



Le Challenge Power Tower

Construisez
l'avenir énergétique
de la Suisse



Le Challenge Power Tower

Forger l'avenir énergétique de la Suisse en jouant

Table des matières

Le jeu en bref	2
Vue d'ensemble des blocs de construction pour la Power Tower	6
Fiches explicatives concernant les 20 options de production d'énergie	7
Méthodologie	22



Le Challenge Power Tower:

concevoir l'avenir énergétique de la Suisse en s'amusant

A quoi sert le Challenge Power Tower?

La population suisse veut faire cesser les émissions de gaz à effet de serre, ce qu'elle a confirmé en adoptant la loi climat en juin 2023. Pour la neutralité carbone de la Suisse, il est essentiel d'abandonner le mazout, le gaz, l'essence et le diesel. En conséquence, nous aurons besoin de plus d'électricité pour les voitures électriques et les pompes à chaleur qui vont chauffer nos maisons. De plus, pour des raisons de sécurité, nous allons bientôt devoir arrêter nos vieilles centrales nucléaires et le peuple ne veut pas en construire de nouvelles.

Pourtant, comme aujourd'hui, nous aurons besoin d'un approvisionnement en électricité sûr à l'avenir. Nous pouvons et devons déterminer dès maintenant à quoi ressemblera cet avenir énergétique: combien de toits équiperons-nous de modules photovoltaïques? Allons-nous développer sensiblement la production éolienne? Voulons-nous exploiter encore davantage les cours d'eau suisses, déjà fortement mis à contribution, pour produire l'énergie dont nous avons besoin? Devons-nous profiter du potentiel important d'économies d'électricité ou investir des sommes colossales pour moderniser les centrales nucléaires sans savoir exactement si ces mesures permettront effectivement de les faire encore fonctionner?

Nous disposons de nombreuses options pour concevoir l'avenir énergétique, mais aucune d'entre elles ne sera gratuite. Toutes ont un prix, en francs, en surfaces construites, en émissions de CO2 directes ou grises ou en atteintes à la biodiversité. Ce profil de coûts est différent pour chaque option et le mélange d'options détermine le montant de la facture totale dont devront s'acquitter, en fin de compte, la population et l'environnement.

La Power Tower permet de visualiser et de comprendre ces interdépendances: votre mission consiste à construire une tour qui couvrira les besoins en électricité futurs de la Suisse. Suivant le scénario, elle peut être constituée de 22 ou de 28 blocs ; c'est vous qui décidez lesquels des 63 blocs disponibles vous utilisez.

Une fois terminée, votre Power Tower révèle le coût de vos décisions pour les consommatrices et consommateurs d'électricité, les contribuables, le climat et la biodiversité.



Sur quelle base scientifique repose le Challenge Power Tower?

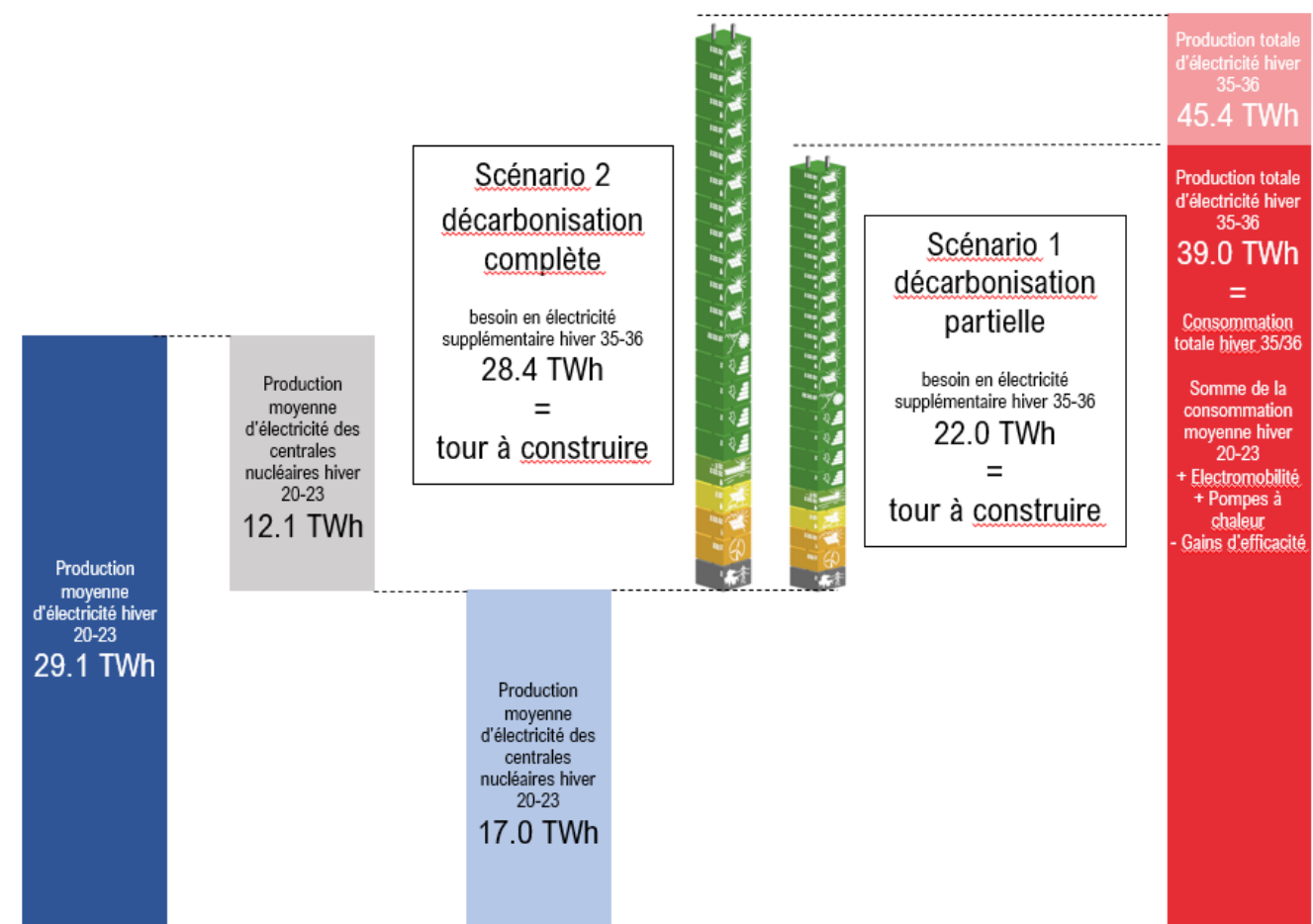
Ce jeu consiste en premier lieu à évaluer les conséquences de nos décisions en matière de production d'énergie. Que les besoins en électricité de la Suisse varient de 5% à l'avenir ou que la puissance photovoltaïque installée sur les bâtiments atteigne 30 ou 35 GW dans douze ans n'a finalement qu'une importance secondaire. Et pourtant, le jeu repose sur des estimations précises. Vous trouverez des

détails à ce sujet dans les fiches d'information relatives aux options énergétiques ainsi que dans la description de la méthode¹.

Hauteur de la tour terminée: la hauteur de la Power Tower symbolise la quantité d'électricité que nous devons produire en Suisse d'ici l'hiver 2035/36 en plus du courant que les centrales électriques produisent aujourd'hui, mais sans la production des centrales nucléaires. Celles-ci seront arrêtées après 50 années d'exploitation tout au plus². D'ici 2035 environ, l'approvisionnement de la Suisse devrait être neutre en CO₂ du point de vue scientifique³. L'hiver est au cœur des réflexions puisqu'à cette saison, les besoins en électricité de la Suisse sont d'ores et déjà supérieurs à la production indigène. Des importations sont donc nécessaires et le défi pour la sécurité de l'approvisionnement est plus grand en hiver qu'en été.

Les besoins futurs estimés reposent sur la consommation moyenne des trois semestres d'hiver 2020/21-2022/23 à laquelle s'ajoute le supplément dû à l'abandon des énergies fossiles jusqu'en 2035, avant tout du fait de la consommation des voitures électriques et des pompes à chaleur. Nous avons utilisé pour cela deux scénarios: l'un reflète la politique climatique et énergétique sur laquelle repose la loi climat récemment adoptée. L'autre table sur le fait que la Suisse prendra ses responsabilités et qu'elle abandonnera complètement les énergies fossiles d'ici 2035.

Afin de couvrir les besoins des deux scénarios, on peut soit utiliser la production d'électricité actuelle (sans le parc de centrales nucléaires) et se servir de la Power Tower pour combler la lacune avec la consommation estimée en 2035. Pour que cela soit possible, elle doit s'élever à 22 ou 28 TWh:



¹ Collaboration scientifique: Econcept AG, Alexander Umbricht, MSc ETH en sciences nat. de l'environnement, MAS ETH en MTEC, David Schärer, MSc ETH en sciences de l'environnement, Valentin Delb, ing. dipl. ETH

² La centrale nucléaire suisse la plus récente – Leibstadt – aura atteint sa durée d'exploitation prévue de 50 ans en 2034.

³ EBP. Budget CO₂ de la Suisse. Rapport succinct. 2017

Les blocs de construction de la tour sont les options énergétiques: il existe de nombreuses manières de produire de l'électricité. Nous avons estimé le potentiel d'un grand nombre d'entre elles, qui pourraient toutes être mises en œuvre d'ici 2035 en Suisse si tant est que la société, la politique et l'économie le veuillent bien. Nous avons également évalué les coûts des émissions de CO2 causées par la construction et l'exploitation de ces solutions ainsi que les effets sur la biodiversité. Pour certaines options, le lieu de construction d'une installation joue un grand rôle, par exemple dans le cas des installations photovoltaïques dans l'espace alpin, dans celui des centrales hydroélectriques ou dans le cas des éoliennes. Nous avons alors réparti ces options en deux variantes, celles dont l'impact est important (high impact) et celles dont l'impact est faible (low impact).

- Chaque bloc correspond à une quantité d'électricité d'un térawattheure (1 TWh). Le nombre de blocs varie en fonction du potentiel d'une option énergétique.
- Les coûts sont représentés par des \$, à savoir de \$ à \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$.
- Les émissions de CO2 sont également réparties en dix catégories au moyen de ce symbole ☼.
- Les effets sur la biodiversité sont répartis en sept catégories et indiqués de manière analogue à l'étiquette-énergie bien connue: de vert à rouge en passant par le jaune et l'orange.
- Les blocs représentant les centrales nucléaires rééquipées forment une catégorie à part. Ils sont gris car un accident nucléaire majeur est certes peu probable, mais ses effets sur la biodiversité et sur la population sont pratiquement impossibles à évaluer. Les coûts d'1 TWh de courant d'origine nucléaire sont indiqués dans une fourchette (\$ - \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$): il se pourrait qu'une centrale nucléaire soit rééquipée pour des millions de francs, mais que de nouvelles études montrent qu'elle ne peut pas continuer d'être exploitée en toute sécurité. Selon la loi, elle devrait alors cesser son activité.
- Concernant les importations d'électricité, deux variantes ont été retenues: l'électricité produite par les éoliennes et les installations photovoltaïques, vendue à un prix très bas lorsque le vent souffle et que le soleil brille sur tout le continent européen, mais qui coûte plus cher quand la météo est maussade et que le vent ne souffle pas. Les deux blocs correspondants sont gris car nous n'avons tenu compte que des effets sur la biodiversité en Suisse.
- Vous estimez que nous avons oublié une option pour produire de l'électricité? Dans ce cas, vous pouvez utiliser un joker.

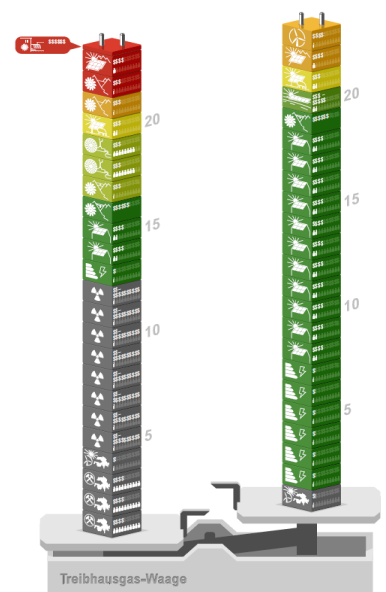
Quelle est l'utilité du Challenge Power Tower?

Le jeu démontre en premier lieu deux choses:

- **La transition énergétique est possible d'ici 2035. Les options réalistes sont suffisamment nombreuses.**
- **Le choix des options fait une énorme différence pour la biodiversité.**

Construire une Power Tower incite à réfléchir.

- Pourquoi choisir certaines options plutôt que d'autres?
- Quelles en seront les conséquences?
- À quoi accorde-t-on de l'importance, quels sont les facteurs secondaires?
- Quelle valeur a l'autarcie à mes yeux?
- Comment pourrait-on encourager les options avantageuses comme les installations photovoltaïques sur les toits, l'efficacité ou la sobriété de manière à exploiter réellement le potentiel théorique?
- Comment pourrait-on accroître le potentiel d'une option favorisée?



Expérimentez!

- Testez différents scénarios.
- Commencez par construire la tour de vos rêves puis celle que vous jugez réaliste. De quoi avez-vous besoin pour que votre rêve devienne réalité?

Une tour vivante

Nous avons soigneusement compilé les chiffres et les estimations pour la Power Tower. Mais nous savons bien que l'avenir est incertain et le paysage énergétique complexe. C'est pourquoi nous avons laissé de côté les questions du stockage de l'électricité et du réseau électrique. Nous sommes à l'écoute de vos retours et en tiendrons si possible compte lors de la prochaine version du jeu: Vos calculs montrent que le potentiel photovoltaïque sur les infrastructures est plus grand que ce que nous imaginons? Vous trouvez qu'il existe d'autres options énergétiques méritant d'être ajoutées au jeu sous forme de blocs? Faites-nous part de vos suggestions en écrivant à climate@wwf.ch.

Technologie	Potentiel du courant hivernal en 2035	1 TWh de courant hivernal occasionne		
	(Nombre de blocs/TWh)	Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
Photovoltaïque sur des toits et des façades	11	A		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaïque sur des infrastructures	2	B		\$\$\$ - \$\$\$\$\$\$
Photovoltaïque en haute altitude (high impact)	2	G		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaïque en haute altitude (low impact)	2	E		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaïque sur les surfaces agricoles	2	C		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Petites centrales hydroélectriques (high impact)	0.15	G		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Petites centrales hydroélectriques sur les infrastructures (low impact)	0.05	A		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Relèvement des barrages existants	1	C		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Développement/construction de grandes centrales hydroélectriques (h. i.)	1	G		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Développement/construction de grandes centrales hydroélectriques (l. i.)	1	E		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Rééquipement de centrales nucléaires existantes	12			\$ - \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Centrales à gaz	2	C		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Centrales éoliennes (high impact)	2	G		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Centrales éoliennes (low impact)	2	E		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Efficacité	7	A		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Sobriété	3	A		\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Importations énergie éolienne/photovoltaïque	5			\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Importations énergie fossile	5			\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Power to X	2		???	???
Joker	1		???	???

Photovoltaïque sur des toits et des façades

Les panneaux photovoltaïques posés sur des toits et des façades sont la seule technologie de production d'électricité qui peut être développée rapidement et en quantités pertinentes. En 2022, la puissance des installations photovoltaïques installées en Suisse était d'environ 4,7 GW.

La production d'électricité des installations photovoltaïques dépend de la durée d'ensoleillement, de l'altitude, de l'angle d'inclinaison, etc. La part de courant hivernal est plus grande dans les installations qui présentent un angle d'inclinaison plus élevé (p. ex. sur des façades).

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Pour produire 1 TWh de courant hivernal sur des toits et des façades avec des installations photovoltaïques, une puissance installée d'environ 3,2 GW est nécessaire. Cela correspond à une surface de toiture et de façade de presque 20 km² ou environ 66 000 installations modèles de type *Götschihof* (voir ci-dessous).

Coûts de revient

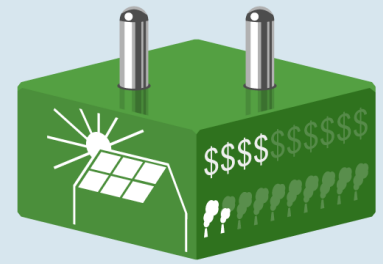
Estimés à 210 millions CHF.

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 90 000 tonnes de CO₂eq, avant tout en raison de la production des modules[1]. Cela correspond environ à 0,2% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

Les installations photovoltaïques sur les toits ou les façades ont, comparées à d'autres installations, peu d'effets sur la biodiversité.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



90 000 t CO₂eq

Coûts



210 millions CHF

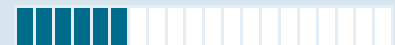
Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



11 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



31%

!

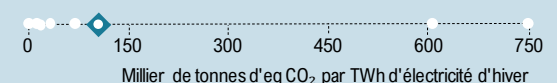
D'un point de vue arithmétique, les installations photovoltaïques sur et contre les bâtiments peuvent, à elles seules, couvrir tous les besoins en électricité de la Suisse sans qu'il soit nécessaire de construire sur des terrains encore vierges. Aucune autre technologie n'est en mesure de fournir un tel résultat.

Comparaison avec d'autres technologies

Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Projet solaire de Götschihof (canton de ZH) avec une surface de modules solaires de 300 m²; une puissance de 56 kWp et une production électrique d'environ 63 MWh.

Installations photovoltaïques sur des infrastructures

Les installations photovoltaïques sur des infrastructures permettent de développer la production d'électricité sans construire sur des terrains vierges. Les infrastructures pouvant accueillir de telles installations sont les routes et les voies ferrées, les places de stationnement, les sous-stations électriques, les ouvrages de protection, les décharges, les gravières et les carrières.

La production d'électricité des installations photovoltaïques dépend de la durée d'ensoleillement, de l'altitude, de l'angle d'inclinaison, etc. La part de courant hivernal est plus grande dans les installations qui présentent un angle d'inclinaison plus élevé (p. ex. sur des façades).

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Pour produire 1 TWh de courant hivernal avec des installations photovoltaïques posées sur des infrastructures, une puissance installée d'environ 3,7 GW est nécessaire. Cela correspond à une surface d'infrastructure de près de 12,6 km² ou environ 56 300 installations comme celle de l'exemple ci-dessous (couverture partielle de l'autoroute A2).

Coûts de revient

Les coûts de revient varient fortement entre les différents types d'infrastructures et au sein de ceux-ci. Les installations sur des talus sont les moins chères, celles placées sur les pare-avalanches les plus chères. La fourchette est estimée entre 120 et 220 millions de francs.

Emissions de gaz à effet de serre

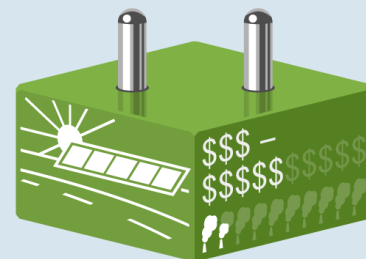
Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 90 000 tonnes de CO₂eq, avant tout en raison de la production des modules[1]. Cela correspond environ à 0,2% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

Les installations photovoltaïques sur des infrastructures ont, comparées à d'autres installations, peu d'effets sur la biodiversité. L'effet miroir des modules photovoltaïques peut déranger les oiseaux. Les installations peuvent nuire à la qualité des surfaces qui entourent les infrastructures.



Couverture partielle de l'autoroute A2 entre Zofingue et Strengelbach avec une surface de toit solaire de 3200 m², une puissance de 840 kWp et une production d'électricité d'environ 700 MWh par année.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



90 000 t CO₂eq

Fourchette de coûts



120-220 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



2 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



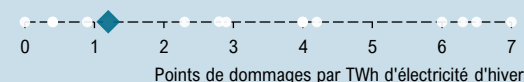
31%

!

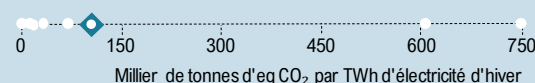
En hiver 2022/23, l'Office fédéral des routes a mis aux enchères de nombreuses surfaces sur les pare-rois antibruit le long des autoroutes et sur les aires de repos, afin que des installations photovoltaïques privées puissent y être construites ces prochaines années.

Comparaison avec d'autres technologies

Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Photovoltaïque dans les zones alpines de haute altitude

Les installations photovoltaïques dans les zones alpines de haute altitude livrent nettement plus d'électricité que celles du Plateau, particulièrement durant le semestre d'hiver. Les sites de haute altitude profitent d'un ensoleillement plus fréquent, de la réflexion du soleil sur la neige, de températures inférieures et d'une densité de l'air moindre.

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Pour produire 1 TWh de courant hivernal avec des installations photovoltaïques dans les zones alpines de haute altitude, une puissance installée d'environ 1,1 GW est nécessaire. Cela correspond à une surface d'environ 6,5 km² ou à environ 61 installations modèles comme celle de *Gondosolar* (voir ci-dessous).

Coûts de revient

Estimés à 200 millions de francs.

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 60 000 tonnes de CO₂eq, avant tout en raison de la production des modules[1]. Cela correspond environ à 0,15% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

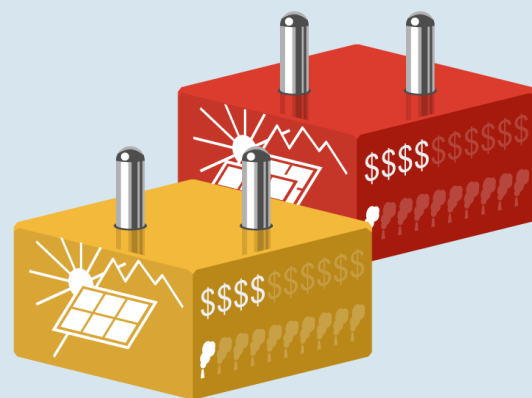
Biodiversité

Les effets des centrales solaires alpines sur la biodiversité varient fortement en fonction de leur emplacement. Dans les zones à fort impact («high impact»), qui méritent particulièrement d'être protégées, les dommages portés à la biodiversité sont très importants comparés à ceux d'autres options technologiques. Ils sont plus faibles dans les zones dites à faible impact («low impact»).

Les effets les plus importants sur la biodiversité sont la perte d'habitat, la fragmentation de ce dernier et une transformation du microclimat. Il faut en outre s'attendre à ce que l'infrastructure supplémentaire nécessaire telle que les routes d'accès, les voies de transport et les nouvelles lignes électriques influencent négativement la biodiversité.

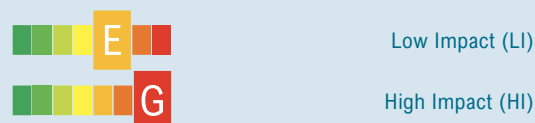


Gondosolar s'étend sur une surface totale de 100 000 m², avec une puissance de 18 MW et une production d'électricité de 23,3 GWh par année. L'installation est en cours de planification, il est possible que la surface construite connaisse des modifications. (Visualisation)



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre

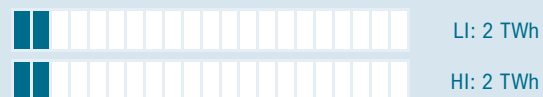


Coûts

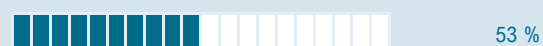


Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



Part de production d'électricité au semestre d'hiver

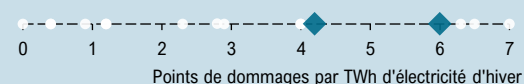


!

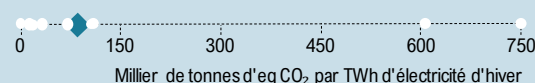
A ce jour, il n'existe que des installations pilotes de sorte que nous ne disposons pas de valeurs d'expérience sur le long terme.

Comparaison avec d'autres technologies

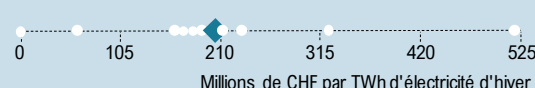
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Photovoltaïque sur les surfaces agricoles

Les installations photovoltaïques sur les surfaces agricoles combinent production d'électricité et culture des champs. Il existe plusieurs variantes pour la construction des modules: pose verticale, près du sol ou couverture.

Les installations photovoltaïques sur les surfaces agricoles ne sont pas encore autorisées en Suisse mais il existe des projets pilotes dans différents cantons. Au Parlement, des efforts sont en cours pour que la construction d'installations photovoltaïques soit possible sur les terres agricoles [2].

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Pour produire 1 TWh de courant hivernal avec des installations photovoltaïques sur des surfaces agricoles, une puissance installée d'environ 3,2 GW est nécessaire. Cela correspond à une surface de tout juste 20 km² ou à environ 625 installations modèles de type *Fruitfarm* (voir ci-dessous).

Coûts de revient

Estimés à 160 millions de francs.

Emissions de gaz à effet de serre

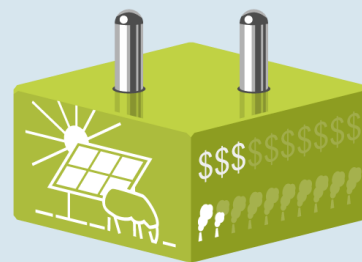
Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 90 000 tonnes de CO₂eq, avant tout en raison de la production des modules[1]. Cela correspond environ à 0,2% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

Les installations photovoltaïques sur des surfaces agricoles ont des effets moyennement importants sur la biodiversité. Ces installations peuvent avoir des influences négatives sur les oiseaux (p. ex. perturbations dues aux reflets), les insectes (changement de comportement) ou les plantes (ombre, bien que certaines espèces en profitent).



Fruitfarm (NL) est dotée d'une couverture de panneaux solaires d'une surface de 32 000 m² et d'une puissance installée de 4,8 MWp.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



90 000 t CO₂eq

Coûts



160 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



2 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



31%

!

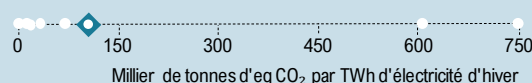
Les installations photovoltaïques sur des surfaces agricoles peuvent réduire la consommation d'eau et l'utilisation de pesticides sur certaines cultures. Elles protègent les plantes des orages et des fortes pluies. Suivant les conditions climatiques et agricoles, les installations font augmenter ou baisser le rendement agricole.

Comparaison avec d'autres technologies

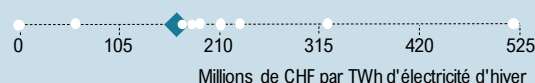
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Petites centrales hydroélectriques

Les petites centrales hydroélectriques (puissance inférieure à 10 MW) existent depuis plus de 100 ans. Production actuelle: 4 000 GWh, les plus petites installations (< 1 MW) produisant environ 2% du total. Les petites centrales hydroélectriques présentent le plus faible potentiel de développement de toutes les technologies considérées.

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Les estimations relatives aux coûts des petites centrales hydroélectriques varient fortement, ce facteur étant très dépendant de l'emplacement et de la taille de l'installation. Les valeurs de référence diffèrent également beaucoup selon qu'il s'agit d'une nouvelle construction ou d'une installation rénovée. Les indications suivantes sont des valeurs moyennes.

Coûts de revient

Estimés à 320 millions de francs.

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 20 000 tonnes de CO₂eq. Cela correspond environ à 0,05% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

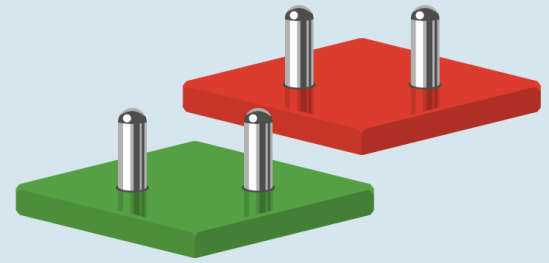
Les centrales hydroélectriques nuisent à l'écologie des cours d'eau, par exemple en retenant l'écoulement de l'eau en amont de la centrale et en provoquant un assèchement de la rivière en aval de celle-ci, en perturbant le régime des eaux et en constituant des obstacles insurmontables pour les poissons.

La biodiversité souffre proportionnellement plus de chaque GWh de courant produit par des petites et très petites centrales hydroélectriques que lorsque l'électricité est produite par de grandes centrales. La plupart des grands cours d'eau de Suisse sont déjà entravés par des installations hydroélectriques. Les plus petits cours d'eau constituent les derniers habitats encore relativement préservés.

Les petites centrales hydroélectriques construites sur des cours d'eau naturels appartiennent à la catégorie «high impact». Les installations dites d'infrastructures, qui utilisent par exemple la pression excédentaire des systèmes d'eau potable, n'ont que des effets minimaux sur la biodiversité (catégorie «low impact»).



La petite centrale hydroélectrique de Buchholz a une puissance de 0,14 MW. Les deux turbines intégrées produisent, ensemble, 530 MWh d'électricité par année en moyenne.



Les blocs représentant les petites centrales hydroélectriques ne sont pas à l'échelle pour des raisons de stabilité de la construction.

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Low Impact (LI)

High Impact (HI)

Emissions de gaz à effet de serre



20 000 t CO₂eq

Coûts



320 millions CHF

Solution potentielle pour combler la lacune de courant hivernal

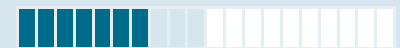
Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



LI: 0,05 TWh

HI: 0,15 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



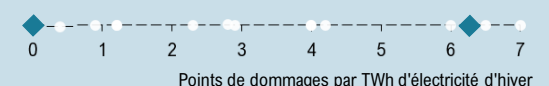
34%

!

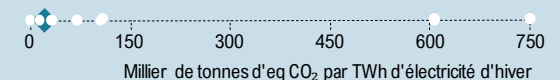
1400 petites centrales hydroélectriques produisent environ 10% de l'électricité produite en Suisse par la force hydroélectrique. Sur ce nombre, 900 sont de très petites installations d'une puissance inférieure à 300 kW. Leur part à la production d'électricité hydro est de 1%.

Comparaison avec d'autres technologies

Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Relèvement des barrages existants

Cette mesure ne comprend que des projets de relèvement de barrages existants. La plupart de ces projets ont surtout pour effet de reporter la production existante d'été en hiver.

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

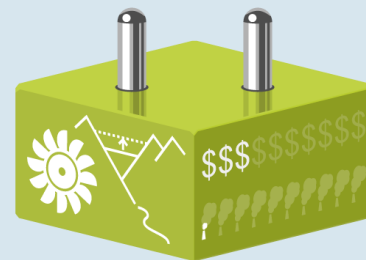
Estimés à 150 millions de francs.

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'un TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 10 000 tonnes de CO₂eq. Cela correspond environ à 0,03% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

Par rapport à d'autres catégories de centrales hydroélectriques, les effets sur la biodiversité sont proportionnellement faibles, ces projets visant des installations existantes (murs de barrages, lacs de retenue, conduites et turbines). Les effets peuvent par exemple être l'inondation de terres précieuses, notamment de hauts marais.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



10 000 t CO₂eq

Coûts



150 millions CHF

Solution potentielle pour combler la lacune de courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



1 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



100%

!

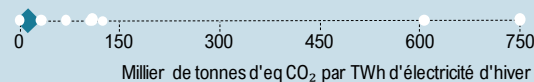
En raison de la topologie de nombreux lacs de retenue alpins (rives en forte pente), l'impact supplémentaire sur la biodiversité est comparativement faible, à condition que le droit en vigueur soit respecté et qu'aucun autre bassin d'accumulation ou écosystème précieux ne soit affecté.

Comparaison avec d'autres technologies

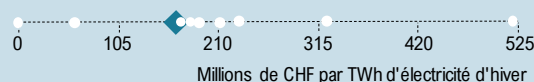
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Le relèvement du mur du [barrage de Göscheneralp](#) pourrait permettre de produire près de 95 GWh de courant hivernal supplémentaire (pour une production supplémentaire totale d'environ 45 GWh par année).

(Image: Paebi)

Développement ou construction de grandes centrales hydroélectriques

Cette option comprend l'agrandissement des utilisations existantes de la force hydraulique, p. ex. par le raccordement de cours d'eau proches de ceux qui sont déjà utilisés ou par l'intégration d'un niveau supplémentaire d'utilisation (p. ex. centrales à éclusées) et les nouveaux projets de constructions (p. ex. nouvelles centrales au fil de l'eau ou installations de stockage sur des cours d'eau qui ne sont pas encore exploités).

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

Estimés à 170 millions de francs (low impact) et à 190 millions de francs (high impact).

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 15 000 tonnes de CO₂eq. Cela correspond environ à 0,04% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

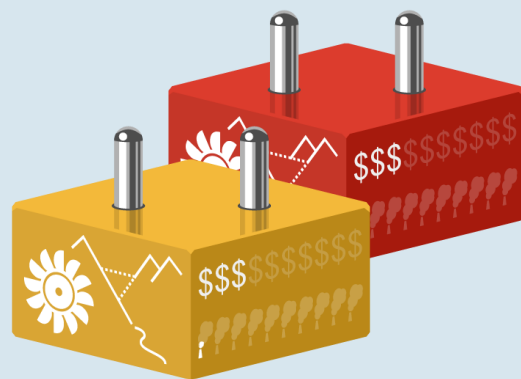
Les centrales hydroélectriques nuisent à l'écologie des cours d'eau, par exemple en retenant l'écoulement de l'eau en amont et en provoquant un assèchement de la rivière en aval de la centrale, en perturbant le régime des eaux et en constituant des obstacles insurmontables pour les poissons.

Les effets sur la biodiversité dépendent fortement du projet individuel et de son emplacement. L'agrandissement d'installations existantes a généralement moins d'effets (catégorie «low impact») que les nouveaux projets (catégorie «high impact»). Les projets d'agrandissement relèvent de la catégorie «high impact» s'ils concernent des cours d'eau avec un statut de protection (p. ex. zones alluviales, sites de reproduction de batraciens, marais ou sites de l'UNESCO).



Linthal 2015 Avec la rénovation et l'agrandissement des installations de la centrale de Linth-Limmern, le volume de stockage est passé de 9 millions de mètres cubes d'eau à 23 millions de mètres cubes.

(Image: Peter Schenk)



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Low Impact (LI)

High Impact (HI)

Emissions de gaz à effet de serre



15 000 t CO₂eq

Coûts



170 millions CHF

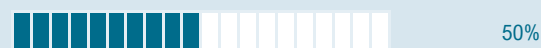
Solution potentielle pour combler la lacune de courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



Ces valeurs sont arrondies à 1 TWh pour les blocs du jeu.

Part de production d'électricité au semestre d'hiver

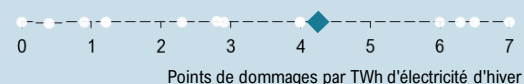


!

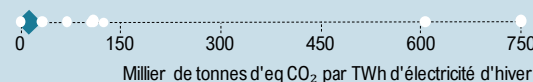
Les projets «high impact» sont difficiles à réaliser, les clarifications et les procédures nécessaires étant de longue haleine.

Comparaison avec d'autres technologies

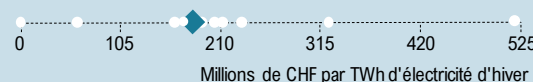
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Centrales nucléaires: rééquipement des centrales existantes

En Suisse, quatre centrales nucléaires sont en exploitation, pour une puissance totale de 2 973 MW [3]. La cinquième, celle de Mühleberg, a été arrêtée en 2019. Elle est en train d'être démantelée [4]. Les centrales nucléaires produisent chaque année environ 18,5 TWh d'énergie en bande [5].

En Suisse, les centrales nucléaires existantes peuvent être exploitées aussi longtemps que leur sécurité est assurée. En revanche, la construction de nouvelles centrales nucléaires est interdite [6].

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

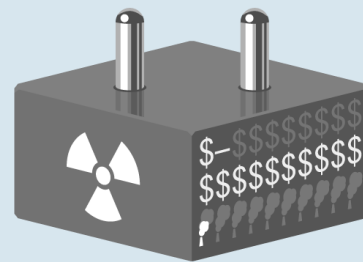
La limite inférieure des coûts de revient pour 1 TWh de courant hivernal est estimée à 40 millions de francs dans le cas du rééquipement des centrales nucléaires. Lorsque de nouvelles connaissances remettent en question l'exploitation sûre d'une centrale nucléaire, l'autorité de surveillance de la Confédération (ENSI) doit exiger son rééquipement ou lui retirer l'autorisation d'exploitation. Suivant les cas, cette décision peut intervenir peu après un rééquipement. Vraisemblablement, les coûts de revient augmenteraient alors fortement, à savoir jusqu'à 520 millions de francs.

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'un TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 20 000 tonnes de CO₂eq. Cela correspond environ à 0,05% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

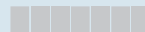
Biodiversité

Comme les centrales nucléaires sont déjà en exploitation, les dommages à la biodiversité provoqués par le maintien de leur fonctionnement sont proportionnellement faibles. L'eau de refroidissement, qui pourrait se faire rare en raison des étés de plus en plus chauds, et la problématique des déchets, qui n'est toujours pas résolue, sont des points à prendre en compte. Les conséquences possibles d'un accident nucléaire majeur sont quant à elles presque impossibles à estimer. Nous avons donc renoncé à une estimation dans ce cas. Les blocs représentant les centrales nucléaires sont gris.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



20 000 t CO₂eq

Fourchette de coûts

\$-\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$

40-520 mio CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



12 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



58%

!

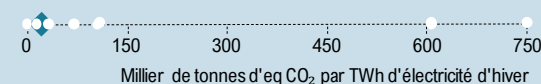
La durée d'exploitation des centrales nucléaires prévue à l'origine est de 50 ans. En conséquence, celle de Leibstadt serait la dernière à être mise hors service, en 2034.

Comparaison avec d'autres technologies

Biodiversité

Non évalué

Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



La centrale nucléaire de Gösgen fonctionne depuis 1979 et a une puissance de 1010 MW.

Centrales à gaz

Les centrales à gaz permettent de produire de l'électricité de manière souple, puisqu'elles peuvent rapidement être poussées à plein régime ou arrêtées selon les besoins. Elles conviennent donc pour couvrir les pics de consommation. Le Conseil fédéral a déjà mis en place des centrales fossiles (à gaz ou à mazout) pour pallier les situations de pénurie exceptionnelles; d'autres doivent venir s'y ajouter.

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

Estimés à 180 millions de francs.

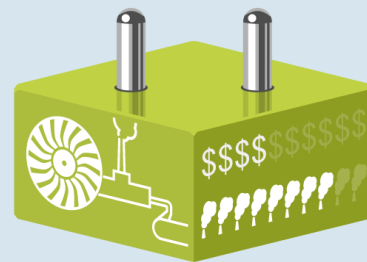
Comme les prix du gaz ont subi de fortes variations, au plus tard depuis la guerre en Ukraine, il est difficile de faire des déclarations précises quant aux coûts de revient. Avec des prix du gaz comme ceux du 7 mars 2022 (prix du gaz le plus élevé sur le marché spot durant le semestre d'hiver), les coûts de revient se seraient montés à 325 millions de francs, soit près de deux fois plus par TWh de courant hivernal.

Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 610 000 tonnes de CO₂eq, avant tout en raison de la production des modules. Cela correspond environ à 1,4% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

Les effets négatifs des centrales à gaz sur la biodiversité concernent avant tout les importantes émissions de gaz à effet de serre et le bruit occasionné.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



610 000 t CO₂eq

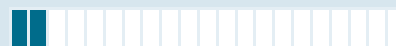
Coûts



180 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



2 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



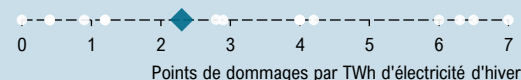
100 %

!

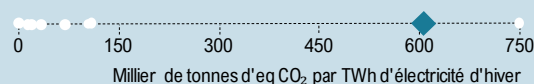
La Commission fédérale de l'électricité ElCom recommande de construire deux à trois centrales à gaz avec une puissance cumulée de 0,7 à 1,4 GW afin de combler les lacunes possibles dans l'approvisionnement [7]. Selon une étude de la ZHAW, cette mesure est n'est toutefois pas nécessaire [8].

Comparaison avec d'autres technologies

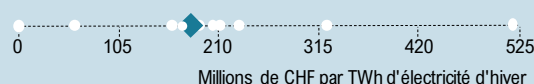
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



La centrale à gaz et à vapeur d'Irsching (D) (bloc 4) a une puissance de 561 MW et un rendement de 60,4%.

Centrales éoliennes

Les centrales éoliennes produisent environ deux tiers de la production d'électricité annuelle durant le semestre d'hiver [9]. En 2021, la puissance installée des centrales éoliennes en Suisse était d'environ 87 MW, avec une production annuelle de 146 GWh. Actuellement, des projets avec une puissance planifiée d'environ 897 MW sont en cours de planification et d'autorisation [10].

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

Estimés à 220 millions CHF.

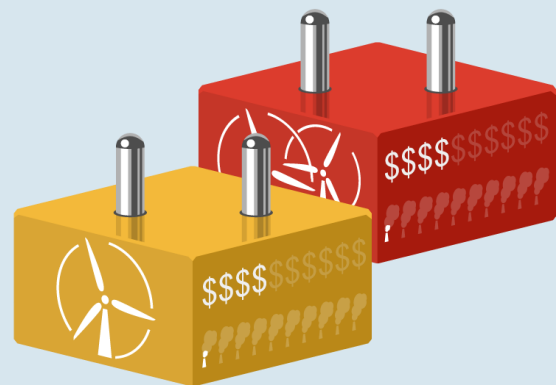
Emissions de gaz à effet de serre

Selon les estimations, la production d'1 TWh de courant hivernal occasionne, sur toute la chaîne de production, 20 000 tonnes de CO₂eq. Cela correspond environ à 0,05% des émissions de gaz à effet de serre indigènes.

Biodiversité

Les effets des centrales éoliennes sur la biodiversité varient fortement en fonction de leur emplacement. Dans les zones dites «high impact», qui méritent particulièrement d'être protégées, les effets sont grands comparés à ceux d'autres options technologiques. Ils sont plus faibles dans les zones dites «low impact».

Les principaux effets sur la biodiversité sont la perte d'habitat ainsi que le risque de collision avec les rotors auquel sont exposés les oiseaux et les chauves-souris. L'infrastructure supplémentaire nécessaire telles que les routes d'accès et les nouvelles lignes électriques peuvent aussi avoir une influence négative sur la biodiversité.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Low Impact (LI)

High Impact (HI)

Emissions de gaz à effet de serre



20 000 t CO₂eq

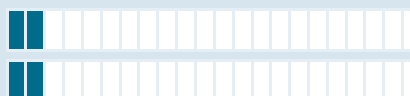
Coûts



220 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



LI: 2 TWh

HI: 2 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



67 %

!

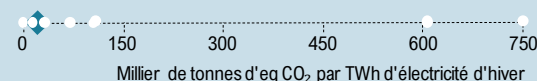
Les centrales éoliennes peuvent contribuer de manière importante à la sécurité de l'approvisionnement en hiver car elles livrent la majorité de leur production durant la saison froide.

Comparaison avec d'autres technologies

Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Le parc éolien du Mont-Crosin (BE) comprend 16 éoliennes différentes d'une puissance totale de 37,2 MW. Cela en fait le parc éolien le plus performant de Suisse.

Mesures d'efficacité énergétique

Les mesures dans le domaine de l'efficacité électrique sont considérées comme avantageuses et économiques à long terme. Elles sont souvent plus simples à réaliser que le développement du réseau ou de la production; elles peuvent être réalisées plus rapidement. Le potentiel d'économie des mesures d'efficacité est théoriquement de 40% maximum de la demande d'électricité. Les mesures dans les domaines du chauffage et de l'électricité ont plus d'effet en hiver qu'en été [11].

Valeurs de référence pour l'économie d'1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

Estimés à 40 millions CHF.

Emissions de gaz à effet de serre

Généralement, les mesures d'efficacité n'occasionnent pas d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Grâce aux économies d'énergie, les émissions peuvent même être réduites dans de nombreux cas.

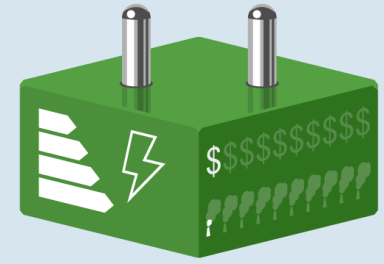
Biodiversité

Généralement, les mesures d'efficacité n'ont pratiquement pas d'effets sur la biodiversité. Si les moyens économisés grâce à une efficacité accrue sont consacrés à d'autres investissements (effet de rebond), des dommages peuvent être causés indirectement à l'environnement.



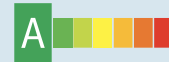
Dans le domaine de l'éclairage, le remplacement des ampoules conventionnelles par des LED, l'utilisation de capteurs et de commandes intelligentes ainsi qu'une planification adaptée aux besoins permettent d'économiser entre 50% et 70% de la consommation [11].

(Image: evening_tao/Freepik)



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



10 000 t CO₂eq

Coûts



40 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Economie possible de courant hivernal en 2035



7 TWh

Part du potentiel d'économie au semestre d'hiver



67 %

!

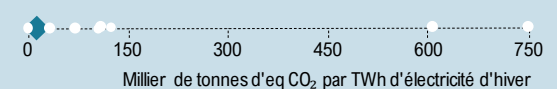
Bien que les mesures d'efficacité fassent partie des activités les moins onéreuses pour accroître la sécurité de l'approvisionnement, un manque de sensibilisation, des déficits en matière d'information, des intérêts divergents entre les acteurs et actrices du marché et des conditions juridiques défavorables entravent leur mise en œuvre [11].

Comparaison avec d'autres technologies

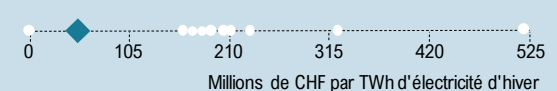
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Sobriété

Moins c'est mieux: telle est l'explication la plus succincte de la notion de sobriété. Pour économiser l'électricité en hiver, on peut par exemple baisser la température des pièces de un ou deux degrés. Une analyse de la consommation d'énergie de 10 000 ménages suisses a montré qu'il existait un potentiel substantiel en matière de sobriété dans le domaine de la consommation d'électricité [12].

Valeurs de référence pour l'économie d'1 TWh de courant hivernal

Coûts de revient

La plupart des mesures de sobriété consistent à renoncer à une prestation ou à une action. Il n'est pas impossible que ce phénomène entraîne des coûts d'opportunité, mais en fin de compte, les seuls coûts sont quasiment nuls.

Emissions de gaz à effet de serre

De manière analogue aux réflexions relatives aux coûts, les émissions de gaz à effet de serre sont nulles dans le bilan.

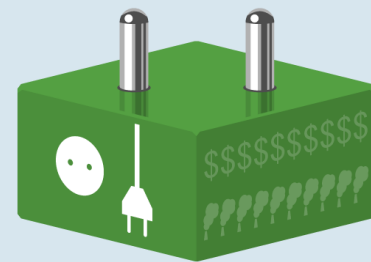
Biodiversité

Souvent, les mesures de sobriété ont même des effets positifs sur la biodiversité. Si les moyens économisés grâce à une efficacité accrue sont consacrés à d'autres investissements (effet de rebond), des dommages peuvent être causés indirectement à l'environnement. Dans le bilan: catégorie la meilleure.



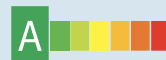
La sobriété exige que les individus, les familles, les groupes, les entreprises et la politique fassent preuve d'initiative, et que les conditions cadres soient conçues de manière à permettre des mesures en ce sens.

(Image: Freepik)



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



0 t CO₂eq

Coûts



0 million CHF

Potentiel du courant hivernal

Economie possible de courant hivernal en 2035



3 TWh

Part du potentiel d'économie au semestre d'hiver



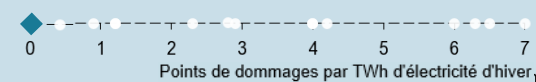
50%

!

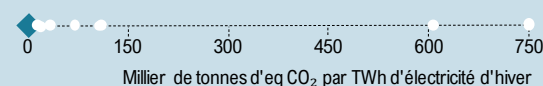
Des travaux scientifiques et l'expérience montrent qu'il est difficile de mettre en œuvre à large échelle des mesures de sobriété dans la société [13].

Comparaison avec d'autres technologies

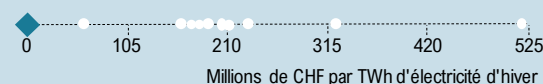
Biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre



Coûts



Importations d'électricité

La Suisse est le point de pivot du réseau électrique européen. Sur ces douze dernières années, de l'électricité a été importée durant cinq années et exportée durant sept ans. En 2021, la quantité de courant exportée s'est montée à 29,1 TWh, tandis que 31,5 TWh ont été importés (il résulte, au bilan, un total net des importations de 2,4 TWh [14]).

Durant le semestre d'hiver, la Suisse dépend des importations. En été, elle exporte généralement de l'électricité. D'octobre 2020 à mars 2021, ses importations nettes se sont montées à 1,8 TWh [15].

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

En 2035, les capacités de production d'électricité renouvelable dans les pays voisins seront nettement plus élevées qu'aujourd'hui. En hiver également, à certaines périodes, nous pourrions donc importer de grandes quantités d'excédent de courant bon marché de production renouvelable, par exemple des centrales éoliennes d'Europe du Nord. Toujours en hiver, durant les périodes sans vent et peu ensoleillées, nous devrions importer de l'électricité de production non renouvelable, qui occasionne d'importantes émissions de CO₂.

Coûts de revient

Les coûts sont estimés à 50 mio CHF pour l'importation de courant excédentaire renouvelable solaire et éolien (ESI) et à 200 mio CHF pour le courant d'origine fossile (FSI).

Emissions de gaz à effet de serre

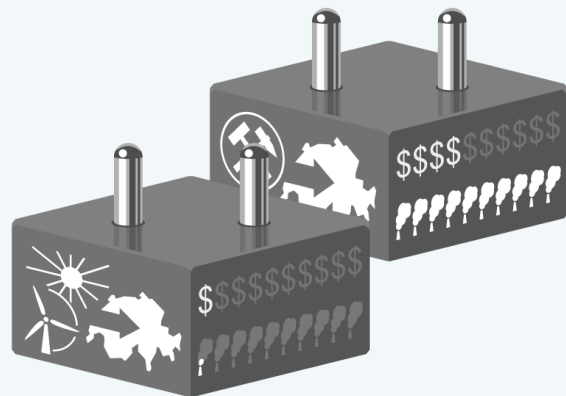
Environ 20 000 t CO₂eq pour un bouquet d'importations d'électricité d'origine éolienne et solaire et 750 000 t CO₂eq pour un bouquet d'importations d'électricité produite avec du charbon et du gaz.

Biodiversité

La majeure partie des effets sur la biodiversité se produit à l'étranger et n'est donc pas prise en compte par la méthode utilisée.



Pour l'importation, il est crucial de disposer de capacités suffisamment élevées dans le réseau électrique transfrontalier et d'un accord sur l'électricité avec l'UE qui fonctionne.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Non évalué

Emissions de gaz à effet de serre



ESI: 20 000 t CO₂eq

FSI: 750 000 t CO₂eq

Coûts



50 million CHF

200 million CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035



ESI: 5 TWh

FSI: 5 TWh

Part de production d'électricité au semestre d'hiver



100%

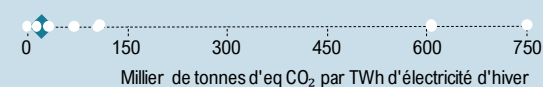
Comparaison avec d'autres technologies

Biodiversité

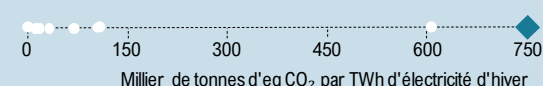
Non évalué

Emissions de gaz à effet de serre

ESI



FSI



Coûts

ESI



FSI

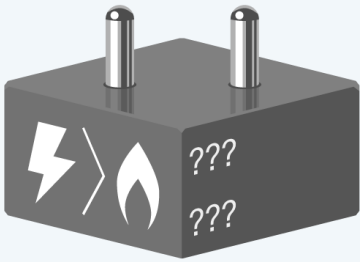


Power to X

De nombreux spécialistes et acteurs du secteur énergétique partent du principe que la technologie dite *Power to X* jouera, à l'avenir, un rôle dans le transfert en hiver des excédents de courant renouvelables produit en été. Par exemple, durant les périodes de production excédentaire, l'électrolyse permet de produire de l'hydrogène à base d'eau avec l'électricité produite par des installations photovoltaïques ou des centrales au fil de l'eau. L'hydrogène peut être stocké et utilisé en hiver dans les centrales à gaz ou les piles à combustibles pour produire de l'électricité.

Valeurs de référence pour 1 TWh de courant hivernal

Actuellement, il est pratiquement impossible de faire des estimations pertinentes sur le potentiels, les coûts de revient, les émissions de gaz à effet de serre et la biodiversité.



1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité



Emissions de gaz à effet de serre

???

Coûts

???

Potentiel du courant hivernal

Potentiel hypothétique de courant hivernal en 2035



Part du potentiel d'économie au semestre d'hiver



!

Il existera une série d'utilisations possibles pour le courant renouvelable «excédentaire»: Par exemple pour produire de l'hydrogène et des carburants synthétiques pouvant être utilisés dans l'aviation, la navigation ou l'industrie.



Le power to X est une sorte de batterie pour le courant excédentaire.

(Image: Freepik)

Littérature

- [1] BAFU, «Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018», 2021. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf.download.pdf/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf> (abgerufen 11. Dezember 2022)
- [2] Jäger, M.; Vaccaro, C.; Boos, J.; Junghardt, J.; Strebel, S.; Anderegg, D.; Rohrer, J. und Schibli, B. (2022): «Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft». ZHAW.
- [3] IAEA, «Country Statistics Switzerland», Country Statistics Switzerland, 10. Dezember 2022. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CH> (abgerufen 11. Dezember 2022).
- [4] BKW (2022): «La désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg». Disponible à l'adresse: <https://www.bkw.ch/fr/energie/production-denergie/desaffectation-de-la-centrale-nucleaire-de-muehleberg> (consulté le 11 décembre 2022).
- [5] OFEN, «Production et consommation totales d'énergie électrique en Suisse 2021», 2022. Disponible à l'adresse: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZnNlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA0MjY=.html> (consulté le 11 décembre 2022).
- [6] DETEC, «Sortie du nucléaire», 2017. <https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/detec/votations/votation-concernan-la-loi-sur-l-energie/energie-nucleaire.html> (consulté le 11 décembre 2022).
- [7] ElCom, «Capacité de production hivernale – Sécurité de l'approvisionnement en électricité en Suisse d'ici 2035 ; estimations de l'ElCom», 2023.
- [8] Rohrer, J.; Wild, M.; Stocker, N. und Siegwart, M. (2023): «Gibt es bessere Alternativen zu fossilen Kraftwerken für die Versorgungssicherheit der Schweiz mit Strom?». ZHAW.
- [9] Suisse Eole, «Plan éolien pour le climat: la solution énergétique hivernale. Analyse et actualisation du potentiel de l'énergie éolienne en Suisse», Suisse Eole, 2020. Disponible à l'adresse: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZnNlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA0MjY=.html> (consulté le 11 décembre 2022).
- [10] Suisse Eole, «L'énergie éolienne en Suisse: état des lieux», Suisse Eole, 2022. Disponible à l'adresse: https://suisse-eole.ch/wp-content/uploads/2023/04/20_SE_02_FACTSHEET_Anpassung_F_V3_230404-1.pdf (consulté le 9 décembre 2022).
- [11] OFEN, «Potenzial und Massnahmen zur Steigerung der Stromeffizienz bis 2025», 2022 (en allemand, avec résumé en français). Disponible à l'adresse: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/70290.pdf> (consulté le 11 décembre 2022).
- [12] Swiss Household Energy Demand Survey (SHEDS), <https://www.sccer-crest.ch/research/swiss-household-energy-demand-survey-sheds/> (consulté le 25 juillet 2023).
- [13] Moser, C; Rösch, A. et Stauffacher, M (2015): «Exploring societal preferences for energy sufficiency in Switzerland», Frontiers in Energy Research, 3:1-12.
- [14] BFS, «Ausfuhr und Einfuhr elektrischer Energie - 1950-2021 | Tableau», Office fédéral de la statistique, 2022. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/catalogues-banques-donnees.assetdetail.23104769.html> (consulté le 15 décembre 2022).
- [15] OFEN, «Statistique de l'électricité 2021», 2022. Disponible à l'adresse: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/statistique-de-l-electricite.html> (consulté le 15 décembre 2022).

Table des matières Méthodologie

1	Méthodologie	23
1.1	Généralités	23
1.1.1	Base des données	23
1.1.2	Période de référence	23
1.2	Besoin supplémentaire de courant hivernal en 2035/36	23
1.3	Sélection des technologies	25
1.4	Critères de comparaison	26
1.5	Uniformisation de l'évaluation sur l'unité TWh de courant hivernal	28
1.6	Options de production d'énergie	29
1.6.1	Photovoltaïque sur des toits et des façades	29
1.6.2	Installations photovoltaïques sur des infrastructures	30
1.6.3	Photovoltaïque dans les zones alpines de haute altitude	31
1.6.4	Photovoltaïque sur les surfaces agricoles	32
1.6.5	Petites centrales hydroélectriques	33
1.6.6	Relèvement des barrages existants	35
1.6.7	Développ. ou constr. de grandes centrales hydroélectriques	36
1.6.8	Rééquipement des centrales nucléaires	37
1.6.9	Centrales à gaz	38
1.6.10	Centrales éoliennes	39
1.6.11	Efficacité	41
1.6.12	Sobriété	42
1.6.13	Importations d'électricité	43
1.6.14	Power to X	44
1.6.15	Joker	45
2	Glossaire	46
	Références bibliographiques	47

1 Méthodologie

Dans le cadre du jeu «Power Tower Challenge», nous comparons des technologies de production d'électricité qui peuvent contribuer à couvrir les besoins supplémentaires en électricité au cours de l'hiver 2035/36. Dans ce but, nous comparons trois critères par térawattheure (TWh) de courant hivernal, à savoir:

1. les coûts de revient
2. les émissions de gaz à effet de serre
3. les effets sur la biodiversité

et nous estimons combien de TWh une technologie de production peut potentiellement livrer jusqu'en hiver 2035/36. Nous nous appuyons sur les technologies et sur les valeurs de référence disponibles en 2023.

1.1 Généralités

1.1.1 Base des données

Notre base de données centrale pour estimer les besoins en courant hivernal pour la saison 2035/36 est constituée des Perspectives énergétiques 2050+ de la Confédération ainsi que le scénario Zéro net de l'Alliance-Environnement. Nous avons complété ces données d'estimations plus récentes relatives aux potentiels. Toutes les sources sont indiquées dans la bibliographie.

1.1.2 Période de référence

Nos réflexions sont basées sur les années 2020 à 2023 et donc sur les semestres d'hiver 2020/21 et 2022/23. L'année cible est 2035, et donc le semestre d'hiver 2035/36.

1.2 Besoin supplémentaire de courant hivernal en 2035/36

Définition Il s'agit de la quantité d'électricité qui devrait être importée au semestre d'hiver 2035/36 si le développement de la production d'électricité en Suisse cessait à partir de 2020-2023 et si les centrales nucléaires étaient mises hors service après leur durée d'exploitation de 50 ans.

Nous désignons par «semestre d'hiver» les mois d'octobre à mars inclus de l'année suivante (de manière identique à la statistique électrique de l'OFEN).

Estimation Nous avons extrapolé les besoins supplémentaires en électricité pour le semestre d'hiver 2035/36 en nous basant sur les hypothèses suivantes, qui reposent sur les importations d'électricité durant les semestres d'hiver 2020 à 2023:

- Toutes les centrales nucléaires sont mises hors service (durée: 50 ans).
 - L'abandon partiel ou complet des énergies fossiles accroît la demande d'électricité.
- Nous avons sélectionné deux scénarios:

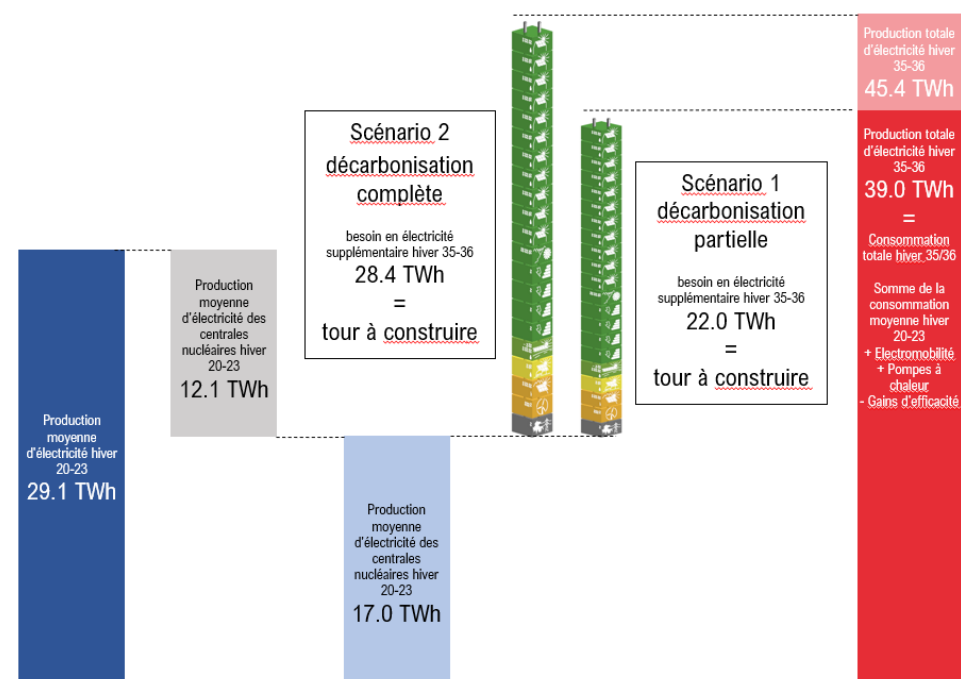
- Scénario 1 conforme à la trajectoire de l'objectif de la loi climat ou à la Stratégie climatique à long terme du Conseil fédéral, plus une correction pour un développement plus rapide de l'électromobilité par rapport aux Perspectives énergétiques 2050+ (selon [3])¹.
- Le scénario 2 correspond à une décarbonisation complète d'ici 2023, conformément à la proposition de l'Alliance-environnement [29].

Le calcul qui en résulte est le suivant – scénario 1:

moyenne de la production d'électricité totale des semestres d'hiver 2020-23	29,1 TWh	
- production hivernale moyenne avec centrales nucléaires 2020-23	12,1 TWh	
= production hivernale moyenne sans centrales nucléaires 2020-23	17,0 TWh	
moyenne de la consommation totale des semestres d'hiver 2020-23	35,6 TWh	
+ augmentation de la demande due à l'électrification de la production de chaleur/mobilité électrique		} 3,4 TWh
+/- gains d'efficacité et autres modifications de la demande jusqu'en 2035/36		
= besoin total en électricité au semestre d'hiver 2035/36	39,0 TWh	
> besoin d'électricité suppl. en hiver 2035/36 $\triangleq$ hauteur de la Power Tower	22,0 TWh	

Scénario 2:

= production hivernale moy. sans centrales nucléaires 2020-23 (c. scénario 1)	17,0 TWh	
consommation totale moyenne des semestres d'hiver 2020-23	35,6 TWh	
+ augmentation de la demande due à l'électrification production de chaleur/mobilité électrique		} 9,8 TWh
+/- gains d'efficacité et autres modifications de la demande jusqu'en 2035/36		
= besoin total en électricité au semestre d'hiver 2035/36	45,4 TWh	
> besoin d'électricité suppl. en hiver 2035/36 $\triangleq$ hauteur de la Power Tower	28,4 TWh	



¹ Cela implique que la loi sur le CO₂ en cours de révision en 2023 devrait être considérablement renforcée par rapport à la version du Conseil fédéral, puisque les mesures de la loi climat ne permettent pas d'amener la Suisse sur la trajectoire de réduction des émissions de CO₂ qui est définie dans cette même loi au sens d'une loi-cadre et qui a été confirmée par le peuple.

Importations de courant hivernal 2020-2023	Différence moyenne entre valeurs de consommation et de production au semestre d'hiver selon l'OFEN [1] 6,5 TWh.
Production hivernale moyenne des centrales nucléaires 2020-23	Selon l'OFEN [1] 12,1 TWh.
Modification relative de la consommation d'électricité	La modification relative de la consommation d'électricité en hiver 2035/36 par rapport aux années 2020-23 repose sur les Perspectives énergétiques 2050+ [2] et sur deux scénarios avec une électrification plus rapide des transports [3] ou une électrification plus rapide des transports et de l'approvisionnement en chaleur que dans les PE2050+ [4]. Pour calculer la consommation d'électricité au semestre d'hiver, nous utilisons un comportement de consommation constant sur une année pour les différents buts d'utilisation de l'électricité. La consommation pour le chauffage des pièces fait exception à cette règle, puisque nous l'imputons entièrement au semestre d'hiver. Avec cette pondération du changement relatif, nous obtenons une augmentation de la consommation d'électricité au semestre d'hiver 2035/36 comparée à 2020-23 de 3,4 TWh (scénario 1) ou de 9,8 TWh (scénario 2).

1.3 Sélection des technologies

Sélection des technologies	Cette étude se concentre sur les technologies qui répondent aux critères suivants: 1 Potentiellement, la technologie est en mesure, en 2035, de contribuer de manière pertinente à la fourniture de courant hivernal (potentiel technique): au moins 1 TWh d'électricité au semestre d'hiver 2035/36. Nous avons fait une exception pour les très petites centrales hydroélectriques, dont le potentiel est très faible, mais dont la technologie est bien connue. 2 Les bases légales sont actuellement telles que la technologie peut être utilisée ou, pour le moins, les modifications législatives nécessaires sont discutées au Parlement. 3 La faisabilité technologie est aujourd'hui donnée. Lorsque la même technologie de production d'électricité peut être utilisée dans différents types d'application, mais que l'on part de coûts et d'impacts différents, des modules et des fiches d'information sont créés pour chaque configuration. Les technologies suivantes ne répondent entre autres pas aux prescriptions et ne sont donc pas intégrées à l'assortiment servant à construire la Power Tower: Géothermie D'après les Perspectives énergétiques 2050+, la Suisse renferme un potentiel important pour des projets de géothermie profonde. Cependant, «La prospection de sites appropriés nécessitant beaucoup de temps et n'aboutissant pas toujours à un résultat concluant, l'hypothèse retenue admet que seuls les projets actuellement prévus seront réalisés d'ici à 2035. C'est seulement après cette date que d'autres installations suivront, de manière à augmenter la production d'électricité géothermique à 2 TWh en 2050.» [2, p. 25]. Dans le rapport technique relatif aux Perspectives énergétiques 2050+, la production d'électricité de la géothermie pour l'année 2035 est estimée à 0,07 TWh dans le scénario ZÉRO
----------------------------	--

base [5, p. 322]. Seule la moitié environ serait disponible pour couvrir les besoins supplémentaires en courant hivernal. En raison de son faible potentiel jusqu'en 2035, la géothermie n'est pas prise en considération.

Nouvelle centrale nucléaire Les centrales nucléaires existantes en Suisse peuvent rester en exploitation tant que leur sécurité est assurée. Les critères de la sécurité d'exploitation sont définis par l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN). Toutefois, aucune autorisation générale n'est accordée pour la construction de nouvelles centrales nucléaires ni pour des modifications fondamentales de centrales nucléaires existantes. [6]

Pour les nouvelles centrales nucléaires, des adaptations légales seraient nécessaires, puis des projets concrets devraient être élaborés, autorisés et construits. Il est donc quasiment exclu que de nouvelles centrales nucléaires puissent être mises en service en Suisse d'ici 2035. C'est pourquoi les nouvelles centrales nucléaires ne sont pas prises en compte.

Débit résiduel Il a été proposé à plusieurs reprises de réduire les contraintes environnementales imposées aux centrales hydroélectriques, notamment les débits résiduels. Des analyses [38] montrent cependant que le surplus de production ainsi obtenu est extrêmement faible, surtout pendant les mois d'hiver: la suspension des débits résiduels ne permettrait d'atteindre que 90 GWh de production supplémentaire par an d'ici 2035, avec un impact écologique très important.

Assainissement

Force hydraulique Une grande partie des installations existantes ne satisfait pas aux obligations actuelles de la protection des eaux pour les nouvelles installations, par exemple en ce qui concerne les débits résiduels, les crues artificielles ou le passage des poissons. C'est pourquoi ces installations devraient à l'avenir être rénovées de manière écologique. Cependant, ces mesures ne permettront guère d'augmenter la puissance des centrales. L'une des raisons est que, dans le cas de l'énergie hydraulique, les coûts de production ne peuvent plus guère être réduits par le développement technique ou les économies d'échelle. C'est pourquoi l'exploitation ou le renouvellement d'une installation peut être un défi économique en soi.

Biomasse Selon les Perspectives énergétiques 2050+, le potentiel d'utilisation de la biomasse dans la production d'électricité est limité, car elle doit être utilisée de préférence dans les secteurs où les solutions de remplacement en matière de décarbonisation sont rares (par exemple dans le secteur industriel pour la production de chaleur industrielle).

1.4 Critères de comparaison

Coûts Nous comparons les coûts de revient de l'électricité, rapportés à l'année 2021. Nous ignorons tant le renchérissement que les baisses de prix en raison des courbes d'apprentissage – une hypothèse prudente, car le prix des technologies baisse en règle générale au fur et à mesure que l'on accumule de l'expérience et qu'on les utilise à plus large échelle. Nous partons également du principe que les coûts de revient du premier au dernier TWh – et donc de l'exploitation totale du potentiel – restent constants.

La répartition dans les catégories de coûts est la suivante:

Fourchette en millions CHF	Symbole
0 – 57	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
58 – 114	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
115 – 172	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
173 – 229	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
230 – 287	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
288 – 344	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
345 – 402	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
403 – 459	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
460 – 517	\$\$\$\$\$\$\$\$\$
> 517	\$\$\$\$\$\$\$\$\$

Emissions de gaz à effet de serre Avec l'objectif fixé par le Conseil fédéral de zéro émission nette de gaz à effet de serre d'ici 2050 et les trajectoires de réduction prévues, les émissions de gaz à effet de serre sont un critère de décision important dans le choix de la technologie de production d'électricité. Comme le réchauffement climatique en Suisse est influencé par toutes les émissions de gaz à effet de serre dans le monde, nous prenons en compte les émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble de la chaîne de production et pas seulement celles produites dans le pays.

La répartition dans les catégories de coûts est la suivante:

Fourchette en t CO ₂ eq	Symbole
0 – 78	
79 – 157	
158 – 236	
237 – 315	
316 – 394	
395 – 473	
474 – 552	
553 – 631	
632 – 710	
> 711	

Biodiversité

Les technologies de production d'électricité renouvelable apportent de nettes améliorations en matière de protection du climat. Cependant, de nouveaux champs conflictuels peuvent apparaître dans d'autres domaines de la protection de la nature et de l'environnement, entre autres pour la biodiversité. Pour évaluer l'impact sur la biodiversité, des expertes et des experts issus de la recherche et des ONG ont évalué, dans le cadre d'un atelier, les indicateurs de

biodiversité suivants pour les différentes technologies de production d'électricité, en les classant sur une échelle de zéro (aucun impact) à neuf (très fort impact), avant de les pondérer les uns par rapport aux autres.

Indicateur	Pondération
Nouvelle surface naturelle impactée	2
Qualité de la surface	3
Morcellement du paysage	2
Effet régional sur les écosystèmes	2
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	1,5
Effets sur les espèces animales et végétales	2

Les options ont été réparties en sept catégories, selon la valeur totale en résultant, de manière analogue à l'étiquette d'efficacité énergétique bien connue. La répartition a été effectuée comme indiqué dans le tableau ci-dessous:

Nombre de points	Catégorie
0,0 – 12,0	 A
12,1 – 24,0	 B
24,1 – 36,0	 C
36,1 – 48,0	 D
48,1 – 60,0	 E
60,1 – 72,0	 F
> 72,1	 G

1.5 Uniformisation de l'évaluation sur l'unité TWh de courant hivernal

Nous comparons par térawattheure (TWh) de courant **hivernal** chacun des trois critères suivants:

- 1 Coûts de revient
- 2 Emissions de gaz à effet de serre
- 3 Effets sur la biodiversité

À quelques exceptions près, toutes les technologies comparées produisent aussi de l'électricité durant le semestre d'été (*exemple des installations photovoltaïques posées sur les toits: elles produisent en été près de 70% de leur rendement annuel*). D'où la question de savoir comment prendre en compte la part d'électricité d'été dans les coûts et les émissions de gaz à effet de serre, lorsqu'il s'agit en premier lieu de produire de l'électricité en hiver (*p. ex. installations photovoltaïques sur des toits: quels sont les coûts*

de revient et les émissions de gaz à effet de serre «justes» pour 1 TWh d'électricité d'hiver?)

Pour tenir compte de ces différentes proportions, nous définissons une limite inférieure et une limite supérieure pour l'évaluation des coûts de revient et des émissions de gaz à effet de serre, et nous en faisons la moyenne:

- la limite inférieure est constituée par les coûts (ou les émissions de gaz à effet de serre) sans tenir compte de la répartition entre les semestres d'hiver et d'été.

(exemple d'installations photovoltaïques sur les toits: 10 ct/kWh)

- La limite supérieure est constituée des coûts de revient (émissions de gaz à effet de serre) de la puissance à installer pour un TWh de courant hivernal.

(exemple d'installations photovoltaïques sur les toits: $\frac{10.0 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}}{100\% - 69\%} \approx 32.3 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}$)

- La valeur moyenne est calculée pour l'évaluation.

(exemple d'installations photovoltaïques sur les toits: $\frac{10.0 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}} + 32.3 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}}{2} \approx 21.1 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}$)

Effets sur la biodiversité: dans son évaluation, le panel d'expertes et d'experts a tenu compte de la consommation de surface plus élevée des différentes options pour la production d'électricité en hiver par rapport à celle de l'été.

1.6 Options de production d'énergie

1.6.1 Photovoltaïque sur des toits et des façades

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre ²	Coûts ²
		
	90 000 t CO ₂ eq	210 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
11 TWh	31%

² Les émissions de gaz à effet de serre et les coûts tiennent compte de la production électrique au cours du semestre d'été (voir 1.6).

Hypothèses et estimations

Surfaces de toitures appropriées Pour calculer le potentiel solaire sur les toits, nous n'avons pris en compte que les surfaces d'au moins 10 m² bénéficiant d'un bon ensoleillement et nous avons supposé que 30% des surfaces de toitures n'étaient pas adaptées à l'installation de modules photovoltaïques.

La Suisse dispose d'une surface totale de toits d'environ 231 km² [7].

Surfaces de façades appropriées Seules les surfaces d'au moins 20 m² et bénéficiant d'un ensoleillement moyen à excellent ont été prises en compte. Selon le type de bâtiment, 45 à 60% ont été inclus pour l'installation de modules photovoltaïques.

Potentiel Le potentiel de développement de l'électricité d'hiver jusqu'en 2035 a été estimé sur la base des hypothèses suivantes: Selon [7], le potentiel total s'élève à 67 TWh. Dans le cas idéal, 34% de cette électricité, soit près de 23 TWh, est produite en hiver.

Selon le directeur de Swissolar, David Stickelberger [8], il faudrait et il serait possible de développer la production d'électricité solaire à hauteur d'1 GW par an jusqu'en 2025, puis du double par la suite. Selon l'OFEN [9], 1 GW a déjà été ajouté en 2022, contre 700 MW l'année précédente. En raison des économies d'échelle et des effets d'apprentissage, nous estimons que le nombre d'installations peut être augmenté de 30% par an. D'ici 2035, il est donc possible — selon un calcul conservateur — de produire environ 35 TWh d'électricité solaire supplémentaire. Ainsi, 31% (voir ci-dessous) de ce total correspondent à près de 11 TWh d'électricité hivernale.

Part du courant hivernal Les estimations les plus optimistes tablent sur une part de 34% de la production annuelle d'électricité en hiver. Le taux actuel est de 27%. La moyenne a été utilisée comme valeur jusqu'en 2035 (30,5%).

Coûts de revient de l'électricité Nous avons utilisé la moyenne de 10 ct/kWh selon [10].

Gaz à effet de serre 41,7 g CO₂eq selon le bilan environnemental du mix électrique suisse 2018 [11].

Biodiversité Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Évaluation
Nouvelle surface naturelle impactée	0,8
Qualité de la surface	3,9
Morcellement du paysage	0
Effet régional sur les écosystèmes	1,4
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	1,5
Effets sur les espèces animales et végétales	2,9
Total	10,5

1.6.2 Installations photovoltaïques sur des infrastructures

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Fourchette de coûts
		
	90 000 t CO ₂ eq	120-220 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
2 TWh	31%

Hypothèses et estimations

Potentiel	Une étude d'EZS [12] indique le potentiel technique et le potentiel réalisable. L'estimation du potentiel réaliste tient compte de facteurs économiques et réglementaires. On suppose que d'ici 2035, tout le potentiel réalisable pourra être exploité.
Part du courant hivernal	Même proportion que le photovoltaïque sur les toits et les façades: 30,5% (voir ci-dessus).
Coûts de revient de l'électricité	Les coûts de revient des installations photovoltaïques sur des infrastructures varient fortement entre les différentes catégories d'infrastructures et au sein de celles-ci. Les coûts de revient ont été tirés de l'étude [12] pour calculer une fourchette de coûts.
Gaz à effet de serre	Pour les émissions de gaz à effet de serre, on a utilisé la valeur selon [11] , comme pour le photovoltaïque sur les toits et les façades.
Biodiversité	Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Évaluation
Nouvelle surface naturelle impactée	0,5
Qualité de la surface	5,1
Morcellement du paysage	2,6
Effet régional sur les écosystèmes	1,4
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	1,1
Effets sur les espèces animales et végétales	4,0
Total	14,7

1.6.3 Photovoltaïque dans les zones alpines de haute altitude

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité		Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
High impact			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
		60 000 t CO ₂ eq	200 millions CHF
Low impact			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
		60 000 t CO ₂ eq	200 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035		Part de production d'électricité au semestre d'hiver
High impact	2 TWh	53%
Low impact	2 TWh	

Hypothèses et estimations

Potentiel	L'étude «Alpenstrom jetzt!» [13] estime le potentiel de production dans les régions alpines à 41 TWh par an. Des facteurs tels que la distance par rapport aux infrastructures de transport, la taille minimale des surfaces, etc. sont pris en compte. Nous avons estimé le potentiel de développement d'ici 2035 à 20%, soit environ 8 TWh, en raison du temps considérable que nécessitent les processus de planification, d'autorisation et de construction.
Part du courant hivernal	Selon [13].
Coûts de revient de l'électricité	Les coûts de revient du photovoltaïque dans les régions de haute montagne varient fortement selon le site. Les coûts de revient sont tirés de l'étude [13].
Gaz à effet de serre	Pour les émissions de gaz à effet de serre, on a utilisé la valeur selon [11], comme pour le photovoltaïque sur les toits et les façades, avec la part de courant hivernal correspondante.
Biodiversité	Les effets des centrales solaires alpines sur la biodiversité varient fortement en fonction de leur emplacement. Dans les zones à fort impact («high impact»), qui méritent particulièrement d'être protégées, les dommages portés à la biodiversité sont très importants comparés à ceux d'autres options technologiques. Ils sont plus faibles dans les zones à faible impact («low impact»).

Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Evaluation high impact	Evaluation low impact
Nouvelle surface naturelle impactée	5,3	5,3
Qualité de la surface	22,7	15,0

Morcellement du paysage	12,9	9,4
Effet régional sur les écosystèmes	11,7	7,1
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	5,4	4,1
Effets sur les espèces animales et végétales	15,1	8,6
Total	73,1	49,5

1.6.4 Photovoltaïque sur les surfaces agricoles

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
		
	90 000 t CO ₂ eq	160 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
2 TWh	31%

Hypothèses et estimations

Potentiel et part de courant hivernal Le potentiel jusqu'en 2035 et la part de courant hivernal sont tirés d'une étude de la ZHAW [14].

Coûts de revient de l'électricité Pour le calcul des coûts de revient de l'électricité, nous avons calculé la valeur moyenne de différentes variantes d'installations (6,0 et 8,4 ct/kWh) [14].

Gaz à effet de serre Pour les émissions de gaz à effet de serre, nous avons utilisé la valeur selon [11], comme pour le photovoltaïque sur les toits et les façades.

Biodiversité Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Évaluation
Nouvelle surface naturelle impactée	9,0
Qualité de la surface	7,3
Morcellement du paysage	7,1
Effet régional sur les écosystèmes	4,0
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	3,0
Effets sur les espèces animales et végétales	4,9
Total	35,3

1.6.5 Petites centrales hydroélectriques

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité		Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
High impact			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
		20 000 t _{2eq}	320 millions CHF
Low impact			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
		20 000 t _{2eq}	320 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035		Part de production d'électricité au semestre d'hiver
High impact	0,15 TWh	34%
Low impact	0,05 TWh	

Les blocs ne sont pas à l'échelle pour des raisons de stabilité de la construction.

Hypothèses et estimations

Potentiel	L'Office fédéral de l'énergie estime le potentiel à long terme à env. 0,1 et 0,5 TWh. Étant donné qu'il n'est pas possible de réduire davantage les coûts de la force hydraulique par des innovations et qu'il faut adapter les installations existantes à des normes environnementales minimales, le maintien des capacités de production existantes constitue déjà un défi en soi. Pour exploiter le potentiel maximal de 0,5 TWh, il faudrait probablement de nouvelles contributions d'encouragement illimitées dans le temps pour les installations existantes et nouvelles [30]. Les centrales électriques d'infrastructure (p. ex. les turbines qui utilisent la pression excédentaire dans une installation d'approvisionnement en eau potable) ont un faible impact sur la biodiversité (voir ci-dessous), mais leur potentiel de développement est limité. En fin de compte, nous prévoyons un potentiel total de 0,2 TWh, dont 0,05 TWh pour les centrales d'infrastructure.
Part du courant hivernal	Une analyse des données de production des petites centrales hydroélectriques a révélé une part de production hivernale de 34% [31].
Coûts de revient de l'électricité	Les estimations concernant les coûts de revient varient considérablement (par ex. 22 à 43 ct/kWh [32], 8,6 à 30,4 ct/kWh [33] ou 14 à 33 ct/kWh [10]). Les coûts de revient des nouvelles installations sont généralement plus élevés, car les sites les plus intéressants sont déjà exploités. Le coût d'1 TWh d'électricité peut ainsi être estimé entre 100 et 300 millions de francs, sur la base d'un prix de revient d'environ 10 à 30 centimes. Sur la base des mesures d'encouragement actuelles [34] et d'une augmentation supposée des coûts d'environ 20% [10], il est probable que les coûts de revient moyens soient d'au moins 16 ct/kWh. Pour la part d'électricité produite en hiver, on obtient, selon le ch. 1.6, un prix d'environ 320 millions de CHF/TWh.
Gaz à effet de serre	Les émissions de gaz à effet de serre sont très spécifiques à chaque installation dans le cas de la production hydroélectrique. Les estimations [10, 35]

vont de 4 à 17 g de CO₂eq/kWh. Pour simplifier, la production d'1 TWh d'électricité hydraulique est fixée à 10 000 tonnes CO₂ eq par an.

Biodiversité

La biodiversité souffre proportionnellement plus de chaque GWh de courant produit par des petites et très petites centrales hydroélectriques que lorsque l'électricité est produite par de grandes centrales. La plupart des grands cours d'eau de Suisse sont déjà entravés par des installations hydroélectriques. Les plus petits cours d'eau constituent souvent les derniers habitats encore relativement préservés. Les centrales construites sur des cours d'eau naturels appartiennent à la catégorie «high impact». Les installations dites d'infrastructures, qui utilisent par exemple la pression excédentaire des systèmes d'eau potable, n'ont que des effets minimaux sur la biodiversité (catégorie «low impact»).

Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Evaluation high impact	Evaluation low impact
Nouvelle surface naturelle impactée	4,7	0
Qualité de la surface	23,6	0
Morcellement du paysage	16,0	0
Effet régional sur les écosystèmes	13,4	0
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	3,6	0
Effets sur les espèces animales et végétales	16,3	0
Total	77,7	0

1.6.6 Relèvement des barrages existants

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
		
	10 000 t CO ₂ eq	150 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
1 TWh	100%

Hypothèses et estimations

Potentiel

Le potentiel de conflit lié au relèvement de la hauteur des barrages est généralement plus faible que celui lié à la construction de nouvelles installations. La probabilité que les projets existants soient effectivement réalisés est donc

	relativement élevée [36]. D'ici 2035, on estime que la production pourrait être augmentée d'un térawattheure pendant le semestre d'hiver. L'augmentation effective de la production totale sur l'ensemble de l'année est toutefois nettement inférieure.
Part du courant hivernal	Ce type de projet vise à augmenter la capacité de stockage en hiver. Nous tablons donc sur une part d'électricité hivernale de 100%.
Coûts de revient de l'électricité	Le prix de revient des projets de grande hydraulique est estimé entre 7 et 30 ct/kWh [10]. Comme la rentabilité du relèvement des barrages est limitée, car une grande partie de la production n'est que déplacée, nous comptons sur 15 ct/kWh.
Gaz à effet de serre	Les émissions de gaz à effet de serre sont très spécifiques à chaque installation dans le cas de la production hydroélectrique. Les estimations [10, 35] vont de 4 à 17 g de CO ₂ eq/kWh. Pour simplifier, la production d'1 TWh d'électricité hydraulique est fixée à 10 000 tonnes CO ₂ eq par an.
Biodiversité	Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Évaluation
Nouvelle surface naturelle impactée	0,1
Qualité de la surface	13,3
Morcellement du paysage	5,1
Effet régional sur les écosystèmes	6,9
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	2,1
Effets sur les espèces animales et végétales	7,1
Total	34,6

1.6.7 Développement ou construction de grandes centrales hydroélectriques

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité		Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
High impact			
		15 000 t _{2eq}	170 millions CHF
Low impact			
		15 000 t _{2eq}	170 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035		Part de production d'électricité au semestre d'hiver
High impact	0,5 TWh	50%
Low impact	0,5 TWh	
Ces valeurs sont arrondies à 1 TWh pour les blocs du jeu.		

Hypothèses et estimations

Potentiel	La probabilité que des projets de grande hydraulique puissent être réalisés est très variable. Pour les installations ayant un impact important sur l'environnement (high impact), la mise en balance par les autorités et les tribunaux devrait être tellement complexe que seules quelques-unes pourraient être réalisées d'ici 2035. Sur la base des données et rapports existants [15, 36], on peut estimer qu'il existe un potentiel de production d'un demi-térawattheure pour chacune des deux catégories d'impact.
Part du courant hivernal	La part d'électricité produite en hiver varie assez fortement selon le type et l'emplacement d'une installation (réservoirs alpins, centrales à écluses, centrales au fil de l'eau). Selon une estimation sommaire, environ la moitié du potentiel est généré en hiver.
Coûts de revient de l'électricité	Les coûts de production sont estimés dans la littérature entre 7 et 30 ct/kWh [10]. Pour les installations considérées dans cette analyse, nous prévoyons des coûts moyens de 10 à 15 centimes, les installations de la catégorie à fort impact présentant des coûts légèrement inférieurs à ceux de la catégorie à faible impact, car cette dernière comprend également des centrales à écluses relativement chères.
Gaz à effet de serre	Les émissions de gaz à effet de serre sont très spécifiques à chaque installation dans le cas de la production hydroélectrique. Les estimations [10, 35] vont de 4 à 17 g de CO ₂ eq/kWh. Pour simplifier, la production d'1 TWh d'électricité hydraulique est fixée à 10 000 tonnes CO ₂ eq par an.
Biodiversité	Les effets sur la biodiversité dépendent fortement du projet individuel et de son emplacement. L'agrandissement d'installations existantes a généralement moins d'effets (catégorie «low impact») que les nouveaux projets (catégorie «high impact»). Les projets d'agrandissement relèvent de la catégorie «high impact» s'ils concernent des cours d'eau avec un statut de protection (p. ex. zones alluviales, sites de reproduction de batraciens, marais ou sites de l'UNESCO).

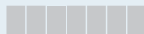
Les expertes et les experts ont évalué l'impact sur la biodiversité comme suit:

Indicateur	Evaluation high impact	Evaluation low impact
Nouvelle surface naturelle impactée	0,7	0,8
Qualité de la surface	17,6	26,1
Morcellement du paysage	8,6	17,7
Effet régional sur les écosystèmes	10,6	17,4
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	3,4	6,2
Effets sur les espèces animales et végétales	11,7	18,0
Total	52,5	86,3

1.6.8 Rééquipement des centrales nucléaires

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Fourchette de coûts
	 20 000 t CO ₂ eq	\$- \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$ 40-520 mio CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
12 TWh	58%

Hypothèses et estimations

Potentiel	Les centrales existantes peuvent être exploitées tant qu'elles sont sûres [15]. Avec une durée d'exploitation de 50 ans (selon les Perspectives énergétiques 2050+), toutes les centrales nucléaires suisses seraient hors service en 2035. Si elles sont exploitées au-delà de cette date, nous nous basons sur la valeur moyenne de la quantité d'énergie produite en 2020-2022.
Part du courant hivernal	Les centrales nucléaires livrent une quantité d'énergie constante. Cependant, elles sont arrêtées en moyenne un mois par an, en été, pour des révisions. Pour cette raison et du fait de leur plus grande efficacité lorsqu'il fait froid, la production d'électricité est en moyenne plus élevée pendant le semestre d'hiver. Nous avons déterminé la part de courant hivernal sur la valeur moyenne de la quantité d'énergie produite dans les hivers 20/21, 21/22 et 22/23.
Coûts de revient	Les coûts de revient de l'électricité produite par les centrales nucléaires se situent entre 4 et 6 ct/kWh [17]. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) et l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) ont étudié le prix de revient de l'électricité produite par les centrales nucléaires dont la durée d'exploitation est prolongée de 10, respectivement 20 ans [18]. L'AIE et l'AEN estiment que la prolongation n'aura pas d'impact majeur sur les coûts de démantèlement et que les coûts de démantèlement initiaux ont été en grande partie provisionnés sur la durée de vie initiale. Les coûts de production d'électricité pour une prolongation de 20 ans et un taux d'actualisation de 7% s'élèvent à près de 3 ct/kWh. Toutefois, comme une centrale nucléaire modernisée peut à tout moment être considérée comme peu sûre par l'IFSN sur la base de nouvelles connaissances, on admet une marge pour les coûts: de 3 à 30 ct/kWh. L'estimation la plus élevée concerne les cas où une nouvelle mise en conformité est due quelques années après un rééquipement déjà effectué. Comme la poursuite de l'exploitation implique un risque d'accident nucléaire majeur persistant avec des coûts financiers et sociaux très élevés, ce domaine de coûts est indiqué sur le bloc de construction représentant les centrales nucléaires.
Gaz à effet de serre	Les émissions de gaz à effet de serre s'élèvent à 14,2 g CO ₂ eq pour les réacteurs à eau pressurisée et à 15,9 g CO ₂ eq [11] pour les réacteurs à eau bouillante. Pour le calcul des émissions par TWh de courant hivernal, ces facteurs ont été appliqués au prorata de la production respective en 2021.

On obtient ainsi une valeur de 14,6 g CO₂eq.

Biodiversité

Cette évaluation ne peut pas refléter de manière adéquate la problématique d'accident nucléaire majeur, raison pour laquelle nous avons renoncé à évaluer les blocs (couleur grise).

1.6.9 Centrales à gaz

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
		
	610 000 t CO ₂ eq	180 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
2 TWh	100%

Hypothèses et estimations

Potentiel	Conformément à la recommandation de l'EiCom [19]: deux centrales à gaz d'une puissance totale de 1118 MW. Le potentiel de production annuelle est déduit d'un scénario du pire, dans lequel les besoins d'électricité fournie par les il faut admettre sont de 2,2 TWh.
Part du courant hivernal	Comme les centrales à gaz sont des centrales de réserve, la part d'électricité produite en hiver est de 100%. En été, les centrales ne fonctionnent pas.
Coûts de revient	Les coûts de revient dépendent fortement de la quantité d'électricité produite sur la durée de vie de la centrale. Hypothèse: scénario du pire (2,2 TWh par an), durée de vie de 30 ans. Les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation annuels fixes et variables sont tirés du rapport de l'EiCom [19].
Emissions de gaz à effet de serre	Selon le <i>bilan environnemental des mix électriques 2018</i> , les émissions par kWh s'élèvent à environ 613,7 g CO ₂ eq [11].
Biodiversité	Les expertes ont évalué l'impact sur la biodiversité en Suisse comme suit:

Indicateur	Évaluation
Nouvelle surface naturelle impactée	0
Qualité de la surface	7,7
Morcellement du paysage	2,3
Effet régional sur les écosystèmes	4,9
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	11,1

Effets sur les espèces animales et végétales	2,6
Total	28,6

1.6.10 Centrales éoliennes

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
High impact	 20 000 t _{2eq}	 220 millions CHF
Low impact	 20 000 t _{2eq}	 220 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
High impact	2 TWh
Low impact	2 TWh
	67%

Hypothèses et estimations

Potentiel Pour estimer le potentiel éolien jusqu'en 2035, nous utilisons deux scénarios et tenons également compte de l'accélération prévue par le Parlement (situation en été 2023).

Premier scénario

Un «potentiel durable» pour l'énergie éolienne a été déterminé sur mandat de l'OFEV [20]. Il est basé sur le potentiel technique, qui comprend toutes les surfaces constructibles à l'exclusion des zones non aménagées. En sont exclus:

- Les zones protégées selon le concept d'énergie éolienne de la Confédération
- Zones habitées (y compris une zone tampon de 300 mètres aux fins de la protection contre le bruit)
- Les régions où le vent est insuffisant, selon l'Atlas éolien 2019
- Une déduction de 15% du potentiel total permet de refléter les restrictions dues aux installations secrètes du DDPS ou aux perturbations des installations de contrôle aérien

Il en résulte un potentiel de 29,5 TWh. Il ne faut toutefois pas s'attendre à ce que ce potentiel soit épuisé d'ici 2035. Le tableau suivant montre que fin 2022, des projets représentant un potentiel d'environ 1,7 TWh étaient en cours de planification et d'autorisation [21]. Comme ces processus sont

généralement longs (>1 an), on estime que le potentiel d'ici 2035 est de 4 TWh. À titre de comparaison, la Stratégie énergétique 2050+ prévoit jusqu'à 4,3 TWh d'électricité produite par l'énergie éolienne en 2050 [2]. L'étude «Energiezukunft 2050» table sur 3 TWh par an d'ici 2050 [22].

Phase de la procédure	Nombre de projets	Puissance	Production d'énergie
Permis de construire délivré par le Tribunal fédéral	1	14 MW	22 GWh/a
Plans d'affectation validés par le Tribunal fédéral Procédure d'autorisation de construire	6	83 MW	162 GWh/a
Bloqué devant le Tribunal fédéral	4	148 MW	305 GWh/a
Bloqué devant le tribunal cantonal	2	14 MW	26 GWh/a
Procédure d'autorisation en cours	6	159 MW	288 GWh/a
Avant-projet	29	478 MW	916 GWh/a
Total	48	896 MW	1719 GWh/a

Deuxième scénario

Le canton de Zurich souhaite produire environ 800 GWh par an d'ici 2050 grâce à l'énergie éolienne [23]. Le développement des installations est prévu à partir de 2030. Un développement constant correspondrait à 40 GWh de capacité de production supplémentaire par an. En conséquence, une capacité de 200 GWh, soit un quart du potentiel, pourrait être atteinte d'ici 2035.

Dans ce scénario, nous partons du principe que les plans du canton de Zurich seront également mis en œuvre par d'autres cantons. Cela signifie qu'un quart du potentiel éolien de la Suisse sera exploité d'ici 2035. Cela correspond à 7,37 TWh. Comme la part de l'électricité éolienne en hiver est d'environ 67% (voir ci-dessous), la production d'électricité en hiver devrait être de 4,9 TWh.

En faisant le bilan des deux scénarios et en tenant compte de l'accélération du développement de l'énergie éolienne prévue par le Parlement, nous estimons que le potentiel hivernal sera de 4 TWh pour l'hiver 2035/36.

Part du courant hivernal	La part d'électricité produite en hiver varie d'une région à l'autre et se situe entre 55 et 70% [20]. En moyenne, on peut tabler sur une production de 2/3 en hiver et de 1/3 en été [24].
Coûts de revient	Les coûts de revient se situent entre 15 et 20 ct/kWh [10]. Le rendement annuel est le principal facteur d'influence; sur les sites où les conditions de vent sont particulièrement bonnes ou mauvaises, les coûts et les émissions de gaz à effet de serre peuvent se situer en dehors des fourchettes indiquées.
Gaz à effet de serre	Les émissions de gaz à effet de serre par kWh d'électricité produite par l'énergie éolienne s'élèvent à 17,3 g CO ₂ eq [11]. Il n'est pas prévu que cette valeur subisse d'importantes variations. Une diminution résulterait d'une utilisation plus efficace du vent, une augmentation de la disponibilité moindre des sites [10].
Biodiversité	Lors de l'évaluation, les expertes et les experts ont fait une distinction entre les zones sensibles et les zones moins sensibles en termes d'espèces et d'écosystèmes (low impact et high impact). Les surfaces IFP ou certaines forêts sont considérées comme des zones à fort impact («high impact»). Nous répartissons le potentiel de production d'électricité en hiver jusqu'en

2035 à parts égales entre les deux catégories d'impact.

Indicateur	Evaluation high impact	Evaluation low impact
Nouvelle surface naturelle impactée	0,4	0,4
Qualité de la surface	25,3	13,7
Morcellement du paysage	15,4	11,7
Effet régional sur les écosystèmes	13,4	8,0
Pollution, émissions sonores et dégagement de chaleur	7,5	5,6
Effets sur les espèces animales et végétales	18,0	9,4
Total	80,0	48,8

1.6.11 Efficacité

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

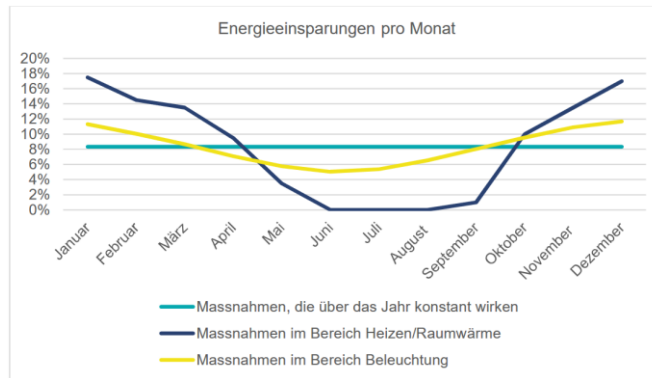
Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
	 10 000 t CO ₂ eq	 40 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
7 TWh	67%

Hypothèses et estimations

Potentiel	Le potentiel d'économies techniques de 25 à 40% [25] est appliqué à la consommation d'électricité en 2021 [1]. Il en résulte un potentiel d'économie de 14 à 23 TWh par an. L'expérience montre toutefois que ce potentiel ne sera que partiellement exploité, même s'il était rentable sur le plan économique. Nous partons d'un potentiel de 10 TWh pour 2035.
Part du courant hivernal	Les économies dans les domaines du chauffage des locaux et de l'éclairage ont lieu en majorité pendant les mois d'hiver. Le graphique suivant, tiré d'un rapport de l'OFEN sur le potentiel d'économies d'électricité, montre qu'environ 2/3 des économies sont réalisées pendant les mois d'hiver.



Coûts de revient

Le potentiel d'économie de 25 à 40% se réfère dans la plupart des cas à un potentiel économique, c'est-à-dire que les mesures se traduisent par une économie financière pour les consommatrices et les consommateurs sur l'ensemble du cycle de vie [25]. Néanmoins, les obstacles financiers constituent un obstacle important à la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique. Le programme d'encouragement ProKilowatt de l'OFEN utilise une procédure d'enchères pour promouvoir les mesures d'efficacité électrique présentant le meilleur rapport coût-efficacité. Ces subventions s'élèvent en moyenne à 2,8 ct/kWh d'électricité et nous les utilisons comme approximation [26].

Gaz à effet de serre

Les mesures d'efficacité ont également une empreinte carbone. Les moteurs économiques à vitesse variable sont par exemple plus coûteux à produire. De nombreuses mesures sont toutefois possibles avec peu d'efforts supplémentaires et une estimation précise sur la base du mix de mesures et de technologies n'est pas possible. C'est pourquoi nous calculons les émissions des modes de production d'électricité les plus propres.

Biodiversité

Non pertinent, ou catégorie la meilleure

1.6.12 Sobriété

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
	 0 t CO ₂ eq	 0 million CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
3 TWh	50%

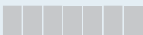
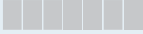
Hypothèses et estimations

Potentiel	Une estimation est difficile et sert uniquement à fournir des hypothèses de départ. Une étude [27] portant sur la consommation d'électricité d'environ 10 000 ménages suisses a révélé de grandes différences: les 10% de ménages les plus économes ne consommaient que 39% de la quantité d'électricité des ménages médians. Si l'on suppose que tous les ménages médians deviennent aussi économes que ceux du centile des 10% et que l'on extrapole ce résultat au nombre total de tous les ménages suisses, on obtient un potentiel de sobriété d'environ 6 Wh. Cette approche est plus conservatrice qu'il n'y paraît, car le potentiel des ménages compris entre la médiane et le centile 100 n'est pas du tout pris en compte dans ce calcul très approximatif. Une autre estimation est possible sur la base d'une étude de l'organisation Negawatt [28]. Elle montre qu'en Suisse, les mesures de sobriété permettent d'économiser environ la moitié de la quantité d'énergie qui peut être obtenue par des mesures d'efficacité. Sur la base de l'estimation du potentiel d'efficacité (voir ci-dessus), le potentiel est de 5 TWh. En moyenne, il en résulte une économie de 5,5 TWh.
Part du courant hivernal	Nous partons du principe que le potentiel peut être exploité dans une mesure similaire en hiver et en été, c'est-à-dire qu'il en résulte environ 3 TWh. Il convient toutefois d'être prudent avec ce chiffre: comme nous l'avons indiqué, l'estimation est très approximative. La recherche et l'expérience montrent que les potentiels sont difficiles à réaliser en matière de sobriété.
Coûts de revient	La plupart des mesures de sobriété consistent à réduire, voire à supprimer, l'utilisation d'un service énergétique. Cela peut parfois entraîner des coûts d'opportunité, mais cela permet aussi de réaliser des économies. Nous ne prévoyons donc aucun coût en fin de compte.
Gaz à effet de serre	Par analogie avec les considérations relatives aux coûts de revient, nous ne prévoyons aucune émission de gaz à effet de serre.
Biodiversité	Non pertinent, ou catégorie la meilleure

1.6.13 Importations d'électricité

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité		Emissions de gaz à effet de serre	Coûts
Énergie fossile			
		750 000 t CO ₂ eq	200 millions CHF
Vent et soleil			
		20 000 t CO ₂ eq	50 millions CHF

Potentiel du courant hivernal

Courant hivernal supplémentaire possible en 2035		Part de production d'électricité au semestre d'hiver
Énergie fossile	5 TWh	100%
Vent et soleil	5 TWh	100%

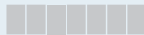
Hypothèses et estimations

Potentiel	Le potentiel d'importation d'électricité dépend de la capacité du réseau électrique, de la capacité de production à l'étranger et de l'accord sur l'électricité conclu avec l'UE. En tenant compte des objectifs de l'UE en matière de développement de la production d'électricité, à savoir 600 GW de puissance supplémentaire qui doivent être installés à partir d'installations photovoltaïques rien que jusqu'en 2030 [29], la totalité des besoins supplémentaires en électricité de la Suisse en hiver pourrait probablement être couverte par de l'électricité importée. Sur la base des capacités de réseau existantes et des restrictions attendues dans les échanges d'électricité avec l'UE, nous estimons le potentiel à 10 TWh au total. Ce chiffre comprend 5 TWh d'électricité d'origine fossile importée en période de pénurie («black out») et 5 TWh d'électricité éolienne et solaire importée en période d'abondance.
Part du courant hivernal	La part d'électricité produite en hiver est de 100%, car les importations ne sont nécessaires que pendant le semestre d'hiver.
Coûts de revient de l'électricité	Le prix de l'électricité d'origine fossile est estimé à 200 Fr/MWh, celui de l'électricité éolienne et solaire à 50 Fr/MWh.
Gaz à effet de serre	Pour évaluer l'intensité des émissions de gaz à effet de serre, nous nous basons sur un mélange de charbon et de gaz pour l'électricité fossile importée, ce qui correspond à des émissions de 750 g CO ₂ eq/kWh. Pour l'importation d'électricité produite à partir de sources renouvelables, nous tablons sur 17,3 g CO ₂ eq/kWh.
Biodiversité	La méthode d'évaluation ne considère que les effets en Suisse. Comme la majeure partie de l'impact de l'électricité importée se produit à l'étranger, cet aspect n'est pas évalué. Les blocs sont donc gris.

1.6.14 Power to X

Vue d'ensemble

1 TWh de courant hivernal occasionne

Effets sur la biodiversité	Emissions de gaz à effet de serre	Fourchette de coûts
	???	???

Potentiel du courant hivernal

Potentiel hypothétique du courant hivernal en 2035	Part de production d'électricité au semestre d'hiver
2 TWh	100%

Hypothèses et estimations

Potentiel et part de courant hivernal	De nombreux spécialistes et acteurs du secteur énergétique partent du principe que la technologie dite Power to X jouera, à l'avenir, un rôle dans le transfert en hiver des excédents de courant renouvelable produit en été. Par exemple, durant les périodes de production excédentaire, l'électrolyse permet de produire de l'hydrogène à base d'eau avec l'électricité produite par des installations photovoltaïques ou des centrales au fil de l'eau. L'hydrogène peut être stocké et utilisé en hiver dans les centrales à gaz ou les piles à combustible pour produire de l'électricité. Actuellement, il n'est toutefois guère possible de faire des estimations pertinentes sur le potentiel, les coûts, etc. Pour permettre aux personnes convaincues de l'importance du rôle futur de cette technologie de miser sur celle-ci, le kit «Power Tower» contient 2 TWh d'électricité produite de cette manière.
Coûts de revient	Aucune estimation possible
Gaz à effet de serre	Dépendent du futur mode de production. Aucune estimation possible
Biodiversité	Dépendent du futur mode de production. Aucune estimation possible

1.6.15 Joker

Il suffit parfois de dix ans pour qu'une technologie à laquelle on ne prêtait guère attention auparavant ou qui était encore en phase de développement prenne une place importante (scénario du smartphone). Ou alors, il se peut que vous estimiez que nous n'avons pas accordé assez de crédit à une technologie en particulier. Pour les deux cas, 1 TWh de joker sont à votre disposition.

2 Glossaire

Centrale nucléaire	Centrale nucléaire
Courant hivernal	Électricité produite pendant le semestre d'hiver (d'octobre à mars).
Coûts de revient de l'électricité	Coûts globaux pour produire de l'énergie électrique («électricité» ou «courant»). Ils résultent des coûts du capital, des coûts d'exploitation (fixes et variables), des coûts du combustible ainsi que du taux de rémunération du capital visé sur la période d'exploitation. La distribution et la mise en tampon de l'énergie électrique produite en fonction des besoins ne sont pas comprises.
CO ₂ eq	L'équivalent CO ₂ est une unité de mesure permettant d'uniformiser l'effet climatique de différents gaz à effet de serre. Cela permet par exemple de prendre en compte l'impact climatique nettement plus important du méthane (CH ₄).
EICom	Commission fédérale de l'électricité
Énergie en bande	L'énergie en bande désigne les besoins de base en électricité qui sont consommés tous les jours, 24 heures sur 24. Les centrales nucléaires et les centrales hydroélectriques situées sur les fleuves (centrales au fil de l'eau) fournissent par exemple de l'énergie en bande.
GW	Gigawatt, unité de puissance. 1 GW correspond à 1 milliard de watts. À titre de comparaison, la centrale nucléaire de Gösgen a une puissance électrique d'environ 1 GW.
GWh	Gigawattheure, unité d'énergie. 1 GWh correspond à 1 milliard de wattheures. À titre de comparaison, la centrale nucléaire de Gösgen produit environ 1 GWh d'énergie électrique en une heure.
IFSN	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire
kW	kilowatt, unité de puissance. 1 kW correspond à 1000 watts. À titre de comparaison, une bouilloire a une puissance d'environ 1 kW.
kWh	kilowattheure, unité d'énergie. 1 kWh correspond à 1000 wattheures. À titre de comparaison, une bouilloire électrique consomme environ 1 kWh d'énergie électrique en une heure.
kWp	L'abréviation kWp, couramment utilisée dans le domaine du photovoltaïque, signifie «kilowatt peak» (ou «kilowatt-crête»). Elle indique la puissance maximale en kilowatts (kW) qu'une installation photovoltaïque peut fournir.
TW	Térawattheure, unité de puissance. 1 TW correspond à 1 milliard de watts. À titre de comparaison, cela correspond à un peu plus de la moitié de la puissance électrique nécessaire dans le monde.
TWh	Térawattheure, unité d'énergie. 1 TWh correspond à 1 milliard de watts. À titre de comparaison, la ville de Zurich a besoin d'environ 3 TWh d'électricité en un an [28].

Références bibliographiques

- [1] BFE, «Production et consommation totales d'énergie électrique en Suisse 2021», 2022. Disponible à l'adresse:
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmVvYWQvMTA0MjY=.html> (consulté le 29 novembre 2022)
- [2] OFEN, «Perspectives énergétiques 2050+: rapport technique», Office fédéral de l'énergie OFEN, Ittigen, décembre 2021. Disponible à l'adresse:
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmVvYWQvMTA3ODM=.html> (consulté le 29 novembre 2022)
- [3] Note de l'OFEN du 24 avril 2023 à l'intention de la CEATE-E concernant les propositions d'amendement S151, S157, S150 et S154
- [4] Teske, S., Assaf, J., Kim, Y., (2020), «Energy [R]evolution: 100% Renewable Energy for Switzerland», décembre 2020
- [5] OFEN, «Perspectives énergétiques 2050+: résumé des principaux résultats», Office fédéral de l'énergie OFEN, Ittigen, résumé, 2020. Disponible à l'adresse:
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmVvYWQvMTA3ODM=.html> (consulté le 7 décembre 2022)
- [6] OFEN, «Principales nouveautés du droit de l'énergie à partir de 2018». Office fédéral de l'énergie OFEN. Disponible à l'adresse:
<https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/50167.pdf> (consulté le 7 décembre 2022)
- [7] N. Moro, D. Sauter, S. Strebel, et J. Rohrer, «Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern», janvier 2021, doi: 10.21256/ZHAW-2652.
- [8] Watson, «Solarboom in der Schweiz: Eine Branche zwischen Euphorie und Ärger», watson.ch, 31 mars 2022. <https://www.watson.ch/!673729839> (consulté le 25 novembre 2022).
- [9] OFEN, «Encouragement de la production d'électricité issue des énergies renouvelables en 2023: 600 millions de francs pour les installations photovoltaïques», 24 novembre 2022.
<https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-91897.html> (consulté le 25 novembre 2022).
- [10] BFE et PSI, «Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen» (en allemand), Berne, 2019.
- [11] OFEV, «Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018» (en allemand), Office fédéral de l'environnement, Uster, 2021. Disponible à l'adresse:
<https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf.download.pdf/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf> (consulté le 5 décembre 2022)
- [12] EZS et SuisseEnergie, «Solarstrom auf Infrastrukturanlagen und Konversionsflächen», Energie Zukunft Schweiz, 2021. Disponible à l'adresse:
https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/7195893/Infrasolaire/Studie%20InfraSolare_Endbericht.pdf (Consulté le 5 décembre 2022)
- [13] F. Egli, L. Hälgi, M. Schreiber, et M. Schwarz, «Alpenstrom jetzt!», Stiftung Alpines Energieforschungszentrum AlpEnForCe, Altdorf. Verfügbar unter:
<https://www.kulturen-der-al->

- pen.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente/Downloads/Studien___Publikationen/Alpe
nstrom_jetzt.pdf (consulté le 7 décembre 2022)
- [14] M. Jäger u. a., «Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft», ZHAW, 2022.
 - [15] DETEC, «Sortie du nucléaire», 2017.
<https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/detec/votations/votation-concernant-la-loi-sur-l-energie/energie-nucleaire.html> (consulté le 11 décembre 2022).
 - [16] Forum nucléaire suisse, «Centrale nucléaire de Leibstadt: retour sur l'année 2021», Centrale nucléaire de Leibstadt: retour sur l'année 2021, 12 janvier 2022.
<https://www.nuklearforum.ch/fr/nouvelles/centrale-nucleaire-de-leibstadt-retour-sur-lannee-2021> (consulté le 19 décembre 2022).
 - [17] BFE et PSI, «Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies», 2017.
 - [18] IEA et NEA, «Projected Costs of Generating Electricity», 2020.
 - [19] ElCom, «Concept relatif à des centrales à gaz destinées à couvrir les charges de pointe pour assurer la sécurité du réseau dans des situations d'urgence exceptionnelles», Commission fédérale de l'électricité ElCom, Berne, rapport à l'attention du Conseil fédéral, 2021. Disponible à l'adresse:
<https://www.elcom.admin.ch/dam/elcom/fr/dokumente/2022/conceptrelatifadescentrales-a-gaz.pdf.download.pdf/Concept%20relatif%20%C3%A0%20des%20centrales%20%C3%A0%20gaz.pdf> (consulté le 7 décembre 2022)
 - [20] OFEN, «Etude sur le potentiel éolien en Suisse 2022», 2022. Disponible à l'adresse:
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/72771.pdf> avec résumé en français (consulté le 7 décembre 2022)
 - [21] Suisse Éole, «L'énergie éolienne en Suisse: état des lieux», Suisse Eole, 2022. Disponible à l'adresse: https://suisse-eole.ch/wp-content/uploads/2023/04/20_SE_02_FACTSHEET_Anpassung_F_V3_230404-1.pdf (consulté le 7 décembre 2022)
 - [22] AES, «Avenir énergétique 2050», AES, 2022. Disponible à l'adresse:
<https://www.strom.ch/energiezukunft-2050/resultate#studienbericht> (consulté le 8 décembre 2022)
 - [23] Direction des travaux publics du canton de Zurich, «Windenergie kann Beitrag zur Winterstromversorgung im Kanton Zürich leisten», canton de Zurich, 2022.
<https://www.zh.ch/de/news-uebersicht/medienmitteilungen/2022/10/windenergie-kann-beitrag-zur-winterstrom-versorgung-im-kanton-zuerich-leisten.html> (consulté le 10 février 2023).
 - [24] Suisse Eole, «Plan éolien pour le climat: la solution énergétique hivernale. Analyse et actualisation du potentiel de l'énergie éolienne en Suisse», Suisse Éole, 2020. Disponible à l'adresse: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA0MjY=.html> (consulté le 8 décembre 2022)
 - [25] OFEN, «Potenzial und Massnahmen zur Steigerung der Stromeffizienz bis 2025», 2022. Avec résumé en français. Disponible à l'adresse:
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/70290.pdf> (consulté le 8 décembre 2022)
 - [26] ProKilowatt, «Appels d'offres publics concernant les mesures d'efficacité dans le domaine de l'électricité», 2022. [en ligne]. Disponible à l'adresse:
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/mesures-d-encouragement/efficacite-energetique/appels-offres-publics-prokilowatt.html> (consulté le 25 juillet 2023)
 - [27] Swiss Household Energy Demand Survey (SHEDS), <https://www.sccer-crest.ch/research/swiss-household-energy-demand-survey-sheds/> (consulté le 25 juillet 2023)

- [28] «Le scénario Negawatt» <https://www.negawattsuisse.org/scenario/> (consulté le 25 juillet 2023)
- [27] Commission européenne, «REPowerEU: une énergie abordable, sûre et durable pour l'Europe», 18 mai 2022. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_fr (consulté le 16 décembre 2022)
- [28] Zurich, «Endenergiebilanz - Stadt Zürich», Bilan énergétique final - Ville de Zurich, 2022. https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/energie-in-zahlen/endenergiebilanz.html (consulté le 25 novembre 2022).
- [29] Alliance-Environnement, «Pour un approvisionnement énergétique suisse et sûr en 2035», 2022 <https://energiewende2035.umweltallianz.ch/fr/> (consulté le 3 août 2023)
- [30] OFEN, «Potentiel hydroélectrique de la Suisse: Évaluation du potentiel de développement de la force hydraulique dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050», 2019
- [31] Econcept, «Beitrag erneuerbarer Energien zur Winterstromproduktion: Analyse der Produktionsdaten», 2014 (pour le compte du WWF)
- [32] AES, «Petite hydraulique, document de connaissances de base», 2014
- [33] OFEN, «Vérification des coûts de production et des taux de rétribution des installations RPC », 2016
- [34] OFEN, communiqué de presse «La rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) se révèle efficace», 2012. Disponible à l'adresse: <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-46401.html> (consulté le 14.8.2023)
- [35] Treeze, «Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018» (en allemand), 2019
- [36] OFEN, communiqué de presse «Déclaration commune adoptée par la table ronde consacrée à l'énergie hydraulique» 2021. Disponible à l'adresse: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/actualites-et-medias/communiques-de-presse/mm-test.msg-id-86432.html> (consulté le 14.8.2023)
- [37] OFEN, «Table ronde consacrée à l'énergie hydraulique», données publiées, 2022
- [38] OFEN, note de l'OFEN du 2 avril 2023 à l'attention de la CEATE-E; 21.047: «Approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables. Loi fédérale»



Notre objectif

Mobilisons-nous toutes et tous pour protéger l'environnement et concevoir un avenir harmonieux pour les générations futures.

WWF Suisse

Avenue Dickens 6
1006 Lausanne

Tél.: 021 966 73 73

[wwf.ch/contact](https://www.wwf.ch/contact)

[wwf.ch/don](https://www.wwf.ch/don)