

Version provisoire

En Allemagne
Un tableau de consommation d'énergie en 2045 sans émission de CO2

Deux hypothèses de production d'électricité : sans nucléaire ou avec une forte capacité nucléaire

On se réfère à une étude de Agora Energiewende (AEW) ¹.

L'Allemagne avait décidé qu'en 2050 elle n'émettrait plus de CO2 et ne produirait plus d'électricité nucléaire. Puis elle a avancé cette échéance à 2045. L'objet de cette note est de faire une comparaison entre une hypothèse de production d'électricité sans nucléaire et ce qui serait possible avec une forte capacité nucléaire ; en particulier d'évaluer la différence de capacités de production à installer pour répondre à une même demande, la différence de dépenses et la différence d'autonomie.

Par ailleurs, en reprenant les données publiées et avec quelques interpolations, j'ai dressé un tableau croisé de la consommation d'énergie en 2045.

Principales observations :

Le tableau croisé de consommation d'énergie en 2045

La consommation finale d'énergie est d'environ 1600 TWh, contre 2400 TWh en 2018. Les importations sont de 170 TWh d'hydrogène et de 160 TWh de bioénergie.

La consommation finale d'électricité est de 750 TWh.

La consommation d'hydrogène est de 260 TWh dont 160 TWh sont importés.

Pour équilibrer le tableau, j'évalue le besoin en biomasse à 460 TWh.

La production d'électricité sans nucléaire ou dans l'hypothèse d'une forte capacité nucléaire

Le rapport qui présente le scénario de AEW suppose implicitement que la stabilité du réseau est préservée alors que la capacité de production des machines tournantes est très basse.

La capacité totale des moyens de production hors l'hydraulique est, sans nucléaire, de 690 GW ; (145 GW d'éolien sur terre et 70 GW en mer, 385 GW de photovoltaïque et 91 GW à partir de gaz ou d'importation). Elle est de 275 GW avec nucléaire.

Sans nucléaire, le scénario de AEW suppose d'importants mouvements d'importation et d'exportation avec des pays voisins pouvant « stocker » 50 à 60 TWh d'électricité dans des lacs de montagne. Ces échanges feront probablement l'objet de contrats. *Les dépenses totales dépendent beaucoup du coût qui sera facturé pour ce service.*

Si l'on suppose que le prix de l'électricité importée est ce que coûterait une production à partir d'un gaz à 40 €/MWh (ou 80 €/MWh), les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène sont de 112,6 (ou 118,1) milliards d'euros par an. Avec 80 GW nucléaire, elles sont de 80,3 (ou 84,4) milliards d'euros par an ; une différence de 33 milliards d'euros par an.

Les surfaces occupées par le photovoltaïque sont de 5700 km² sans nucléaire ; elles sont de 1100 km² avec 80 GW nucléaire.

Le nombre d'éoliennes est de 36 000 sans nucléaire, de 10 000 avec 80 GW nucléaire.

¹ [Publication - Towards a Climate-Neutral Germany by 2045 \(agora-energiewende.de\)](https://www.agora-energiewende.de/),

A- Le tableau croisé de consommation d'énergie en 2045

A partir des données publiées par Agora Energiewende, il est possible, en faisant quelques interpolations, de restituer un tableau croisé de la consommation d'énergie par secteur d'utilisation et type d'énergie.

La consommation finale totale est de 1600 TWh contre 2400 TWh en 2018.

Je comprends que dans ce chiffre de 1600 TWh figure l'énergie pompée par les pompes à chaleur

Le besoin d'énergie pour le chauffage semble être divisé par près de deux. L'électricité est utilisée avec des pompes à chaleur. Avec un apport de chaleur solaire directe et de chaleur cogénérée avec de l'électricité ; le tableau est équilibré avec 170 TWh de biomasse et de biogaz. Celle-ci serait moindre s'il était possible de stocker de la chaleur produite par des excédents de production d'électricité.

La consommation d'énergie par l'industrie diminue de 7 %.

La consommation pour le transport, y compris international, est divisée par 2,3 du fait de l'électrification. Les distances parcourues par personne ne diminuent pas ; les distances parcourues par le transport de marchandises augmentent.

La consommation d'hydrogène est de 270 TWh (soit 7,7 millions de tonnes) dont 170 TWh sont importés et 100 TWh sont produits avec 50 GW d'électrolyse. Près de la moitié sert à produire de l'électricité. L'autre moitié est consommée par l'industrie et le transport lourd sur terre.

Il est prévu aussi l'importation de 160 TWh de bioénergie, surtout pour le transport aérien et maritime.

Pour équilibrer le tableau croisé de consommation d'énergie par type d'énergie et par secteur d'utilisation, j'évalue la ressource en biomasse disponible à 460 TWh.

Commentaires :

- une très forte consommation d'hydrogène – 7,7 millions de tonnes par an alors qu'en France, les hypothèses les plus hautes sont voisines de 3 millions de tonnes
- de fortes importations d'énergie décarbonée : 330 TWh soit 20 % de la consommation finale
- une forte réduction de la consommation d'énergie de chauffage
- une forte sollicitation de la biomasse.

Le tableau de la consommation est ici : www.hprevot.fr/allemande.html

B- La production d'électricité sans nucléaire ou avec une forte capacité nucléaire

J'ai pu retrouver avec SimelSP2 (un simulateur du système de production d'électricité et d'hydrogène publié s sur Internet) toutes les données publiées du scénario AEW. Cela ne veut pas dire que la réplique est exactement ressemblante car de nombreuses hypothèses retenues par AEW ne sont pas connues.

Voir en annexe un tableau comparatif.

Le détail des capacités de production, des rendements et des coûts figure sur ces deux tableaux publiés sur internet : [sans nucléaire](#) et [avec nucléaire](#)

B-1 : Une réplique du scénario présenté par Agora Energiewende

La consommation d'électricité

Comme dans le scénario d'Agora Energiewende – désigné ici par AEW -, la consommation finale hors pertes en ligne est 750 TWh. Les pertes en ligne sont de 7 %.

Pour ce qui est du profil horaire de la consommation finale, faute de mieux j'ai supposé qu'il est le même que celui de la consommation en France en 2013, une année moyenne.

C'est *a priori* une source d'incertitude. Pourtant lorsque l'on utilise d'autres profils de consommation pour une même consommation annuelle, les résultats ne sont pas très différents : d'une part on suppose ici une grande flexibilité de la consommation et d'autre part, les variations de la consommation ont beaucoup moins d'effet que celles de la production. Seul le besoin de capacité de production à partir de gaz dépend sensiblement du profil horaire de consommation.

J'ai supposé une possibilité de déplacement de consommation de 30 GWh. Cela correspond par exemple au déplacement d'une consommation de 3 kW pendant une heure par 10 millions de ménages. De plus, il peut y avoir un effacement de la consommation allant jusqu'à 10 GW.

La pointe de la consommation finale *avant déplacement de consommation et effacement* est de 148 GW.

Les moyens de production et de stockage

Remarque importante : Dans le scénario AEW, l'inertie des machines tournantes de production est insuffisante pour assurer sur le réseau électrique la stabilité de fréquence. Il faudra pour assurer cette stabilité des dispositifs spécifiques dont on ne sait pas aujourd'hui s'ils pourront être déployés à grande échelle. Je n'ai pas tenu compte des dépenses relatives à ces dispositifs.

Les capacités et les productions éoliennes et photovoltaïques sont celles de AEW : 145 GW, 70 GW et pour l'éolien en mer ; 385 GW pour le photovoltaïque. Leur possibilité de production est en tout de 918 TWh. Pour le photovoltaïque, vu la position de principe du gouvernement allemand, j'ai supposé que la proportion sur toiture est de 70 %.

La production à partir d'hydraulique (20 TWh) et la production à partir de biomasse (10 TWh) sont celles de AEW. La capacité de production à partir de biomasse est calculée par le simulateur en supposant qu'elle est utilisée aux deux-tiers en base. Elle est de 3 GW.

Comme dans le scénario AEW, la production à partir d'hydrogène est de 60 TWh. La capacité dépend de la capacité pouvant être garantie par le stockage comme il est dit plus bas.

Comme dans AEW, les importations d'électricité sont supérieures de 22 TWh aux exportations. Une partie de ces échanges sert à combler les écarts entre production et consommation d'électricité en Allemagne. La réplique suppose que les importations sont de 57 TWh et que les exportations sont de 35 TWh.

Les moyens de stockage et les déplacements de consommation

La contenance des Steps est celle de AEW : 40 GWh.

Les batteries des véhicules électriques seront, selon AEW, grandement sollicitées pour équilibrer fourniture et demande d'électricité. J'ai supposé qu'au total la contenance des batteries ainsi disponible serait de 400 GWh, ce qui correspond par exemple à 20 kWh par véhicule (la moitié ou le quart de la contenance des batteries d'un véhicule) et 20 millions de véhicules.

Les déplacements de consommation, qui peuvent aller jusqu'à 30 GWh, ont le même effet que des batteries d'une contenance égale.

Au total, la contenance du stockage (y compris les possibilités de déplacement de consommation) est de 470 GWh. La puissance pouvant être ainsi garantie par l'ensemble des Steps, des batteries et des déplacements de consommation est évaluée à l'aide de SimelSP2 au vu de la chronique horaire de ce qui est demandé aux moyens de flexibilité pour équilibrer la fourniture et la consommation d'électricité. Elle est de 47 GW.

Ainsi, le rapport entre la capacité garantie (en GW) et la contenance des moyens de stockage (en GWh) est ici de 0,1. C'est peu mais cela peut se justifier économiquement si le coût pour le réseau de la mise à

disposition de ces batteries est très bas. J'ai supposé qu'il est, en coût fixe, de 30 €/kW, soit 3 €/kWh pouvant être versé chaque année au propriétaire des véhicules, ou 60 € par an pour 20 kWh.

Selon la réplique du scénario AEW, les quantités déstockées sont de 77 TWh ; les pertes de stockage-déstockage sont 19 TWh.

SimelSP2 suppose que le stockage ne peut être rechargé que par de l'électricité éolienne ou photovoltaïque. Or, pour qu'il puisse servir à écrêter les pointes de consommation, il doit être chargé avant qu'elles apparaissent même si c'est avec de l'électricité importée. Il est donc probable que les mouvements de stockage et déstockage dans le scénario AEW sont supérieurs à ce que calcule SimelSP2. Cette différence n'a guère d'effet sur les résultats annuels.

La production d'hydrogène et les possibilités de production d'électricité excédentaires

Le rapport d'AEW indique que l'hydrogène a une triple fonction.

1- l'hydrogène sert à produire de l'électricité ;

2- l'électrolyse est alimentée en continu sur le réseau mais elle s'efface lorsqu'il faut importer ou faire fonctionner les moyens de production à partir d'hydrogène ; l'électrolyse fonctionne alors « en base moins la pointe » ;

3- l'électrolyse utilise les possibilités de production d'électricité lorsque celles-ci dépassent la demande finale.

Dans le scénario AEW, la capacité de l'électrolyse est de 50 GW et la consommation d'électricité par l'électrolyse est de 150 TWh. La production d'hydrogène est de 3 millions de tonnes par an.

Le simulateur SimelSP2 peut rendre compte de ces trois fonctions de l'hydrogène avec une capacité de l'électrolyse « en base moins la pointe » de 15 GW consommant 96 TWh et une capacité de 35 GW sur les excédents de production d'électricité, consommant 54 TWh.

Le coût de l'électricité consommée par l'électrolyse peut être calculé comme étant la différence entre les dépenses de production d'électricité avec ou sans cette consommation par l'électrolyse, le système de production d'électricité étant optimal dans les deux cas. Le coût de production d'hydrogène ainsi calculé est voisin de 4 €/kg. C'est moins qu'à partir d'une production d'électricité dédiée car l'hydrogène contribue à l'équilibre du réseau électrique – le « premier » million de tonnes par an y contribue beaucoup plus que les suivants ; son coût est donc moindre.

Pour délivrer l'hydrogène en flux continu et constant, il faudrait une capacité de stockage de 9 % de la production annuelle.

La capacité de production d'électricité à partir de gaz

La capacité de production à partir de gaz est calculée de deux façons différentes. Ou bien c'est la demande de pointe diminuée des capacités garanties, ou bien c'est le maximum de ce qui est demandé aux moyens de flexibilité diminué de la capacité garantie par les moyens de stockage et les possibilités de déplacement de la consommation, et diminué aussi de la capacité d'effacement définitif.

Les capacités de production garanties par les moyens de production :

C'est la capacité nucléaire (ici, nulle) affectée de son coefficient de disponibilité, c'est aussi la production hydraulique de fleuve minimale en hiver et aussi 1 % de la capacité éolienne. On y ajoute les capacités d'effacement définitif. Le scénario AEW semble y ajouter une capacité d'importation garantie par des contrats avec des pays ayant la possibilité de « stocker » l'électricité dans leurs lacs de montagne.

Dans la réplique par SimelSP2, la capacité garantie par les fleuves et la production à partir de biomasse est de 5,4 GW, par les éoliennes de 1,5 GW, par les moyens de stockage et les déplacements de consommation de 47 GW, soit en tout 54 GW. La consommation finale (avant les déplacements de consommation) et sans compter la consommation de l'électrolyse (qui s'efface) peut atteindre 150 GW.

Si l'on suppose qu'il n'y a pas de vent lorsque la demande est au plus haut, il manque 96 GW. Si l'on accepte le risque de manquer de puissance pendant 3 heures par an, il manque 91 GW.

Cette puissance doit être apportée par une capacité de production à partir de gaz et une capacité d'importation garantie comme dit plus haut.

Selon AEW, la capacité des moyens de production à partir de gaz est 80 GW.

Les coûts et les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène

Les LCOE des moyens de production, calculé avec un taux d'actualisation de 4,5 %, sont ici les suivants : éolien sur terre : 63,9 €/MWh ; éolien en mer : 82,4 €/MWh ; photovoltaïque sur sol : 62,5 €/MWh ; photovoltaïque sur toiture : 94,9 €/MWh (selon AEW, le facteur de charge du photovoltaïque en Allemagne est de 920 h/an).

Les frais fixes de l'électrolyse sont, par GW et par an, de 67 M€.

Le coût de l'hydrogène importé est de 150 €/MWh. Pour une analyse de ce coût, on peut se référer au numéro spécial de La Revue de l'énergie sur l'hydrogène (hors-série d'octobre 202, p. 90).

L'électricité importée fera sans doute l'objet de contrats qui donnent à l'Allemagne l'assurance de pouvoir en disposer à la demande. Il est difficile d'anticiper ce que serait le coût de l'électricité importée selon de tels contrats. On fait donc ici l'hypothèse que *l'électricité importée* coûte aussi cher que si elle était produite en Allemagne à partir d'un gaz qui coûte 40 €/MWh (ou 80 €/MWh). Les importations coûtent alors 7 (ou 12,6) milliards d'euros soit *123 €/MWh (ou 220 €/MWh)*. Au total, les 117 TWh produits à partir d'hydrogène ou importés coûtent en moyenne 300 €/MWh (ou 340 €/MWh).

Si les exportations sont valorisées 40 €/MWh, leur produit est de 1,3 milliard d'euros par an.

Selon le coût de l'électricité importée, les dépenses totales de production d'électricité et d'hydrogène et de stockage d'électricité, nettes des exportations, sont **112,6 ou 118,1 milliards d'euros an**. Ces dépenses n'incluent pas l'hydraulique ni les dépenses de transport et de distribution, ni le stockage d'hydrogène.

Par ailleurs, il y a 36 000 éoliennes et la surface occupée par le photovoltaïque est de 5,3 millions de mètres carré.

B-2 Un jeu d'hypothèses avec 80 GW nucléaires

La consommation finale est la même que sans nucléaire : 750 TWh passant par un maximum, avant les déplacements de consommation, de 150 GW. La consommation pour produire de l'hydrogène est de 150 TWh.

La capacité nucléaire est ici de 80 GW

La production à partir d'hydraulique et de biomasse est la même que sans nucléaire.

La production à partir d'hydrogène est de 30 TWh (au lieu de 60 TWh).

Les batteries mettent à la disposition du réseau une capacité de 100 GWh (au lieu de 400 GWh).

Comme dans le scénario sans nucléaire, il y a des importations et des exportations d'électricité décarbonée entre l'Allemagne et des pays qui peuvent stocker de l'électricité dans des lacs de montagne ; les importations sont, ici aussi, supérieures aux exportations de 20 TWh. La capacité des lignes d'interconnexion est de 28 GW, les exportations sont de 29 TWh, les importations de 49 TWh.

Pour répondre à la demande, parmi le large éventail des possibilités je suppose que la capacité éolienne est de 40 GW sur terre et 38 GW en mer, et que la capacité photovoltaïque est de 75 GW.

Dans ce jeu d'hypothèses, toute la production d'hydrogène se fait « en base moins la pointe ». La capacité de l'électrolyse est de 24 GW. Elle consomme 150 TWh.

L'électrolyse s'efface totalement ou partiellement 2200 heures dans l'année ; les quantités qu'elle pourrait consommer si elle ne s'effaçait pas sont de 31 TWh.

En regardant la chronique horaire de ce qui est demandé aux moyens de flexibilité, on voit que, pour passer les « pointes », la capacité qui peut être garantie par les batteries, les Steps et les possibilités de déplacement de consommation (en tout 170 GWh) est de 25 GW.

Si la pointe de consommation apparaissait sans vent ni soleil et avec une faible production hydraulique, il manquerait 47 GW. En acceptant un très faible risque, il suffit que la capacité de production à partir de gaz et la capacité d'importation soient au total de 42 GW ; c'est 48 GW de moins que sans nucléaire.

Les capacités de production d'électricité et la capacité d'importation garantie sont en tout de 275 GW, contre 690 GW sans nucléaire.

Les possibilités de production abandonnées sont seulement de 4 TWh (au lieu de 48 TWh dans le scénario AEW).

Comme plus haut, on fera deux hypothèses sur le coût de l'électricité importée : 120 ou 220 €/MWh. Les dépenses de production et d'importation d'électricité et de production d'hydrogène sont de 80,6 ou 85,3 milliards d'euros par an ; soit environ 33 milliards de moins que sans nucléaire.

Les dépenses fixes de production d'hydrogène sont à peu près la moitié de celles du scénario sans nucléaire, soit 1,7 milliard de moins.

Les dépenses de nucléaire éolienne et photovoltaïque sont inférieures de 12,8 milliards d'euros.

Les dépenses de stockage sont divisées par trois, soit une économie de 1 milliard d'euros.

La capacité nucléaire permet d'éviter une consommation de 60 TWh d'hydrogène et aussi 50 GW de capacité garantie par des moyens de production à partir d'hydrogène et par des possibilités d'importation ; je calcule ici que les dépenses ainsi évitées sont de 17 milliards d'euros par an.

Voir en annexe

un tableau récapitulatif de la production d'électricité et d'hydrogène avec ou sans nucléaire et, sur www.hprevot.fr/allemande.html

- le tableau croisé de consommation d'énergie par type d'énergie et secteur d'utilisation
- le détail des hypothèses et résultats du système de production d'électricité et d'hydrogène sans ou avec nucléaire.

Annexe

La production d'électricité en Allemagne en 2045

Une réplique du scénario de Agora-Energiewende sans nucléaire

et une hypothèse avec 80 GW nucléaire

	Sans nucléaire	Avec 80 nucléaire GW
Consommation finale d'électricité après les pertes en ligne	750 TWh	750 TWh
consommation pour produire de l'hydrogène	150 TWh	150 TWh
dont « en base moins la pointe » / sur possibilités excédentaires	96* / 54* TWh	150 / 0 TWh
Capacité d'électrolyse	50 GW	24 GW
Balance importation-exportation	22 TWh	21 TWh
Production à partir d'énergie fossile ou importée	57 TWh*	48,9 TWh
Capacité éolienne sur terre / en mer	145 GW / 70 GW	40 GW / 38 GW
Capacité photovoltaïque	385 GW	75 GW
Production à partir de biomasse	10 TWh	10 TWh
Production à partir d'hydrogène importé	60 TWh	30 TWh
Contenance des batteries utilisées pour équilibrer le réseau électrique	400 GWh*	100 GWh
Capacité de production à partir de gaz et capacité d'import. garantie	90 GW*	42 GW
Capacité totale des moyens de production d'électricité et garants	690 GW*	275 GW
Capacité des batteries utilisées pour équilibrer fourniture et demande**	400 GWh *	100 GWh *
Ecrêtement des productions éolienne et photovoltaïque	48 TWh	4 TWh
Puissance garantie par les batteries et les Steps***	47 GW*	25 GW
Dépenses pour fournir l'électricité (production, stockage, import. et export.) et l'hydrogène produit par électrolyse		
Si l'électricité décarbonée importée coûte 120 €/MWh	112 600 M€/an*	80 650 M€/an
Si l'électricité décarbonée importée coûte 220 €/MWh	118 100 M€/an*	85 300 M€/an
Détail : dépenses de nucléaire, éolien et photovoltaïque	71 100 M€/an	58 200 M€/an
Production à partir de gaz et importations, selon le coût de l'import	34 600 ou 40 100	18 300 ou 22 900

* Les valeurs qui ne sont pas marquées d'une étoile sont celles du rapport de Agora-Energiewende reprises dans la réplique ; les valeurs marquées d'une étoile sont interpolées ou calculées par SimelSP2.

** Les batteries des véhicules sont connectées au réseau. Hypothèse : 20 kWh sur 20 millions sans nucléaire ou sur 5 millions de véhicules avec nucléaire.

*** La puissance garantie par les batteries et les Steps est évaluée au vu de la chronique horaire de ce qui est demandé aux moyens de flexibilité. Elle est *très inférieure* à la somme des puissances pouvant être délivrées par chaque moyen de stockage