Impacts de la production d'électricité éolienne. Quel bilan en 2020 ? Quelles perspectives ?

Auteur :
BESLIN Guy, Précédemment, directeur technique & achats industriels ENGIE (ex-GDF SUEZ), Production d'Électricité France, Direction des Énergies Renouvelables

25-02-2022

Partie prenante du mix électrique de nombreux pays, la production d'électricité éolienne est assurée par des milliers de parcs éoliens répartis sur les continents et plus récemment en mer. L'expansion des parcs éoliens fait débat et l'implantation des éoliennes dont les dimensions et la puissance sont de plus en plus imposantes (aérogénérateurs multi-MW) soulève des critiques, notamment en Europe. Dans ce contexte, quels sont les impacts des parcs éoliens terrestres sur l'environnement et la société ainsi que sur le réseau public d'électricité ? Quel est l'intérêt du débat démocratique et d'une démarche consensuelle pour éviter, réduire et compenser les impacts résiduels ? Par ailleurs, l'électricité d'origine éolienne est source de création de valeur. Pour renforcer celle-ci et atténuer les impacts, une proposition alternative est soutenue : privilégier l'aménagement de parcs éoliens terrestres qui seraient d'une taille critique plus ramassée, regroupant des aérogénérateurs moins ostentatoires. Cela allégerait la pression des installations éoliennes sur les territoires. Cette proposition est associée au développement de l'éolien en mer dont le potentiel est très important au large des côtes de tous les océans. Ainsi, la filière éolienne (terrestre et offshore) devrait apporter une contribution très peu carbonée et significative au mix électrique mondial en 2050.

La production d'électricité éolienne est assurée par l'exploitation d'aérogénérateurs de dimensions et de puissance nominale (multi-MW) imposantes, en augmentation continue sur les dernières décennies. Ces installations industrielles [1] (Lire Du gisement éolien à la production d'électricité) sont à l'origine d'impacts sur l'environnement et la population et par ailleurs, source de création de valeur pour la collectivité.

1. Impacts des installations de production d'électricité éolienne

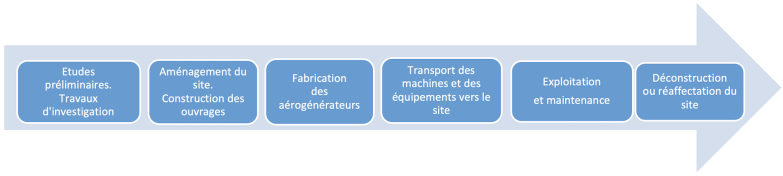

Figure 1. Schéma d'analyse des impacts d'un parc éolien sur l'ensemble du cycle de vie [Source : © G.BESLIN, 2021, Encyclopédie de l'Environnement]

Les impacts [2] qui résultent des aménagements pour la production d'électricité éolienne doivent être recensés, expertisés, évalués sur l'ensemble de la durée de vie des ouvrages et des équipements concourant à la production : des études préliminaires et des premiers travaux d'investigation, puis de l'aménagement du site, de la construction des ouvrages, de la fabrication des aérogénérateurs y compris le transport exceptionnel des composants hors gabarit vers le site, suivie de l'exploitation et maintenance des ouvrages, enfin de la déconstruction ou de la réaffectation du site après la période d'exploitation.

1.1. Analyse et évaluation des impacts [3] provenant des installations de production d'électricité éoliennes terrestres [4]

Figure 2. Impact sur l'environnement d'un grand parc éolien situé en Espagne [Source : Pixabay / libre de droits]

Les impacts de la production d'électricité éolienne sont étroitement liés aux caractéristiques géographiques et environnementales du site ainsi qu'aux choix technico-économiques effectués, notamment le modèle, les dimensions des aérogénérateurs et le nombre de machines regroupées dans le parc éolien [5].

Par ailleurs, la perception de l'énergie éolienne dans tel ou tel autre pays, l'acceptation par la collectivité nationale ou par les riverains diffèrent selon que le regard se place au niveau national, à l'échelon local ou à proximité des éoliennes [6].

Les parcs éoliens, considérés comme d'intérêt général, destinés à la production industrielle d'électricité donnent lieu à des impacts dont certains sont ressentis par les riverains comme générant des conflits d'usages. Ils sont résumés ci-après :

Impacts sur les paysages : modification de la perspective « historique » du territoire, impacts visuels sur le patrimoine environnemental, les sites et monuments emblématiques,

Impacts sur l'affectation des terrains, l'occupation des sols, l'habitat, les zones commerciales ou industrielles, les activités touristiques s'il en existe,

Impacts sur l'hydrologie du site et l'écoulement des eaux du fait des opérations de défrichage et décaissement des terres, voies d'accès, pistes ou routes goudronnées internes au parc éolien, VRD, fondations gravitaires,

Impacts sur la flore,

Impacts sur la faune : insectes, animaux vivant en surface ou sous terre, oiseaux nicheurs et migrateurs, les chiroptères, les amphibiens, etc.

Impacts sur les émissions sonores : niveau sonore absolu, niveau de bruit émergent le jour versus la nuit,

Impacts sur la transmission des ondes hertziennes, sur les échos radars du fait de la rotation des pales de grandes dimensions,

Impacts sur l'ensoleillement et l'éclairage des terrains environnants selon l'azimut du soleil : alternance d'ensoleillement normal et d'ombre en fonction de la rotation des pales,

Impacts sur la structure du réseau public d'électricité de distribution ou de transport,

Impacts sur l'utilisation de sable, matières premières, terres rares et du recyclage de ces matériaux et composants en fin de vie des ouvrages.

1.2. Les risques industriels

Sur l'ensemble du cycle de vie des installations de production d'électricité éoliennes, plusieurs risques industriels sont identifiés :

Lors de l'aménagement du site : les risques sont typiques de travaux d'infrastructures et de génie-civil de grande importance,

Pour le transport par voie maritime ou terrestre des équipements et composants de grandes dimensions : il s'agit des risques connus et maîtrisés par les entreprises de transports exceptionnels,

Lors de la construction, pour la mise en place in situ de composants de grandes dimensions et de masse importante, dont certains d'entre eux sont placés à grande hauteur, au sommet du mât : les risques sont spécifiques aux dimensions imposantes des aérogénérateurs (machines multi-MW). Ils sont associés à la mise en œuvre de moyens de levage hors-norme par des équipes très spécialisées,

Figure 3. Chute d'un aérogénérateur au Mount Etna, près de Norden, Rochdale, au Royaume Uni [Source : © Colin Park, CC BY-SA 2.0, www.geograph.org.uk]

En phase d'exploitation, c'est à dire pendant une vingtaine d'années, les risques relèvent principalement de cinq catégories :

- Les risques d'intervention et de manutention en hauteur,

- Les risques d'intervention sur des machines électromécaniques complexes et sur des équipements électriques,

- Les risques liés à la foudre susceptible de créer un point faible sur une pale voire de la désagréger brutalement,

- Les risques de défaillance du mât ou de composants en rotation de l'aérogénérateur : risque de chute de l'aérogénérateur au sol lors d'épisode de vent « cyclonique » ou de fatigue des composants, risque de détachement d'une pale ou d'une partie de la pale [7] entraînant un déséquilibre dynamique pouvant entrainer la chute de l'aérogénérateur. Il convient de préciser que le choix des aérogénérateurs est spécifié en fonction du gisement éolien [8]

- Les caractéristiques, la conception et la résistance des machines doivent répondre aux vitesses et rafales de vent mentionnées dans l'étude du gisement éolien,

- Les risques d'échauffement ou d'amorçage électrique dans la nacelle ou le mât pouvant alimenter un incendie.

Par ailleurs, lorsque l'étude d'implantation est bien accomplie, les aérogénérateurs sont installés de telle sorte que les risques de chute au sol de l'ensemble de la machine ou de l'envolée de toute ou partie d'une pale évite les zones d'habitation, les zones d'activités commerciales, les voies de circulation routière ou de chemin de fer [9].

Le retour d'expérience provenant de milliers de parcs éoliens en exploitation à travers le monde montre que les chutes d'aérogénérateurs au sol et le détachement de pale ou de partie de pale relèvent d'évènements exceptionnels [10].

Grâce à l'expérience acquise par les constructeurs et les professionnels de la filière, aux études de risques et autorisations réglementaires accordées aux exploitants, il ressort que la production d'électricité éolienne dans les pays de l'OCDE et notamment de l'UE, présente un très faible taux de gravité et qu'elle figure aujourd'hui dans ces pays comme une filière de production d'électricité très sûre lorsque les accidents – peu fréquents - sont analysés sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages et équipements installés.

1.3. Éviter, réduire, compenser les impacts. La séquence « ERC »

Capter le gisement éolien est une question de surface et le développement de la production d'électricité éolienne mobilise ou plutôt neutralise des territoires. Dans la plupart des pays où cette énergie renouvelable se développe, il existe un débat démocratique autour de cette activité industrielle.

La concertation, le débat démocratique permettent de rechercher et valider des solutions technico-économiques et environnementales acceptables qui visent à améliorer la balance entre les avantages et les inconvénients [11] du projet avec pour objectif, la préservation de l'intérêt bien compris des parties en présence.

A cette fin, la séquence ERC [12] : « Éviter, Réduire, Compenser » les impacts résiduels apporte un cadre de dialogue et de concertation.

A titre d'exemples, les options dont dispose le maître d'ouvrage pour éviter et réduire les impacts sont :

Le choix d'un site voisin, d'autres implantations pour les aérogénérateurs,

La réduction de la taille globale du parc éolien (nombre d'éoliennes, puissance unitaire),

Les caractéristiques des aérogénérateurs : dimensions (diamètre du rotor, hauteur du mât), puissance unitaire, régulation aérodynamique (profil des pales, régulation de puissance, etc.).

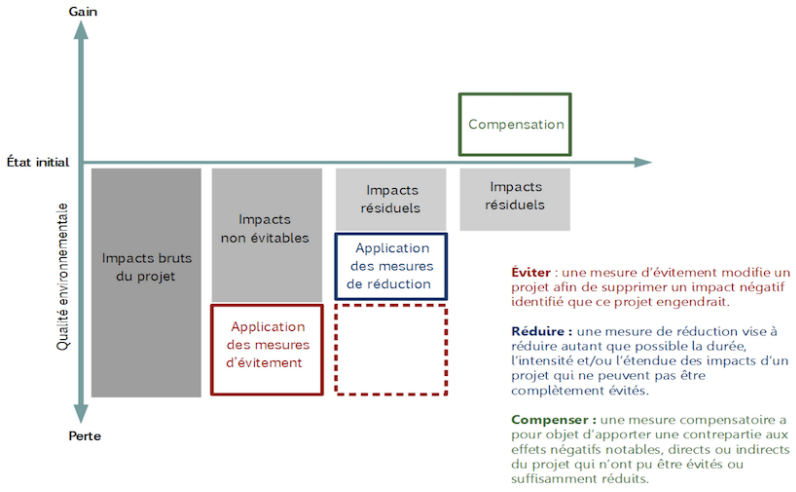

Figure 4. La séquence ERC : Éviter, Réduire, Compenser les impacts. [Source : © Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat, La séquence ERC : Éviter, Réduire, Compenser les impacts, mars 2017]

Les mesures de compensation quant à elles, se distinguent entre les compensations financières qui s'appliquent à l'immense

majorité des installations de production d'électricité éolienne et d'autres compensations souvent immatérielles qui sont spécifiques à un parc éolien déterminé :

Exemples de compensations financières : achat ou location des terrains aux propriétaires, redevance d'occupation du sol (dans certains pays ou états), taxe ou redevance perçue par la localité ou la communauté de communes, indemnité versée aux riverains (réparation du préjudice sur la vue et/ou le bruit), indemnité versée aux agriculteurs, indemnité versée aux associations (protection des oiseaux), subvention pour le développement du tourisme local, subvention pour la rénovation de monuments historiques, etc.

Exemples de compensations immatérielles : création d'emplois permanents (exploitation et maintenance de l'installation de production), formation sur le terrain, apprentissage pour les jeunes, apport de main d'œuvre pour soutenir une activité touristique, réalisation de film documentaire pour la promotion de la collectivité territoriale, etc.

1.4. Impacts positifs. La production d'électricité éolienne : source de création de valeur

L'aménagement des parcs éoliens et la production d'électricité éolienne sont dans l'immense majorité des sites dans le monde, source d'impacts positifs et de création de valeur pour le maître d'ouvrage et la collectivité. Très généralement, les avantages l'emportent sur les inconvénients. La création de valeur s'analyse sous différents angles parmi lesquels :

1.4.1. Création de valeur pour le système électrique et l'environnement

Tout aérogénérateur en exploitation transforme l'énergie éolienne disponible à proximité de la surface terrestre, énergie qui est renouvelable, exempte de carbone en une quantité d'électricité comprise selon les sites terrestres et les conditions d'exploitation entre 1 700 et 2 200 MWh [13] par tranche d'un MW installé et par an.

Le coût de production moyen actualisé de l'électricité (LCOE [14]) éolienne est compétitif, compris entre 70 et 80 €/MWh [15] en France.

Par ailleurs, cette énergie « verte » est très faiblement carbonée [16]. Elle contribue ainsi à des émissions de carbone évitées dans la plupart des mix électriques des pays qui présentent généralement une signature moyenne de « carbone » plus élevée du fait de l'exploitation, par ailleurs, de centrales de production fossiles.

1.4.2. Création de valeur pour le pays

L'aménagement de parcs éoliens s'accompagne de la réalisation d'études à l'amont et d'ingénierie complexes, de la réalisation de travaux d'infrastructures et de génie-civil (fondations) à forte valeur ajoutée [17], outre la fourniture et le transport des aérogénérateurs.

Le coût d'aménagement spécifique [18] d'un parc éolien terrestre se situe aujourd'hui entre 1 400 et 1 700 €/MW dont 1 000 à 1 200 €/MW au titre du seul aérogénérateur (mât, nacelle, rotor, pales).

1.4.3. Création de valeur pour les collectivités locales

L'exploitation et la maintenance d'un parc éolien impliquent l'intervention de ressources humaines hautement qualifiées pour réaliser des opérations diversifiées afin de mettre en œuvre des machines imposantes. Celles-ci embarquent une technologie complexe. Ces opérations d'exploitation et de maintenance relèvent d'une équipe pluridisciplinaire expérimentée qui intervient au quotidien sur le site. Elles se traduisent par la création d'emplois [19] pérennes sur la commune ou la communauté de communes. Elles représentent, en moyenne, l'équivalent de 2 à 3 emplois à temps plein très qualifiés et non délocalisables par tranche de 20 MW éoliens installés en milieu terrestre.

1.4.4. Les retombées financières : impôts et redevances versés à l'État, aux collectivités territoriales et aux riverains

Les installations de production d'électricité éolienne disposent à présent d'une taille critique importante : quelques MW à plusieurs dizaines de MW par site pour l'éolien terrestre, plusieurs centaines de MW pour les parcs éoliens en mer. Elles génèrent une importante activité industrielle sur le long terme, un chiffre d'affaires significatif et pérenne et dégagent une importante

valeur ajoutée.

Ce modèle d'activité qui est aujourd'hui bien connu et maîtrisé dans les pays donnent lieu au paiement de différents impôts et redevances qui dépendent de la législation fiscale et des usages dans le pays en question.

Nous mentionnons ci-après une liste non exhaustive d'impôts et autres contributions :

Au bénéfice de l'état: la TVA, la taxe sur le chiffre d'affaires, l'impôt sur les sociétés, la redevance ou contribution nationale pour le service public de l'énergie, pour le développement du réseau électrique, etc.

Au bénéfice des collectivités territoriales: la taxe professionnelle [20] ou équivalente, la redevance pour l'exploitation d'installations électriques, la redevance d'occupation du domaine public, la location des terrains communaux, etc.

Au bénéfice des riverains ou des propriétaires de terrains : il s'agit principalement de la vente ou de la location [21] des terrains privés.

2. Bilan et perspectives de la production d'électricité éolienne

2.1. Quel bilan en 2020 ?

Bénéficiant d'un solide retour d'expérience consolidé sur quatre décennies, la production d'électricité éolienne apparaît aujourd'hui comme une des sources d'énergie renouvelable les plus crédibles pour participer à la construction d'un mix électrique efficace, sûr, de moins en moins carboné et cela, sur tous les continents.

Cependant, pour une partie de la collectivité, pour quelques minorités agissantes hostiles, le bilan apparaît mitigé voire négatif.

Quels sont les arguments de cette frange de la population qui ne voit pas dans le déploiement des parcs éoliens (terrestres et/ou offshore) un franc succès, mais plutôt un relatif échec [22] ?

2.1.1. Une adhésion relative, parfois limitée de la population au développement des projets éoliens

Malgré le débat démocratique et le processus de concertation qui prévalent dans les démocraties, l'argumentaire des opposants s'appuie sur :

Une concentration des machines considérée comme « agressive » dans les régions à fort potentiel éolien,

Les dimensions de plus en plus imposantes des aérogénérateurs. Ceux-ci sont visibles de loin ; ils imposent un impact visuel aux riverains et aussi à la population des communes aux alentours ; ils modifient et perturbent les paysages, ils sont susceptibles de dévaloriser les sites historiques ainsi que le foncier bâti, notamment la valeur des habitations,

Une implication limitée des acteurs locaux dans le financement, le développement et l'exploitation des installations de production d'électricité éolienne qui ont une vocation industrielle. Ce type d'installations relève de structures juridiques, financières et techniques qui dépendent le plus souvent de compagnies d'électricité ou de groupes industriels [23].

2.1.2. Les promoteurs de la filière éolienne ont misé sur l'augmentation de la puissance des aérogénérateurs et de la taille critique des parcs éoliens

Le développement rapide des installations de production d'électricité éolienne sur la période 1980 – 2020 met en évidence une évolution continue vers des turbines de plus en plus impressionnantes et des regroupements d'aérogénérateurs au sein de parcs éoliens toujours plus imposants dans leurs dimensions et leur puissance. En proposant cette évolution, les professionnels et acteurs de la filière ont démontré que la production d'électricité éolienne est efficace, compétitive, fiable et sure. Les pouvoirs publics ont également adhéré à cette « promesse ».

Dans la plupart des pays de l'OCDE, en particulier dans l'UE et en France, les décideurs politiques ont élaboré un cadre législatif et/ou réglementaire qui est favorable à cette évolution dont un des objectifs est d'éviter le mitage d'installations éoliennes qui pourraient se disperser sur les territoires [24].

2.1.3. Une autre voie : des parcs éoliens terrestres moins imposants ?

Poser aujourd'hui la question de concevoir pour les sites terrestres des installations de production d'électricité éoliennes moins étendues, moins puissantes [25], davantage réparties sur les territoires, comportant un nombre limité d'aérogénérateurs de taille plus réduite prend un sens. Il s'agirait d'une autre façon de concevoir l'aménagement du territoire avec des parcs éoliens peut-être plus nombreux dans le pays, mais moins imposants et jugés moins agressifs par les populations locales.

Figure 5. Exemple d'un « petit » parc éolien à proximité d'installations agricoles au Danemark [Source : droits réservés]

Une telle voie sacrifierait probablement une part de l'efficacité de l'énergie éolienne ; elle pourrait concerner davantage de communes et conduirait à une production d'électricité davantage répartie sur le territoire national et à un coût de production du MWh éventuellement plus élevé, bien que toujours compétitif.

En revanche, cette autre conception de la production d'électricité éolienne aurait le mérite de rendre les installations de production en milieu terrestre plus acceptables pour l'environnement, pour les collectivités locales et leurs habitants, réconciliant ainsi les contraintes d'une production industrielle d'électricité renouvelable décarbonée et la volonté des populations riveraines de préserver leur cadre de vie.

2.1.4. L'intégration de l'énergie éolienne sur le réseau public d'électricité et le dimensionnement des infrastructures électriques

La production d'électricité éolienne est variable et aléatoire. L'amplitude des variations de la production et l'incertitude de celle-ci dépendent du régime de vent [26].

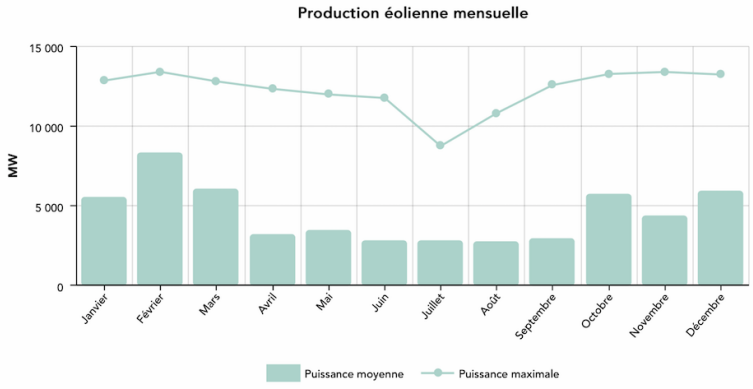

Figure 6. Puissance mensuelle fournie par les parcs éoliens en France en 2020. [Source : © RTE, Bilan électrique 2020]

A titre d'exemple, la figure ci-après traduit les variations de puissance fournie par les parcs éoliens en France en 2020. On relève ainsi l'écart entre la puissance maximale atteinte dans le mois et la puissance moyenne mensuelle, traduisant ainsi la variabilité de

cette source d'énergie.

Alors que la production éolienne occupe une place de plus en plus significative dans le mix électrique de nombreux pays, des phénomènes transitoires peuvent apparaitre sur le réseau de transport d'électricité (HT/THT) susceptibles de dégrader le plan de tension et de fréquence. Pour compenser ces phénomènes, le gestionnaire de réseau doit faire appel à des capacités de réserve suffisantes pour assurer la stabilité du réseau et répondre à la demande des usagers, conformément au cahier des charges en vigueur dans le pays.

L'équilibre du système électrique sera maintenu si l'on associe aux installations de production éoliennes des moyens d'ajustement entre l'offre et la demande d'électricité : portefeuille de consommateurs disposant de contrats de fourniture d'électricité interruptibles, dispositifs de stockage d'énergie (STEP : stations de transfert d'énergie et de pompage hydraulique, accumulateurs de grande capacité, stockage d'hydrogène, etc.), centrales électriques « dispatchables [27] ».

Par ailleurs, le raccordement sur le réseau public d'électricité de nouvelles sources de production telles que les installations éoliennes amène à redimensionner certains ouvrages du réseau de transport et parfois de distribution, pour éliminer les éventuels points de congestion.

2.2. Mise en perspective de la production d'électricité éolienne

2.2.1. La filière éolienne : une composante « clé » du mix électrique du futur

L'électricité est le vecteur énergétique que la collectivité doit privilégier pour aller vers un modèle énergétique international efficace, à faible teneur en carbone et tendre vers la neutralité carbone à l'horizon 2050.

La filière éolienne en milieu terrestre, conjuguée avec des programmes de développement considérables en offshore sur plusieurs continents est une composante « clé » du paysage énergétique appelée à occuper une place de plus en plus significative dans le mix électrique du futur.

Outre la ressource naturelle très bien répartie sur les différentes régions du monde, la production d'électricité éolienne bénéficie du progrès technologique ; celui-ci lui procure un avantage concurrentiel. Elle est donc en mesure d'occuper une place de plus en plus significative à côté des autres énergies renouvelables (biomasse dont l'acheminement de la ressource vers les centrales de production reste soumis à une logistique complexe et coûteuse, hydroélectricité pour laquelle les sites exploitables se raréfient dans les pays de l'OCDE et bien entendu solaire photovoltaïque et concentré).

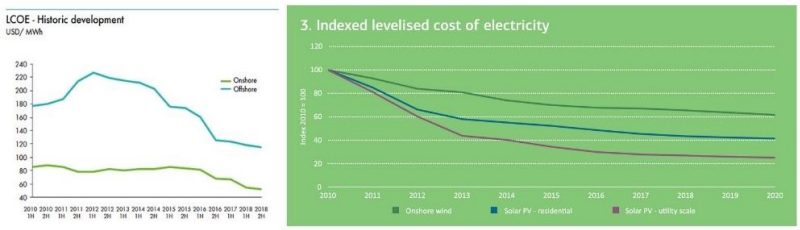

Figure 7. Évolution du coût de production d'électricité éolienne. Comparaison avec le solaire PV (base 100 en 2010) [Source : à gauche : Global Wind Report 2018, Global Wind Energy Council (GWEC), à droite : IEA, Tracking Clean Energy Progress 2016 Report, International Energy Agency www.iea.org]

Le graphique ci-dessous illustre l'amélioration de la compétitivité de l'électricité éolienne (terrestre et offshore) ; la décroissance ininterrompue du coût de production (LCOE) du MWh éolien en est le principal ressort. La courbe en valeur relative à droite avec l'indice de référence fixé en 2010 permet de visualiser les progrès accomplis par ailleurs, par l'électricité solaire photovoltaïque au cours de la dernière décennie.

2.2.2. La production d'électricité éolienne en Europe : un facteur de succès pour la neutralité carbone en 2050

La Commission Européenne soutient la filière éolienne depuis son décollage industriel, au début des années 80 sur la base d'un programme ambitieux de R&D assorti d'incitations volontaristes.

Observant les progrès technologiques accomplis par la filière, l'UE a fréquemment relevé les objectifs à long terme fixés pour la

production d'électricité éolienne et la place de celle-ci dans le mix électrique de la plaque « cuivre » européenne.

Consciente du débat qui existe au sujet de l'éolien terrestre et d'un relatif phénomène de saturation perçu par les populations dans certains pays à forte densité qui sont aujourd'hui marqués par l'installation de nombreux aérogénérateurs, l'Europe entend relever la contribution de l'énergie éolienne dans le mix électrique en s'appuyant sur deux facteurs de succès :

La généralisation d'opérations de « repowering [28]» pour optimiser le productible des sites dédiés à la production d'électricité éolienne par le remplacement des aérogénérateurs lorsque ceux-ci parviennent au terme de leur durée de vie,

La dynamique des installations de production d'électricité en mer en tenant compte du gisement éolien offshore qui est considérable autour des pays de l'UE et aussi des performances très positives et encourageantes obtenus par les premiers parcs éoliens offshore de taille industrielle (plusieurs dizaines puis centaines de MW) dont le retour d'expérience autour de pays tels que le Royaume-Uni [29], l'Allemagne, le Danemark, la Belgique, les Pays-Bas, etc. porte aujourd'hui sur une dizaine d'années. C'est ainsi que la stratégie de l'UE est de porter la puissance éolienne installée en mer de 12 GW (hors UK) en 2020 à 60 GW en 2030 et fixe un objectif de 300 GW pour 2050.

2.2.3. L'éolien terrestre et offshore : une contribution significative dans le mix électrique mondial en 2050

Bien que l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 ne soit pas acté aujourd'hui par tous les pays développés, principaux émetteurs d'émissions de GES, les énergies renouvelables – toutes complémentaires - sont appelées à occuper une place essentielle dans le mix électrique du futur. Parmi celles-ci, la filière éolienne terrestre sera complétée, pratiquement à hauteur de 50%, par l'éolien en mer [30] qui gagnera progressivement la plupart des mers et océans, à distance plus ou moins éloignées des côtes.

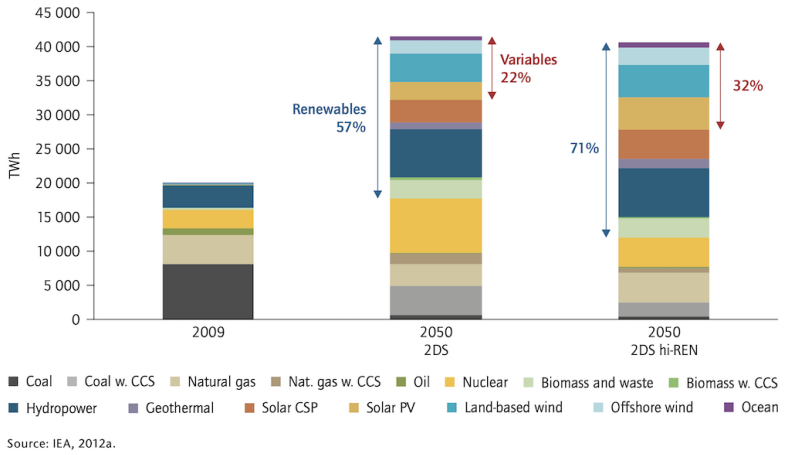

Figure 8. Mix électrique global à l'horizon 2050. Scénario de base 2DS et 2DS hi-REN (Énergies renouvelables renforcées) [Source : IEA (2013), Wind Energy Technology Roadmap 2013. Tous droits réservés]

A l'horizon 2050, les différents scénarios mettent en évidence que la production d'électricité éolienne (terrestre et en mer) sera du même ordre de grandeur que l'hydroélectricité (6 000 à 8 000 TWh/an) et inférieure à l'électricité solaire (photovoltaïque + CSP).

2.2.4. Un potentiel éolien exploitable encore plus important

Des études prospectives plus récentes (2019) tablent sur un potentiel éolien exploitable en milieu terrestre plus important et davantage encore en offshore. Elles accordent aux énergies renouvelables une contribution possible à concurrence de 86% du mix électrique en 2050, avec une part pour l'éolien terrestre et en mer qui se rapprocherait de 20 000 TWh produits (6 044 GW installés).

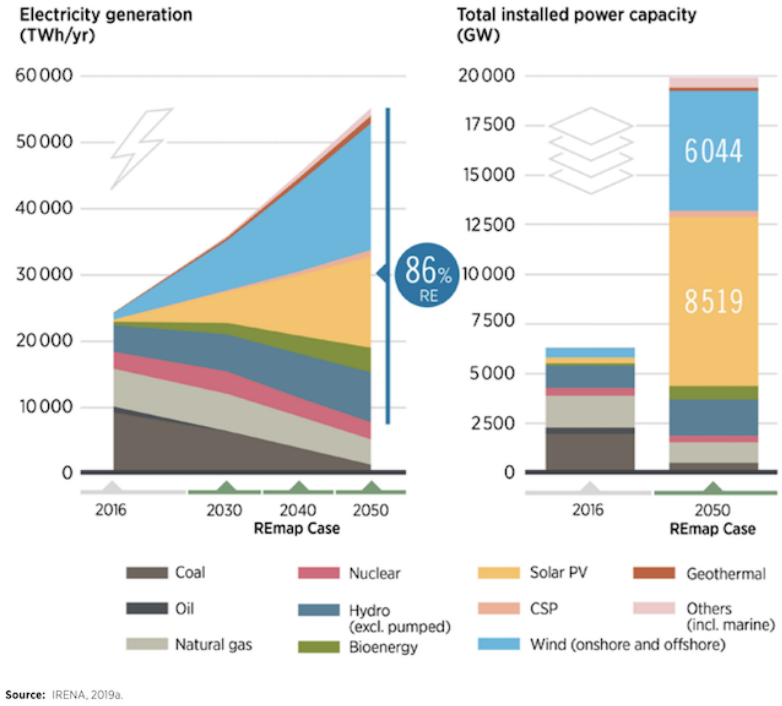

Figure 9. Mix électrique global à l'horizon 2050, Renewable Energy (RE) Case [Source : Future of Wind, A global Energy Transformation paper 2019, © International Renewable Energy Agency, www.irena.org]

En effet, l'éolien en mer présente un potentiel récupérable qui s'élargit avec le retour d'expérience et les solutions innovantes de façon très importante ; cela grâce au progrès technologique (structures flottantes, liaisons électriques sous-marines haute tension). Celui-ci permettra d'accéder le moment venu dans des conditions technico-économiques qui doivent faire sens à des sites en eau plus profonde (plusieurs dizaines de mètres) et éloignés des côtes (plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres).

2.2.5. La production d 'électricité éolienne : une opportunité pour l'après crise sanitaire internationale

Le développement de la production d'électricité éolienne est susceptible de contribuer à la reprise économique et atténuer les impacts de la pandémie COVID - 19. La filière éolienne (terrestre et offshore) dispose de caractéristiques technico-économiques et d'avantages concurrentiels qui sont favorables pour les pays et populations dans le monde :

Il s'agit en premier lieu de produire massivement une énergie propre qui prendra dans les prochaines décennies la place d'énergies fossiles émettrices de carbone et ainsi de participer à la construction d'un avenir durable,

Ensuite, les professionnels de la filière éolienne et surtout les résultats d'exploitation des unités de production en milieu terrestre et en mer démontrent que la production d'électricité éolienne est efficace : compétitive, fiable et sure. Adossée à des capacités de production modulables et à des dispositifs de stockage, l'électricité d'origine éolienne sera mieux intégrée dans les réseaux publics d'électricité et par conséquent, elle sera mieux valorisée. Dans cette perspective, elle contribuera au progrès technologique et à l'amélioration des conditions de vie économiques et environnementales des populations,

Enfin, le développement massif de la production d'électricité éolienne, notamment en mer, conduira à la réalisation d'investissements productifs de premier plan sur la scène internationale et le renouvellement d'infrastructures essentielles. La réalisation des aménagements et l'exploitation des parcs éoliens se traduiront par la création et la fixation de dizaines de milliers d'emplois [31] pérennes, en majorité très qualifiés, répartis sur de nombreux pays.

3. Messages à retenir

La production d'électricité par des aérogénérateurs aux dimensions et caractéristiques toujours plus imposantes (machines multi-MW) regroupés dans des parcs éoliens industriels (taille critique : plusieurs dizaines de MW en milieu terrestre, plusieurs centaines de MW en mer) raccordés au réseau public d'électricité (moyenne ou haute tension) est le processus industriel qui optimise aujourd'hui la conversion de l'énergie éolienne en un vecteur énergétique efficace et renouvelable. En 2019, la

production d'électricité éolienne (terrestre et en mer) a représenté 1 597 TWh, soit 5,9% de la demande mondiale d'électricité.

Pour autant, le développement de parcs éoliens imposants s'accompagne d'impacts sur l'environnement (paysages, faune, hydrologie, neutralisation des terrains concernés, etc.), sur les riverains (ombre portée par la rotation des pales, niveau sonore), sur les activités humaines (écho radar, transmission hertzienne), sur l'économie locale (dépréciation des terrains et du foncier bâti à proximité et aux alentours) et sur le système électrique (équilibre du réseau). Ces impacts sont mis en exergue par des opposants minoritaires en nombre mais influents.

Moyennant le respect du contexte législatif en vigueur dans le pays, des règlements, normes et des dispositions propres au débat démocratique (étude d'impact, enquête publique, concertation avec les élus, les riverains et les associations) l'aménagement de parcs éoliens peut s'entendre sur une démarche positive : évaluer et réduire les impacts, compenser les impacts résiduels.

L'essor de l'éolien mer depuis le début des années 2000, pourrait inciter les pays à limiter la progression des installations éoliennes en milieu terrestre et réduire ainsi la pression de ces installations sur l'environnement et la société. Une option, probablement plus consensuelle, serait alors de renoncer, notamment sur les zones à densité d'habitants élevée, aux caractéristiques de plus en plus démesurées des aérogénérateurs et des parcs éoliens qui les regroupent. Des machines plus raisonnables (puissance nominale recommandée : 2,5 à 3,5 MW) et des parcs éoliens moins étendus (plafonnement à une vingtaine de MW) pourraient s'avérer davantage opportunes au sens de l'intérêt général.

Il ne fait aucun doute : la production d'électricité éolienne est une composante clé pour la réalisation, dans le futur, d'un mix électrique peu carboné et aussi un facteur de succès pour la transition énergétique. Dans les scénarios envisagés à l'horizon 2050, la contribution de l'énergie éolienne est essentielle ; sur la base d'une production annuelle d'électricité éolienne de l'ordre de 6 000 à 8 000 TWh (répartie entre l'éolien terrestre et en mer), elle devrait dépasser celle de l'hydroélectricité et assurer plus du quart de la production mondiale d'électricité en 2050.

Notes et références

Image de couverture. Grand parc éolien terrestre en Allemagne. Exemple d'insertion d'aérogénérateurs industriels dans le paysage [Source : Pixabay, libre de droits]

[1] BESLIN, G., 2021, Du gisement éolien à la production d'électricité par les aérogénérateurs industriels, Encyclopédie de l'Environnement, www. encyclopedie-environnement.org

[2] ADEME, Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, Actualisation 2010, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, www.developpement-durable.gouv.fr

[3] BAFOIL, F., 2016, L'énergie éolienne en Europe – Conflits, démocratie, acceptabilité sociale, Presses de Sciences Po

[4] Nous nous limiterons ici à présenter une démarche générique pour les installations éoliennes terrestres. Les études relatives aux parcs éoliens en mer relèvent d'approches plus spécifiques et complexes en rapport avec l'emplacement des ouvrages de production en mer. La filière éolienne offshore est habituellement classée dans la catégorie des énergies marines renouvelables.

Ouvrage : Direction générale de l'Energie et du Climat, Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer, Edition 2017, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, www.developpement-durable.gouv.fr

[5] RAPIN, M. et NOËL, J.M., Février 2019, Du petit éolien à l'éolien offshore – 3ème édition, DUNOD

[6] Il existe une différence de perception de la production d'électricité éolienne par la société au niveau national et par les riverains : pour ceux-ci il peut y avoir une forte acceptabilité compte tenu des retombées locales ou à l'inverse, une attitude de rejet inspirée par l'idée d'éloigner le projet éolien des riverains impactés, par référence au réflexe NIMBY : « not in my back yard ».

[7] On parle dans ce cas de « missile » éolien dont l'envolée peut parcourir quelques centaines de mètres.

[8] Les aérogénérateurs sont spécifiés pour des classes de vent : IEC IA/IB, IEC IIA/IIB, IEC IIIA/IIIB, IEC S.

[9] En France, les aérogénérateurs sont aujourd'hui installés à une distance minimum d'1 km environ des habitations, zones

commerciales, zones industrielles, voies de circulation.

[10] Asian, S., Ertek, G., Haksoz, C., Pakter, S., & Ulun, S., 2017, Wind turbine accidents : a data mining study, Dr Gürdal Ertek's Publications.

[11] On pourrait dire aussi : renforcer la création de valeur face aux impacts résiduels.

[12] La séquence ERC est soutenue en France par les pouvoirs publics dans le cadre d'un débat démocratique indispensable pour assurer le développement harmonieux de la filière éolienne.

Guide THEMA : Commissariat général au développement durable, Ministère de l'environnement, de l'énergie et de

la mer, en charge des relations internationales sur le climat, mars 2017, www.developpement-durable.gouv.fr,https://www.ecologie.gouv

[13] On désigne ainsi la productivité moyenne annuelle des installations éoliennes terrestres. Cette amplitude de la production (1 700 à 2 200 MWh par MW de puissance installée et par an) couvre la majorité des installations de production d'électricité éoliennes récentes dans les pays de l'UE. On en déduit le facteur de charge moyen annuel qui est donc compris entre 19,4% et 25,1%. Pour les installations éoliennes en mer, le facteur de charge moyen annuel est plus élevé, compris entre 2 800 et 3 200 h/an, au bénéfice du gisement éolien en mer qui est plus régulier.

[14] LCOE : Levelized Cost Of Energy, soit : coût de production moyen actualisé sur la durée d'exploitation de l'installation de production (20 ans pour la grande majorité des sites). Ce coût prend en compte le coût d'investissement (CAPEX), les dépenses d'exploitation et de maintenance (OPEX) et le coût de déconstruction actualisés, rapportés au Chiffre d'Affaires actualisé sur la durée d'exploitation de l'installation de production électrique.

[15] Source : https://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/comment/leolien/

[16] Il s'agit de l'énergie « grise », le processus industriel de conversion proprement dit de la ressource éolienne en électricité étant exempt de CO_2. Pour un parc éolien terrestre, l'énergie grise équivaut à douze mois environ du productible de l'installation de production d'électricité. Le contenu carbone du kWh éolien terrestre se situe entre 20 et 30 grammes de CO_2/kWh (consensus des études).

[17] Analyse : Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine Éolien terrestre, biomasse, solaire photovoltaïque, Avril 2014, Commission de Régulation de l'Energie, www.cre.fr, https://www.cre.fr/Documents/Publications/Rapports-

[18] Coût d'aménagement spécifique (CAPEX : Capital Expenditure). Après avoir diminué dans la précédente décennie (2010-2020), il est orienté à la hausse sur fond d'inflation des matières premières : acier, cuivre, terres rares, etc. Le CAPEX des parcs éoliens en mer est quant à lui plus élevé (proche de 3 000 €/MW) et dépend beaucoup des caractéristiques du site offshore (régime de vent, profondeur de la mer, nature du sous-sol, éloignement par rapport à la côte, etc.).

[19] Rapport : Wind Observatory, 2019, France Energie Eolienne, www.fee.asso.fr
https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-wind-observatory-final.pdf

[20] En France, la taxe professionnelle a été réformée dans les années 2010. Elle a été remplacée par une cotisation sur la valeur ajoutée des entreprises (CVAE). Les sociétés de production d'électricité éoliennes sont en sus, assujetties à l'imposition forfaitaire pour les entreprises de réseau (IFER).

[21] Le loyer versé aux propriétaires fonciers pour installer des aérogénérateurs relève d'une négociation de gré à gré. Il est fonction des usages dans le pays ou la région et varie d'un site à un autre selon les caractéristiques du parc éolien : dimensions des machines, puissance, nombre d'aérogénérateurs, la nature du terrain et son usage antérieur. En France, le loyer va d'un à quelques milliers d'Euro par MW installé et par an.

[22] WALKER,R.P., SWIFT,A., 2015, Wind Energy Essentials. Societal, Economic and Environmental Impacts, Wiley Edition

[23] Les investissements qui s'élèvent à plusieurs dizaines de Millions voire centaines de Millions d'Euro pour les parcs éoliens les plus importants, de même que les procédures d'exploitation rigoureuses et complexes ne laissent guère de place à la population des communes concernées qu'elle soit volontaire ou non, pour participer au conseil d'administration ou de direction de la société de production d'électricité éolienne locale. Ces installations industrielles n'offrent pas le caractère associatif ou coopératif qui existait dans les années 80 aux Pays-Bas, Danemark ou Allemagne pour l'aménagement de parcs éoliens par des associations ou regroupements de « petits » propriétaires.

[24] En France, les pouvoirs publics ont élaboré un schéma directeur éolien qui définit des zones de développement éolien (ZDE) propices pour l'aménagement de parcs éoliens en milieu terrestre et en mer.

[25] Typiquement : 20 MW maximum, regroupés au sein d'un parc éolien, soit l'équivalent de 5 à 6 aérogénérateurs limités à 3,5 MW de puissance nominale unitaire.

[26] On rappelle que le vent est en mer plus régulier qu'à terre. De ce fait, la production d'électricité éolienne en mer présente une meilleure stabilité et sa prédiction à court terme est moins aléatoire.

[27] Les centrales à gaz (CCG : Cycles Combinés au Gaz naturel) qui disposent d'une rampe de lancement de quelques minutes pour atteindre leur puissance nominale peuvent jouer un rôle privilégié pour assurer l'équilibre du réseau électrique. Elles présentent par ailleurs un bilan carbone (300 à 400 grammes de CO_2/kWh) qui est acceptable pour assurer un ajustement de puissance avec une durée d'appel limitée.

L'expérience acquise dans plusieurs pays européens où la proportion d'électricité éolienne est significative (Allemagne, Danemark, Pays-Bas, par exemple) a montré que l'adossement des installations éoliennes à des centrales électriques fossiles de base ou de semi-base (centrales au charbon, lignite, etc.) est problématique quant à l'émission de carbone.

[28] Le « repowering » consiste à procéder au réaménagement du parc éolien lorsque les aérogénérateurs installés initialement arrivent au terme de leur durée normale d'exploitation (de l'ordre de 20 ans). Ainsi, les anciennes machines sont remplacées par des aérogénérateurs de la meilleure technologie du moment. Ces derniers permettent d'augmenter sensiblement le productible du site après réaménagement : de 20 à 40% selon les sites.

[29] Le Royaume-Uni, aujourd'hui en dehors de l'UE, a été précurseur pour aménager à partir des années 2000 des parcs éoliens en mer de démonstration et développer en fonction du retour d'expérience une industrie offshore qui est parmi les plus performantes. Le pays compte aujourd'hui 10 GW d'éoliennes installées en mer. L'éolien offshore autour du Royaume-Uni a produit 32 TWh en 2019 soit presque autant que l'éolien terrestre.

[30] BURTON, T.L., JENKINS, N., BOSSANYI, E., SHARPE, D., GRAHAM, M., May 2021, Wind Energy Handbook – 3rd Edition, WILEY

[31] L'industrie éolienne a déjà créé des dizaines de milliers d'emplois en Europe (Allemagne, Danemark, Espagne, Royaume-Uni, etc.) aux États-Unis et plus récemment en Asie-Pacifique (Chine, Inde, Corée du Sud). Et même en France où l'on regrette l'absence d'acteurs industriels majeurs, la filière éolienne fournit du travail à forte valeur ajoutée à de nombreux sous-traitants qualifiés et à des bureaux d'études spécialisés, comme en témoigne le « 2019 Wind Observatory » publié par France Énergie Éolienne (https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-wind-observatory-final.pdf)

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** BESLIN Guy (2022), Impacts de la production d'électricité éolienne. Quel bilan en 2020 ? Quelles perspectives ?, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=14923

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.