

# Bilan 2021 de l'éolien en Allemagne

03/02/2022 Hartmut Lauer

Temps de lecture : 14 min



Parc Arkona en Mer Baltique (puissance électrique 385 MW), mis en service 2019/source : RWE Renewables

**Le bureau d'études Deutsche WindGuard a publié le bilan 2021 de l'éolien terrestre et en mer sur le territoire allemand /1/. Le texte ci-dessous résume les résultats les plus importants.**

**Fin 2021, la capacité raccordée au réseau atteint presque 64 GW, soit 56,1 GW sur terre (28230 éoliennes) et 7,8 GW en mer (1501 éoliennes). Selon les chiffres de Deutsche WindGuard, la production baisse de 13% par rapport à 2020 à environ 122 dont 96 TWh pour l'éolien terrestre et 26 TWh pour l'éolien en mer. Cela correspond, lissé sur l'année, à environ un cinquième de la production d'électricité totale /2/.**

**La nouvelle coalition au pouvoir outre-Rhin a l'intention de rehausser les objectifs en matière de l'énergie éolienne. D'ici 2030, il est prévu d'augmenter leur capacité à 30 GW en mer et à 100 - 130 GW sur terre en visant 2% de la surface totale de l'Allemagne requis pour cette technologie. Pour mémoire : le gouvernement sortant avait fixé les objectifs de 20 GW en mer et 71 GW sur terre à l'horizon de 2030 /3/.**

## Parc éolien terrestre

Au 31 décembre 2021, 28 230 éoliennes terrestres étaient installées en Allemagne. La capacité totale s'élève à 56,1 GW (cf. tableau 1).

	Développement brut et net au cours de l'année et puissance cumulée [MW]	Éoliennes installées, remplacées et démantelées au cours de l'année et nombre total
Développement (brut)	1.925	484
dont		
Repowering	244	64
Démantèlement	233	230
Développement (net)	1.692	254
<b>Parc terrestre en service le 31.12.2021</b>	<b>56.130</b>	<b>28.230</b>

Tableau 1 : chiffres du parc éolien terrestre allemand au 31 décembre 2021 selon /1/

Au cours de l'année 1925 MW ont été raccordés au réseau, soit 484 éoliennes y compris le repowering (remplacement d'anciennes machines par des turbines plus puissantes et plus productives) de 64 éoliennes (244 MW). En tenant compte du démantèlement de 230 éoliennes (233 MW), l'augmentation nette s'élève à 254 éoliennes (1692 MW). Cela signifie une légère amélioration par rapport au déploiement en 2020 (environ 1200 MW), cf. figure 1.

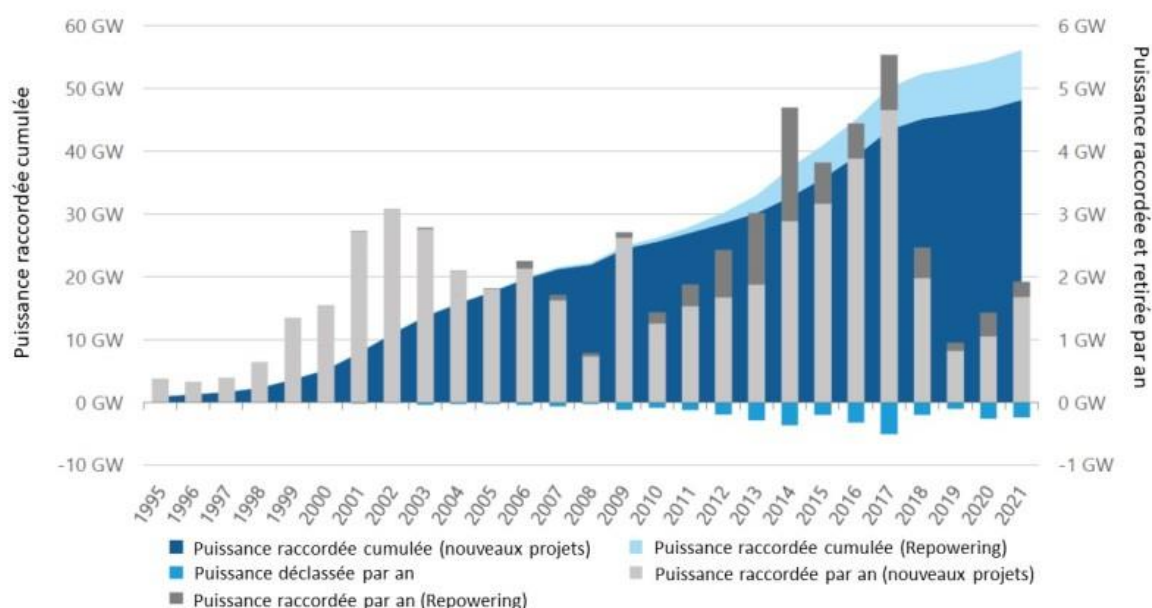


Figure 1 : évolution de la puissance raccordée des éoliennes terrestres sur le territoire allemand selon /1/

## Déconstruction et Repowering

Parmi les 230 éoliennes mises hors service en 2021, 155 éoliennes étaient en fonctionnement depuis plus de 20 ans.

Toutes les éoliennes mises en service en 2000 ou avant ont cessé de bénéficier à partir de 2021 du mécanisme de soutien prévu pendant 20 ans selon la Loi sur les Énergies Renouvelables (EEG), soit environ 4730 éoliennes (~ 3600

MW) selon /3/. Fin 2021, 4339 éoliennes (3.286 MW) concernées étaient encore en service /1/. En raison de la flambée du prix de l'électricité sur le marché de gros en 2021, la sortie du mécanisme de soutien n'a pas encore provoqué une grande vague de déconstruction. Un grand nombre de ces anciennes installations a pu continuer à être exploité de façon rentable jusqu'à présent, hormis celles mises hors service en raison de défauts techniques, de l'expiration du permis d'exploitation ou dans le cadre d'un remplacement (repowering)

A partir de 2022, le mécanisme de soutien prend fin pour 1826 éoliennes (2341 MW) supplémentaires, mises en service en 2001 /1/. Les exploitants sont donc confrontés à la question de la rentabilité de l'exploitation d'un point de vue économique et technique. La situation en matière d'autorisation joue également un rôle, car les autorisations étaient initialement conçues pour une période d'exploitation de 20 ans.

Notamment le remplacement (repowering) des éoliennes les plus anciennes rencontre de nombreux obstacles administratifs. En 2021, seulement 64 éoliennes (244 MW) ont été remplacées dans le cadre du repowering, soit 13% de la capacité totale installée en 2021. La nouvelle coalition au pouvoir a l'intention de simplifier les procédures pour le remplacement (repowering) des anciens parcs éoliens.

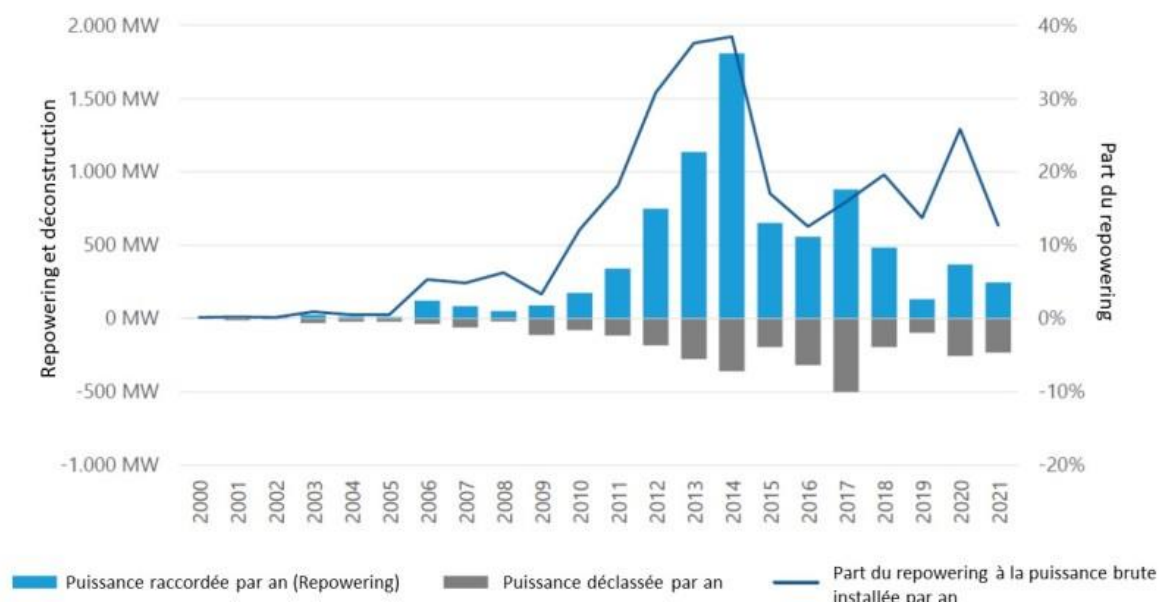


Figure 2 : évolution de la puissance raccordée par an (en absolu et en pourcentage de la puissance brute totale installée par an) dans le cadre du repowering ainsi que de la puissance déclassée par an

## Caractéristiques d'une éolienne terrestre en 2021

La technologie des éoliennes ne cesse d'évoluer, cf. tableau 2. En moyenne, une éolienne installée en 2021 a une puissance nominale de 3 978 kW, soit 17 % de plus qu'en 2020. La taille des installations (diamètre du rotor, hauteur du moyeu et hauteur totale) a également augmenté.

Caractéristiques moyennes par éolienne	Éoliennes mises en service en 2021	Évolution des caractéristiques par rapport à l'année précédente
Puissance unitaire	3978 kW	+ 17%
Diamètre du rotor	133 m	+ 10%
Hauteur du moyeu	140 m	+ 4%
Hauteur totale	206 m	+ 6%

Tableau 2 : caractéristiques moyennes d'une éolienne terrestre nouvellement installée en 2021 selon /1/

## Répartition régionale des éoliennes terrestres

Le développement des éoliennes terrestres est assez hétérogène en fonction des régions. La répartition régionale montre toujours une nette disparité nord-sud en 2021 (cf. figure 3). Les régions du nord et du centre (Basse-Saxe, Brandebourg, Schleswig-Holstein, Rhénanie-du-Nord-Westphalie, Saxe-Anhalt et Mecklembourg-Poméranie-Occidentale) représentent environ 73 % de la capacité totale raccordée en Allemagne. La Basse-Saxe abrite avec 21% la plus grande capacité installée. Le gisement (puissance installée par km<sup>2</sup> de la superficie du Land) le plus élevé se trouve en Schleswig-Holstein.

La Saxe, le Bade-Wurtemberg, la Bavière et Berlin contribuent le moins (gisement inférieur à 100 kW/km<sup>2</sup>). Ces régions disposant de 35% de la surface du territoire allemand ne contribuent qu'avec 10% à la capacité totale d'éoliennes installées.

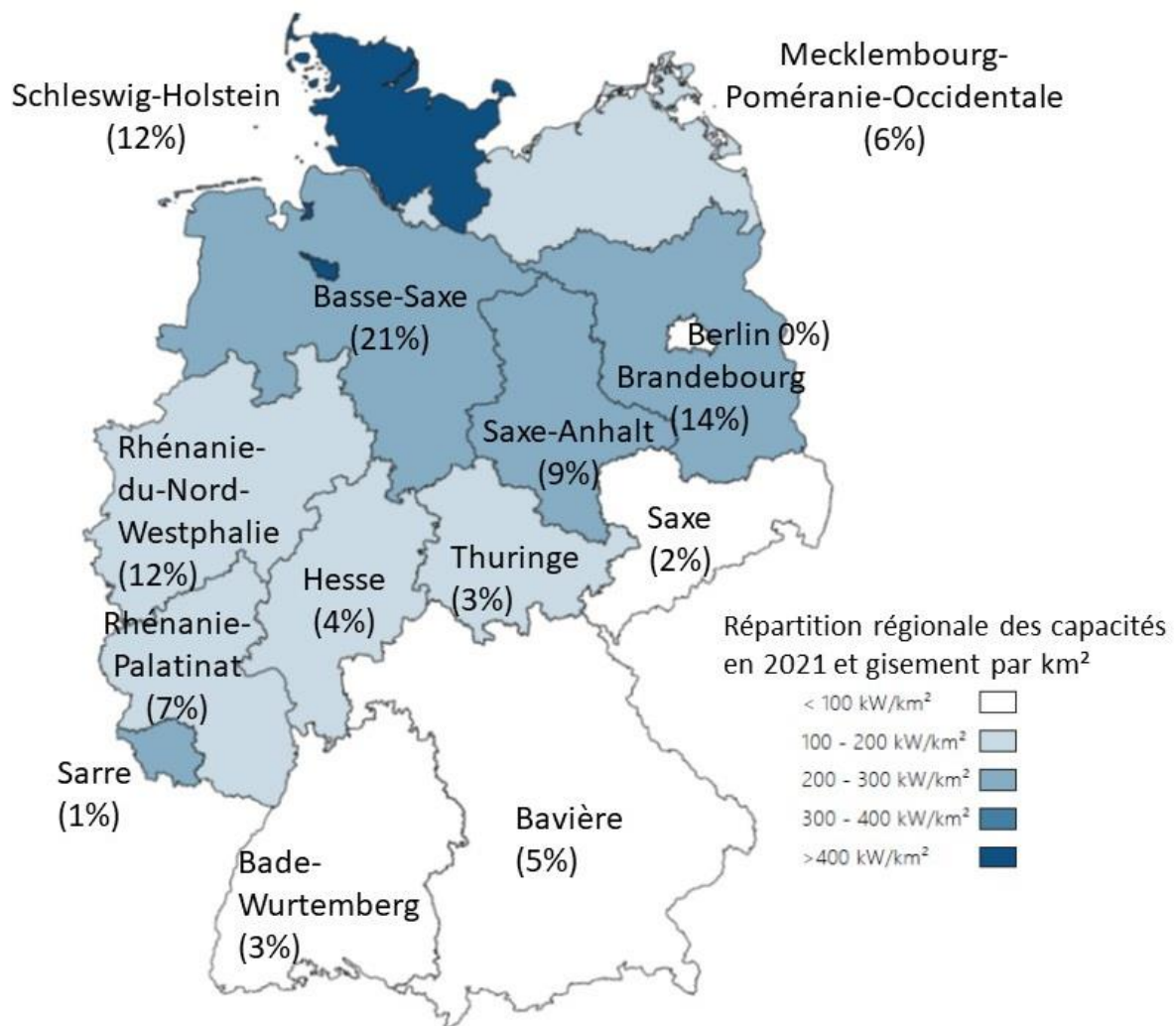


Figure 3 : répartition régionale des capacités et gisement par km<sup>2</sup> des éoliennes terrestres en 2021 selon /1/

## Production en 2021

Selon les chiffres de Deutsche WindGuard /1/, les éoliennes terrestres ont produit environ 96 TWh en 2021 (cf. figure 4). Cela correspond à une baisse de 14 % par rapport à 2020 du fait de conditions météorologiques défavorables. En particulier le premier trimestre 2021 a connu une période assez peu venteuse /2/.

Leur contribution à la production brute d'électricité du pays s'élève à un peu plus de 16%. Le facteur de charge est estimé à environ 20 %, soit environ 1745 heures équivalent pleine puissance (hepp) sous l'hypothèse d'une puissance moyenne de 55 GW au réseau. Il s'agit du plus mauvais résultat depuis 2016, cf. /4/.

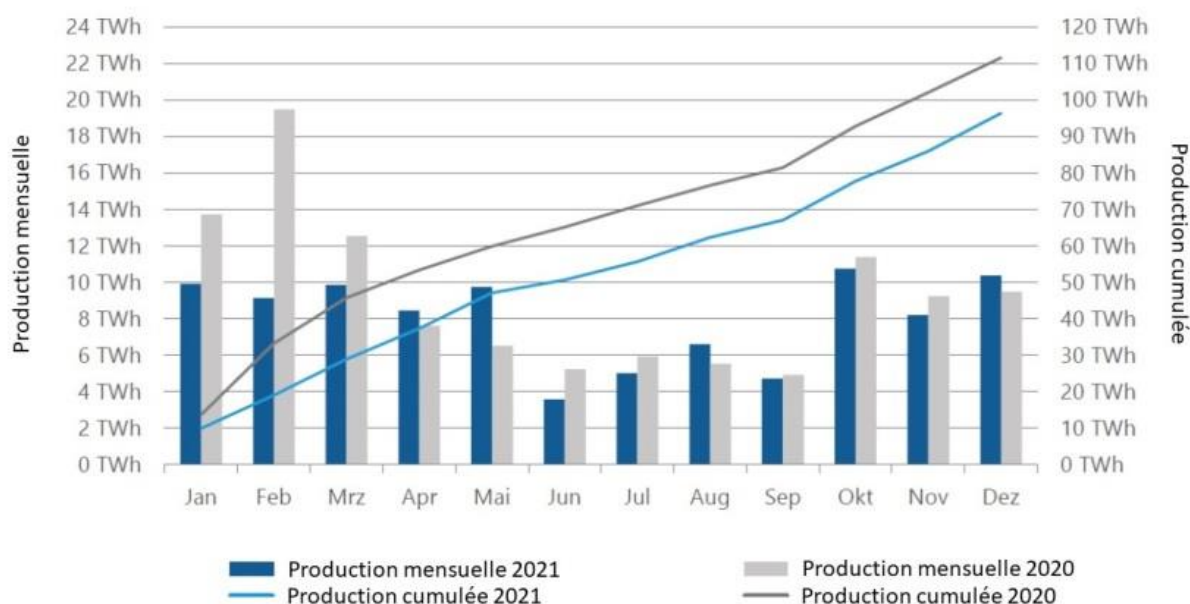


Figure 4 : production mensuelle et cumulée des éoliennes terrestres en 2020 et 2021

## Résultats des appels d'offres 2021 et taux de réalisation des volumes adjudiqués

Trois appels d'offres ont été réalisés en 2021 /1/. Le volume total appelé a été de 4235 MW et le volume finalement retenu de 3296 MW. Seul l'appel d'offres de septembre 2021 a été intégralement souscrit. La limite maximale de la rémunération de référence pour des appels d'offres était de 6,0 ct/kWh. Le montant d'adjudication moyen pondéré en fonction du volume de 5,88 ct/kWh, n'est que légèrement inférieur.

Après l'appel d'offres l'adjudicataire dispose de 24 mois pour la mise en service, entre 25 et 30 mois avec pénalité : au-delà l'adjudication est annulée. Une prolongation du délai peut être demandée dans des cas exceptionnels, par exemple en cas de recours au tribunal contre l'autorisation.

L'association « Fachagentur Wind an Land » publie régulièrement un rapport sur la situation de réalisation des projets /7/. Le tableau 3 montre le taux de réalisation des volumes adjudiqués depuis 2017. Pour les éoliennes terrestres réalisées jusqu'en 2021, le délai entre l'adjudication et la mise en service s'élève à environ 2 ans en moyenne. Environ 20% de projets adjudiqués font l'objet d'une plainte ce qui retarde considérablement la réalisation ou conduit à l'abandon /8/.

La situation d'appels d'offres en 2017 est particulière. Plus de 90% du volume appelé ont été accordés à des sociétés détenues par des citoyens (Bürgerenergiegesellschaft), à l'époque dispensées d'autorisation préalable

selon la loi fédérale allemande de protection contre les nuisances environnementales /9/. Ce fait a finalement conduit à un retard considérable du déploiement ainsi qu'à l'abandon des projets adjudiqués.

Appels d'offres	Volume réalisé	Taux de réalisation du volume adjudiqué
2017	297 MW	11%
2018	1862 MW	79%
2019	1486 MW	80%
2020	593 MW	22%
2021	58 MW	3%

Tableau 3 : taux de réalisation des volumes adjudiqués depuis 2017

Le nouveau gouvernement veut accélérer les procédures d'approbation des éoliennes terrestres, actuellement beaucoup trop longues /5/. Il est temporairement prévu de classer leur développement comme « intérêt public majeur », afin d'être réévalué par rapport à d'autres enjeux, même celui de la protection de la forêt ou des espèces.

### **Prévisions de développement et objectif politique à l'horizon de 2030**

Le gouvernement sortant avait fixé une capacité de 71 GW à l'horizon de 2030 dans la loi sur les énergies renouvelables, entrée en vigueur début 2021. Aucune valeur cible n'est fixée dans le contrat de coalition du nouveau gouvernement. En revanche, il est prévu de requérir 2% de la surface totale de l'Allemagne pour cette énergie /5/.

Selon un rapport de l'Agence Fédérale de l'Environnement (Umweltbundesamt – UBA) une surface de 0,9 % (~ 3100 km<sup>2</sup>) a été requise fin 2017, dont 58% (~ 1800 km<sup>2</sup>) ont été occupés par les 28700 éoliennes (~ 50 GW) installées à l'époque (/10/, /11/), soit ~ 15 éoliennes par km<sup>2</sup>. Sur cette base, il est possible d'estimer un corridor entre 100 et 130 GW qui pourrait potentiellement être installé sur une surface de 2% requise d'ici 2030 suivant le contrat de coalition.

Aucune indication n'est faite sur les distances d'éloignement entre un mat éolien et une habitation. Ce paramètre essentiel pourrait limiter le déploiement d'éoliennes ou conduire à l'augmentation de la surface réellement nécessaire pour le doublement de la capacité actuelle à l'horizon de 2030.

A titre d'exemple, la distance de 10H (distance d'une habitation au moins égale à 10 fois la hauteur totale d'une éolienne) imposée en Bavière réduit considérablement le nombre d'éoliennes par km<sup>2</sup>. Même sous l'hypothèse de moins de 28000 éoliennes installées à l'horizon de 2030 en raison de l'augmentation de la puissance unitaire (cf. tableau 2), l'emprise au sol ne diminuera pas beaucoup. Cela est dû au fait que l'espace nécessaire pour échapper aux turbulences entre les machines augmentera avec la puissance.

Pour atteindre l'objectif de 2030 il faudrait un ajout annuel moyen de 8 GW entre 2022 et 2030. En revanche, sur la base du rythme de réalisation actuel et du nombre d'installations déjà adjudiquées mais pas encore réalisées, l'ajout de capacité supplémentaire en 2022 ne devrait pas dépasser les 3 GW au mieux /1/. Les mesures annoncées par le nouveau gouvernement facilitant le développement des éoliennes terrestres ne produiront leurs effets qu'avec un certain retard. De ce fait un ajout proche de 10 GW/an sera vraisemblablement nécessaire à partir du milieu des années vingt, cf. figure 5.

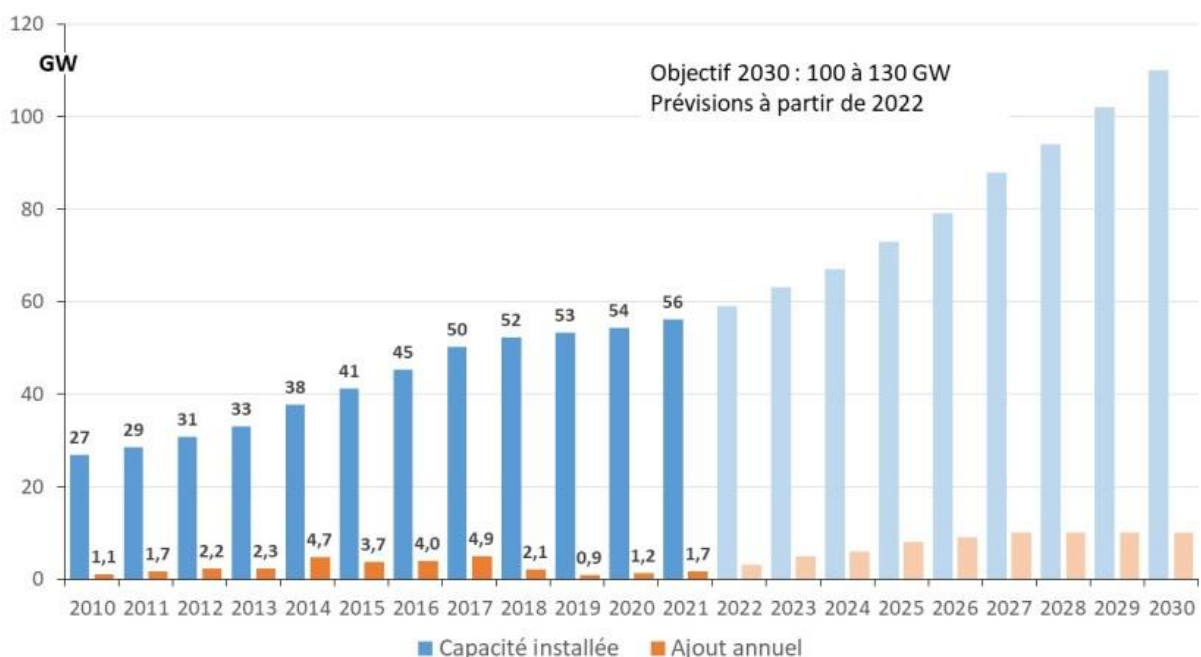


Figure 5 : capacité installée et ajout annuel (prévisions à partir de 2022 selon l'objectif politique à l'horizon de 2030)

En outre, une capacité de presque 25 GW d'éolien terrestre sortira du mécanisme de soutien jusqu'à fin 2030, selon une information du gouvernement au parlement allemand /12/. Il est certes difficile de prévoir combien de temps la poursuite de l'exploitation de ces éoliennes sera rentable d'un point de vue économique et technique. En tenant compte du démantèlement des anciennes éoliennes au cours des prochaines années, l'atteinte de l'objectif de 2030 nécessite un effort supplémentaire au niveau du rythme de réalisation des nouveaux projets.



## Parc éolien en mer

Au 31 décembre 2021, une capacité de 7 784 MW était en exploitation, soit 1501 éoliennes. Aucune nouvelle éolienne n'a été raccordée au réseau en 2021. Une capacité de 24 MW a été rajoutée par suite de la mise à niveau de 132 éoliennes existantes (cf. tableau 4).

	Développement de la puissance installée au cours de l'année et puissance cumulée [MW]	Éoliennes installées au cours de l'année, mises à niveau et nombre total
Nouvelles éoliennes mises en service	0	0
Upgrading d'éoliennes existantes	24	132
Nouvelles éoliennes pas encore connectées au réseau	0	0
Fondations de nouvelles installations (sans machines)		0
<b>Parc en mer en service le 31.12.2021</b>	<b>7.794</b>	<b>1.501</b>

Tableau 4 : Chiffres du parc éolien en mer au 31 décembre 2021 selon /1/  
Par voie d'appels d'offres, 4,1 GW ont été déjà adjudiqués pour une réalisation entre 2022 et 2026, de sorte que la capacité pourra être portée à près de 12 GW d'ici fin 2026 (cf. figure 6).

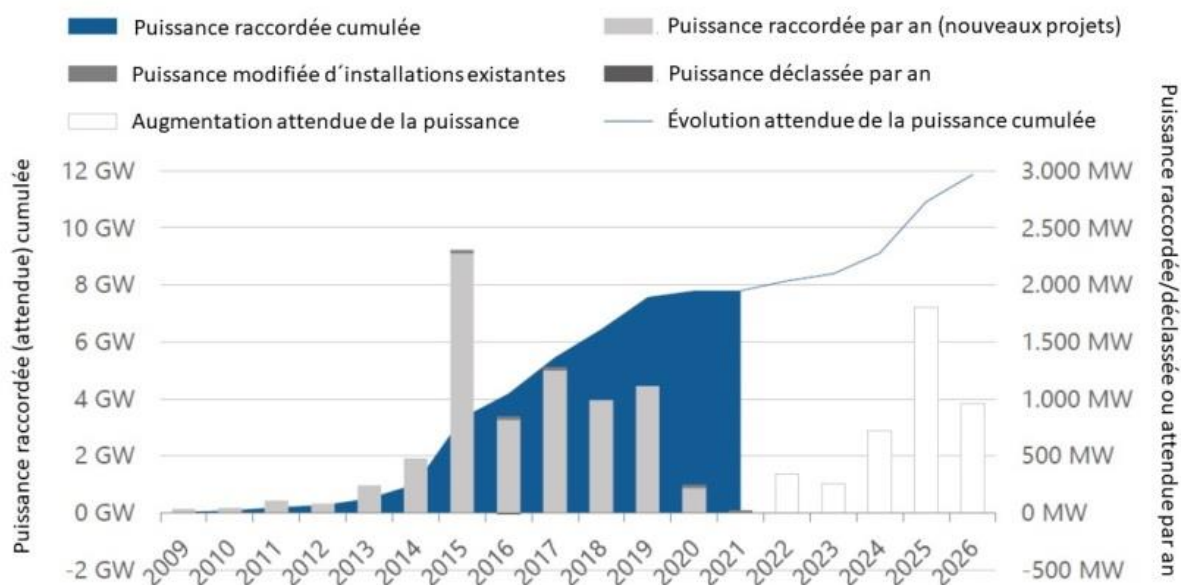


Figure 6 : évolution de la puissance des éoliennes en mer raccordées sur le territoire allemand et prévisions pour 2026 selon /1/

### Caractéristiques des éoliennes en mer installées

Les éoliennes en mer installées en Allemagne jusqu'à fin 2021 ont une puissance unitaire de près de 5,2 MW en moyenne. Dans la prochaine phase de

développement (jusqu'en 2025), une augmentation de la puissance unitaire jusqu'à 15 MW est prévue.

En moyenne, les éoliennes installées d'ici fin 2021 ont une profondeur d'eau de 30 m et une distance de la côte de 74 km. Les installations prévues jusqu'en 2025 ne diffèrent guère de celles existantes, cf. tableau 5. Les parcs éoliens les plus éloignés de la côte se trouvent à plus de 120 km et des profondeurs d'eau allant jusqu'à 44 mètres.

Les fondations dites à « monopieu » restent la technologie la plus utilisée en Allemagne. Les éoliennes qui seront mises en service jusqu'en 2025 utiliseront aussi ce type de fondation.

Les caractéristiques des éoliennes en mer sont résumées dans le tableau 5.

Caractéristiques moyennes par éolienne	Éoliennes en service fin 2021	Éoliennes mises en service jusqu'en 2025
Puissance unitaire	5 192 kW	11 177 kW
Diamètre moyen du rotor	133 m	196 m
Hauteur moyenne du moyeu	95 m	127 m
Gisement	372 W/m <sup>2</sup>	370 W/m <sup>2</sup>
Profondeur d'eau	30 m	35 m
Distance de la côte	74 km	76 km

Tableau 5 : caractéristiques des éoliennes en mer en Allemagne selon /1/

## **Répartition des éoliennes en Mer du Nord et Mer Baltique sur le territoire allemand**

Les éoliennes en mer sont réparties sur la Mer du Nord et la Mer Baltique. Fin 2021, la Mer du Nord dispose de 6698 MW (1269 éoliennes) et la Mer Baltique de 1096 MW (232 éoliennes).

Dans le cadre des appels d'offres réalisés, un volume de 3042 MW a été retenu en Mer du Nord et de 1033 MW en Mer Baltique. La mise en service de ces projets est prévue entre 2022 et 2026.



Territoire allemand en bleu foncé  
 Éoliennes en vert = en service; en gris et rouge = mise en service prévue entre 2022 et 2025 (en rouge = décision finale d'investissement prise)

Figure 7 : Répartition des éoliennes sur la Mer du Nord et la Mer Baltique selon /1/

## Production en 2021

Selon les chiffres de Deutsche WindGuard /1/, la production s'élève à 26,1 TWh en 2021. Cela correspond à une baisse de 10% par rapport à 2020 en raison de conditions météorologiques moins favorables et notamment l'absence de tempêtes hivernales (cf. figure 8).

Sous l'hypothèse d'une puissance moyenne de 7,79 GW au réseau, le facteur de charge est estimé à 38% soit environ 3350 heures équivalent pleine puissance (hepp).

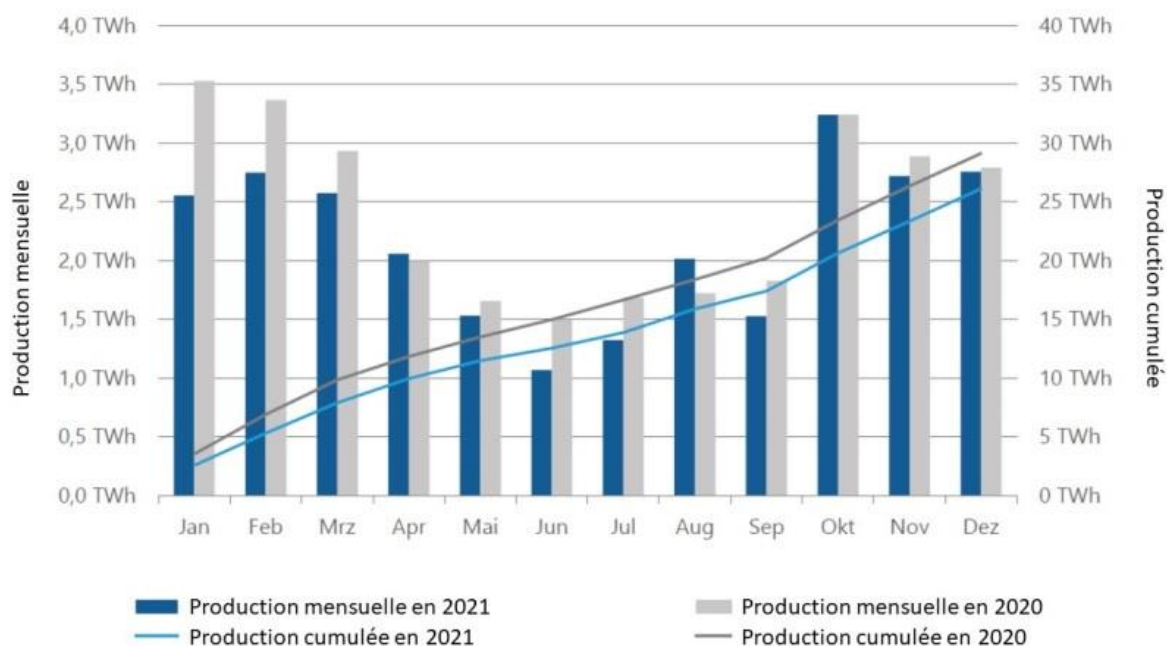


Figure 8 : production mensuelle et cumulée des éoliennes en mer en 2020 et 2021 selon /1/

## Résultat de l'appel d'offres 2021

L'Agence Fédérale des Réseaux a publié le 9 septembre 2021 le résultat de l'appel d'offres 2021 /13/. Un volume de 958 MW a été appelé, réparti sur trois zones. Un volume de 658 MW a été attribué en Mer du Nord sur 2 zones et un volume de 300 MW en Mer Baltique sur une zone. Les énergéticiens retenus se passeront totalement du soutien. Deux zones ont même fait l'objet de plusieurs offres à 0 ct/kWh, c'est pour cela qu'un tirage au sort, prévu par la Loi dans ce cas, a été appliqué.

L'adjudication s'accompagne du droit à un raccordement au réseau – financé par le consommateur d'électricité via le tarif d'utilisation des réseaux – et à la possibilité d'exploiter le parc pendant au moins 25 ans.

## Prévisions de développement et objectif politique à l'horizon de 2030, 2035 et 2045

Selon la nouvelle coalition au pouvoir /5/, /6/, il est prévu de rehausser d'ici 2030 la capacité à 30 GW contre 20 GW auparavant. Une capacité de 40 GW est visée d'ici 2035 et au moins 70 GW d'ici 2045.

En plus des 7,8 GW en service, un volume total de 4,1 GW a été adjudiqué par voie d'appels d'offres pour une réalisation entre 2022 et 2026 (pour 2,2 GW en stade de planification avancée, la décision finale d'investissement a été prise). La réalisation de 18,1 GW supplémentaires sera nécessaire pour atteindre l'objectif de 2030. Les appels d'offres actuellement prévus

comportent un volume appelé de 8,7 GW. Le volume appelé doit donc être rehaussé de 9,4 GW, cf. figure 9.

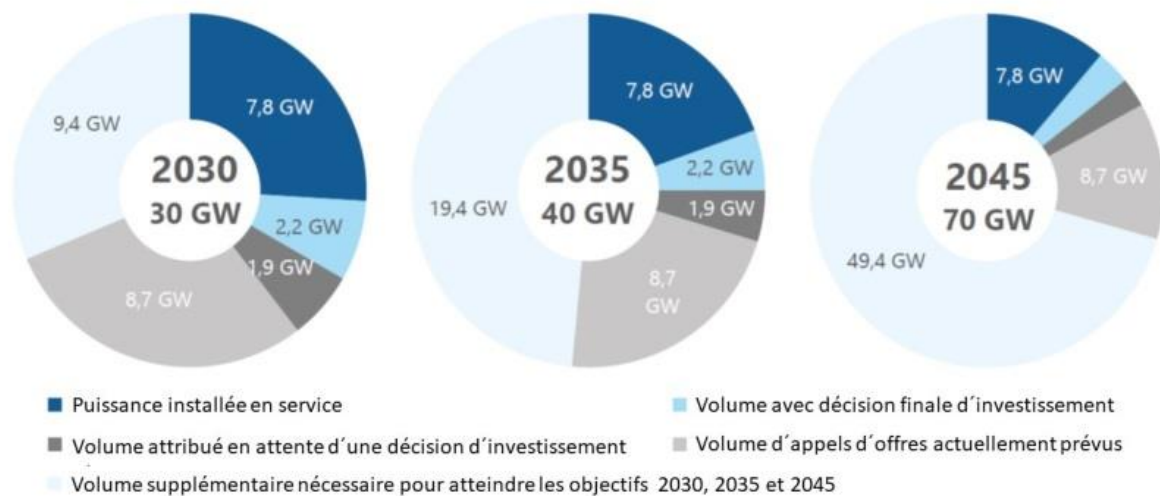


Figure 9 : éoliennes en mer en service, volumes attribués/appelés et prévisions à l'horizon de 2030, 2035 et 2045 selon /1/  
 L'objectif de 70 GW d'ici 2045 requiert le développement de nouvelles zones d'exploitation en mer. Cependant la superficie à disposition en Mer du Nord et en Mer Baltique pour la mise en place des éoliennes est limitée, en tenant compte des réserves naturelles et des routes maritimes. Selon les études actuelles, une capacité éolienne en mer supérieure à 40 GW serait possible mais une densité de puissance éolienne trop élevée pourrait baisser sensiblement le facteur de charge à cause de l'effet de sillage (turbulences entre les machines) /14/. La capacité installée n'est donc pas le seul facteur déterminant, mais aussi la productivité obtenue.

## Références

/1/ **Deutsche WindGuard (2022)** Windenergie-Statistik: Jahr 2021, en ligne : <https://www.windguard.de/jahr-2021.html>

/2/ **Allemagne-Energies (2022)** Allemagne : les chiffres clés de l'énergie en 2021, en ligne : <https://allemagne-energies.com/2022/01/16/allemagne-les-chiffres-cles-de-lenergie-en-2021/>

/3/ **FA Wind (2021)** Weiterbetrieb von Windenergieanlagen – Was gilt es zu beachten ? En ligne : [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Planung/FA\\_Wind\\_Kurzinformation\\_Weiterbetrieb\\_01-2021.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Planung/FA_Wind_Kurzinformation_Weiterbetrieb_01-2021.pdf)

/4/ **Deutsche Windguard (2020)** Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land, en ligne : [https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto\\_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2020/Volllaststunden%20von%20Windenergieanlagen%20an%20Land%202020.pdf](https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2020/Volllaststunden%20von%20Windenergieanlagen%20an%20Land%202020.pdf)

**/5/ Allemagne-Energies (2021)** Le nouveau gouvernement allemand veut accélérer la transition énergétique, en ligne : <https://allemagne-energies.com/2021/12/08/le-nouveau-gouvernement-allemand-veut-acceler-la-transition-energetique/>

**/6/ BMWK (2022)** Habeck legt Eröffnungsbilanz Klimaschutz vor „Müssen Geschwindigkeit der Emissionsminderung verdreifachen.“ Communiqué de presse du 11 janvier 2022, en ligne : <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/01/20220111-habeck-legt-eroeffnungsbilanz-klimaschutz-vor.html>

**/7/ FA Wind (2021)** Ausbausituation der Windenergie an Land im Herbst 2021, en ligne : [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA\\_Wind\\_Zubaanalyse\\_Wind-an-Land\\_Herbst\\_2021.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA_Wind_Zubaanalyse_Wind-an-Land_Herbst_2021.pdf)

**/8/ FA Wind (2019)** Hemmnisse beim Ausbau der Windenergie in Deutschland, en ligne : [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA\\_Wind\\_Branchenumfrage\\_beklagte\\_WEA\\_Hemmnisse\\_DVOR\\_und\\_Militaer\\_07-2019.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA_Wind_Branchenumfrage_beklagte_WEA_Hemmnisse_DVOR_und_Militaer_07-2019.pdf)

**/9/ Allemagne-Energie (2018)** Retour d'expérience des appels d'offres de l'éolien terrestre en 2017 (Mise à jour du 8 juin 2018), en ligne : <https://allemagne-energies.com/2018/02/22/retour-dexperience-des-appels-doffres-de-leolien-terrestre-en-2017/>

**/10/ Umweltbundesamt (2019)** Flächenanalyse Windenergie an Land, en ligne : <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-kurzmittelfristigen-verfuegbarkeit-von>

**/11/ Deutsche WindGuard (2018)** Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland 2017, en ligne : <https://www.windguard.de/windenergie-statistik-jahr-2017.html>

**/12/ Deutscher Bundestag (2020)** Rückbau und Entsorgung von Windrädern. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der AfD. Bundestags-Drucksache 19/17209 vom 14.02.2020. Deutscher Bundestag. En ligne : <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/172/1917209.pdf>.

**/13/ Bundesnetzagentur (2021)** Ergebnisse der Ausschreibungen für Offshore-Windenergie, Communiqué de presse du 9 septembre 2021, en ligne : [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20210909\\_Offshore.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20210909_Offshore.html)

**/14/ Allemagne-Energies (2020)** Le développement de l'éolien maritime dans la partie allemande de la Mer du Nord tributaire de l'effet de sillage, en ligne : <https://allemagne-energies.com/2020/04/17/le-developpement-de-leolien-maritime-dans-la-partie-allemande-de-la-mer-du-nord-tributaire-de-leffet-de-sillage/>