 2019.
- [17] S. Pfenninger, ETH Zurich, «Complémentarité des vents en Suisse,» 2019.