

Le modèle de rendement de référence pour l'éolien terrestre :

Outil de répartition des projets sur le territoire allemand

Septembre 2018

Auteur : Markus Wagenhäuser, OFATE
Contact: markus.wagenhauser@developpement-durable.gouv.fr

Veillez trouver le disclaimer sur la dernière page du document.

Résumé

Le modèle de rendement de référence (*Referenzertragsmodell*), a été introduit pour permettre une répartition équilibrée des projets sur l'ensemble du territoire allemand. Il détermine des tarifs différenciés pour les centrales éoliennes terrestres en Allemagne. La motivation principale est de soulager les régions qui ont connu un fort développement de l'éolien ces dernières années ainsi que les réseaux qui absorbent l'électricité générée dans ces régions.

Avec le modèle de rendement de référence, les exploitants d'installations situées dans des régions avec un potentiel éolien plus faible reçoivent ainsi un tarif plus élevé par kilowattheure d'électricité produite que les projets sur des sites très ventés.

Ce document présente les deux variantes du modèle : le modèle à niveau unique introduit par la loi EEG 2017 et le modèle à deux niveaux utilisé auparavant. Une comparaison de la répartition des centrales sur le territoire allemand avec les deux approches montre que le modèle à deux niveaux a permis une certaine répartition. Cependant, suite à l'introduction des appels d'offres en 2017 et le passage à un seul niveau, le développement des projets dans le sud de l'Allemagne a considérablement baissé.

Soutenu par :



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Soutenu par :



I. Contexte et objectifs

Le modèle de rendement de référence (Referenzertragsmodell), utilisé pour déterminer les tarifs des centrales éoliennes terrestres, est introduit avec l'adoption de la loi sur les énergies renouvelables, en 2000 (*Erneuerbare-Energien Gesetz*, EEG). Les exploitants d'installations situées dans des régions avec un potentiel éolien plus faible reçoivent un tarif plus élevé par kilowattheure d'électricité produite. Le modèle vise à permettre une répartition équilibrée des projets sur l'ensemble du territoire allemand et à soulager les régions qui ont vu un fort développement de l'éolien. Au cours de ces dernières années, la coordination du développement des capacités de production d'électricité éolienne avec celle des infrastructures de transport et de distribution est également devenue un sujet de plus en plus crucial pour le succès de la transition énergétique allemande. Elle peut théoriquement être facilitée par une meilleure répartition des éoliennes terrestres.

Comme illustré dans la Figure 1 ci-dessous, le modèle à niveau unique remplace celui à deux niveaux pour les installations participant aux appels d'offres, ce qui représente la grande majorité des installations. Le modèle à deux niveaux est désormais uniquement valable pour des centrales de petite taille et des installations transitoires (*Übergangsanlagen*) sous certaines conditions (§22, 46, 46a loi EEG 2017), notamment lors d'un raccordement au réseau avant le 1 janvier 2019.

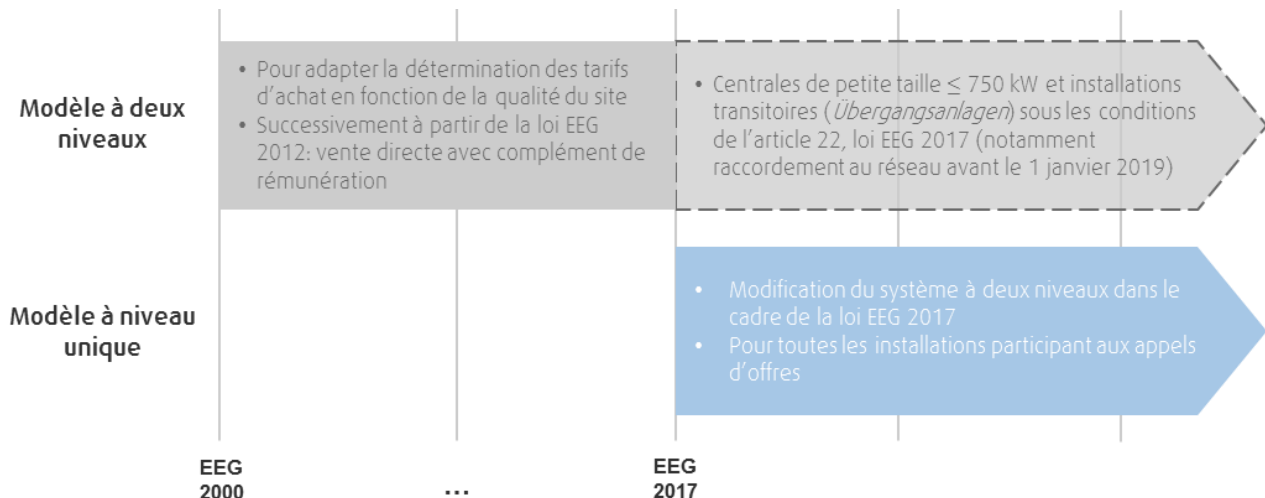


Figure 1 – Développement de l'application du modèle de rendement de référence

Source: Présentation OFATE d'après les lois mentionnées.

Dans ce mémo, suivant un ordre non-chronologique, le régime de la loi EEG 2017 est présenté dans un premier temps pour des raisons d'actualités avant d'expliquer le modèle à deux niveaux (voir [paragraphe V](#), pour plus de détails).

II. Le modèle à niveau unique de la loi EEG 2017

Dans le cadre de l'adoption de la loi EEG 2017¹ entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2017 et l'introduction des appels d'offres, le modèle de rendement de référence a été profondément modifié. Les autorités ont introduit un modèle à niveau unique avec lequel a été mis à jour le calcul relatif au site référentiel (voir [paragraphe III](#)). Il simplifie la détermination des tarifs respectifs et leur comparaison (article 36h, loi EEG 2017).

¹ Voir le texte de la loi EEG 2017 ([Lien](#), en allemand) et un mémo de l'OFATE sur les points clés de la législation publié en juin 2016 ([Lien](#) vers le mémo).

Le modèle permet de corriger à la hausse ou à la baisse la valeur de référence accordée aux projets lauréats des appels d'offres selon les zones d'implantation des projets et leurs caractéristiques. Ceci se fait à l'aide d'un coefficient de correction qui dépend de la qualité du site. Le niveau du soutien pour les projets éoliens terrestres est défini par une multiplication du coefficient de correction par le prix proposé lors de l'appel d'offres (*Zuschlagswert*). Cette valeur est désignée comme la valeur de référence (*anzulegender Wert*).

Les différents coefficients de qualité du site et les coefficients de correction correspondants sont représentés ci-dessous avec des exemples de calculs de la valeur de référence pour différentes qualités du site (cf. Tableau 1). Pour une qualité du site inférieure ou égale à 70%, le coefficient de correction est fixé à 1,29. En outre, le coefficient de correction est fixé à une valeur constante de 0,79 pour des qualités du site de 150% et au-delà. Dans les exemples de calcul, nous assumons que les prix proposés lors des appels d'offres sont de 50 €/MWh, 55 €/MWh et 60 €/MWh. Les résultats présentent les valeurs de référence en fonction de la qualité du site de 60% à 160%.

Coefficient de qualité du site	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	160%
Coefficient de correction	1,29	1,29	1,16	1,07	1,00	0,94	0,89	0,85	0,81	0,79	0,79

Valeur de référence [€/MWh]					Prix de l'offre retenue [€/MWh]													
	60%	70%	80%	90%	50	55	60	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	160%
	64,5	64,5	58,0	53,5	50	55	60	47,0	44,5	42,5	40,5	39,5	39,5					
	71,0	71,0	63,8	5,89	55	60		51,7	49,0	46,8	44,6	43,5	43,5					
	77,4	77,4	69,6	64,2	60			56,4	53,4	51,0	48,6	47,4	47,4					

Tableau 1 – Données pour le calcul de la valeur de référence avec exemples de calcul
Source: BMWi, Fachagentur Windenergie an Land, présentation OFATE.

La Figure 2 ci-dessous illustre le coefficient de correction applicable en fonction du coefficient de qualité du site, selon le modèle à niveau unique.

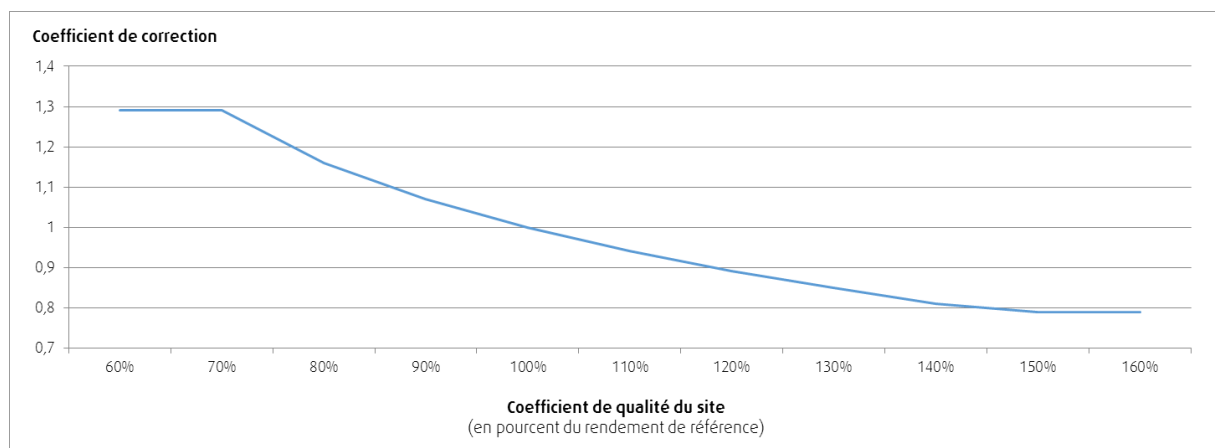


Figure 2 – Coefficients de correction en fonction du coefficient de qualité du site (Modèle à niveau unique)
Source: BMWi, présentation OFATE.

Pour les premiers appels d'offres en 2017, la valeur de référence a été plafonnée à 70 €/MWh pour un rendement correspondant à 100% au rendement référentiel (la valeur de référence plafonnée est de 63 €/MWh en 2018).²

² Consultez cette [note de synthèse de l'OFATE](#) pour plus de détails sur les modalités de la vente directe des énergies renouvelables sur la bourse de l'électricité.



III. Calcul de la valeur de référence entre les valeurs de base

Selon le paragraphe 36h alinéa 1 de la loi EEG 2017, les coefficients de correction sont déterminés moyennant une interpolation linéaire entre deux valeurs de base selon la formule de calcul présentée ci-dessous :

$$\text{Coefficient de Correction}_{cible} = CC_{gauche} + \frac{CC_{droite} - CC_{gauche}}{CQ_{droite} - CQ_{gauche}} * (CQ_{cible} - CQ_{gauche})$$

Commentaires :

« CC » signifie « coefficient de correction » ; « CQ » signifie « coefficient de qualité du site » ; « cible » désigne le coefficient de qualité du site pour lequel le coefficient de correction est recherché. Les désignations « gauche » et « droite » se rapportent aux deux valeurs de référence entre lesquelles se trouve le coefficient de correction recherché.

Exemple de calcul:

Pour un parc éolien construit sur un site avec un coefficient de qualité de 85% (déterminé par des études de site), nous calculons le coefficient de correction pour déterminer la valeur de référence pour ce projet. Nous assumons alors que ce parc a été lauréat à un appel d'offre avec une offre de 60 €/MWh.

Dans un premier temps, nous utilisons la formule de calcul pour déterminer le coefficient de correction relatif à la qualité du site, en occurrence 85 % :

$$CC_{85\%} = CC_{80\%} + \frac{CC_{90\%} - CC_{80\%}}{FQS_{90\%} - FQS_{80\%}} * (FQS_{85\%} - FQS_{80\%})$$

$$FC_{85\%} = 1,16 + \frac{1,07 - 1,16}{0,9 - 0,8} * (0,85 - 0,8) = 1,115$$

Le coefficient de correction déterminé est dans un second temps multiplié par l'offre de 60 €/MWh, Par conséquent, l'exploitant bénéficiera d'une valeur de référence de 60 €/MWh * 1,115 = 66,90 €/MWh.

IV. Détermination de la qualité du site

Le coefficient de qualité du site représente le rapport entre le rendement du site d'une installation (déterminé par des études de site) et le rendement de référence d'une installation. La qualité du site d'un parc éolien selon le modèle de rendement de référence varie selon la technologie de l'installation et la hauteur de moyeu. Le rendement de référence est une quantité d'électricité théorique calculée pour un type d'éolienne donné sur un site fictif. Établi par des institutions certifiées, le rendement de référence est calculé pour une période de 5 ans en kWh. Le calcul est réalisé à partir de la mesure de la courbe de puissance du type d'éolienne. Selon la loi EEG 2017, les opérateurs sont obligés de contrôler la qualité du site après une période de fonctionnement de cinq, de dix et de quinze ans. Afin de comparer le rendement du site avec le rendement de référence, une vitesse de vent moyenne correspondant à la hauteur de moyeu du site est requise. Elle est déterminée selon la loi de puissance :

$$\bar{v}_2 = v_1 * \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha$$

Dans le modèle de rendement de référence à niveau unique, une vitesse de vent moyenne de 6,45 m/s (v_1) à 100 m de hauteur (h_1) est assumée. Le coefficient de vent est fixé à $\alpha=0,25$. Pour calculer la vitesse de vent moyenne sur le site (v_2), la hauteur de moyeu (h_2) pour ce projet est appliquée.

V. Le modèle de rendement de référence à deux niveaux

À partir de la première loi EEG de 2000³, un modèle de rendement de référence à deux niveaux était en place.⁴ Après une période initiale, au cours de laquelle un tarif initial est versé, un tarif de base plus bas s'applique. Un calcul présenté ci-dessous montre la façon selon laquelle le niveau de soutien (tarif moyen) peut être déterminé par ce modèle.

Coefficient de qualité du site	Durée de versement du tarif de départ (par an)	Tarif moyen (exemple: tarif de départ: 70 €/MWh, tarif de base : 40€/MWh)
≤ 80%	20	70
90%	16	64
100%	11,9	57,8
110%	9,7	54,5
120%	7,3	51
≥ 130%	5	47,5

Tableau 2 – Calcul de tarifs déterminés par le modèle à deux niveaux
Source: Calcul et présentation OFATE.

Pour chaque projet, le tarif de départ (dans l'exemple 70 €/MWh) est versé pendant les cinq premières années. Pour des sites avec un potentiel éolien très élevé (coefficient de qualité du site de 130% et au-delà), le tarif de base (exemple : 40€/MWh) est versé à partir de la sixième année. Pour les sites moins favorables, le tarif de départ est versé pour une durée jusqu'à 20 ans maximum (sites ayant un coefficient de qualité du site inférieur ou égal à 80%), à déterminer selon le modèle à deux niveaux. La Figure 3 ci-dessous illustre les différentes durées de versement du tarif de départ :

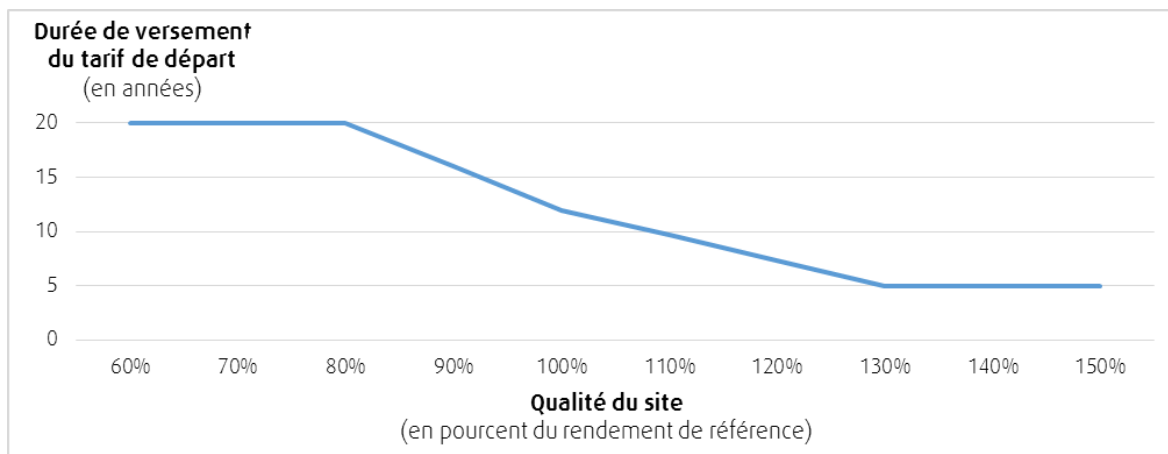


Figure 3 – Durée de versement de tarif d'achat de départ (Modèle à deux niveaux)
Source: Calcul et Présentation OFATE.

³ Voir le texte de la loi EEG 2000, ([Lien](#), en allemand).

⁴ Le site référentiel dans le cadre du modèle à deux niveaux est défini à une hauteur de moyeu de 30m avec une vitesse de vent moyenne de 5,5 m/s en utilisant le profil de vent logarithmique (longueur de rugosité: 0,1).



VI. Le modèle de rendement de référence et la répartition de centrales éoliennes en Allemagne

Avec comme objectif une répartition plus équilibrée des aérogénérateurs sur le territoire allemand, l'efficacité du modèle de rendement de référence peut donc être évaluée par une analyse de la distribution actuelle des centrales éoliennes en comparant les valeurs avec le potentiel théorique des différentes régions. Il faut noter que les régimes de vents sont généralement plus faibles dans les régions du sud de l'Allemagne.⁵ Dans l'analyse présentée ci-dessous, les différents *Länder* sont associés à une situation géographique selon la répartition entre « nord », « centre » et « sud » réalisée par l'Office fédéral de l'environnement (*Umweltbundesamt*) dans une étude sur le potentiel de l'éolien terrestre en Allemagne.⁶

Région	Länder	Cumul de la puissance installée, 31/12/17 [MW]	Puissance installée en 2017 [MW]	Puissance attribuée, AO 2017 [MW]	Puissance attribuée, AO 2018* [MW]
Nord	Basse-Saxe	10 582	1 416	576	210
	Schleswig-Holstein	6 863	573	214	69
	Brandebourg	6 794	539	814	194
	Saxe-Anhalt	5 118	285	66	116
	Mecklembourg-Poméranie occidentale	3 253	174	357	76
	Brême	185	11	0	3
	Hambourg	117	50	0	0
	Berlin	12	0	0	0
Centre	Rhénanie-du-Nord-Westphalie	5 449	882	368	201
	Rhénanie-Palatinat	3 400	252	50	174
	Hesse	1 983	300	166	106
	Thuringe	1 470	148	129	64
	Saxe	1 199	49	35	20
Sud	Bavière	2 493	312	44	23
	Bade-Wurtemberg	1 442	388	0	58
	Sarre	416	107	0	0
		50 777	5 486	2 820	1313

Tableau 3 – Répartition de centrales éoliennes terrestres en Allemagne

* Valeurs pour les 1ère et 2ème périodes des appels d'offres en février et mai 2018

Source : Agence fédérale des réseaux (2018)⁷, présentation OFATE.

⁵ De plus, la règle « 10H » en Bavière exige une distance minimale entre les zones résidentielles et un projet éolien de dix fois la hauteur des éoliennes installées. Ces réglementations limitent le potentiel des sites conformes.

⁶ Office fédéral de l'environnement (Umweltbundesamt) 2013, Potenzial der Windenergie an Land, ([Lien](#), en allemand). Avec cette répartition, le territoire allemand est divisé en trois parties de surface presque égale.

⁷ Agence fédérale des réseaux (*Bundesnetzagentur*, BNetzA) 2018, Statistiken zum Ausschreibungsverfahren zur Ermittlung der finanziellen Förderung von Windenergie an Land nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG), ([Lien](#), en allemand).



Le calcul des parts de la puissance installée du parc éolien allemand pour les différentes régions (cf. Tableau 3), montre que le système à deux niveaux a jusqu'à présent contribué à une certaine répartition des centrales, même si les centrales dans le nord de l'Allemagne dominant. Cet effet ne s'est plus produit d'une manière aussi marquante depuis le passage au mécanisme d'appels d'offres en 2017. Depuis, la part des installations éoliennes dans les *Länder* du sud était faible.

Cependant, lors des deux premières périodes en 2018, la répartition des projets retenus était plus importante avec une part de 43 % des centrales dans le centre et 6,1 % dans le sud de l'Allemagne, probablement dû à des exigences législatives entraînant des limitations spatiales des expansions locales dans le nord. Pour la troisième période en août 2018, la répartition régionale exacte des volumes n'est pas encore publiée. Néanmoins, neuf des 86 projets sélectionnés ont été remportés dans le Bade-Wurtemberg et en Bavière. Le tableau 4 ci-dessous résume ce développement en montrant la répartition régionale des centrales éoliennes et le potentiel de puissance déterminé par l'Office fédéral de l'environnement en 2013 pour les différentes régions.

Région	Cumul de la puissance installée, 31/12/2017 [MW]	Puissance installée en 2017 [MW]	Puissance attribuée, AO 2017 [MW]	Puissance attribuée, AO 2018* [MW]	Total du potentiel de puissance [GW]
Nord	32 924	3 049	2 027	668	526
	64,8 %	55,6 %	71,9 %	50,8 %	44 %
Centre	13 501	1 631	748	565	287
	26,6 %	29,7 %	26,5 %	43,0 %	24 %
Sud	4 351	806	44	80	375
	8,6 %	14,7 %	1,6 %	6,1 %	32 %

Tableau 4 – Répartition des éoliennes terrestres en Allemagne selon la région

* Valeurs pour les 1^{ère} et 2^{ème} périodes des appels d'offres en février et mai 2018

Source : Calcul et Présentation OFATE (dernière colonne d'après les calculs de l'Office fédéral de l'environnement (2013))



Disclaimer

Le présent texte a été rédigé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE). La rédaction a été effectuée avec le plus grand soin. L'OFATE décline toute responsabilité quant à l'exactitude et l'exhaustivité des informations contenues dans ce document.

Tous les éléments de texte et les éléments graphiques sont soumis à la loi sur le droit d'auteur et/ou d'autres droits de protection. Ces éléments ne peuvent être reproduits, en partie ou entièrement, que suite à l'autorisation écrite de l'auteur ou de l'éditeur. Ceci vaut en particulier pour la reproduction, l'édition, la traduction, le traitement, l'enregistrement et la lecture au sein de banques de données ou autres médias et systèmes électroniques.

L'OFATE n'a aucun contrôle sur les sites vers lesquels les liens qui se trouvent dans ce document peuvent vous mener. Un lien vers un site externe ne peut engager la responsabilité de l'OFATE concernant le contenu du site, son utilisation ou ses effets.