

Conversion des énergies primaires en énergies secondaires, avec les estimation des rendement pour quelques branches industrielles

L'énergie primaire fossile correspond à l'énergie thermique du charbon, pétrole ou gaz tel qu'elles sont sorties de la terre, sans raffinage et transport.

Les scénarios probables de l'AIE et du NEO 2019 (Boomborg) prévoient encore une croissance cumulée de 6% des énergies fossiles jusqu'en 2027. L'équivalent de CO2 de ces 6% sera capturé par les sols et forêts en 2050. Bien que l'agriculture de conservation puisse capturer et stocker beaucoup de CO2, ce processus fonctionne pendant environ 20 ans jusqu'à ce que les sols aient atteint le maximum de carbone.

Concernant les forêts, le bilan de stockage du CO2 est positif uniquement si le bois est utilisé dans la construction de bâtiments et de meubles, et non pas pour chauffer des bâtiments ou pour faire de l'électricité. Le seul groupe Drax GB brûle 7 500 000 t de bois par an dans des centrales électriques. Ce bois brûlé émet autant de CO2 qu'il a capturé! Ensuite, les forêts primaires émettent autant de CO2 qu'elles captent, car il y a autant de bois qui se décomposent que de nouveau bois qui se forme. Seules les forêts "gérées", dont les vieux arbres sont coupés pour une utilisation permanente, sont des "puits de carbone". <https://www.economist.com/international/the-world-should-prove-its-love-for-forests-by-putting-carbon-prices-on-them/21806086>

Conversion euro / dollar = 1.0; moyenne depuis 2015: 1€ = 1.1\$; minimum en 2002: 1€ = 0,71\$

Auteur: Pierre Strack Version 1.1

Énergies fossile par secteur	prim/seco facteur	Energie		% finale consommée	Source / Commentaire
		primaire TWh	second. finale TWh		
Total fossile Twh		134000		100	http://www.isd-engineering.com voir aussi IEA 2015
Utilisation Bâtiments	0,84	40200	33768	30	https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/rendement-d-une-chaudiere/
Transport, moteurs élec. accu Lilon	0,50	24120	12060	18	stockage accu et moteur el. = 2 x moins de pertes que moteur thermique, électr. zéro CO2
Transport, hydrogène, pile à combustible	1,00	13400	13400	10	Electrolyse+compression hydrogène moteur pile à combustible rendement 35%; ADEME 2020
Construction (béton goudron)	1,00	8040	8040	6	
Autres industries (détails ci-après)	0,79	32160	25551	24	
Électricité à base d'énergie fossile	0,40	17280	6912	12	sans nucléaire ni hydraulique ni autres renouvelables
Total secondaire à remplacer par an			99731	100	https://www.centralbanking.com/central-banks/economics/4738011/the-cost-of-decarbonisation
Production pour stockage, reserve 30h			342		Bloomberg NEO 2020 Executive Message, point 7, estime les besoins à 100'000 TWh Reserve journalière + production reserve saisonnière = 30h
Autres industries		% par industrie		Facteur pondéré	
Industrie chimique	0,85	29		0,25	http://needtoknow.nas.edu/energy/energy-efficiency/industrial-efficiency/
Production fer et acier sans CO2 (1)	0,90	20		0,18	www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/electric-arc-furnace.html
Minéraux et matériaux non ferreux (2)	1,00	10		0,10	voir note (2)
Papier et pulpe à papier	0,60	6		0,04	
Métaux non ferreux	0,80	3		0,02	
autres procédés utilisant énergie fossile	0,65	32		0,21	
«Autre industrie» facteur				0,79	

Production électricité total Twh 2019		27000	20%
Fossiles 64%	0,40	17280	6912
nucléaire+hydro+renouvelables	1,00	9720	9720
Total électricité secondaire TWh		16632	

www.brighthubengineering.com/power-plants/72369-compare-the-efficiency-of-different-power-plants/

les centrales nucléaires existantes ne sont pas remplacées et leur durée de vie peut être prolongée de 20 ans minimum

Renouvelables remplacent fossiles dans le Monde	crête / moyenne	Capacité installée (TW)	Invest. €/watt crête installé	CAPEX Milliard euros	Surface km ² Nombre
Installation renouvelables TWh 24h/24h		11,38			
Photovoltaïque 2/3 (4)	0,15	50,60	0,80	40479	808941
Eolien 1/3 (9)	0,25	15,18	2,60	39467	2730175
Invest. production renouvelables		65,78		79947	
Invest. avec pertes pour stockage		94,65		115031	
Investissement stockage TWh		342	228	77928	
Invest. Infrastructure 30 années	30		1600	48000	
CAPEX Total monde (milliards €)				240960	

11000m² pour 1 MW crête

90 MW/km²

En France, le facteur est 0,11

8 MW/éolienne

1600 milliards par an. Voir Economist, 23 mai 2020, page 50 sans équipements hydrogène

Renouvelables remplacent fossiles, Union européenne + Schengen (6)	crête / moyenne	Capacité installée (TW)	Invest. watt installé	CAPEX Milliard euros	Surface km ² Nombre
Installation renouvelables TW 24h/24h		2,60			
Photovoltaïque 1/3 (5)	0,15	5,78	0,80	4620	92334
Eolien 2/3 (9)	0,25	6,93	2,60	18020	1246508
Invest. production renouvelables		12,71		22640	
Invest. avec pertes pour stockage		18,28		32575	
Investissement stockage TWh				15469	
Invest. Infrastructure 30 années	30		318	9528	
Invest. Production hydrogène				5955	
CAPEX Union Européenne (milliards €)				63528	
Union européenne + Schengen, PIB				16675	

11000m² 1MW crête

PIB UE = 19% du PIB monde; Importation 15% énergie grise

90 MW/km²

8 MW/éolienne

€/kWh = milliards €/TWh

1600 milliards par an. Voir Economist, 23 mai 2020, page 50

Pertes pour stockage élec.renov.	Rendement estimé	Durée de stockage	% du stockage total	pondéré	Commentaire
Hydrogène dans mines vides (3)	0,55	30-150 j.	25%	0,14	Electrolyse pertes 30%, compression du gaz pertes 10 %, autres pertes 5 %; hydrogène produit chaleur
Hydrogène dans réservoirs	0,40	5-90 jours	10%	0,04	Electrolyse pertes 30%, compression du gaz pertes 10 %; hydrogène produit électricité pertes 20%
Photovoltaïque vers accus Li DC→DC→AC	0,90	1 jour (3)	15%	0,14	Pertes dans l'accu
Éolien dans accus Li AC→DC→AC	0,75	1 jour	10%	0,08	Pertes dans l'accu et par les 2 types d'onduleurs et l'accumulateur
stockage mécanique ou autre	0,80	1 jour	15%	0,12	https://energyvault.com/
Transfert de pompage d'eau	0,75	1 - 60 jours	25%	0,19	Nouveaux barrages: rendement avec un démarrage par jour
Rendement moyen	0,70				pertes moyennes avec pondération = 30%

Moyens et coût de Stockage (7)	nb heures	Coût 2020	Coût 2050	Capacité de stockage 340TWh	CAPEX moyen milliards	Commentaire
Coût des accus (\$/kWh)	30	274	74	250	54375	En 2020, le coût est de 1000€/kWh pour des batteries de taille moyenne. https://www.batteriedomestique.be/
Coût régulation & protection (\$/kW)	30	260	110	250	14453	https://atb.nrel.gov/electricity/2020/data.php
Transfert de pompage d'eau \$/kWh (8)	30	80	80	91	9100	Toutes les types de stockage ont le même CAPEX sauf le pompage d'eau http://www.hubspeicher.de/kostenbeispiele.htm
Coût stockage				341	77928	
Coût stockage par TWh					228	€/kWh = milliards €/TWh
CAPEX total monde (milliards €)					270960	Avec équipement pour production d'hydrogène (30000 milliards)

Notes

(1) Sans énergies fossiles, l'acier peut être fabriqué par des fours à arc électrique avec de l'acier et du fer de recyclage. Il faut 475kWh pour 1t d'acier à partir de fer recyclé. Des "fours à réduction directe", en y ajoutant de l'hydrogène, peuvent produire de l'acier à partir de minerais. Ainsi, à Luella dans une usine-pilote, la société suédoise SSAB produit de l'acier quasiment sans produire du CO2 en utilisant de l'hydrogène. L'hydrogène est produit par électrolyse et de l'électricité issue d'énergies renouvelables. Mais en 2019, 70 % de l'acier est produit à partir de minerais avec du charbon. Produire de l'acier à partir de fer recyclé consomme 5 fois moins d'énergie qu'à partir de minerais.

<https://www.economist.com/europe/2021/05/15/plentiful-renewable-energy-is-opening-up-a-new-industrial-frontier>

(2) Sans énergies fossiles, fabriquer des céramiques, du verre, de la porcelaine, briques,... a besoin de températures supérieur égal à 900°C, qui peuvent être atteint avec de l'hydrogène qui est produit avec un rendement de 60%. Ce mauvais rendement annule partiellement les gains fait ailleurs.

(3) Stockage d'hydrogène dans des anciens sites de gaz naturel pour des réserves saisonnières ou au moins pour quelque semaines.

La durée de stockage d'un jour étant très faible, il est supposé que les batteries des voitures électriques en stationnement peuvent au moins couvrir les points de consommation à midi et le soir.

(4) l'AIE estime qu'en 2050 dans le monde, un tiers des énergies renouvelable installés sera éolien et deux tiers photovoltaïque. Pour les pays au nord des Alpes, il faut donc plus d'éolien qui produit davantage en hiver, sinon il faudrait produire trois fois plus en été. Le facteur de conversion 0.15 pour le photovoltaïque est une moyenne sur l'ensemble de la planète.

(5) En Allemagne, la production photovoltaïque est 5 fois supérieur en été qu'en hiver alors que la consommation d'énergie est supérieur en hiver.

(6) La consommation d'énergie suit le PIB. Vu les relations commerciales, l'Europe importe environ 15% d'énergie en forme d'énergie grise de plus qu'elle exporte. PIB monde = \$84000 milliards PIB Europe = \$16600 milliards = 20 % (année 2020)

(7) J'ai prévu le strict minimum en volume de stockage. Il existera des configurations météorologiques pendant lesquelles un certain nombre de machines ne pourront pas fonctionner, elles devront attendre un signal d'EDF pour démarrer, semblable aux signaux envoyés pour démarrer les chauffe-eau pendant les heures creuses.

Données du National Renewable Energy Laboratory (NREL);

<https://atb.nrel.gov/electricity/2020/data.php>

voir aussi: <https://www.technologyreview.com/2019/10/10/369/how-a-new-class-of-startups-are-working-to-solve-the-grid-storage-puzzle/>

(8) En 2018, le volume de stockage d'eau dans des réservoirs dans le monde atteint presque 9TWh. Mes calculs supposent que ce volume sera à terme multiplié par 10 à 85TWh. Mais en Europe, le volume de stockage n'a augmenté que de 20% en 20 ans depuis 2001. Hydropower.org prévoit des nouveaux moyens de stockage pour 3.1TWh entre 2021 et 2030 pour passer de 9 TWh à 12 TWh en 2030. J'ai prévu d'une manière **très optimiste** 85TWh en 2050 ou 2060. La Norvège est le pays avec le plus grand potentiel de stockage.

www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/the_worlds_water_battery_-_pumped_storage_and_the_clean_energy_transition_2.pdf

(9) Les éoliennes en mer ont, en moyenne, un facteur de charge de 0.33, les éoliennes terrestres de 0.2

Cout comparatif EPR - Eolien	puissance MW	Facteur de charge	Investisseme nt (millions €)	Invest. Démant.	Invest. avec taux util.	CAPEX 1600MW	
EPR de type Flamanville (1) (4)	1600	0,78	12000	1000	16385	16385	millions €
Grandes éoliennes off shore (2)	8	0,33	4160	0	12606		
Stockage énergie 24h batterie (MWh) (3)	42240		9638			22244	millions €
Stockage énergie 24h pomp.eau (MWh)	48000		3840			16446	millions €

Mini-surgénérateurs remplacent fossiles	facteur de charge	prod. /an MWh	nb. mini-centrales
Mini-surgénérateur puissance 100MW (5)	0,8	700800	142310

1TWh = 1 000 000MWh

Notes

(1) Il est supposé que des nouveaux EPR coûteraient 30% moins cher que celui de Flamanville. D'après la Cour des comptes, l'EPR de Flamanville coûte 18.7 milliards. Il est ensuite supposé qu'une centrale de type Superphénix coûtera autant qu'un EPR, supposition optimiste vue les réticences des réglementateurs.

Facteur de charge d'une centrale nucléaire d'après le site d'EDF. En moyenne, une centrale est à l'arrêt pendant 32.5 jours par an pour maintenance. (Source: EDF, Arrêt de Tranche)

(2) Facteur de charge des éoliennes off-shore belges en 2018. Les éoliennes n'ont pas besoin d'être démantelées, seuls quelques éléments dans le générateur doivent être remplacés tous les 30 ans. Il n'y a pas de raison pourquoi un mât d'éolien, fait avec un acier moderne, ait une vie plus courte que la tour Eiffel, faite avec un acier de moindre qualité d'il y a 120 ans.

(3) Stockage d'électricité dans des batteries ou des systèmes mécaniques aux prix semblables. Un pays avec une électricité nucléaire supérieur à 90% a aussi besoin de stockage dans des batteries pour stabiliser les fluctuations de la charge. EDF a investi environ 40 millions dans un tel système en 2018. Dans mes calculs du coût du nucléaire, ce besoin de stockage est ignoré, je n'ai trouvé aucun moyen pour estimer ce besoin, mais il faudrait encore l'ajouter au coût nucléaire. Les pertes du système de pompage d'eau sont estimées à 25%.

(4) Arrêt tranches pour maintenance: 15 jours tous les ans, 30 jours tous les 2 ans; 100 jours tous les 10 ans: 32,5 jours en moyenne par an. Les arrêts pour manque d'eau dans les rivières ne sont pas inclus, sinon le facteur serait encore plus bas.

(5) Le facteur de charge est optimiste pour une centrale à neutrons rapides! Le nombre de mini-centrales nucléaires dans le monde pour remplacer toutes les énergies fossiles, sans rien faire d'autre, est très élevé. Comment dans ce cas contrôler le traité de non-prolifération des armes nucléaires ?

Cryptomonnaies / Blockchains	Millions par an	Energie TWh	transaction kWh
Nb. de transactions crypto-monnaies (6)	400	111	278
Nb. de transactions bancaires (7)	180000	50040	
Electricité internet & téléphonie (8)		2500	

Notes

(6) Sedlmeir, J., Buhl, H.U., Fridgen, G. et al. ; The Energy Consumption of Blockchain Technology (2020) .

Une transaction avec des Bitcoins consomme 10^9 joules (page 606). (10^9 Joules = 278kWh)

Selon l'IEA, l'ensemble des transactions en bitcoin ont consommé 50TWh en 2018 (IEA, Energy efficiency 2019, page 39). Depuis, le nombre des transactions de toutes les cryptomonnaies a considérablement augmenté.

(7) Si toutes les transactions bancaires se faisaient en cryptomonnaie, la consommation d'énergie correspondrait à 20 fois la consommation d'énergie de tout l'internet en 2020. Remplacer toutes les transactions bancaires du monde par des transactions basées sur des blockchains et des cryptomonnaies consommerait beaucoup trop d'énergie (50000 TWh)! Ceci correspond à 50% de l'énergie électrique si toutes les énergies fossiles étaient remplacées par l'électricité ou 2 fois toute l'électricité produite en 2020.

(8) Total Consumer Power Consumption Forecast, Anders S.G. Andrae (Huawei), lors du Nordic Digital Business Summit, Helsinki, oct.2017.

D'après le "Royal Institute of Technology KTH" de la Suède, la consommation d'énergie de l'internet est de 2500 TWh en 2019.

<https://cornucopia.cornubot.se/2019/02/internet-drar-10-av-varldens.html>