

22/06/2019

Rapport - PH09

Ethique de la transition énergétique à travers la filière éolienne



Léo LAMBERT - Hugo FORAISON – Adam POTDEVIN

Sommaire:

Introduction	2
I. Les enjeux de la transition énergétique	4
A. L'urgence environnementale	4
B. Les difficultés économiques	8
C. L'émergence d'enjeux sociaux	11
II. Production des éoliennes	15
A. L'Acier	17
B. Le Béton	19
C. Le cuivre	19
D. Les Aimants permanents	21
III. Implantation et exploitation	27
A. L'implantation et exploitation des parcs éoliens	27
B. Les enjeux environnementaux	28
C. Les enjeux économiques	31
D. Les enjeux sociaux	37
IV. Fin de Vie des éoliennes	41
A. Le démantèlement	41
B. La fin de vie	42
Conclusion	44
Index	45
Annexes	45
Sources	49



Introduction

L'énergie accompagne les civilisations humaines depuis longtemps et semble étroitement liée à l'évolution de la société. Le premier bouleversement majeur fut la découverte du feu au cours du Paléolithique permettant à l'Homme de se réchauffer, de s'éclairer mais aussi de cuire ses aliments. Ensuite, l'Homme apprend à exploiter la force du vent et de l'eau en concevant tout d'abord les premiers bateaux à voile puis les moulins à vent et à eau apparaissent. La source principale d'énergie de nos sociétés restera pendant longtemps le bois puis au XVIII^{ème} siècle l'invention de la machine à vapeur va alors créer une nouvelle rupture. C'est avec cette invention que le charbon va prendre une place importante dans notre monde jusqu'à nos jours puisqu'il constitue encore près de 30% de l'apport énergétique mondial. Et enfin, au siècle suivant, l'industrialisation du pétrole et de l'électricité donne un nouvel essor à la révolution industrielle. L'énergie est alors au cœur de l'économie et de la politique des états. Malheureusement, de par leur nature, les ressources énergétiques sont inégalement réparties dans le monde. En 1973, le premier choc pétrolier souligne l'importance de cette ressource dans le monde et la dépendance de l'économie à cet "or noir". La recherche de nouvelles sources d'énergies devient alors centrale pour obtenir l'indépendance. Nous sommes passés d'une combinaison traditionnelle basée presque entièrement sur le bois au début du XIX^{ème} siècle à une offre énergétique beaucoup plus diversifiée aujourd'hui (voir Figure 1).

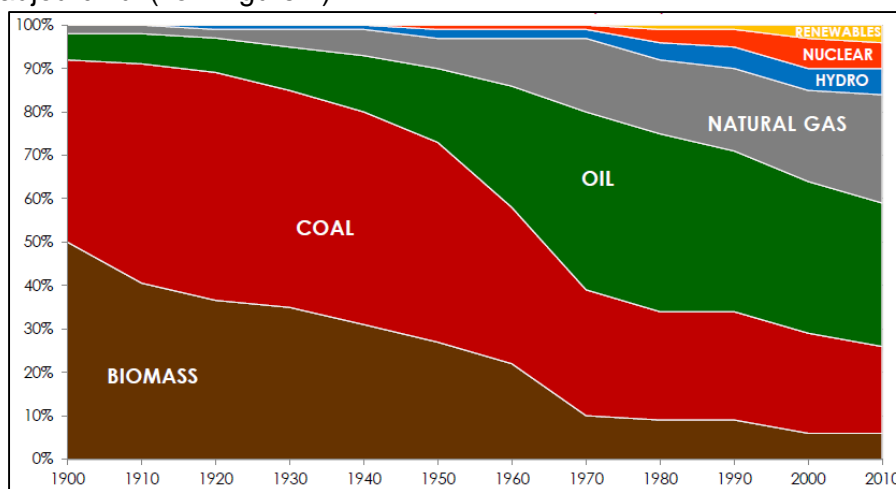


Figure 1 : Proportions des sources d'approvisionnement en énergie (de 1900 à 2010)
Source : Vaclav Smil(2010), *Energy Transitions*; BP Statistical review of world energy 2018

Aujourd'hui, de nouveaux enjeux se sont ajoutés au problème de l'énergie. En 2015, les énergies fossiles représentaient encore 83% de la production totale d'énergie mondiale. Les émissions de gaz à effet de serre dégagées lors de leur combustion s'accumulent dans l'atmosphère et entraînent une augmentation des températures globales. La diminution des stocks de pétrole, la production toujours croissante de Gaz à Effet de Serre (GES) (voir Figure 2), le bouleversement du climat et l'augmentation de la demande mondiale oblige à remettre en question le système de l'énergie. En 1990, le premier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) fait prendre conscience de l'importance de l'impact de l'activité humaine sur le climat à cause de l'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère. Le changement de climat qui en résultera, nuira à la vie sur Terre telle que nous la connaissons, et à nos économies comme jamais auparavant depuis le début de l'humanité. La diminution de la glace de mer et la diminution de la couverture de neige, l'élévation du niveau de la mer, la modification des précipitations et la fréquence accrue des phénomènes météorologiques extrêmes auront des répercussions sur les populations de nombreuses façons et les obligeront à s'adapter ou à migrer vers des lieux plus hospitaliers. Les premiers scénarios de crise environnementale apparaissent et une coopération internationale est alors nécessaire pour faire face au problème. Une transition en profondeur



de ce système énergétique est alors préconisée. Face aux énergies fossiles, le déploiement massif des énergies renouvelables met en avant une consommation énergétique plus éthique qui ne constituerait pas une hypothèque des ressources et de la qualité de vie des futures générations au profit de nos besoins actuels. De plus, elles permettent de relocaliser la production et les régions dénuées de pétrole peuvent espérer être indépendantes du commerce mondial. Cependant, la montée en puissance de ces énergies montre également progressivement les faiblesses de cette stratégie. En effet, l'opinion générale semble de plus en plus conquise par ces énergies mais sont-elles sans risque et peuvent-elles réellement répondre aux besoins ? Constituent-elles un approvisionnement en énergie infini et durable ? La solution la plus admise aujourd'hui est l'élaboration d'un mix énergétique mondial permettant d'assurer de faibles émissions de GES et une quantité suffisante d'énergie. En effet, l'opinion publique semble souvent trompée par la façade "durable" des énergies dites renouvelables. Il n'existe pas de source d'énergie parfaite, il est nécessaire de trouver le juste équilibre entre fiabilité, accessibilité économique et préservation de l'environnement. Nos sociétés ne peuvent pas uniquement compter sur les énergies renouvelables qui sont souvent décrites comme la solution.

De par la place centrale de l'énergie, cette transition a le potentiel d'influencer non seulement la production et la distribution d'énergie, mais également l'organisation sociale, économique et politique du secteur de l'énergie. La transition énergétique soulève alors de nouvelles questions de justice et de morale.

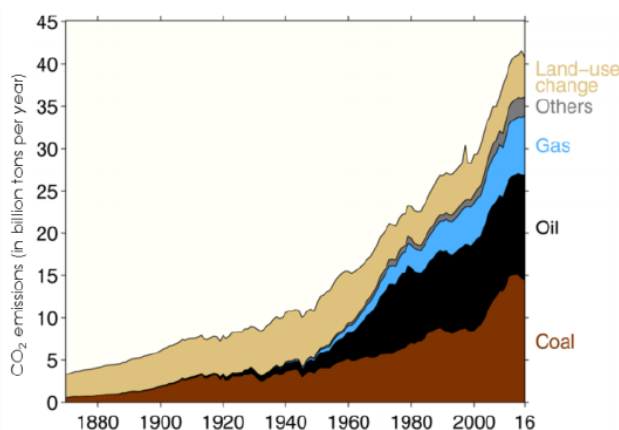


Figure 2 : Evolution des émissions de CO2 de 1880 à 2016

Source : Global Carbon Project (2017)

Dans cette transition, les énergies renouvelables ont un rôle central. Parmi elles, l'éolien dispose de nombreux avantages et est donc au centre de l'attention. Cette filière s'est largement développée durant les dernières années et porte en elle un espoir certain pour le futur. En France, elle représente près de 4,5% de la production d'électricité en 2017 (9,2% pour l'hydraulique et 1,7% pour le solaire) et contrairement à l'hydraulique, elle ne cesse de se développer. En effet, elle est plus polyvalente que ces deux autres énergies ce qui est un atout primordial. Cependant, le contexte actuel semble montrer que la réduction de la production de GES ne suffit plus pour réussir la transition énergétique. Il est essentiel d'avoir une vision systémique des différents aspects mis en jeu. La filière éolienne dispose de beaucoup d'avantages mais est-elle si durable ? Elle représente un bouleversement total de la manière de produire de l'énergie. Ainsi, ce changement brutal ne révèle-t-il pas d'autres enjeux sociétaux ? C'est pourquoi notre travail a pour ambition d'exposer les aspects moraux de la transition énergétique et de souligner la relation entre éthique et énergie à travers la filière éolienne en répondant à la question suivante :

Pourquoi une énergie renouvelable comme l'éolien pose-t-elle des questions d'éthiques et de justice sociale ?



I. Les enjeux de la transition énergétique

Le système mondial de l'énergie est sur le point du subir une transformation radicale. Beaucoup d'incertitudes sont liées à ce changement, mais un des objectifs principaux est clairement défini : il est nécessaire de limiter l'impact environnemental de ce secteur et de drastiquement réduire sa quantité de GES émis. Cependant, la remise en question progressive de ce système depuis les dernières années à apporter de nouvelles questions sur les inégalités dont il pouvait être responsable. Les enjeux de cette transition énergétique sont donc multiples et prennent en compte des critères environnementaux et économiques mais aussi sociaux. Il ne s'agit plus de simplement atteindre une production d'énergie n'émettant que très peu de GES (voir pas du tout), mais de tendre vers la durabilité de notre énergie.

Nous verrons donc au cours de cette première partie les enjeux de la transition énergétique et ses objectifs. C'est à travers le constat des problèmes actuels que ces enjeux seront mis en évidence.

A. L'urgence environnementale

L'enjeu environnemental de la transition énergétique est sans aucun doute le plus préoccupant et le plus discuté, il est urgent de réduire l'impact environnemental de l'énergie pour ne pas atteindre un point de non-retour. L'impact des activités humaines sur le climat a été déjà été prouvé et notre mode de vie actuelle engendrerait une détérioration irréversible de l'équilibre de la nature. Dans la partie suivante, l'évolution de l'énergie mondiale depuis ces dernières années est exposée afin d'en comprendre les tendances et les prédictions. Grâce à cela, des leviers de la transition mis en avant par les experts actuels seront introduits et permettront d'appréhender le futur de l'énergie mondiale.

Les combustibles fossiles constituent depuis presque un siècle l'essentiel de la consommation mondiale (voir figure 1). Or les émissions de GES dégagées lors de leur combustion s'accumulent encore et toujours dans l'atmosphère et entraînent une hausse des températures dans le monde. Le changement climatique induit par cette pollution nuira inévitablement à la vie sur Terre et à nos économies. Plusieurs phénomènes seront causés par cette hausse des températures et certains se font déjà ressentir. La fonte des glaces, l'élévation du niveau de la mer, la modification des précipitations et la fréquence accrue des phénomènes météorologiques extrêmes auront un impact considérable sur les populations et les obligeront à s'adapter à des conditions extrêmes ou à migrer vers des lieux plus hospitaliers.

- **Un constat préoccupant**

Les observations récentes de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) montrent que la quantité de GES émis ne cessent d'augmenter : passant de 20 518 Mt CO₂ en 1990 à 32 316 Mt CO₂ en 2016. Pour analyser l'évolution des émissions de GES, l'équation de Kaya est par exemple utilisée par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) [13]. Cette équation relie les émissions anthropiques de CO₂ à des paramètres d'ordre démographique, économique et énergétique. Selon Yoichi Kaya, le niveau total d'émission peut être évalué grâce au produit de quatre facteurs (voir figure 3) :



- Le contenu en CO2 de l'énergie consommée
- L'intensité énergétique de notre activité économique (généralement mesurée par la quantité d'énergie consommée divisée par le PIB)
- Le PIB par habitant
- La population mondiale

Tous les pays membres des Nations Unies ont convenu à Paris d'atteindre un niveau d'émissions « zéro net » dès que possible dans la seconde moitié du 21^e siècle, conformément à l'objectif de limitation de la croissance des températures à +2°C. De nombreux scénarios existent pour estimer les tendances futures compatibles avec cet objectif, diviser collectivement nos émissions de CO2 par 3 entre aujourd'hui et 2050 en fait partie. Selon les plus récentes estimations des Nations Unies, la population mondiale augmentera de 30% entre aujourd'hui et 2050. Dans le même temps, en supposant que le PIB mondial par habitant augmentera au cours des 35 prochaines années aussi rapidement que les 35 dernières, cela signifie que le terme PIB / habitant augmentera d'environ 60% d'ici 2050. En résumé, cela signifie que, pour diviser les émissions mondiales par 3 en 2050, avec 30% de personnes en plus et un PIB de 60% plus élevé par habitant, nous devons diviser les deux autres termes de cette équation, CO2 / énergie ou énergie / PIB par plus de 6!

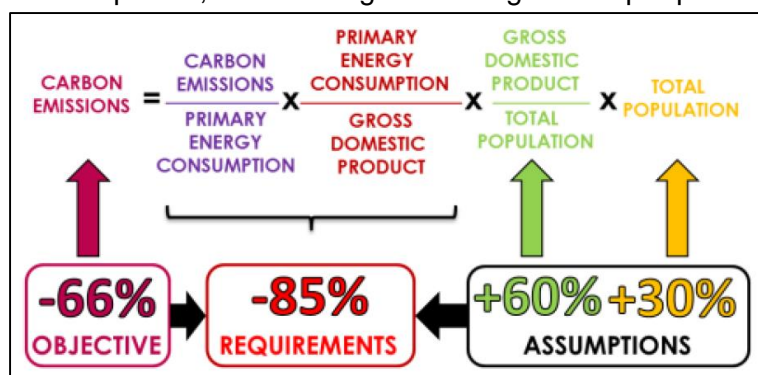


Figure 3 : Evolution des facteurs de Kaya entre 2015 et 2050

Par conséquent, cette équation met en avant deux leviers pour atteindre ces objectifs : la teneur en carbone de l'énergie consommée et l'intensité énergétique de notre activité économique.

Or le premier de ces paramètres n'a pas évolué depuis 30 ans (voir figure 4). Après un léger recul dans les années 90, il a augmenté après 2000 en raison du développement économique rapide de plusieurs pays asiatiques, soutenu par une consommation intensive de charbon et de pétrole. En moyenne, l'approvisionnement en énergie primaire nécessaire pour produire une unité de PIB supplémentaire a diminué de 1% par an, sous l'effet de l'amélioration de nos processus industriels, mais aussi du développement du secteur des services dans le PIB mondial. En effet, il nécessite moins d'énergie que les industries lourdes par exemple.

Néanmoins, nous sommes loin d'être en phase avec l'obligation de réduire de -5% par an l'intensité globale en carbone du PIB, ce qui est attendu dans un scénario compatible avec une hausse inférieure à 2°C. En définitif, nous ne sommes pas sur la bonne voie.



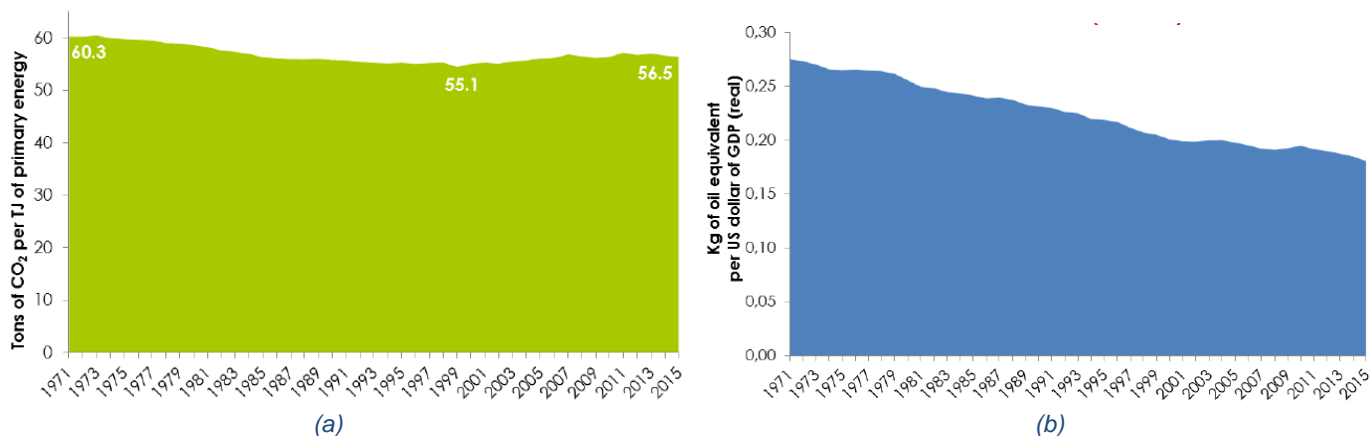


Figure 4 : Evolution de la teneur en carbone de l'approvisionnement en énergie (a) et de l'intensité énergétique du PIB mondial (b)

- Les leviers d'actions possibles

Pour atteindre ces objectifs des solutions sont possibles et connues depuis maintenant plusieurs décennies. L'augmentation de la part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial est évidemment une piste importante d'amélioration mais l'efficacité énergétique des technologies pourrait avoir un plus grand impact. Le graphique ci-dessous (figure 6) représente les émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie de différentes sources d'électricité. Les barres montrent les résultats d'une série d'études évaluant la teneur en carbone (mesurée ici en grammes CO₂ équivalent) pour chaque kilowattheure

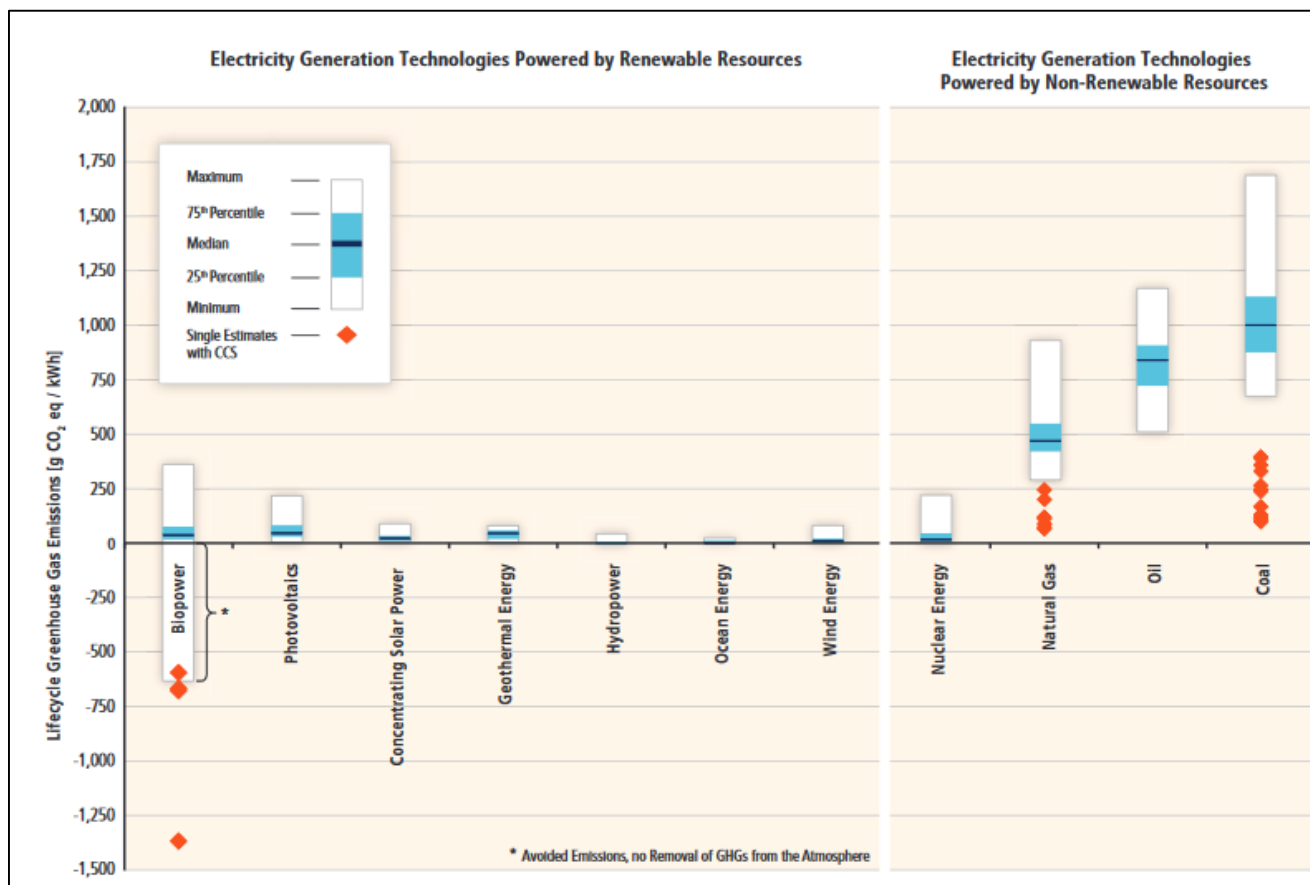


Figure 6 : Émissions de GES dans le cycle de vie des technologies de production d'électricité

Source : IPCC (2011), Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.



d'électricité produite. Décarboniser notre énergie implique donc très clairement de passer de notre mix à 80% de combustibles fossiles à des sources faibles en carbone telles que l'énergie hydraulique, éolienne, solaire ou la bioénergie. De plus, des technologies permettent même d'atteindre des émissions négatives (donc de la consommation) de CO₂ comme l'exploitation de la biomasse ou encore le Captage et le Stockage du Carbone (CCS).

Cependant, certaines de ses sources d'énergie plus « vertes » sont également controversées sur l'aspect environnemental puisqu'elles perturbent l'équilibre naturel d'une autre façon. En effet, la biodiversité est de plus en plus menacée et l'industrie de l'énergie n'est pas neutre sur ce point. En mai 2019, Paris a accueilli l'IPBES (Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les services Ecosystémiques) rassemblant des experts de la biodiversité et des représentants de 130 pays. Selon cette organisation, jusqu'à un million d'espèces animales et végétales pourraient être menacées d'extinction dans les prochaines années. L'importance vitale de la biodiversité alarme devant ce constat et des politiques doivent être menées pour préserver ces espèces. Malheureusement, les énergies renouvelables ne semblent pas pouvoir répondre facilement à ce problème. Première source de production d'énergie renouvelable en France, les barrages hydrauliques perturbent des écosystèmes entiers en régulant les débits des fleuves. Les éoliennes, également, affectent la migration d'espèces et semblent être responsables de la mort d'oiseaux les percutants. Enfin, l'exploitation de la biomasse et des biocarburants crée une production grandissante de monoculture et une occupation des terres importantes, homogénéisant ainsi les espèces. Le projet de la bioraffinerie de Total à La Mède a par exemple été décrié [7] : une partie non négligeable de l'huile utilisée pour produire ce carburant était de l'huile de palme. Un produit bon marché importé de l'étranger qui est responsable d'une déforestation alarmante. Les émissions de GES constituent donc le facteur de pollution le plus important de ce secteur, néanmoins, l'industrie de l'énergie produit également d'autres types de pollution qu'il est nécessaire de prendre en compte.

Enfin, l'efficacité énergétique de nos installations semblerait constituer un levier d'action important pour abaisser nos besoins énergétiques et donc limiter l'impact de ce secteur.

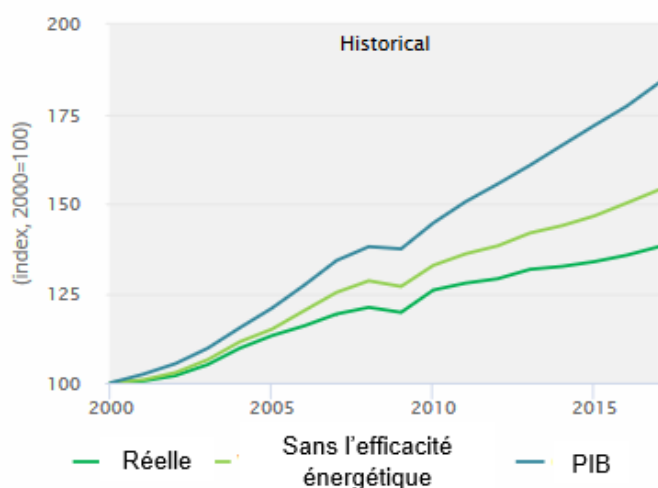


Figure 5 : Impact de l'efficacité énergétique sur la consommation d'énergie : la demande mondiale en énergie entre 2000 et 2017

Source : IEA, Energy Efficiency Market Report 2018.

En effet, une des raisons de la diminution progressive de l'intensité énergétique de la production de richesse dans le monde (figure 4) est bien une constante amélioration de cette efficacité. D'après l'AIE, sans l'augmentation de l'efficacité énergétique, la consommation en énergie mondiale en 2017 aurait été supérieure à 12% (figure 5). Cette économie est énorme puisqu'elle représente la consommation annuelle de l'Union Européenne. Avec l'évolution de nos technologies, le potentiel de l'efficacité énergétique est donc considérable et permettrait d'abaisser grandement la



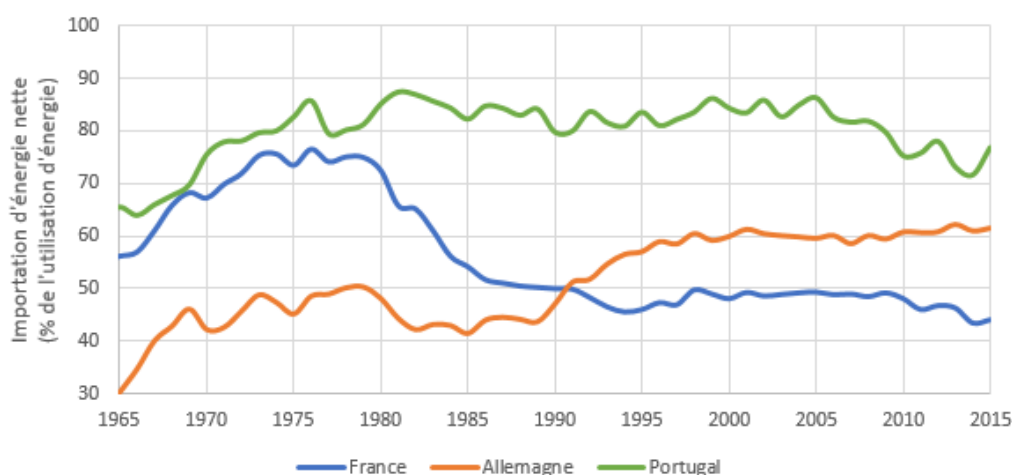
courbe de l'évolution de la consommation d'énergie. En effet, l'énergie impacte grandement l'économie et le développement de nos sociétés et la transition énergétique sera alors sous l'influence de critères économiques.

B. Les difficultés économiques

La transition énergétique est indéniablement réfléchie en prenant en compte des critères économiques. En effet, le développement économique d'une région a tendance à aller de pair avec la transformation du secteur énergétique. L'approvisionnement en énergie sûre et abordable à tous les habitants est donc essentiel à la croissance économique et fait partie des enjeux de cette transition. Malheureusement, les ressources naturelles ne sont pas réparties équitablement sur toutes les régions du monde. Le mix énergétique des pays est donc globalement lié aux ressources dont il dispose. De plus, la production de l'énergie est alors globalement centralisée puisqu'en effet, les besoins énergétiques du monde sont principalement comblés par des énergies fossiles. L'énergie impacte largement l'économie de notre monde et est au centre des relations internationales, créant un véritable réseau commercial.

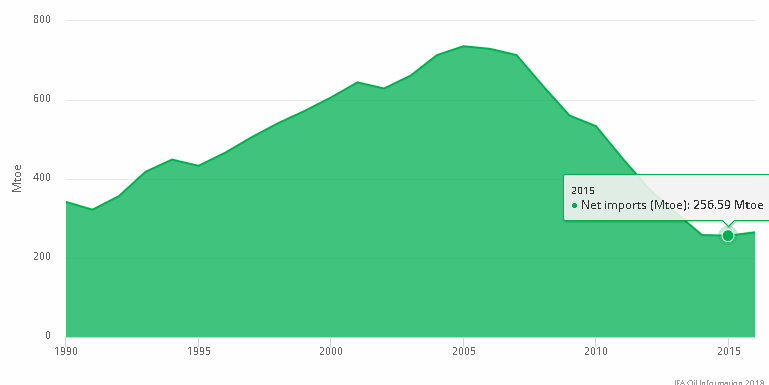
- *Eviter la dépendance énergétique à tout prix*

Cependant, l'émergence d'énergies nouvelles offre à certaines régions l'opportunité de se libérer de cette dépendance et décentraliser la production. En effet, des régions entières sont dépendantes des relations internationales et commerciales autour des pays producteurs. Par conséquence, la stabilité de l'économie du pays entier est menacée en permanence par une crise énergétique. L'importance de l'énergie a amené des Etats à mener des politiques visant à limiter leur dépendance énergétique durant le siècle dernier. Par conséquence, le mix énergétique d'un pays est indéniablement lié aux ressources dont il dispose. L'Allemagne a par exemple longtemps satisfait ses besoins à l'aide de son charbon et s'efforce depuis peu de réformer son énergie sous la pression d'opinions écologiques. La France s'appuie sur son important réseau hydroélectrique mais surtout sur la puissance du nucléaire dont l'uranium provient d'un réseau lié à l'histoire française. Certains pays n'ont pas eu la chance de disposer de suffisamment de ressources pour satisfaire leur besoin et ont donc rapidement été dépendant du marché mondial. C'est le cas du Portugal [8] [10] [11] dont la production d'énergie n'a pas pu suivre l'augmentation exponentielle de sa demande à la fin du XXème siècle et a dépassé 80% de dépendance énergétique. Une situation alarmante et inconfortable puisque le pays dépendait majoritairement de l'import d'énergie fossile dont les prix et l'approvisionnement sont difficilement prévisibles d'après l'histoire.



Cela a donc poussé le gouvernement à mener des politiques visant à réduire cette dépendance. L'AIE énonce [4] les grands traits de ces décisions basées sur des investissements importants dans le secteur de l'énergie malgré le contexte de crise économique de cette période (2007-2016). Parmi elles, l'amplification du déploiement des énergies renouvelables, une libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz naturel et une plus grande importance accordée à l'efficacité énergétique ont permis d'enfin diminuer la quantité d'énergie importée et consommée. C'est également grâce à la communauté européenne et ses nouvelles politiques, qui ambitionnent de créer une Europe indépendante énergétiquement et capable de fournir une énergie sûre et abordable à tous, que le Portugal a pu évoluer. En effet, renforcer les interconnexions avec les réseaux européens d'électricité et de gaz naturel, ainsi que promouvoir la durabilité économique et environnementale ont été des objectifs clefs de cette nouvelle politique. Le Portugal ne produit pas de combustibles fossiles et sa production s'est donc orientée vers les énergies renouvelables en grande partie. L'éolien, le solaire, la géothermie, les biocarburants et les déchets ont respectivement augmenté de 31%, 20%, 8,4% et 0,2% en moyenne par an en 2013-2014. Et en 2014, l'énergie est produite à partir de biocarburants et de déchets (52,2%), d'hydroélectricité (23,9%), d'énergie éolienne (18,5%), d'énergie géothermique (3,1%) et solaire (2,3%). A cette date, la quantité d'énergie produite a augmenté de 44,4% par rapport à 2004. Cependant, l'économie portugaise est encore largement soutenue par l'importation d'énergie fossile et cette évolution doit continuer pour atteindre les objectifs. Néanmoins, ce pays est un exemple de la volonté d'indépendance énergétique des Etats et l'association des énergies renouvelables et d'une politique européenne de coopération pourrait permettre cela.

Net energy imports
United States 1990 - 2016



D'autres pays n'ont pas fait le choix du renouvelable pour combler ce besoin : les Etats-Unis ont largement développé les technologies de fracturation hydraulique durant ces dernières années. De hauts risques écologiques et sociaux planent autour de cette façon de produire du gaz. Cependant, cela a permis de grandement abaisser le

rapport entre la quantité d'énergie importée sur le sol américain et celle exportée. C'est ainsi que la volonté de s'extraire d'une trop forte dépendance énergétique peut mener à un développement allant à l'encontre des principes de durabilité.

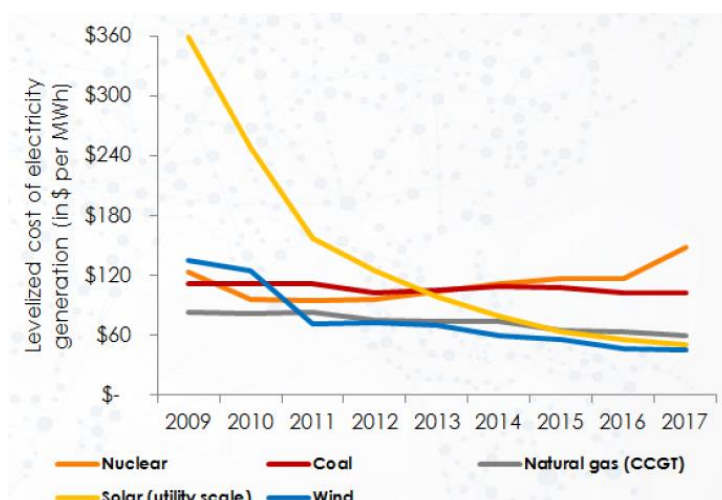
- Evolution des coûts de l'énergie favorable au changement

Ce changement soudain dans la stratégie de cet Etat ne relève pas simplement d'une prise de conscience des différents acteurs, c'est la décroissance des coûts des filières renouvelables qui ont permis de débloquer la situation. En effet, le coût de l'énergie influence largement ce marché et la façon dont l'énergie est produite. Ainsi le marché a été et est encore dominé par les énergies fossiles puisque cette production est économiquement très compétitive. De plus, le pétrole par exemple est facilement stockable et transportable, sans perte significative contrairement aux sources électriques. Le coût total de l'énergie fossile sur l'ensemble de son cycle de vie est alors souvent inférieur aux autres.

Les énergies éoliennes et solaires souffrent par exemple d'une production discontinue, liée aux conditions météorologiques. Ainsi, une éolienne produira de l'électricité entre 15 et 40%



de l'année alors que les panneaux solaires seront de l'ordre de 10 à 25%. Tandis que le charbon, le gaz naturel ou le nucléaire peuvent atteindre 90% [5]. En plus de ces fluctuations temporelles, une variation quantitative s'ajoute à cela. Effectivement, une éolienne peut fonctionner uniquement en présence de vent, mais la quantité d'énergie produite varie énormément en fonction de l'intensité de ce vent. Ainsi, en Allemagne durant 2008, la production d'énergie issue du solaire et de l'éolien a varié en une semaine de 1GW à 40 GW. Ces énergies sont donc intermittentes et il est nécessaire d'adapter le réseau et les infrastructures en fonction de cette production fluctuante grâce à des énergies plus flexibles. Cependant, les avancées technologiques des filières renouvelables durant ces dernières années ont amélioré leur efficacité et donc abaissé leur coût. Ce sont les problématiques de stockage et de transport de l'électricité qui mobilisent l'essentiel de la recherche actuelle. L'amélioration des rendements énergétiques a aussi participé jusqu'à permettre une production à coûts modérés aujourd'hui, surtout pour les panneaux solaires. L'électricité ne pouvait jusqu'à présent pas être stockée facilement de manière économique, de nombreux pays ont donc privilégié la flexibilité des moyens de production distribuables (tels que les combustibles nucléaires et fossiles) par rapport à des ressources variables telles que l'éolien et le solaire. Ce sont les améliorations de son stockage à travers les batteries qui contribuent en grande partie à cette baisse continue de ces coûts, exposée sur la figure suivante.



Cependant, les coûts exposés sur ce graphique dépendent largement du contexte géographique et économique, et une étude au cas par cas doit être menée généralement. Ainsi, cela ne donne qu'une idée de l'évolution de ces coûts et il est difficile de comparer directement les avantages économiques d'une énergie par rapport à une autre. Mais cela souligne un point essentiel, les coûts des sources d'énergie vertes telles que l'éolien ou le solaire suivent une tendance favorable.

Fournir une énergie abordable est un des objectifs principaux d'un Etat mais l'impact de cette production sur l'environnement est également préoccupant. Les changements nécessaires de nos sources impliquent des investissements importants puisqu'il est nécessaire d'adapter tout un système. En 2011, l'AIE estimait que des investissements minimums de 38 000 milliards dollars seraient nécessaires pour répondre à la demande mondiale en énergie jusqu'en 2035. Ainsi, les gouvernements sont parfois contraints de faire des choix politiques. En novembre 2018, le gouvernement français tente d'augmenter la Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques (TICPE), impactant principalement les produits pétroliers, en annonçant vouloir insister le citoyen à consommer moins et financer la transition énergétique par ce biais. Suite à cela, un grand nombre de citoyen s'est mobilisé créant le « Mouvement des Gilets Jaunes ». Ce mouvement protestataire, qui a très vite dérivé sur d'autres problèmes d'inégalités, illustre la nécessité de prise en compte de l'impact social de la transition énergétique lors de décisions politiques.



C. L'émergence d'enjeux sociaux

Face à l'importance du changement de l'organisation de la production et de la consommation d'énergie, la société réclame, aujourd'hui plus que jamais, ses droits et exige une prise en compte plus importante des enjeux sociaux de la transition énergétique. Partout dans le monde, la mobilisation sociale autour de l'implantation ou la fermeture de sites de production d'énergie est présente. Et ce peu importe la source d'énergie en question. Les efforts nécessaires pour transformer notre système énergétique, ne relèveront pas seulement de changements technologiques et économiques, ils vont aussi redéfinir le fonctionnement entier de notre société. En effet, il ne s'agit plus de choisir quel type d'énergie est préférable, mais plutôt de se questionner sur l'adaptation de l'organisation sociale, économique et politique avec le futur mix énergétique.

Les travaux de Clark Miller [1] [13] [14] ont par exemple mis en évidence les liens étroits entre l'énergie et la société. Il en va jusqu'à décrire le système de l'énergie comme étant en réalité un « sociotechnological system », comprenant des éléments sociaux et technologiques difficilement dissociables. Ainsi, il explique que « les systèmes énergétiques sont des systèmes sociotechnologiques qui impliquent non seulement des machines, des canalisations, des mines, des raffineries et des appareils, mais également les humains qui conçoivent et développent des technologies, développent et gèrent des routines, utilisent et consomment de l'énergie ». L'expansion des énergies vertes, l'essor du big data dans le système de l'énergie, l'arrivée des véhicules hybrides et électriques ou encore l'incorporation de l'hydrogène surviennent en relation directe avec des changements de valeurs, de décisions, de comportements, de relations et de pratiques. Ces technologies influencent également l'économie en modifiant par exemple les modèles économiques et commerciaux. Ce rapport entre énergie et société peut être mis en évidence en étudiant le système français dont la production est majoritairement issue du nucléaire. Grâce à cette source produisant de grande quantité d'énergie, les prix de l'électricité en France sont relativement bas (187\$/MWh contre 344\$/MWh en Allemagne) [4]. Mais cette énergie nucléaire a provoqué une centralisation du pouvoir, sous prétexte d'enjeux sécuritaires et organisationnels. Ce lien fort entre énergie et société a donc engendré des réflexions questionnant l'aspect éthique du système énergétique actuel.

- *La Justice Énergétique*

La question éthique la plus répandue de la production et de l'utilisation de l'énergie relève peut-être de l'équité énergétique et de la justice. Les décisions politiques liés aux énergies ne réorganisent pas seulement la production et la consommation d'énergie, elles affectent également la façon dont les risques, les richesses et le pouvoir liés à cette activité sont redistribués. Clark Miller définit ainsi la justice énergétique comme impliquant des « choix de types de systèmes énergétiques à construire pour l'avenir, où les construire et comment répartir leurs avantages, leurs coûts et leurs risques ». Aujourd'hui, ce système est loin d'être équitable : de nombreuses régions du monde n'ont pas un accès convenable à l'électricité tandis que des citoyens peuvent profiter de stations de recharge en accès libre pour leur véhicule électrique. C'est pourquoi, parmi les résolutions adoptées par l'Assemblée générale de l'ONU en 2016 figurait le constat suivant [21] : « Profondément préoccupée par le fait que, dans les pays en développement, 2,7milliards de personnes, en particulier dans les zones rurales, sont tributaires de la biomasse traditionnelle pour cuisiner et se chauffer, ce qui accroît de façon disproportionnée la charge de travail des femmes et des enfants et porte excessivement atteinte à leur santé, que 1,2milliard de personnes n'ont pas accès à l'électricité et que, même là où des services de distribution d'énergie sont disponibles, ils sont



trop coûteux pour des millions de pauvres ». La question de la juste distribution de ces richesses énergétiques doit être traitée et elle n'est pas assez prise en compte même sur des projets récents. Le plus grand projet au monde d'énergie renouvelable, appelé Desertec [19], vise à alimenter la région Europe-Moyen-Orient-Afrique du Nord (EU-MENA) en énergie durable et à des prix abordables. Cet objectif serait atteint par la construction de 40 centrales solaires et éoliennes principalement en Afrique du Nord. Cependant, ce projet a été accusé de servir exclusivement les intérêts des pays du Nord et de l'Est. Le manque de considération pour cette équité énergétique se traduit principalement dans le manque d'outil et méthode pour l'incorporer dans les prises de décisions et éviter ces problèmes. L'implantation de nouveaux sites de production est souvent soutenue par des arguments tels que les retombées économiques grâce à la création d'emplois ou encore la baisse du coût de l'énergie. Néanmoins, ces arguments sont réfléchis par rapport à une zone géographique spécifiques et omettent plusieurs détails. Par exemple, Jones [22] a démontré en se basant sur des faits historiques que, dans une région donnée, la répartition de ces avantages varie en fonction du type de technologie de transport d'énergie adopté. La construction et l'exploitation de canaux pour le transport du charbon ont généré un important développement économique secondaire le long de la voie de transport, ce qui n'a été le cas pour les pipelines ou les lignes de transport. Il en va de même de la réflexion sur la distribution des risques liés à la production d'énergie. En effet, le constat de la situation actuelle montre que les polluants et les procédés les plus dangereux associés à l'industrie de l'énergie sont presque systématiquement concentrés à proximités de régions pauvres ayant peu d'influence politique. Contrairement aux régions les plus riches, qui sont les plus grosses consommatrices d'énergie et peuvent vivre sans s'exposer à de tels risques. La transition vers des sources d'énergies renouvelables devrait rendre obsolètes la plupart des installations que ciblent fréquemment les activistes de la justice environnementale, notamment les raffineries de pétrole et les centrales à charbon. De ce fait, les énergies renouvelables jouissent d'une image plus juste auprès de la population, cependant, elles ont le potentiel d'accentuer ce déséquilibre. Les ressources nécessaires à la fabrication d'éoliennes ou de panneaux solaires sont rares et leur extraction est souvent effectuée dans des conditions désastreuses pour l'environnement et pour les populations locales. Par exemple, l'extraction de lithium au Chili consomme énormément d'eau, alors que la région est régulièrement victime au manque d'eau. Des manifestations publiques régulières réclament plus de modération et dénoncent ce problème. Ainsi, la transition énergétique a le potentiel de reproduire la situation actuelle en remplaçant l'hégémonie du pétrole par l'ère de l'électricité.

- *Une Remise en cause de la gouvernance actuelle*

Le contexte actuel marqué par l'émergence des énergies renouvelables et de moyens de transport alternatifs (voitures électriques, hybrides, vélo électriques ...), la mise en place de moyens « non-conventionnels » de production de pétrole et de gaz, la volatilité des prix du pétrole et les accidents nucléaires de Fukushima et de Tchernobyl ont appelé les citoyens à remettre en cause la gouvernance, jusqu'à présent, majoritairement centralisée de l'énergie. La gouvernance définit les pratiques et les processus des institutions de régulation de l'énergie, ainsi que la dynamique politique plus large et les structures organisationnelles dans lesquelles elles sont intégrées. Durant le XXème siècle, le pouvoir a été concentré dans les mains de décideurs politiques, d'experts scientifiques et de commerciaux probablement à cause des lourds investissements nécessaires aux infrastructures et du fait de la stabilité de l'approvisionnement de ce réseau. Directement impactés par les événements révélés à une société également mieux informée, le citoyen européen se mobilisa par exemple de plus en plus pour contester l'exploitation du nucléaire ou du charbon en tant que source d'énergie.



Cet intérêt croissant n'est pas exclusif au secteur de l'énergie, le citoyen veut être mieux incorporé aux décisions politiques.

Les avancées technologiques récentes des énergies renouvelables pourraient permettre de décentraliser ce système et répartir sa gestion sur une échelle plus locale. Par nature, la production d'énergie renouvelable offre le choix d'une gouvernance plus locale, contrairement aux énergies conventionnelles. Ainsi, de plus en plus de régions, et même de villes, expriment l'envie d'atteindre une autosuffisance énergétique. Tineke van der Schoor et Bert Scholtens [15] ont par exemple étudié ces nouvelles initiatives locales en observant leurs causes et leurs intérêts. Elles ont le potentiel de prioriser l'intérêt de cette communauté de façon cohérente et démocratique. Cela peut donc contribuer à une transition énergétique plus juste au travers d'une décentralisation du système et de l'exploitation d'énergie renouvelable. Néanmoins, ces énergies qui jouissent actuellement d'une image favorable auprès du public, pourraient évoluer dans la mauvaise direction. En effet, les éoliennes sont par exemple dimensionnées de plus en plus grande afin d'augmenter leur rendement énergétique. Ce choix dans la conception impacte directement la compatibilité de cette technologie avec la volonté d'une gouvernance plus démocratique. Cela augmente effectivement le prix d'investissement et conforte la dimension industrielle de l'énergie.

- *Solutions proposées pour incorporer le citoyen*

Le constat actuel de l'impact social de l'industrie de l'énergie est clair, ce système ne prend pas assez en compte la dimension sociale. La transition actuelle doit être réfléchi de manière à améliorer cette situation ou la mobilisation citoyenne s'érigera devant les décisions politiques. En redistribuant les capacités énergétiques de chaque région, les énergies renouvelables pourraient permettre de tendre vers un système plus juste. Cependant, Le levier du changement ne se situerait pas sur le choix des sources d'énergies considérées comme éthiques et d'autres contraires à l'éthique, mais entre des conceptions de systèmes différents qui contribuent à des résultats justes ou non. Les choix de conception peuvent être plus éthiques, en ajustant parfois les conceptions technologiques, parfois en adaptant l'organisation sociale, économique et politique de ces technologies d'après les différents auteurs qui se sont penchés sur la question. En l'état actuel, il n'existe pas assez d'outils ou de méthodes capables d'incorporer le citoyen et l'éthique dans la conception des systèmes énergétiques. Clark Miller propose ainsi quatre façons pour tendre vers cet objectif qui peuvent alors être une inspiration pour les changements à venir. Puisque les retombées des solutions de production d'énergie sont essentiellement calculées par rapport au prix final de l'énergie, sa fiabilité et sa quantité de CO2 produite, Clark Miller propose d'incorporer un critère éthique dans l'évaluation des résultats. Il évoque également la prise en charge régulière et moins tardive de l'aspect social dans la conception des systèmes ou encore la modification des analyses de cycle de vie de l'enjeu social. Enfin, il exprime le manque d'un organisme dominant qui pourrait permettre de planifier les stratégies énergétiques et d'aiguiller les changements nécessaires. Seule l'Agence internationale de l'énergie est clairement axée sur l'énergie à l'échelle internationale mais elle ne constituerait essentiellement qu'une source d'informations et non de planification et de coordination énergétiques mondiales.

Conclusion de la première partie

Finalement, les enjeux sociaux de la transition énergétique sont de véritables défis pour la politique et le système actuel tout autant que les enjeux environnementaux et économiques.



Notre système énergétique a hérité de plusieurs injustices sociales que la transition peut résoudre. Les objectifs de cette transition ne doivent plus être uniquement basés sur une réduction des émissions de carbone et sur la stabilité économique de l’approvisionnement. Face à la menace d’un changement climatique, « nous nous adapterons... C’est un problème d’ingénierie qui a des solutions techniques » a déclaré le PDG d’Exxon Mobil en 2012. Il semble nécessaire de comprendre que cette résolution ne se fera pas qu’au travers de la technologie mais requiert d’ajouter des critères sociaux. Il convient donc d’ajouter des critères qui évaluent la répartition équitable des avantages ainsi que des coûts et des risques. La volonté grandissante des citoyens de s’immiscer au sein du pouvoir décisionnel laisse espérer que cela reste possible.



II. Production des éoliennes

Tout d'abord, avant de parler de la production des éoliennes en elle-même, il faut définir quel type d'éolienne nous intéresse. Dans notre étude, nous avons décidé de nous focaliser sur les éoliennes terrestres présentes sur le marché français puisque les éoliennes maritimes commencent tout juste à s'implanter le long de nos côtes. Outre une grande diversité de modèles qui dépendent essentiellement de la pluralité des constructeurs, il faut savoir que les éoliennes se divisent en deux catégories: les éoliennes synchrones et les éoliennes asynchrones. Il est important de faire ici cette différence car ces deux types ne sont pas produits de la même manière et ne nécessitent donc pas les mêmes matières premières pour être produites.

Nous allons alors expliquer la différence entre une éolienne synchrone et une éolienne asynchrone. Le vent, quand il est suffisamment puissant, applique une force sur les pales des éoliennes qui entraîne ensuite la rotation du moyeu. Ce moyeu est directement relié par l'arbre principal au système de génération d'électricité situé dans la nacelle de l'éolienne. Jusqu'ici, les deux types d'éoliennes utilisent le même principe de fonctionnement mais c'est à partir de ce moment que la différence apparaît au niveau de la façon de transformer l'énergie cinétique du vent en électricité.

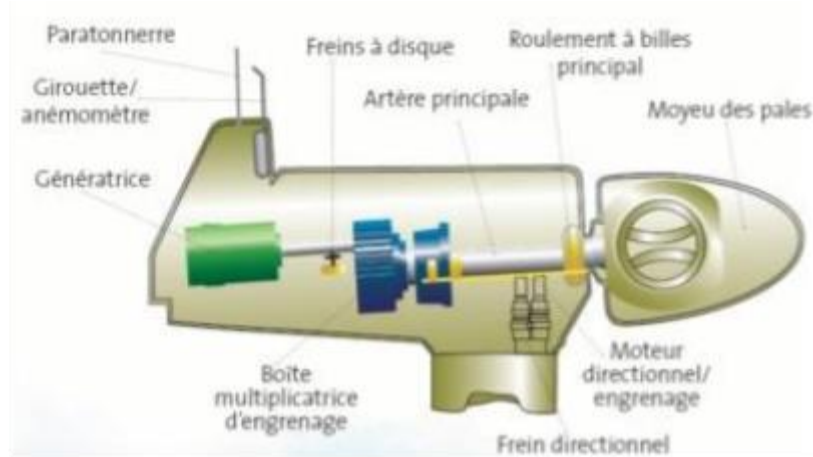


Schéma des composants de la nacelle d'une éolienne

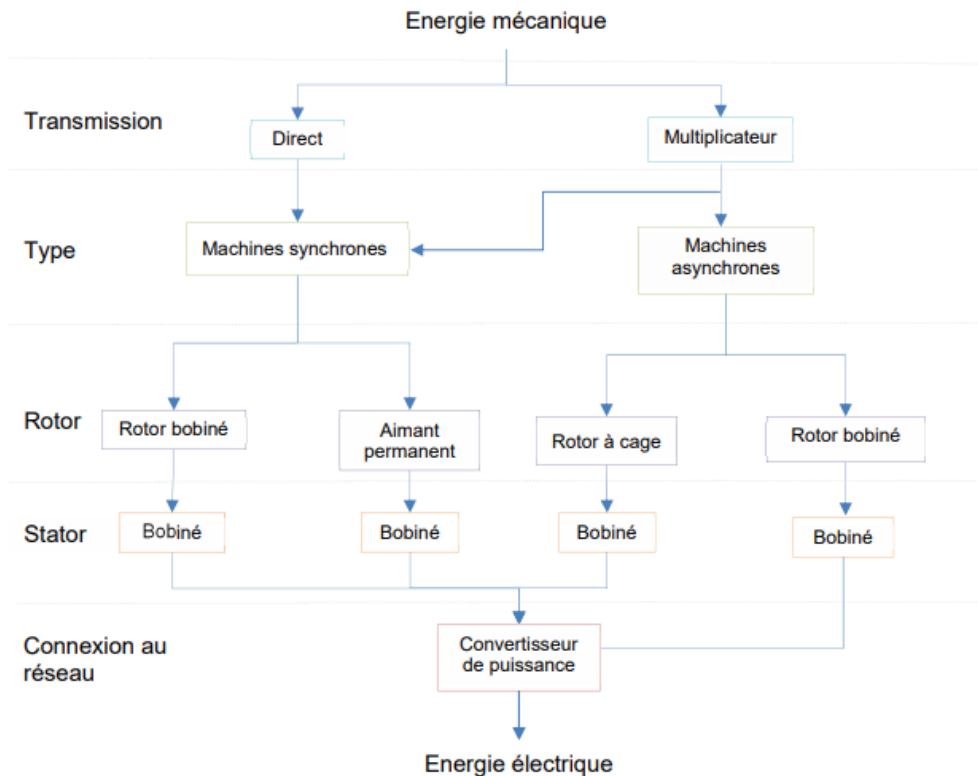
http://grvtsp.fr/tpe/eol_prpc.html

- Pour les éoliennes synchrones, c'est un entraînement direct entre le moyeu et la génératrice. Cette solution possède l'avantage de se soustraire de multiplicateur, car ne nécessitant pas une vitesse importante de l'arbre pour produire de l'électricité. Le rotor est composé d'un système électromagnétique multi polaire créé par des bobines de cuivre ou des aimants permanents. Ces deux systèmes possèdent un meilleur rendement, une masse moins importante et réduisent la maintenance. Cependant, ce système demande une plus grosse quantité de cuivre et la présence de terres rares pour les aimants permanents.
- Pour les éoliennes asynchrones, l'arbre principal est relié à un multiplicateur (aussi appelé boîte de vitesse) qui transforme la faible vitesse de l'arbre principal dépendant de la rotation du moyeu (15 à 20 tr/min) en une vitesse adaptée sur l'arbre rapide permettant à la génératrice de produire de l'électricité. Ici le rotor est composé d'un électro-aimant et non d'un aimant permanent, il faut donc qu'il y ait toujours de



l'électricité stockée dans la nacelle pour pouvoir alimenter l'électro-aimant. C'est une technologie qui a été utilisée depuis les débuts de l'éolienne, c'est donc une technologie mature qui a tout de même des inconvénients comme les pertes d'énergie due au multiplicateur, le bruit et les vibrations plus importantes, etc. Les asynchrones ont aussi le désavantage d'être moins autonome que les synchrones puisque nécessitant de l'électricité pour lancer l'électro-aimant au contraire des synchrones à aimants permanents. Les éoliennes synchrones seraient donc privilégiées pour l'offshore (éolien en mer).

Vous trouverez ci-dessous un schéma résumant les différents types d'éolienne en fonction du mécanisme utilisé pour transformer l'énergie éolienne en électricité.



Maintenant nous allons pouvoir nous intéresser aux détails de la production de leurs composants. Pour cela, nous allons nous appuyer en grande partie sur l'analyse cycle de vie opérée par l'ADEME concernant l'éolien. Bien que le rapport date de 2015, nous estimons que les résultats qu'il pourra nous fournir seront suffisamment fiables pour les appliquer à aujourd'hui en prenant en compte que les éoliennes en fonctionnement en 2015 le sont toujours actuellement et que la technologie de l'éolien n'a subi aucun changement majeur au cours des quatre dernières années. Vous trouverez ci-dessous tableau récapitulant les différents matériaux présents dans les divers composants de l'éolienne.



Partie de l'éolienne	Composants	Matériaux
Rotor	Pales	Fibres de verre ou de carbone et epoxy ou polyester
	Moyeu	Acier
	Nez	Fibres de verre et résine plastique
	Contrôle d'inclinaisons des pales	Acier
Nacelle	Arbre	Acier
	Roulement principal	Acier
	Frein mécanique	Acier
	Multiplicateur	Acier
	Générateur	Acier, cuivre ou aimants permanents
	Transformateur	Acier /cuivre
	Système d'orientation de la nacelle	Acier
	Grue	Acier
	Système hydraulique	Acier / huile
	Armoire électrique et convertisseur	Acier /cuivre /composants électriques
	Cadre, châssis, carénage	Acier /fibre de verre renforcé de plastique
Mât	Mât	Acier
Fondations	Fondations	Acier / Béton

A travers ce tableau, nous pouvons constater qu'une éolienne est composée en grande partie d'acier et de béton, nous retrouvons ensuite le cuivre et les aimants permanents. Dans cette partie, nous allons donc étudier ces différents matériaux afin de comprendre l'impact globale d'une éolienne au point de vue de la consommation de ressources, de la consommation d'énergie et ses impacts sur l'environnement et la société.

A. L'Acier

• Les enjeux environnementaux :

Tout d'abord, analysons d'un point de vue général la figure ci-dessous qui présente les différents impacts environnementaux d'1kWh d'électricité produite par une éolienne française, nous pouvons voir que dans tous les cas, excepté pour l'utilisation des sols et la demande d'énergie cumulée renouvelable, que la fabrication des composants (rotor, nacelle, mât, fondation et câblage interne) représente plus de 50% de l'impact sur chaque indicateur.

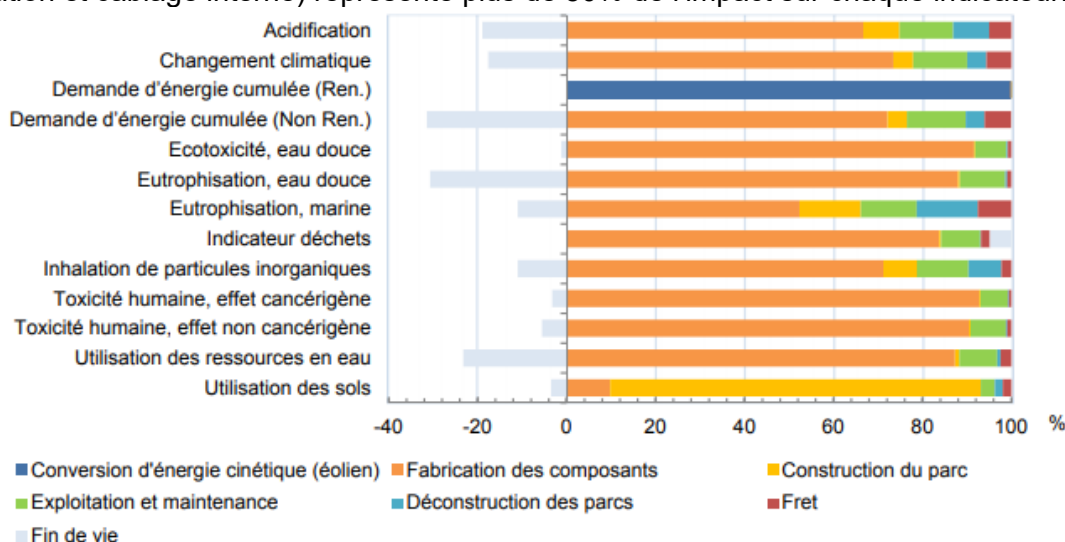


Figure 12 - Impacts environnementaux d'1 kWh d'électricité issu de la filière éolienne française



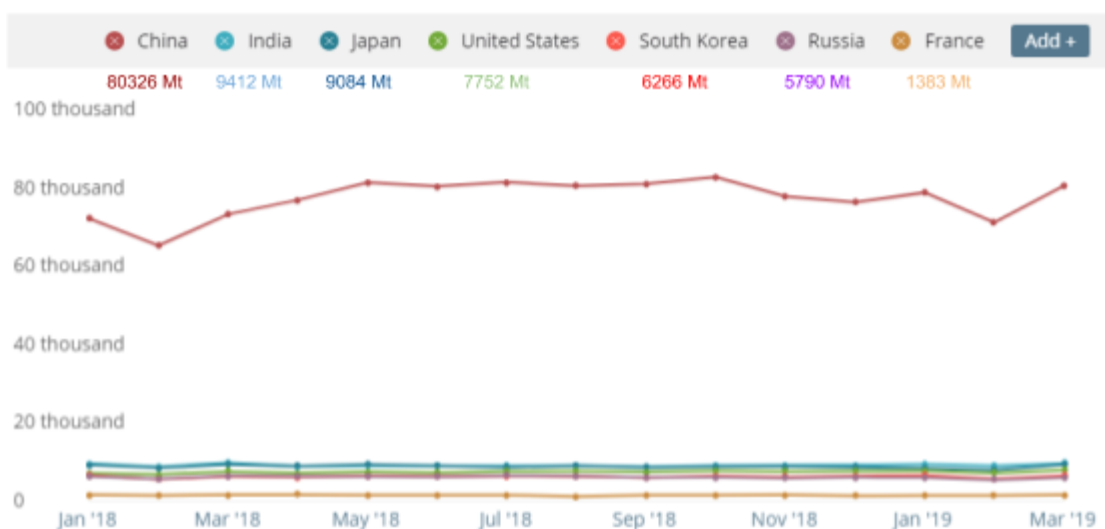
Tout en sachant que l'Acier compose une grande partie de l'éolienne, plus de 20% du poids de l'éolienne en prenant en compte les fondations (ce chiffre passe à plus de 90% si l'on fait abstractions des fondations) (voir Gamesa G90 2 MW en annexe), il est ainsi facile de comprendre que l'impact de l'Acier est prédominant dans la fabrication des composants.

Si l'on prend par exemple le critère du changement climatique qui parle généralement au plus grand nombre car il se mesure en grammes de CO₂ rejeté dans l'atmosphère, nous pouvons constater que lorsque l'on additionne l'impact des différents aciers de l'éolienne (inoxydable, peu allié, renforcement, fonte) provenant tous de l'extraction du fer on obtient une contribution avoisinant les 40% de l'impact. L'industrie de l'acier est considérée comme une grande émettrice de gaz à effet de serre, jusqu'à deux tonne de CO₂ émis pour une tonne d'acier produit. Ce chiffre tombe à moins de 1 tonne de CO₂ pour de l'acier issu de la filière recyclage. Ces émissions sont liées principalement à l'énergie utilisée dans les différents procédés de transformation du minerai de fer (fourneau, convertisseur à l'oxygène, etc).

Si l'on s'intéresse maintenant à l'utilisation des ressources en eau, nous pouvons voir qu'encore une fois c'est la fabrication de l'acier qui consomme énormément d'eau tout au long de sa transformation (exemple: 6 m³/t pour l'obtention des minerais de fer ou encore 5.5 m³/t pour le procédé de laminage à chaud et cette liste n'est pas exhaustive). De plus cette importante utilisation d'eau s'accompagne par d'autres impacts néfastes pour l'environnement puisque le critère d'Éco toxicité de l'eau douce révèle la présence de Chrome VI et d'Antimoine dans l'eau.

- Les enjeux sociétaux

Comme nous venons de le voir précédemment, le processus de fabrication de l'acier rejette du Chrome VI dans l'eau qui est nocif pour l'Homme à forte dose. C'est donc ce Chrome VI qui est responsable en grande partie de la toxicité humaine cancérigène. On peut donc se demander ce qui advient à cette eau lorsqu'elle n'est pas traitée, par exemple dans les pays négligents en matière de respect de normes environnementales comme la Chine. Cette dernière qui produit d'ailleurs plus de 50% de l'acier dans le monde comme le souligne le graphique ci-dessous.



Graphique présentant la quantité d'acier produite aujourd'hui dans le monde

Cette présence importante de la Chine sur le marché de l'Acier, qui est un matériau très sollicité dans des domaines d'applications très différents (construction, automobile,



aéronautique, etc), donne aux Chinois le pouvoir de contrôler les approvisionnements et donc de les interrompre s'ils le souhaitent. Ce qui rend la solution très délicate mais nous verrons par la suite que ce n'est pas le seul matériau qui subit ces pressions géopolitiques.

B. Le Béton

- Les enjeux environnementaux:

Tout comme l'acier, le béton est un matériau majeur dans la construction d'une éolienne puisqu'il est notamment utile aux fondations de ces dernières quand il ne rentre pas en compte dans la fabrication des mâts (voir Enercon E82 2.3 MW). En effet la masse de béton correspond à plus de 75% de la masse totale de l'éolienne (en prenant les chiffres de la Gamesa G90 2 MW). La masse de béton présent dans les fondations varient beaucoup en fonction du modèle de l'éolienne, mais dans tous les cas, il représente une part non négligeable dans l'impact de l'éolienne.

En nous appuyant de nouveau sur le critère de réchauffement climatique, on s'aperçoit que les rejets de CO₂ du béton représentent 8% de tous les rejets de GES de l'éolienne. Le béton étant un mélange de clinker (plus communément appelé ciment), de cailloux, de sable et d'eau, c'est surtout l'impact du ciment qui est le plus problématique. Cet impact provient du procédé pour obtenir l'oxyde de calcium (composant du clinker) qui nécessite de chauffer le calcaire à haute température pour produire du ciment. Jusqu'à 900 kg de CO₂ sont émis pour fabriquer 1 tonne de ciment. Aujourd'hui, l'industrie du béton opère sa transition écologique en essayant de varier les combustibles utilisés dans les hauts fourneaux (incinération de déchets par exemple) ou encore en faisant varier la quantité de clinker dans le béton en le remplaçant en partie par des déchets de l'industrie sidérurgique: les laitiers.

Mais l'émission de GES n'est pas le seul critère à prendre en compte, comme il a déjà été précisé, le béton a besoin également d'une grande quantité d'eau pour sa mise en place dans les fondations. Il utilise 26% des ressources en eau nécessaire à la fabrication de tous les composants. Cette forte consommation d'eau n'est pas un réel problème en France car le pays est rarement soumis à un stress hydrique mais ce critère peut être plus contraignant dans d'autres pays.

En voulant aller plus loin dans l'analyse autour du béton, nous avons voulu comparer les quantités de béton nécessaires pour produire la même quantité d'énergie entre l'éolien et le nucléaire. Nous avons trouvé que les nouveaux réacteurs de type EPR devrait mobiliser 1,1 Mt de béton pour une production annuelle d'environ 11 TWh. Pour produire la même quantité d'énergie avec des éoliennes, il faudrait environ 2250 mâts de 2.5 MW ce qui nous donne approximativement 3,3 Mt de béton. Grâce à cette exemple, il est facile de voir que la production d'une centrale nucléaire consomme autour de 3 fois moins de béton que pour son équivalent éolien. Cependant, ce chiffre est à nuancer fortement car contrairement aux éoliennes qui ne rejettent aucun déchet durant la phase d'exploitation, les centrales rejettent des déchets radioactifs qui nécessitent d'être confiner des centaines de milliers d'années dans d'immense centre de stockage comme avec le projet CIGEO qui nécessitera environ 15 Mt de béton pour sa construction. Il est donc plus difficile de savoir quelle source d'énergie utilise le moins de béton.

C. Le cuivre

- Les enjeux environnementaux

Le cuivre est un matériau qui entre dans la partie production électrique de l'éolienne. On le retrouve dans les divers câblages, dans le transformateur et enfin dans le générateur de l'éolienne. La présence de cuivre dans le générateur de l'éolienne dépend de la technologie



utilisée, par exemple les DFID, les SCIG et les DDSG utilisent du cuivre dans leur générateur tandis que les DDPMG utilisent eux des aimants permanents. L'importance du cuivre pour les éoliennes est donc centrale car il est nécessaire à la production et à la transformation électrique même si au point de vue quantité, il correspond à une infime partie de l'éolienne. Cependant sa consommation pose problème car le cuivre nécessite beaucoup de moyens pour sa production mais surtout il entre dans une phase d'épuisement de la ressource.

En nous intéressant au critère du réchauffement climatique, nous avons pu constater que le cuivre, tout comme l'acier, rejette énormément de CO₂ lors de sa phase de production. En effet, selon les chiffres de l'ADEME, une tonne de cuivre primaire rejetterait 1445 kg CO₂ eq et seulement un peu moins pour du cuivre recyclé (1304 kg CO₂ eq). Ces importants chiffres s'expliquent par l'importante quantité d'énergie que demande le cuivre pour être raffiné (broyages des roches, chauffages à plus de 1200° dans des fours et enfin une électrolyse pour finir de purifier le cuivre, voir plus de détail en annexe 4). Par ailleurs avec la diminution de la teneur des gisements il est nécessaire d'extraire et de traiter un plus grand volume de roche pour extraire le même tonnage de métal. Entre 2011 et 2014 la consommation d'énergie par tonne de cuivre produite a augmenté de 17% (Copper Alliance).

De plus, outre l'importante consommation d'énergie, le cuivre pose aussi le problème de la destruction des sols parce qu'il faut extraire une tonne de roche pour obtenir environ 10 kg de cuivre. Et plus la ressource va diminuer, plus il va falloir extraire de roches et plus il va falloir utiliser de l'énergie pour raffiner le cuivre

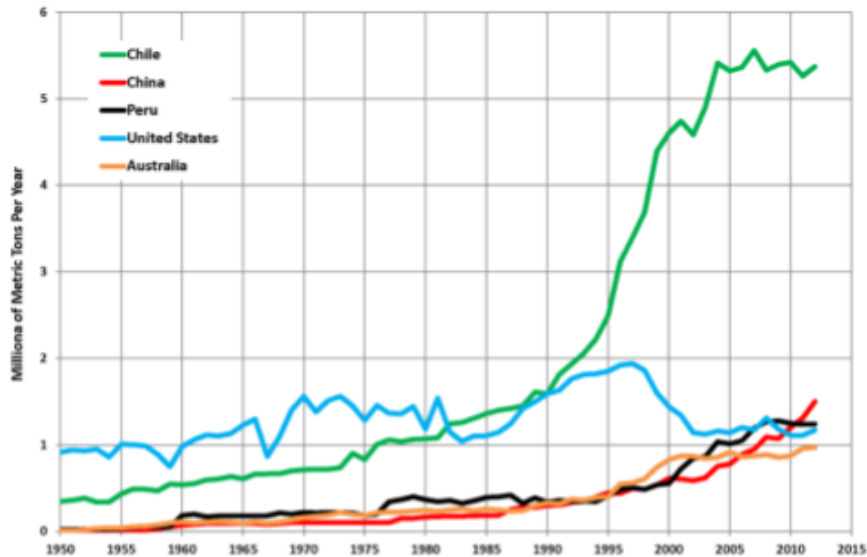
Si l'on s'intéresse maintenant à l'utilisation des ressources en eau, nous pouvons constater sans avoir des chiffres précis qu'à travers le procédé de raffinage, le cuivre nécessite énormément d'eau (utilisée lors du broyage des roches par exemple). Or cette ressource subit une forte pression surtout dans les zones arides comme au Chili où les mines de cuivres se situent dans le désert d'Atacama. On utilise donc de l'eau douce pour les procédés industriels en ne sachant pas s'il y en a suffisamment pour les populations locales.

- Les enjeux sociétaux:

Tout d'abord, si l'on prend le cas de la mine de Chuquicamata au Chili comme exemple pour parler des différents impacts du cuivre, nous pouvons constater que la production du cuivre dans la région a créé des emplois et que l'entreprise Codelco (en charge du site) paye ses ouvriers jusqu'à 10 fois le SMIC chilien. Cependant, à cause de l'expansion de la mine, l'entreprise a dû reloger les habitants du village voisin, maintenant déserté à cause des terrils qui grandissent toujours plus et des nuages de poussières que crée l'extraction des minerais. Ces nuages de poussières couplés au dioxyde de soufre rejeté par les usines de traitement engendrent des problèmes respiratoires à la fois pour les ouvriers mais aussi pour les habitants. Pour finir avec les impacts sur les populations, on constate également la contamination des sols dû notamment à l'utilisation d'acide sulfurique lors des traitements et la contamination de l'eau dû au broyages des roches.

De plus, tout comme l'acier, le cuivre est une ressource qui est principalement produite par le Chili ce qui pose des problèmes géopolitiques du fait du rôle hyper stratégique du cuivre dans nos sociétés (voir graphique ci-dessous).





Graphique présentant la production par an en cuivre des 5 plus gros producteurs

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_copper_production

Pour finir avec le cuivre, le principal problème est le fait que la ressource est entrée en phase d'épuisement ce qui signifie que notre consommation actuelle compromet fortement la possibilité que les générations futures aient assez de cuivre pour subvenir à leurs besoins. Selon certains scénarios, avec notre production annuelle de cuivre et un taux de croissance de 3% (celui observé depuis 100 ans), la disparition du cuivre arriverait dans moins d'un demi-siècle. A noter que différents scénarios qui s'intéressent aux différentes façons d'utiliser le cuivre ont révélé que le scénario qui consomme le plus de cuivre est celui du développement durable (EF sur le graphique ci-dessous) du fait de la multiplication des énergies renouvelables et de l'accès généralisé à l'énergie.

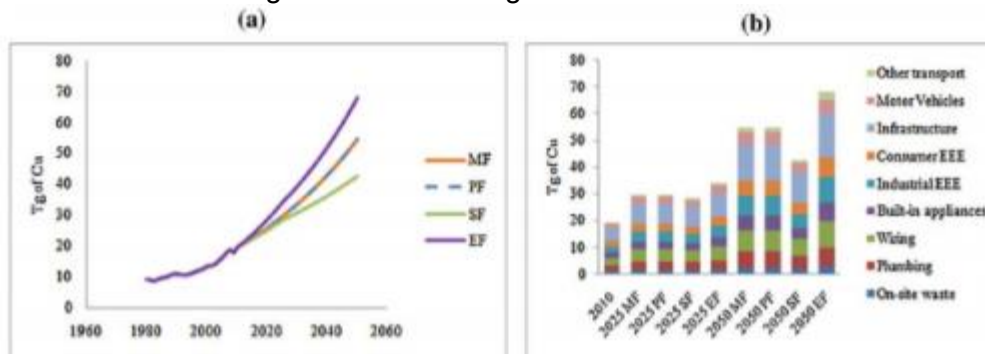


Figure 3 - (a) Demande globale pour les 4 scénarios de GEO-4¹, (b) répartition de l'usage du cuivre en 2010, 2025 et 2050 pour les 4 scénarios GEO-4 (Ayman Elshakki, 2016)⁴

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/epuisement-metaux-mineraux-fiche-technique.pdf>

D. Les Aimants permanents

Comme nous avons pu le voir au début de cette partie, certaines éoliennes "synchrones" utilisent des aimants permanents pour produire de l'énergie. Il faut savoir que ces aimants permanents sont faits en partie de terres rares (environ 30% de néodyme et 2% de dysprosium)(voir annexe 5), nous allons donc faire un point sur ce que sont ces "terres rares", à quoi servent elles et quelle est leur importance?

Les terres rares sont dites "rares" car les métaux qui les composent sont infiniment moins présents dans l'écorce terrestre que d'autres métaux comme le fer par exemple. L'appellation "terres rares" regroupent en réalité 17 éléments chimiques du tableau périodique de



Mendeleïev. On y retrouve deux métaux de transition: le scandium et l'yttrium ainsi que toute la famille des Lanthanides comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau périodique des éléments chimiques

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté. Les terres rares, c'est-à-dire le scandium (Sc), l'yttrium (Y) et la série des lanthanides (La à Lu), sont mises en évidence par une bordure rouge. Une flèche rouge pointe vers cette section depuis l'étiquette 'Terres rares' située à gauche du tableau.

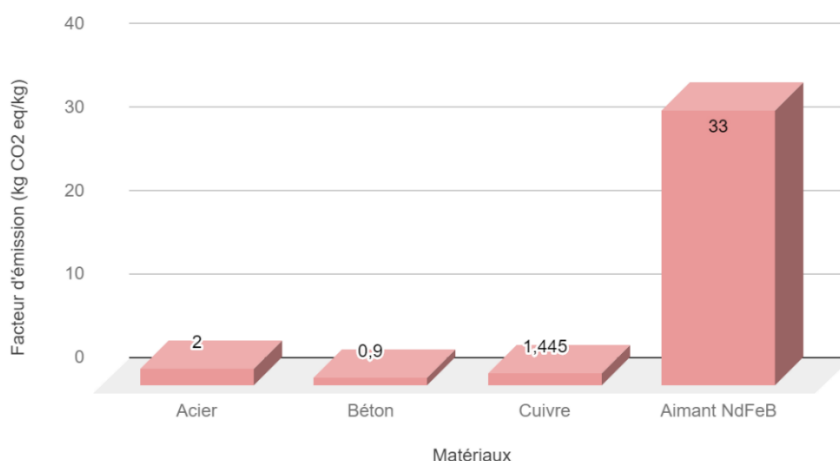
Mais à quoi servent-elles? En réalité, à énormément de choses puisqu'on les retrouve dans tous les téléphones portables, les écrans, les voitures électriques, les appareils électroniques mais aussi dans nos aimants. Il faut comprendre que sans ces terres rares, la société ne ressemblerait pas à ce qu'elle est, il n'y aurait jamais eu le boom du numérique. Aujourd'hui, cette ressource est devenue hautement stratégique aux vues de la transition numérique et énergétique. Il est donc important de les prendre en compte dans notre étude même si seulement une petite partie des éoliennes (voir annexe 6) utilisent des aimants permanents pour la production d'énergie (en France en tout cas). Nous ne cherchons pas à mettre sur le dos des éoliennes toute l'exploitation de ces terres rares mais il est intéressant de considérer le processus global pour ainsi mesurer tous ses impacts.

- Les enjeux environnementaux:

Toujours en restant sur les mêmes critères pour baser notre analyse, nous allons commencer par le critère du réchauffement climatique. Selon la base de données de l'ADEME, 1 kg d'aimant permanent vérifiant les hypothèses 68% de fer et 30% de néodyme rejeterait 33kg de CO₂ équivalent. Le graphique ci-dessous nous permet de visualiser l'écart entre ce matériau et les précédents que nous avons pu aborder.



Facteur d'émission (kg CO₂ eq/kg) par rapport à Matériaux



Les aimants permanents sont donc les constituants les plus polluants de l'éolienne en terme de CO₂ émis, loin devant l'acier (avec l'hypothèse défavorable de 2 t de CO₂ pour 1 t d'acier). Bien sûr, si l'on ramène tout ceci à la quantité présente dans une éolienne, avec l'exemple de la Crawford 3MW, on se retrouve à 56 t de CO₂ pour 1700kg d'aimants permanents contre 1026t de CO₂ pour 1140000 kg de béton. On pourrait donc penser que son impact est négligeable à cause de sa faible proportion mais les rejets de GES ne sont pas le seul point critique de cette ressource.

Tout comme le cuivre qui nécessite énormément de roches broyées pour sa production, le néodyme demande d'importantes quantités de terre qui doivent être extraites de gigantesques mines comme le montre la photo ci-dessous. On voit bien les deux mines au centre entourées de larges terrils (le trait blanc sur la photo représente 300m).



Photo satellite de la mine du district minier de Baiyun (Chine)- Google Maps

Si l'on s'intéresse maintenant à l'utilisation des ressources en eau, nous pouvons voir grâce à l'annexe 5 qu'1 kg d'aimant nécessite aux alentours de 9 litres d'eau. Cette eau qui sert avant tout dans le procédé de raffinage est souvent chargée de métaux lourds comme le plomb ou encore pire puisque le processus de purification des terres rares sépare le thorium et



l'uranium préalablement mélangés avec les minerais que l'on veut purifier, ce qui a pour conséquence de créer des déchets radioactifs qui sont souvent mélangés à l'eau. Dans notre exemple, ces eaux usées sont stockées tel quel dans un lac de 10000 m³ non loin de l'usine et des habitations comme vous pouvez le voir ci-dessous. Ses trop-plein sont rejetés dans le fleuve Jaune (deuxième plus grand fleuve de Chine).



Photo présentant un lac rempli de déchets toxiques provenant du raffinage des terres rares et le village de Dalahai à côté de la ville de Baotou - Google Maps

Aucune mesure de sécurité n'a été prise pour protéger l'environnement ou même les habitants, les résidus du lac peuvent donc facilement rejoindre la nappe phréatique et ainsi empoisonner tous les environs.

- Les enjeux sociétaux:

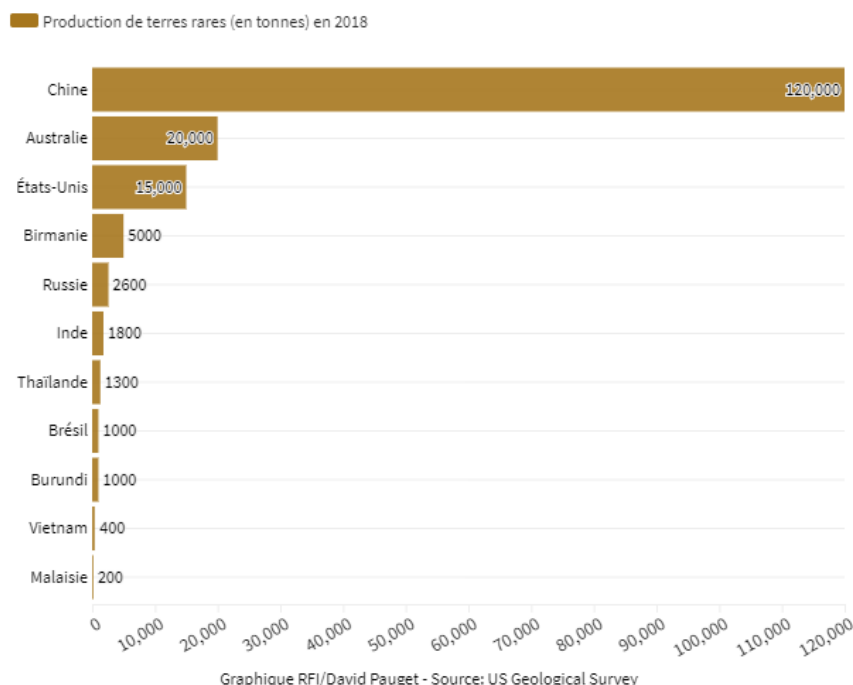
Maintenant, nous allons nous intéresser aux problèmes sociétaux que cela implique. Les habitants près des mines souffrent de problèmes respiratoires à cause des poussières toxiques que l'extraction soulève, le ruissellement de l'eau sur les parois des mines pollue cette dernière. En nous intéressant au village de Dalahai, surnommé le village du cancer en raison du nombre importants de personnes décédés de cette maladie (70% environ) lors des 25 dernières années, les experts ont pu constater que le lien entre le lac et cette forte mortalité est indéniable. Le niveau de radioactivité y est 32 fois supérieur à la normale à cause du thorium présent dans l'eau notamment. A cela s'ajoute les conditions précaires des travailleurs qui sont peu ou pas protégés par rapport à cette radioactivité et l'utilisation de nombreux produits chimiques dangereux pour l'Homme.

De surcroît, les terres rares sont comme nous l'avons vu hautement stratégique pour toutes les technologies dites "vertes", ce qui rend le fait que la Chine dispose d'un quasi-monopole avec 70% de la production mondiale encore plus préoccupant.



Rapport – PH09

Éthique de la transition énergétique à travers la filière éolienne



En ayant un tel contrôle sur cette ressource, la Chine peut exercer n'importe quelle pression sur n'importe quel pays (voir embargo terres rares en 2010 sur le Japon). Même les États-Unis qui dépendent à 80% des exportations de la Chine sont obligés de se plier aux conditions de Pékin. Aujourd'hui, tous les pays s'inquiètent de ce quasi-monopole car des pans entiers de l'économie dépendent de cette ressource.

Conclusion de la phase de production:

Pour conclure sur la partie production de l'éolienne, nous avons pu constater rien qu'au travers de l'analyse de l'ADEME que c'est la phase la plus polluante dans le cycle de vie d'une éolienne. Au fil de notre analyse, nous avons pu insister sur les rejets de CO₂ dus à la production des composants puisque leur fabrication nécessite une importante quantité d'énergie souvent fournie par des énergies fossiles. Cependant, on peut nuancer à travers le fait que le retour énergétique de l'éolienne est d'un an (temps que l'éolienne met pour produire autant d'énergie que ce qu'elle a nécessité pour être produite) et que sa durée de vie est approximativement de 20 ans ce qui signifie qu'elle produit 19 fois plus que ce qu'elle a nécessité. De plus, c'est peut-être la seule phase où l'éolienne produit du CO₂ puisque sa phase d'exploitation et sa fin de vie ont tendance à améliorer son bilan carbone (voir partie IV de notre rapport).

En revanche, il sera difficile de nier que les éoliennes, en tant qu'énergie renouvelable, demandent des ressources qui elles ne le sont pas. Et c'est là tout le problème. Comme nous avons pu le voir, le scénario de la transition énergétique est celui qui demandera le plus de cuivre à l'avenir alors que nous savons d'ores et déjà que la ressource est en phase d'épuisement. De surcroît, les énergies renouvelables qui se veulent vertes et promouvoir les valeurs sociales du développement durable se retrouvent à utiliser des ressources produites dans des conditions plus que discutables (ex: les terres rares pour ne citer que cela). Ces énergies propres causent en réalité beaucoup de problèmes environnementaux dans des pays peu regardant sur le sujet, on a en réalité juste délocalisé le problème des puits de pétrole aux mines de métaux. De plus, nous avons pu également constater que la production des éoliennes repose en grande majorité sur la consommation de ressources fortement contrôlés parfois par un seul pays (Chine, Chili), on peut ainsi souligner un certain paradoxe



entre le fait que les énergies renouvelables fuient la dépendance du pétrole mais créent d'autres dépendances, peut-être plus dangereuses.

Nous terminerons cette partie avec la citation suivante qui illustre parfaitement le paradoxe des énergies renouvelables: "Le monde s'est séparé entre ceux qui font du sale et ceux qui font semblants d'être propre " (Guillaume PITRON).



III. Implantation et exploitation

La France s'est dotée dès l'année 2000 d'une politique de soutien pour le secteur de l'éolien: obligation d'achat puis introduction de tarifs dédiés, lancement d'une série d'appels d'offres; des objectifs de déploiement de l'éolien ont été fixés sur la période 2000-2015. Il apparaît a posteriori que, sur la période qui s'étend jusqu'à 2012, la fixation des objectifs et l'élaboration du cadre réglementaire n'ont pas suffisamment anticipé les difficultés qui allaient se présenter en termes de conflits d'usages, d'intégration locale, de prise en compte des impacts environnementaux et d'aménagement du réseau. La prise en compte de ces enjeux a conduit à une accumulation de changements réglementaires, dont on n'a pu réaliser que tardivement l'inadéquation avec des objectifs de déploiement ambitieux. Dans cette partie nous allons voir les différents enjeux liés aux phases d'implantation et d'exploitation des parcs éoliens. Dans un premier temps nous allons définir en quoi consiste chacune de ces phases, puis nous nous intéresserons à leurs enjeux environnementaux, puis économiques et enfin sociaux.

A. L'implantation et exploitation des parcs éoliens

En France l'implantation d'un parc éolien suit un processus bien défini s'étalant de l'identification de zones propices à leur installation jusqu'à leur construction :

- **Identification des zones** : le développeur (entreprise qui développe les parcs) identifie les zones propices à la réalisation d'un parc. Les critères sont les suivants : éloignement des habitations, potentiel de vent, zone autorisée par la région pour le développement éolien, absence de risque vis-à-vis des avions, des lignes électriques, des conduites de gaz, etc. Cette phase peut prendre quelques semaines à quelques mois.
- **Prospection** : il s'agit de se rendre sur la zone et de prendre contact avec les élus locaux, les propriétaires terriens et les exploitants agricoles (les éoliennes sont en général implantées dans des zones agricoles). Si une majorité de ces personnes est d'accord pour permettre le développement du parc éolien, on peut continuer. Sinon, on arrête là et on va voir ailleurs... Cette phase peut durer de quelques mois à un an.
- **Développement** : si les voyants sont au vert, on commence donc à développer le parc. Il s'agit là de faire les études de vent, impacts environnementaux, de positionnement des éoliennes, préparation des dépôts des autorisations... Cette phase peut prendre jusqu'à 2 ans.
- **L'instruction** : lorsque le parc est développé, on dépose les demandes d'autorisations. C'est beaucoup plus compliqué que pour une maison, car il y a le permis de construire, mais aussi l'autorisation d'exploiter. Les refus sont très nombreux, et même lorsqu'il y a autorisation, très souvent, les permis sont attaqués en justice. Il faut imaginer qu'il faut en général deux ans d'instruction.

Arrivé à ce stade, on sait que le parc verra le jour, il s'est passé 4 à 10 ans et seulement 14 % des parcs initiés sont finalement autorisés.

Le parc passe alors en phase de construction.

- **Phase post-permis de construire** : Il reste beaucoup de chose à faire avant de construire réellement le parc. Il faut choisir le fournisseur d'éolienne, demander le raccordement au réseau, signer le bail avec les exploitants agricoles, réaliser les études de sol pour dimensionner les fondations. Cette étape dure encore près de 2 ans.
- **Appels d'offres** : Viennent ensuite les appels d'offres pour choisir les entreprises qui vont travailler à la construction. Il y a en général quatre corps de métiers



principaux (hors des éoliennes elles même) : la réalisation des accès et des plateformes de grutage, la pose des réseaux entre les éoliennes, la réalisation des fondations et la réalisation du poste de livraison de l'électricité. Cette phase dure quelques mois.

- **Le Financement** : Tout est prêt pour construire, il faut maintenant (en connaissance des coûts), financer le projet auprès des banques. L'étape dure encore quelques mois.
- **La construction** : c'est le chantier qui durera environ un an et seulement quelques semaines pour la partie levage !



Une fois l'installation des éoliennes terminées, peut débuter la phase d'exploitation. Pendant près d'une vingtaine d'années, les éoliennes vont délivrer leur production électrique au « fil du vent ». Le pilotage et le contrôle des éoliennes sont assurés à distance depuis un centre d'exploitation. La présence humaine dans un parc éolien est réduite aux seules opérations de maintenance, qui sont normalement réalisées deux fois par an sur chaque machine sauf panne ou incident.

B. Les enjeux environnementaux

• Production de GES

Un des principaux enjeux des énergies renouvelables et en particulier des éoliennes, est la réduction d'émissions de Gaz à effets de serre, et comme on pourrait s'y attendre ces émissions sont quasiment nulles dans le cas de l'éolien pour les phases d'assemblage et d'exploitation, d'après l'analyse cycle de vie opérée par l'ADEME, l'assemblage d'une éolienne produirait 0.68 q CO₂ eq par KWh produit et son exploitation 1.87 q CO₂ eq par KWh produit. Ces émissions représentent donc 16% de l'ensemble des GES émis pendant le cycle de vie d'une éolienne. Les émissions lors de l'exploitation peuvent s'expliquer par le transport des agents de maintenance à cause du CO₂ émis directement par leurs camionnettes.

Tableau 23 – Impacts environnementaux par étape de cycle de vie d'1 kWh sur l'indicateur de réchauffement climatique

Catégorie d'impact	Unité	Fabrication	Assemblage	Utilisation	Désassemblage	Fret	Fin de vie
Changement climatique	g CO ₂ eq	11,34	0,68	1,87	0,67	0,87	-2,72



Ces chiffres sont bien plus faibles que pour les énergies fossiles, à l'exception du nucléaire, puisque par exemple des centrales (les modèles les plus récents) à charbon ou pétroles produisent respectivement 181 et 121 grammes en équivalent CO₂ par KWh produit pendant la phase d'exploitation.

- Impact sur l'environnement local

Une étude de 2014 du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement a mis en évidence une augmentation de la température au sol là où sont implantées des éoliennes. Cette augmentation, entre 0,54 et 1,5 degré, s'explique par le brassage de l'air qu'engendrent ces équipements. L'air chaud parvient alors à la surface du sol et participe au réchauffement local ainsi qu'à l'assèchement du sol. C'est particulièrement vrai la nuit parce que les pales bloquent l'air chaud vers le sol, l'empêchant de se refroidir. Toutefois, cela n'a rien à voir avec le réchauffement climatique et n'impacte en aucun cas l'effet de serre. En effet, les éoliennes ne produisent pas de chaleur, elles brassent simplement l'air, dont l'air chaud.

- Impact sur la faune

Une des principales controverses visant les éoliennes est l'impact sur la faune, tout particulièrement sur les oiseaux. C'est pour cela que l'État a mis en place un certain nombre de documents permettant d'appliquer et de faciliter la mise en place de la séquence « Éviter Réduire et Compenser » (ERC) qui vise à limiter l'impact sur l'environnement de tout type de projets et qui s'applique dans le cas de construction de parcs éoliens. Il est notamment rappelé que les atteintes aux enjeux majeurs doivent être, en premier lieu, évitées. L'évitement est la seule solution qui permet de s'assurer de la non-dégradation du milieu par le projet. La réduction intervient ensuite dans un second temps, dès lors que les impacts négatifs sur l'environnement n'ont pu être pleinement évités. Enfin, si des impacts négatifs résiduels significatifs demeurent, il s'agit, pour autant que le projet puisse être approuvé ou autorisé, d'envisager la façon la plus appropriée d'assurer la compensation de ses impacts.

Comme le précise le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, les mesures d'évitement sont prioritaires. Il peut s'agir « de faire ou ne pas faire », « faire moins », « faire ailleurs » ou « faire autrement ». Les projets éoliens les plus impactants sont logiquement ceux situés sur les zones à forte activité de chauves-souris. La mesure la plus efficace pour éviter les impacts d'un projet éolien est donc une planification préventive visant à un évitement géographique de ces zones. Les projets de parcs ou les implantations retenues dans des zones fortement favorables aux chauves-souris (comme la plupart des zones boisées, zones humides, corridors de déplacements, sorties de gîtes importants...) n'auront pas cherché à éviter l'impact et donc ils doivent être abandonnés. De plus, si une forte activité des chauves-souris est régulièrement enregistrée sur toute la zone de projet au cours des saisons, l'abandon du projet doit être envisagé pour éviter la nécessité des mesures ERC complexes et dont l'efficacité ne pourrait être garantie.

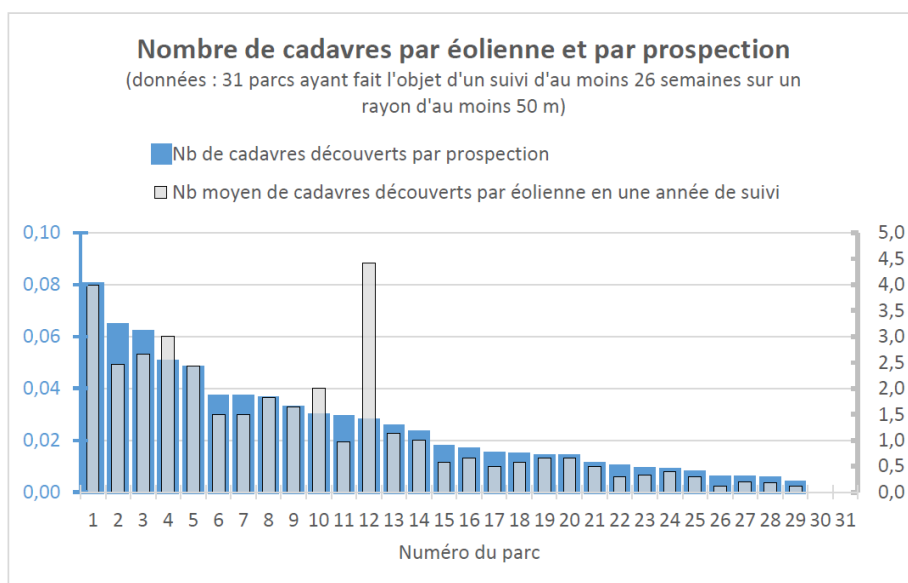
Certains modèles d'éoliennes tournent librement à de très faibles vitesses de vent alors que ces conditions ne permettent pas la production d'énergie. Or ces conditions peuvent encore causer de nombreuses mortalités de chauves-souris ou d'oiseaux. La mise en drapeau ou le blocage du rotor doivent donc être mis en œuvre de façon automatique pour toutes les éoliennes pour les très faibles vitesses de vent et ce, jusqu'au seuil nécessaire à la machine en question (selon le modèle et le dimensionnement) pour commencer à produire de l'électricité.

Dans les mesures de réduction d'impact on retrouve notamment des mesures de réductions d'attraction parmi lesquelles :



- Les nacelles doivent être conçues, construites et entretenues de manière à ce que les chauves-souris ne puissent y gîter (tous les interstices doivent être rendus inaccessibles aux chauves-souris)
- Les environs immédiats de l'éolienne (plateforme, parking, etc.) doivent être gérés et entretenus de manière à ne pas créer un nouvel habitat attractif pour les chauves-souris
- Un éclairage qui n'attire pas les insectes, et l'utilisation d'un éclairage seulement quand nécessaire, sauf s'il est obligatoire pour des raisons de sécurité
- Les plantations d'arbustes ou d'arbres ne doivent pas être autorisées comme mesures de compensation à proximité directe des éoliennes (moins de 200 m).

▪ Destructions d'individus



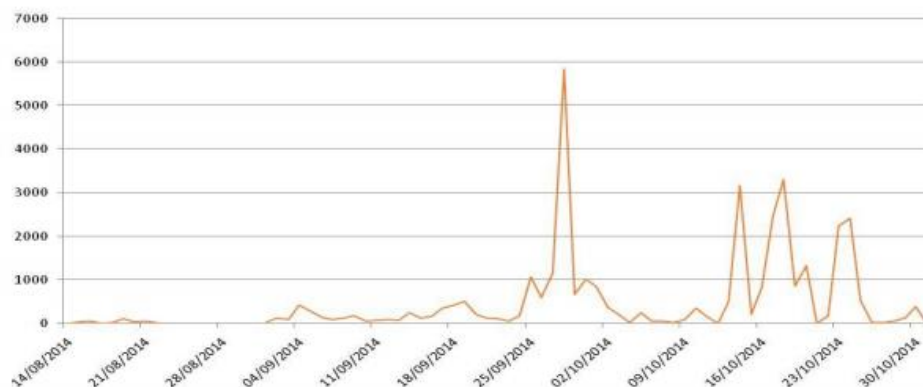
Une étude de la LPO montre que plus les éoliennes sont éloignées des ZPS (Zone de protection spéciale) plus le nombre d'oiseaux tué est faible.

L'implantation en zone d'agriculture intensive n'est pas une condition suffisante pour éviter les collisions des oiseaux avec les éoliennes. Bien d'autres facteurs interviennent comme la proximité du littoral, d'espaces boisés, de zones humides ou tout simplement le fait que certaines espèces utilisent ces sites d'une façon ou d'une autre (nidification, chasse, déplacement, etc.). Comme nous l'avons vu, la mortalité directe due aux éoliennes est au moins deux fois plus importante à proximité des ZPS (p 69). De plus elle y affecte bien plus qu'ailleurs les espèces inscrites à l'Annexe I de la Directive Oiseaux mais également celles considérées comme menacées sur la liste rouge des oiseaux de France métropolitaine. Il convient donc d'éviter d'implanter des éoliennes dans ces périmètres à forts enjeux avifaunistiques – c'est ce que font déjà 15 des anciennes régions métropolitaines – ainsi que dans une zone tampon d'au moins 1 km, correspondant au rayon d'action des espèces ayant justifié ces classements en ZPS, d'autant plus lorsque celles-ci sont réputées sensibles à l'éolien (rapaces, planeurs, migrants).

Un rapport de 2016 de la Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères (SFEPM) remet en question la méthodologie des promoteurs de parcs éoliens quant à la détection d'activité de chauves-souris sur les futurs parcs éoliens. En effet, en général des capteurs acoustiques sont placés en hauteur afin de mesurer cette activité. Mais la plupart du temps ces mesures ne sont pas faites en continu mais seulement de manière ponctuelle. Or



ce rapport met en évidence des pics d'activités de chauves-souris aux alentours de certains parcs éoliens liés à des passages migratoires et recommande de vérifier au préalable les sites se situant sur un potentiel passage migratoire en plaçant des capteurs acoustiques en hauteur et en faisant des mesures continue sur une année.



Mesures d'activité de chauve-souris dans un parc éolien (extrait du rapport de la SFEPM)

▪ Destructions d'habitats

Dans le cas de projets éoliens, les risques de destruction ou d'altération d'habitats peuvent en effet aussi être indirects, par exemple si la phase de travaux induit des effets sur l'équilibre hydrobiologique des zones humides (ruissellement de matières en suspension, pollution, drainage...) et donc sur leurs fonctionnalités écologiques pour les Chiroptères (abreuvement, production d'une ressource alimentaire en insectes...). L'impact sera d'autant plus important que le projet entraînera des destructions importantes (par exemple, défrichements de bois et forêts) et que les enjeux de conservation ou les fonctionnalités des habitats concernés sont élevés (ex : zones humides, habitats plus ou moins isolés, à fonctionnalités plurispécifiques et inter saisonnières).

C. Les enjeux économiques

La croissance de l'éolien s'accompagne d'importantes créations d'emplois dans la filière : c'est la 4ème énergie renouvelable la plus riche en emplois au niveau mondial, avec 1,1 million d'emplois directs et indirects, derrière l'hydroélectricité, le photovoltaïque et les biocarburants. Avec des investissements en 2015 de l'ordre de 1060 à 1600 €/kW pour l'éolien terrestre, l'investissement dans l'éolien représentait un marché mondial de l'ordre de 100 milliards d'euros en 2015, pour une répartition des coûts d'investissement totaux de 65 à 80% pour la fabrication et l'assemblage des éoliennes, 15 à 30% pour l'installation et la mise en service, et 2 à 6% pour les études et le développement. La grande majorité des emplois éoliens est liée à l'investissement, suivant une répartition par maillon de la chaîne de valeur qui reflète approximativement celle des coûts. Un peu plus de 2% des emplois sont dédiés à l'exploitation et à la maintenance à l'échelle mondiale, en augmentation constante.



Rapport – PH09
Éthique de la transition énergétique à travers la filière éolienne

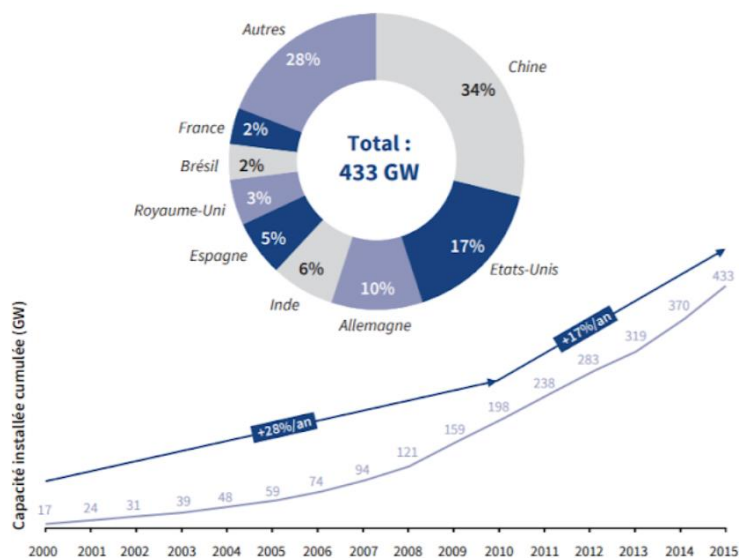


Figure 1 : Evolution de la capacité éolienne installée annuellement entre 2000 et 2015 au niveau mondial et répartition de la capacité cumulée entre les principaux pays

Le secteur des énergies renouvelables et de l'éolien sont en pleine croissance en Europe et en France, en 2000, la France ne comptait que quelques centaines d'éoliennes représentant une puissance totale d'environ 50 MW. Fin 2016, après 15 ans de politique publique de soutien à la technologie, le parc éolien français atteignait 11 800 MW, couvrant cette année-là 3,9% de la production électrique française. Si leurs défenseurs promettent d'importantes créations d'emplois leur détracteurs estiment qu'elles seraient bien moindres à celle d'autres sources d'énergies. En 2017 le secteur de l'éolien représentait 17 000 emplois directs et indirects localisés en France, si on ramène cela à la production électrique nationale du secteur qui est de 12 GW, cela représente presque 1500 emplois par Gigawatt, mais si on compare ces chiffres avec le nucléaire français, dont la capacité est de 63 GW pour 220 000 emplois, ce qui correspond donc à 3500 emplois par Gigawatt soit plus du double de l'éolien à capacité équivalente. Cependant si on compare ces chiffres avec nos voisins européens, on constate que le secteur éolien français est bien moins développé et que même à capacité équivalente il génère moins d'activité économique, puisqu'en Allemagne par exemple il représente 140 000 emplois pour 60 GW soit 2 300 emplois par GW installé.

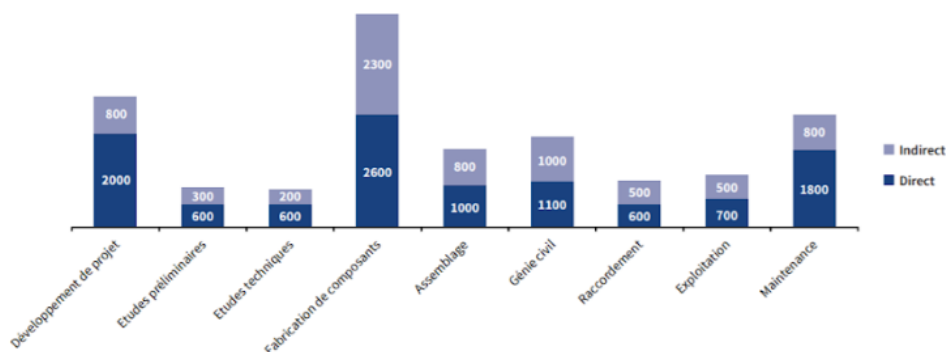


Figure 2 : Emplois directs et indirects en ETP, par activité de la chaîne de valeur éolienne en France

- Coût de l'énergie



Pour un ordre de grandeur général, il faut compter environ 1 500 000 €/MW installé. Les éoliennes les plus courantes en France ont une puissance unitaire de 2 MW (en 2013, on place plutôt des 3 MW). En faisant une moyenne grossière, il faut compter qu'une éolienne de 2 MW en France produira 4400 MWh/an (ou bien 4 400 000 kWh).

Par exemple, un parc éolien de 10 éoliennes de 2 MW coûtera 30 000 000 € qui se décomposent approximativement ainsi :

- Éoliennes (fabriquées, transportées, levées et mises en service) : 22 000 000 € (soit 75 %)
- Raccordement : 2 000 000 € (6%)
- Fondations : 1 500 000 € (5%)
- Génie Électrique : 1 000 000 € (3%)
- Accès et plateformes : 500 000 € (2%)
- Développement : 2 000 000 € (6%)
- Autres : 1 000 000 € (3%) – Missions de contrôles, Mesures compensatoires...

Ces chiffres peuvent varier sensiblement d'un parc à l'autre. Cela dépend bien entendu du lieu d'implantation.

Les investissements nécessaires pour effectuer cette transition énergétique sont donc très conséquents. Le Danemark est le bon élève de la transition énergétique, en 2016 il a produit plus de 50% de son électricité grâce aux vents. Mais il a dû y mettre le prix car l'éolien coûte cher. Les ambitions vertes du pays minent la compétitivité de certaines entreprises. A tel point qu'il renonce à abandonner le charbon d'ici 20 ans alors qu'il représentait encore l'année dernière 30% de sa production d'électricité.

Converti en monnaie, sachant que le kWh est vendu 8,2 centimes, le chiffre d'affaires d'une éolienne de 2 MW est d'environ 360 000 €. Soit pour un parc éolien de 10 éoliennes de 2 MW: 3 600 000 € de chiffre d'affaire annuel.

Il faut bien entendu prendre en compte les charges du parc éolien constituées de :

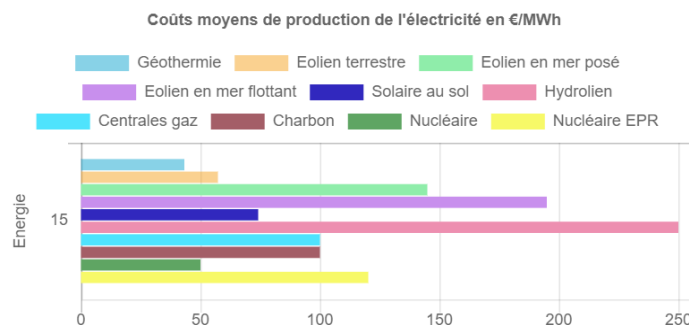
- La maintenance des machines.
- Les frais divers d'exploitation (administratif, suivi de production...)
- Les loyers à payer aux agriculteurs locaux.
- Les taxes : taxe foncière, IFR (imposition forfaitaire sur les Entreprises de Réseaux), l'impôt sur les bénéfices.

Ces frais représentent entre 20 et 30 % du chiffre d'affaires d'un parc éolien, soit 72 000 à 108 000€ par éolienne ce qui permet de dégager un bénéfice net de 270 000€ en moyenne par éolienne et par an ce qui permet un amortissement des investissements au bout de 5 ans et demi. En France le prix de l'éolien est de : 8,2 c€/kWh pendant 10 ans, puis entre 2,8 et 8,2 c€/kWh pendant 5 ans selon la productivité du site considéré contre seulement 4,95 c€/kWh pour le nucléaire.



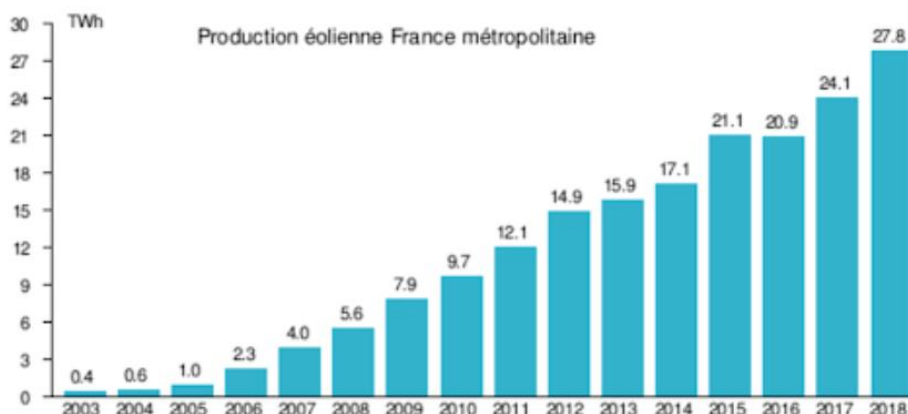
Rapport – PH09

Éthique de la transition énergétique à travers la filière éolienne

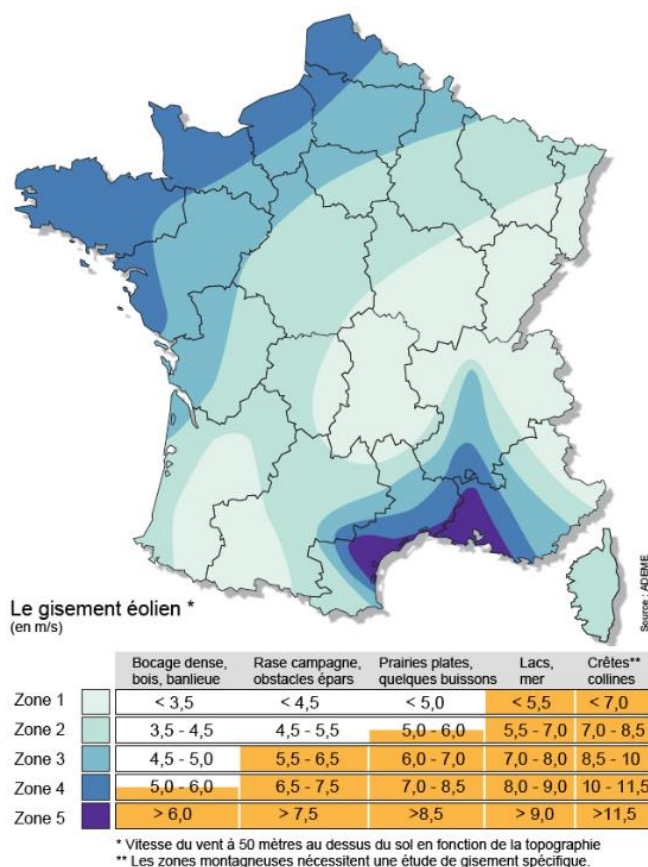


Fourchettes basses selon la plage de variation théorique des coûts, Rapport sur les [Coûts des Énergies renouvelables](#), ADEME 2016.

Un autre coût caché de l'éolien est le stockage et la régulation de la variation de sa production d'électricité. Contrairement aux énergies fossiles, l'éolien est une énergie non pilotable, elle dépend du vent. Quand l'éolienne ne produit pas, il faut compenser par d'autres sources, comme le fait l'Allemagne avec le charbon. L'énergie intermittente et imprévisible produite par l'éolien nécessite donc une régulation par centrales thermiques à flammes, dont les inconvénients doivent être pris en considération. Les centrales nucléaires ont un démarrage beaucoup trop lent (par mesure de sécurité) pour effectuer ce rôle de régulation. Une autre solution serait de stocker le surplus de production et de l'utiliser lors de creux de production, mais malheureusement le stockage d'énergie doit encore faire ses preuves (incompatibilité entre l'offre et la demande pour le moment).

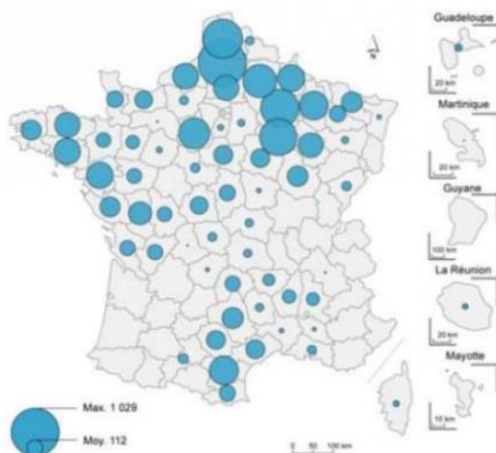


- **Disparités géographiques**



Au niveau européen, la France possède le deuxième potentiel éolien derrière le Royaume-Uni et le quatrième parc éolien en matière de puissance installée. Cependant cette production est très mal répartie sur le territoire. La localisation des éoliennes est dépendante de la ressource (le vent ; mais il faut savoir que tous les sites à vents suffisants sont répertoriés depuis de longues dates ; pour faire simple, toutes les côtes de bords de mer du Sud de la France, de l'Aquitaine vers la Bretagne, en remontant jusqu'au Nord Pas de Calais ; on peut ajouter quelques grands couloirs où le vent est très souvent suffisamment fort, par exemple la vallée du Rhône ; ou encore la vallée de la Seine, après Paris) et ne correspond généralement pas aux zones de consommations (il y a des câbles électrique pour amener l'énergie à bon port ; ce que pratique l'EDF). De plus le caractère dispersé de la majorité des implantations amènerait en cas de fort développement de l'éolien à renforcer le réseau de transport électrique entre les zones de production éolienne et les zones de consommation. Ce renforcement du réseau est très coûteux et provoque les nuisances classiques (visuelle, sonore, électromagnétique) des lignes à haute tension. Mais en fait, il ne s'agit à terme, que de reconception de la production et de la distribution rationalisée de l'énergie. Car grâce à l'éolien, on est sûr de produire au plus près des lieux d'habitations et d'éviter, voire de réduire notablement toutes les lignes à haute tension qui tranchent le paysage de nos campagnes. Au-delà des créations d'emplois, l'éolien peut également être source de redynamisation pour certains territoires ruraux, grâce aux recettes fiscales associées et via le montage de projets participatifs.





Puissance éolienne raccordée en France (MW) source : rapport Enedis / EDF

Près de la moitié de l'électricité produite par le parc éolien provient des régions Grand-Est et Hauts-de-France. Cette inégalité de répartition n'est pas uniquement due aux conditions climatiques, les zones géographiques les plus ventées n'étant pas nécessairement celles qui disposent des plus grandes capacités installées (par exemple, le Languedoc-Roussillon). Elle s'explique également par des facteurs économiques, politiques ou sociaux.

- Impact politique

Les objectifs en matière d'éolien, repris dans les PPI (Plan particulier d'Intervention), ont reconnu l'importance de la contribution de l'éolien à la production renouvelable. Cependant le déploiement effectif n'a pas atteint les différents objectifs PPI (le déploiement réalisé a été de 10% à 30% en deçà des objectifs). Le parc éolien en mer n'a pas non plus atteint les objectifs fixés, puisqu'aucun parc n'est aujourd'hui en fonctionnement. Sur la période 2004-2015, l'atteinte des objectifs fixés pour l'éolien terrestre, aurait nécessité l'installation de 1580 MW/an. Or le rythme annuel moyen effectif a été sur la même période de 840 MW/an, soit un différentiel de 740 MW/an en moyenne.

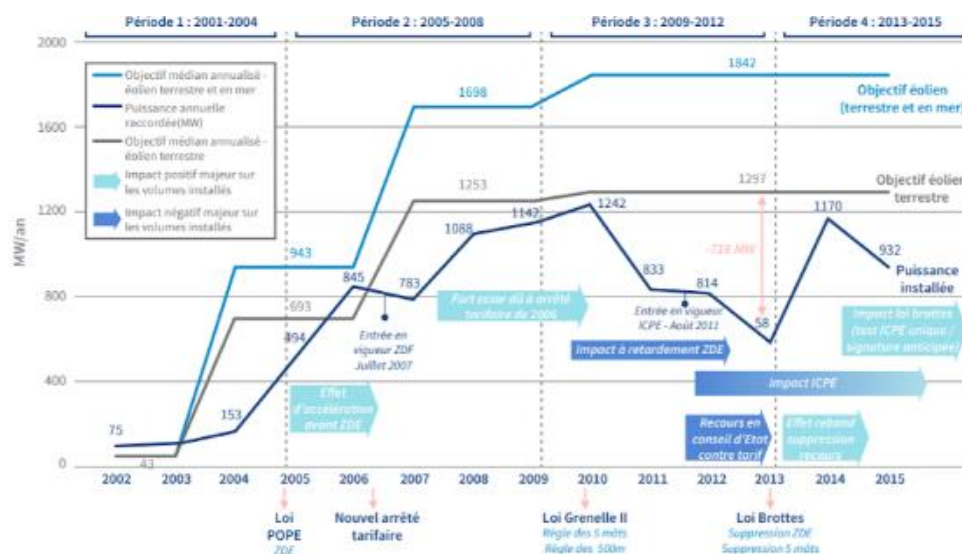


Figure 5 : Comparaison entre les objectifs annuels d'éolien installé et le réalisé, et mise en évidence des impacts positifs et négatifs majeurs sur les volumes



D. Les enjeux sociaux

Malgré les opportunités que représente la filière, 50% des projets éoliens ont fait l'objet de recours entre 2012 et 2014, induisant des retards pouvant dépasser 3 ans. L'une des causes de ces recours réside dans une intégration inégale des projets au sein des territoires sur lesquels ils sont implantés, alors même que les récentes enquêtes ont montré une perception très positive de l'énergie éolienne par les français. L'implication croissante des parties prenantes, et la co-construction de projets de grande qualité environnementale, sociale et économique, sont considérés aujourd'hui comme les leviers majeurs d'intégration locale des projets.

- Conflits d'intérêts

Des opposants à l'énergie éolienne font la chasse aux maires qui ont voté l'installation de parcs sur leur commune tout en étant propriétaires des parcelles, ce qui rapporte aux élus concernés plusieurs dizaines de milliers d'euros par an. Avec une rentabilité de 900 euros mensuels par éolienne, un élu du Pas-de-Calais gagne 108.000 euros par an pour les 10 mâts installés sur son terrain et c'est loin d'être un cas isolé, entre 2013 et 2015 sept condamnations d'élus ont été prononcées pour prise illégale d'intérêt et recel de prise illégale d'intérêt concernant des installations d'éoliennes. Le Service central de la prévention de la corruption, organe rattaché au ministère de la Justice, a alerté, dans un rapport publié en 2014, sur la gravité du phénomène. Pour éviter ces affaires de conflits d'intérêts entre les élus des collectivités, à la fois juges et partie, et des développeurs éoliens, France Eolienne Energie (FEE) et l'association Amorce (association nationale des collectivités, des associations et des entreprises pour la gestion des déchets, de l'énergie et des réseaux de chaleur) ont signé, le 2 octobre 2015, une charte de bonnes pratiques en faveur de projets éoliens territoriaux et concertés. En signant cette charte, la collectivité s'engage à s'assurer que si un élu détient un intérêt direct ou indirect sur le projet éolien (en particulier sur le foncier), celui-ci s'abstiendra de toute présence et de toute participation aux votes du conseil municipal. La collectivité doit également communiquer sur le projet éolien, les prestataires locaux et le bilan des éoliennes. De leur côté, les développeurs doivent étudier la possibilité d'une participation de la collectivité ou des citoyens au financement du parc et créer un projet d'accompagnement pour le public.

- Impact sur les habitants

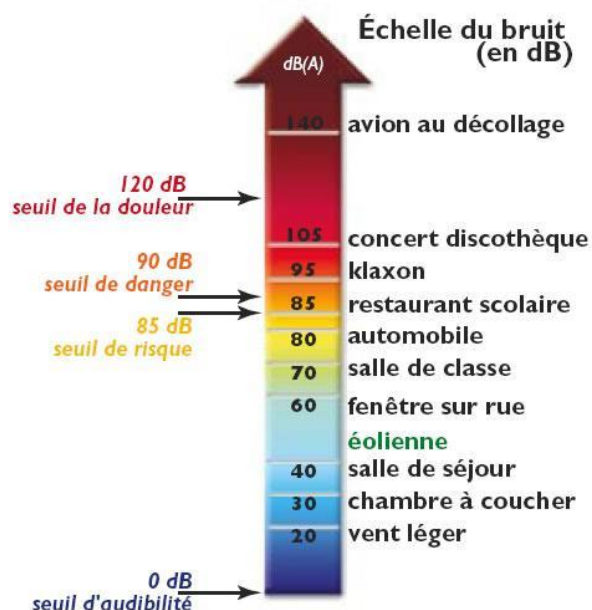
Parmi les personnes habitant à proximité de parcs éolien, nombreux sont ceux qui critiquent ces installations et tentent d'en empêcher la construction en déposant des recours devant la justice. Plusieurs associations ont été créées pour manifester ce mécontentement, parmi elle, l'association "Vent de colère", qui exprimait lors d'une manifestation en début d'année le « ras-le-bol de l'ensemble des gens qui habitent à proximité d'aérogénérateurs industriels ». Ces associations accusent les fermes éoliennes de « détruire le patrimoine paysager », et de provoquer une pollution visuelle, lumineuse et sonore, faisant « fuir les touristes », favorisant des « promoteurs privés » et pouvant provoquer des problèmes de santé chez les personnes exposées.

- **Impact sur la santé**

Les opposants aux projets éoliennes avancent 3 risques pour la santé, qu'ils appellent le Syndrome éolienne :



Le premier est le bruit, considéré par certaines personnes comme trop important et risquant de provoquer des problèmes auditifs sur le long terme pour les personnes résidants à proximité. Or le volume sonore ne dépasse pas les 55 décibels au pied des éoliennes, et à 500m, qui est la distance minimum entre une habitation et une éolienne, il n'est plus que de 35 qui est bien loin du seuil de danger qui est fixé à 90 décibels, de même très loin également du bruit d'une automobile qui passerait dans la rue.



Le deuxième risque sanitaire considéré est celui lié aux infrasons produits par la rotation des pales des éoliennes qui pourraient provoquer des insomnies, maux de tête et acouphènes. Une étude de 2006 très largement citée dans de nombreux articles parlant de ces risques, fait l'état l'impact théorique des infrasons produits par les éoliennes (sons à très basse fréquences) sur l'homme, bien qu'elle met en garde de potentiel effets négatifs sur la santé, elle n'estime pas ce risque comme étant significatif pour la majorité de la population.

Le dernier risque possible pour la santé est l'effet stroboscopique engendré par la rotation des pales, cependant la vitesse de rotation est trop faible et la distance entre les éoliennes et les habitations est trop importante pour qu'un tel effet soit observé.

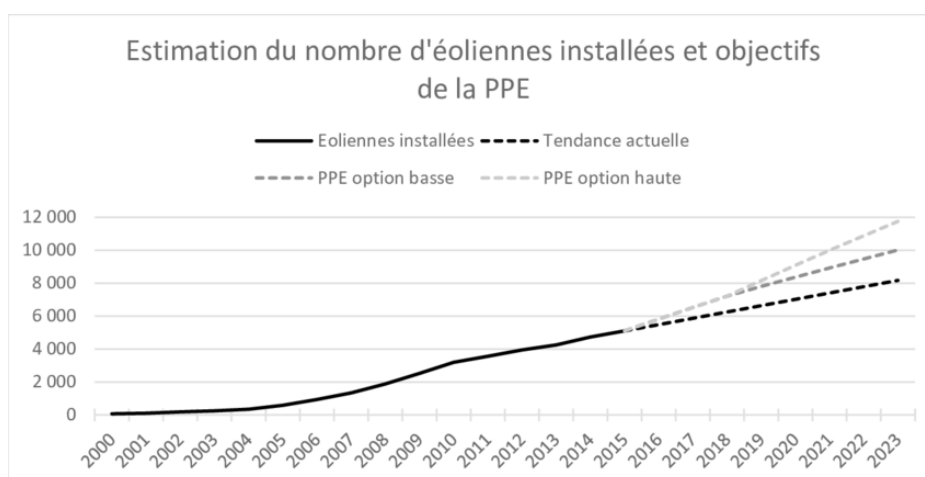
▪ Impact sur le paysage

Le premier argument que bien des opposants de l'énergie éolienne avancent est qu'elle gâche les paysages de nos campagnes et fait fuir les touristes. Parmi eux des associations comme "Vent de colère" qui estiment que la défiguration du paysage engendrée, par son retentissement psychologique et la dévalorisation immobilière qu'elle entraîne, constitue une nuisance réelle.

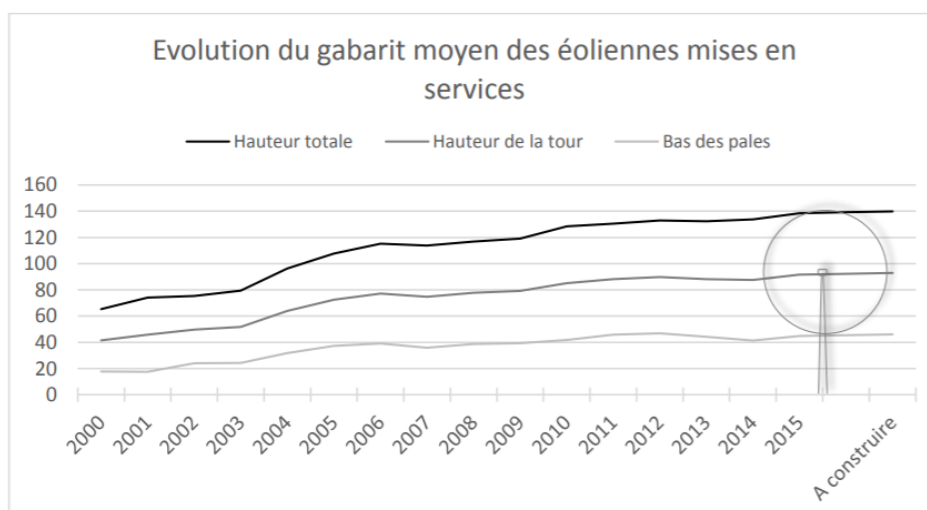




Il est vrai que le nombre d'éoliennes installées en France a explosé ces dernières années puisqu'il est passé de 0 au début des années 2000 à plus de 5000 en 2015 et que ce nombre est amené à être doublé dans les prochaines années.



Non seulement le nombre d'éoliennes est en croissance rapide, mais leur taille moyenne a également grandement augmenté en 20 ans, elle en fait plus que doublée puisqu'elle est passée d'une soixantaine de mètres à 139 mètres en 2016. Quant à la surface moyenne balayée par le rotor elle a, elle, été multipliée par 3,3 pour passer de 2 064 m² à 6 888 m², multipliant par autant leur impact visuel.



De plus, certains parcs, comme celui de Fruges, dans le Pas-de-Calais, qui est le plus grand parc de France, comptent 70 éoliennes, leur impact visuel est donc très conséquent. Il convient néanmoins de noter que ce n'est pas une généralité puisque $\frac{3}{4}$ des parcs français sont constitués de moins de 9 éoliennes.

Si l'impact sur le paysage est subjectif, puisque certaines personnes ne trouvent pas qu'une éolienne gâche le paysage, et d'autres si, l'impact sur le tourisme, lui, est quantifiable. Et d'après une étude de 2017, qui s'appuie principalement sur des enquêtes auprès de touristes, ces craintes ne sont pas fondées puisque l'impact est estimé comme étant nul ou presque.

▪ Les risques d'accidents

Une analyse des risques effectuée par EDF en 2015 fait apparaître 5 catégories de scénarios d'accident :

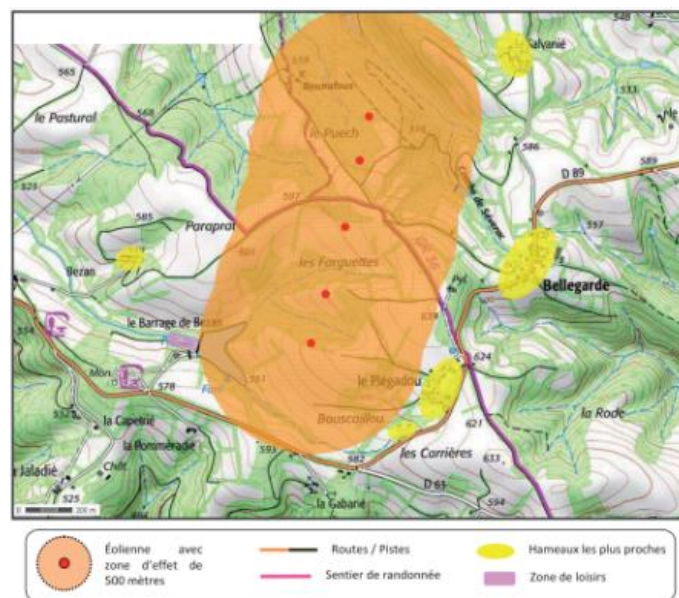
- Effondrement de l'éolienne
- Chute de glace
- Chute d'éléments de l'éolienne
- Projection de glace
- Projection de toute ou d'une partie de pale

Scénarios	Probabilité d'occurrence	Intensité	Gravité du scénario
Effondrement de l'éolienne	D : « S'est produit mais a fait l'objet de mesures correctrices réduisant significativement la probabilité ».	Exposition forte	Sérieuse
Chute de glace	A : « s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctives. »	Exposition modérée	Modérée
Chute d'élément de l'éolienne	C : « un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité ».	Exposition modérée	Modérée
Projection de glace	B : « s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation. ».	Exposition modérée	Sérieuse
Projection d'élément de l'éolienne	D : « S'est produit mais a fait l'objet de mesures correctrices réduisant significativement la probabilité ».	Exposition modérée	sérieuse

Le scénario ayant le plus de risque pour la population est la projection d'élément de l'éolienne à cause de son grand rayon d'action. L'incident le plus extrême a projeté un élément d'éolienne à 380m, cependant la distance minimum entre une éolienne et une habitation est de 500m, et elle sera peut-être augmentée dans le futur. Depuis le début des années 2000, une trentaine d'incidents liés à des éoliennes ont été recensés, et même si les associations anti-éoliennes estiment que ces incidents justifient l'arrêt de parcs éoliens, en raison des risques encourus pour la sécurité des riverains, aucun mort ou blessé n'est à déplorer, et les dégâts matériels se limitent quasiment exclusivement aux éoliennes elles-mêmes

Événement redouté	Distance d'effet (en mètres)
Effondrement de l'éolienne	130 m
Chute d'éléments de l'éolienne	50 m
Chute de glace	50 m
Projection de glace	270 m
Projection d'éléments de l'éolienne	500 m





Cependant comme on peut le constater sur le schéma ci-dessus (extrait du rapport sur le risque d'accidents liés aux éoliennes d'EDF), même si les habitations se situent au-delà des zones théoriques de dangers, le passage dans ces zones n'est pas interdit, dans le cas ci-dessus on peut même constater que des sentiers de randonnée les traversent. Le risque pour la population est donc, bien que faible, non nul.

Pour ce qui est du risque pour l'environnement il est minime. En règle générale, les aérogénérateurs nécessitent très peu de substances liquides dangereuses pour leur fonctionnement, hormis des huiles hydrauliques qui sont parfois nécessaires.

Conclusion de la phase d'implémentation et de production :

Nous venons de voir que l'implantation et l'exploitation des parcs éoliens avait de nombreuses conséquences sur des aspects très différents, allant de la gêne visuelle des habitants jusqu'à être une menace pour les oiseaux et les chauves-souris. Nous avons également vu que même s'il est difficile d'évaluer l'impact réel de ces installations et que certaines craintes ne sont pas fondées, comme l'impact sur le tourisme ou la santé, d'autres sont légitimes et doivent être contenues en prenant des mesures adéquates. Cela s'applique tout particulièrement aux risques pour les volatiles, qui doit être limité au maximum grâce aux consignes ERC de l'état français et aux recommandations faites par les associations de protection des animaux, mais aussi aux risques d'accidents pour les populations locales, car même s'il n'y a eu à ce jour aucun accident grave lié à une éolienne, le risque existe et devra être pris en compte lors d'installations de ces parcs.

IV. Fin de Vie des éoliennes

A. Le démantèlement

La phase de démantèlement d'une éolienne arrive environ après 20 ans d'exploitations, cette phase consiste à désassembler la structure et à remettre le terrain dans son état initial. Aujourd'hui la loi française oblige les exploitants des parcs éoliens à démanteler les installations de production, à excaver une partie des fondations, à remettre en état les terrains et à valoriser et éliminer les déchets issus du démantèlement dans des filières



autorisées par la loi. De plus, la loi donne pour obligation aux exploitants d'épargner lors de la phase d'exploitation les fonds nécessaires au démantèlement. En France, l'arrêté du 26 août 2011 se contente de l'obligation d'une garantie financière de 50 000€ par éolienne. Actuellement, compte tenu du fait que l'on compte peu de cas de démantèlement en France, il est difficile de juger si les provisions prévues à cet effet seront suffisantes ou non.

Outre cette incertitude autour du réel coût de démantèlement, beaucoup se préoccupe plus de l'excavation des fondations en béton armé. L'arrêté cité plus haut fixe également des profondeurs minimales d'excavations de 1 m dans les zones agricoles et de 2 m dans les zones forestières. Cependant, cette mesure est jugée insuffisante car les blocs de béton restant enfouis vont tout de même perturber le milieu naturel (perturbation des couches géologiques et problème d'infiltration des eaux). De surcroît, cette profondeur d'excavation ne permet pas non plus la bonne exploitation des terres a posteriori du fait que les racines de certaines plantes demandent de plus grandes profondeurs pour leur implantation (3 m pour la luzerne, 1,80 m pour le maïs, 1,20 m pour le blé, etc). De même, notre manque de recul ne nous permet pas de dresser un bilan complet de l'impact de ces fondations à long terme, il faudra donc attendre encore des dizaines d'années avant de mesurer réellement les conséquences. Néanmoins, il est possible pour chaque propriétaire de terrain de fixer dans une convention de droit privé des conditions de remise en état plus contraignantes que celles prévues par la réglementation.

Si l'on s'intéresse à l'indicateur du réchauffement climatique, on s'aperçoit que le démantèlement représente que 5 % du bilan carbone de l'éolienne que l'on peut opposer aux presque 90% dû à la fabrication des composants. L'impact du démantèlement est principalement causé par l'usage de camions et de grues nécessaires au désassemblage. Mais intéressons-nous maintenant à la fin de vie de l'éolienne qui est la suite logique de la phase de démantèlement.

B. La fin de vie

Dans cette partie, nous allons regarder en détail la façon dont les divers composants d'une éolienne sont traités et recyclés. En général, si l'on se réfère à l'image ci-dessous, nous pouvons constater que cette phase à améliorer le bilan global de l'éolienne dans la plupart des critères de l'ACV.



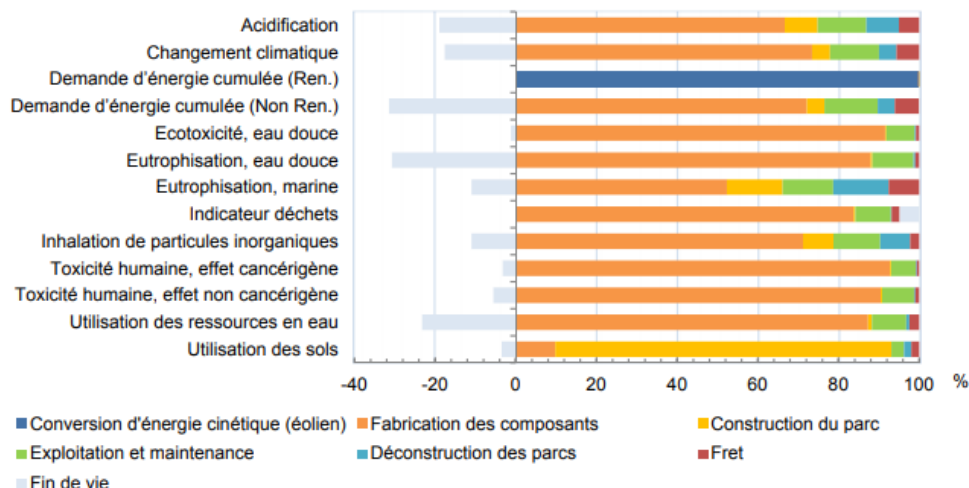


Figure 12 - Impacts environnementaux d'1 kWh d'électricité issu de la filière éolienne française

Comme nous pouvons le voir sur cette image, la fin de vie (représenté en gris) diminue les impacts de l'éolienne notamment grâce au recyclage de la grande majorité de ses composants. Le tableau ci-dessous résume les conditions de traitement et de recyclage des principaux matériaux d'une éolienne.

Tableau 8 – Répartition de la fin de vie des matériaux de constructions

Matériaux	Scenario	Référence
Acier	90 % recyclé, 10 % enfouis	(Elsam Engineering, 2004)
Fonte	90 % recyclé, 10 % enfouis	(Martinez et al. 2009)
Cuivre	90 % recyclé, 10 % enfouis	(Vestas. 2006)
Aluminium	90 % recyclé, 10 % enfouis	(Vestas 2006)
Plastiques	100 % incinéré	(Schleisner, 2000)
Béton	100 % recyclé	(Martinez et al. 2009)
Fibre de verre, époxy	100 % incinéré	(Milanese, 2009)
Aimant permanent	100 % enfouis	Cycleco

L'impact bénéfique du recyclage est en grande partie lié au recyclage de l'acier et du béton qui permet d'éviter l'énergie utilisée pour produire ces matériaux vierges. Nous pouvons remarquer que les matériaux prédominants dans les éoliennes se recyclent au minimum à 90% ce qui évite la création de déchets. Nous pouvons aussi constater que la fin de vie a tendance à limiter l'impact du réchauffement climatique du fait de la réutilisation de la presque totalité des métaux, évitant ainsi la consommation d'énergie pour produire ces matières brutes.

Le béton, bien qu'il soit coûteux à excaver, est recyclé à 100%. Ce dernier est concassé en granulats afin de récupérer les aciers mais aussi pour se servir de ces granulats pour les remblais de route par exemple.

Les autres matériaux de l'éoliennes sont presque tous revalorisés, les plastiques, les fibres de verres et époxy, qui sont difficilement recyclables, sont incinérés et servent à produire de l'électricité.

Seul ombre au tableau, les aimants permanents sont pour le moment 100% enfouis car les terres rares coûtent moins cher à être produites plutôt que recyclées. Cependant, ces dernières années ont vu l'émergence d'une volonté de les recycler afin notamment d'être moins dépendant des pays exportateurs.



Conclusion

Comme nous avons pu le voir dans notre étude, il est nécessaire de prendre en compte le plus d'aspects possible pour avoir une idée réelle des conséquences qu'un changement tel que la transition énergétique peut avoir sur notre société et notre environnement. Loin d'être un réquisitoire contre l'énergie éolienne nous avons avant tout cherché à prendre en compte des aspects souvent oubliés et qui sont rarement mis en avant. L'éolien est vendu comme étant une source d'énergie "Verte", donc éco-responsable, mais certaines phases de son cycle de vie ne sont pas sensiblement différentes des autres sources d'énergie quant à leurs impacts sur l'environnement. Il est donc important de relativiser les atouts environnementaux de cette énergie en prenant en compte l'ensemble de son impact. Il en va de même pour les arguments anti-éoliens qui manquent souvent d'objectivité et de recul, comme avec les risques de santé liés aux éoliennes qui sont souvent mis en avant mais qui ne se fondent pas sur des données réelles. Malgré l'ampleur du sujet et les nombreux axes de réflexions qui lui sont associés, l'objectif de notre travail a été d'être le plus exhaustif et synthétique possible afin d'en avoir une vision la plus globale possible. Cependant loin d'être expert dans la matière, nos résultats s'appuient sur de nombreuses études publiées par divers organismes. Il faut également souligner le fait que nous nous sommes intéressés exclusivement au cas de l'éolien terrestre et que nos conclusions ne s'appliquent probablement pas à l'éolien offshore. De même, les études sur lesquelles nous nous appuyons sont principalement basées sur le secteur de l'éolien français et les résultats pourraient être sensiblement différents à l'étranger.

Nous aimerions remercier notre enseignant François-Xavier GUCHET, dans le cadre du cours de PH09 : Éthiques, approche pluridisciplinaire, de nous avoir permis, durant ce semestre, de nous intéresser à un sujet complexe et de pouvoir étudier en profondeur ses enjeux.



Index

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AIE : Agence Internationale de l'Energie

CCS : Carbon Capture & Storage

Chrome VI : Le chrome est un élément métallique naturel de la croûte terrestre. Le secteur de la sidérurgie représente 90% de l'usage du chrome pour la production d'aciers inoxydables, d'aciers spéciaux et d'alliages. Il améliore la dureté des métaux et leur résistance à la corrosion. Le Chrome en grande quantité est cancérigène pour l'Homme

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IPBES : Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les services Écosystémiques

LPO : Ligue de Protection des oiseaux

PPI : Plan Particulier d'Intervention

SDS : Sustainable Development Scenario

SFEPM : La Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères

TICPE : Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques

WEO : World Energy Outlook

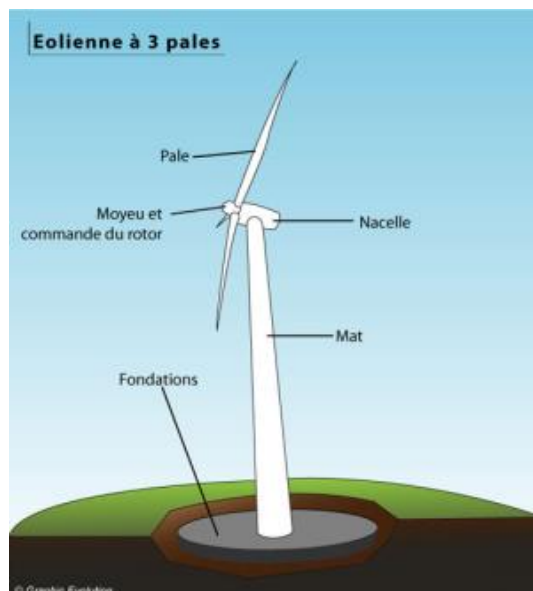
ZPS : Zone de protection spéciale qui vise à protéger les oiseaux

Annexes

Annexe 1 : Schéma des différentes parties d'une éolienne

<http://adence70.eklablog.com/de-l-eolien-a-vellexon-a113362254>

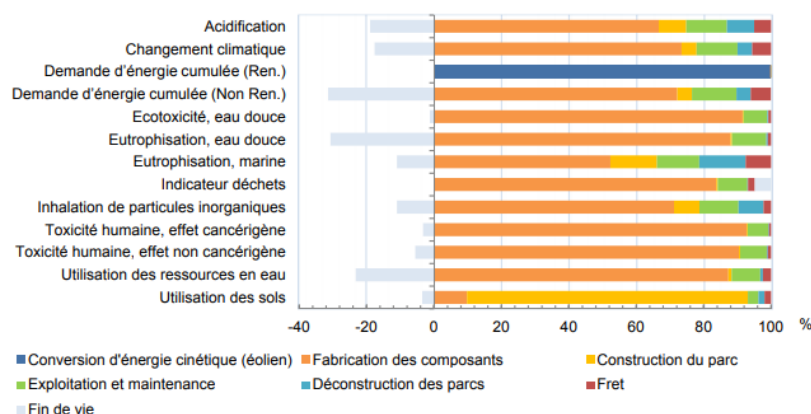




Annexe 2: Tableau des impacts d'1kWh d'électricité issu de la filière éolienne française
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf>

Tableau 17 – Impacts environnementaux d'1 kWh d'électricité issu de la filière éolienne française

Catégorie d'impact	Unité	Impact / kWh d'électricité
Acidification	mol H ⁺ eq	7,19.10 ⁻⁵
Changement climatique	g CO ₂ eq	12,72
Demande d'énergie cumulée (non renouvelable)	MJ	0,19
Demande d'énergie cumulée (renouvelable)	MJ	3,88
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	0,0901
Eutrophisation, eau douce	g P eq	5,60.10 ⁻³
Eutrophisation, marine	g N eq	1,85.10 ⁻²
Indicateur déchets	g	4,05
Inhalation de particules inorganiques	g PM _{2.5} eq	1,03.10 ⁻²
Toxicité humaine, effet cancérigène	CTUh	7,53.10 ⁻⁹
Toxicité humaine, effet non cancérigène	CTUh	5,73.10 ⁻⁹
Utilisation des ressources en eau	m ³	6,99.10 ⁻⁵
Utilisation des sols	g C deficit	100



Annexe 3: Tableau récapitulatif des principaux matériaux présents dans une éolienne
Données compilées à partir de l'ACV éolien de l'ADEME.



Rapport – PH09
Éthique de la transition énergétique à travers la filière éolienne

Partie de l'éolienne	Matériaux (kg)	Gamesa G90 2MW 78m DFIG	Enercon E82 2,3MW 107m DDSG
Rotor	Acier	3345	1140
	Acier Inox	6888	0
	Fonte	9446	0
	Cuivre	56	0
	Fibre de verre	12153	17362
	Epoxy	0	11575
	Carbone	2988	0
	Fibre de verre/ plastique	186	0
Mât	Acier	188179	102829
	Béton	0	791000
Fondation	Acier	58537	52300
	Béton	1116000	1091000
Nacelle	Acier	21805	90190
	Acier Inox	15538	0
	Fonte	23638	73178
	Cuivre	523	11680
	Fibre de verre	10	0
	Fibre de verre/ plastique	1715	0
Poids total éolienne	Tout confondu	1468872	2243554

	Gamesa G90 2MW 78m DFIG	Enercon E82 2,3MW 107m DDSG
Pourcentage acier/fonte	22,2875785	14,24690469
Pourcentage béton	75,97666781	83,88476498
Pourcentage cuivre	0,039418002	0,52060258
Pourcentage fibre de verre /epoxy	1,160890806	1,289783977

Annexe 4: Détail du procédé de production du cuivre

Le cuivre est produit majoritairement dans des mines à ciel ouvert comme à Chuquicamata au Chili. Sur les premiers 300 m de profondeur, on retrouve du minerai de cuivre oxydé qui correspond à seulement 20% de la production, plus profondément, on trouve des minerais sulfurés qui correspondent au reste de la production. Une fois extraite de la paroi à coup de dynamite, les différents minerais sont acheminés vers les usines de traitement dans de gigantesques camions qui pollue beaucoup. Une fois à l'usine, les deux types de minerais de cuivres suivent des traitements différents.

Pour l'oxyde de cuivre, les roches sont concassées puis empilés en tas, ils sont ensuite aspergés d'acide sulfurique qui vient arracher le minerai à la roche. Le liquide est récolté dans des canaux à l'air libre puis sera traité par divers procédés industriels pour séparer le cuivre de l'acide.

Pour les minerais sulfurés, c'est plus complexe, on doit dans un premier temps broyer les roches avec de l'eau afin d'obtenir une espèce de boue. Ensuite, par un traitement de flottation dans l'eau puis de décantation, qui consistent à faire remonter à la surface la partie la plus riche du minerai pour le séparer des boues qui restent au fond du bain, on obtient un concentré contenant 25 à 40 % de cuivre. Dans un second temps, le concentré est chauffé à 1200°C dans un four où l'air est enrichi en oxygène afin de raffiner encore plus le cuivre. Cette étape dégage du dioxyde de soufre (combinaison entre le soufre du concentré et le dioxygène de l'air) qui est hautement dangereux pour l'Homme. Ce gaz est normalement récupéré mais ce n'est pas forcément le cas dans les pays qui ne respectent pas les normes environnementales. Un autre traitement à haute température est nécessaire pour arriver à une concentration de cuivre entre 98 et 99,5 %. Mais ce n'est pas totalement fini puisque le



cuivre doit encore subir un dernier traitement qui est l'affinage électrolytique qui consiste à purifier le cuivre grâce au principe de la catalyse. On obtient ainsi un cuivre pur à 99,9% qui pourra être utilisé pour fabriquer des plaques, des fils, etc.

Annexe 5: Inventaire des ressources que demande 1 kg d'aimant permanent

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf>

Tableau 105 – Inventaire de la composition d'un kilogramme d'aimant permanent

Iron	1,47	kg
Boron carbide	0,0261	kg
Neodymium	0,551	kg
Sodium carbonate	0,0000971	kg
Trisodium phosphate	0,000194	kg
Sodium gluconate	0,000233	kg
Sodium hydroxide	0,000486	kg
Sulphuric acid	0,00179	kg
Nickel [Metals]	0,136	kg
Heat	11,3	MJ
Electricity	8,22	kWh
Water	8,83	kg
Hydrogen gas	0,878	kg

Ce premier tableau ne présente pas de dysprosium dont plusieurs sources affirme le contraire, une masse a été ajoutée issue de la publication suivante (Zimmermann, 2013) donnant la composition suivante : 68% de fer, 29% de neodymium, 2% de dysprosium, et 1% de bore.

Annexe 6: Répartition des éoliennes par puissance et par technologie

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf>



Tableau 2 - Répartition des éoliennes (en nombre de machines) par puissance et par technologie

	0 - 0,49 MW	0,5 - 0,99 MW	1 - 1,49 MW	1,5 - 1,99 MW	2 - 2,49 MW	2,5 - 2,9 MW	3 MW et plus	Total
SCIG	266		94		37			397
DFIG				236	1694	282	97	2309
DDSG		26			843			869
DDPMG						61	22	83
Total	266	26	94	236	2574	343	119	3658
	7,3 %	0,7 %	2,6 %	6,5 %	70,4 %	9,4 %	3,3 %	100%

Les éoliennes utilisant des aimants permanents sont regroupées sous l'appellation DDPMG pour "Direct Drive Permanent Magnet Generator". On peut voir ici qu'elles ne représentent que 2% de toutes les éoliennes de l'étude.

Sources

1. The Ethics of Energy Transitions Clark Miller Consortium for Science, Policy & Outcomes Arizona State University Tempe, AZ clark.miller@asu.edu
2. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Olivier Gergaud
3. Environmental ethics of renewable energy
https://www.academia.edu/11200656/environmental_ethics_of_renewable_energy
4. World Energy Outlook (2018) – (2017)
5. MOOC IFP School Energy Transition
6. Source: IPCC (2011), Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.
7. https://www.liberation.fr/france/2018/06/08/biocarburant-total-jette-de-l-huile-de-palme-sur-le-feu_1657762
8. Energy Policies of IEA Countries 2016 Review Portugal
9. <https://journals.openedition.org/mediterranee/10113>
10. Third Report on the State of the Energy Union - Energy Union Factsheet Portugal
11. <http://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-portugal.pdf>
12. IPCC, 2000 – Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570 Available from [Cambridge University Press](https://www.cambridge.org/core), The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND
13. Miller, Clark & Richter, Jennifer. (2014). Social Planning for Energy Transitions. Current



Rapport – PH09
Éthique de la transition énergétique à travers la filière éolienne

- Sustainable/Renewable Energy Reports. 1. 10.1007/s40518-014-0010-9.
14. Clark A. Miller , Alastair Iles & Christopher F. Jones (2013) The Social Dimensions of Energy Transitions, *Science as Culture*, 22:2, 135-148, DOI: 10.1080/09505431.2013.786989
 15. Tineke van der Schoor, Bert Scholtens, Power to the people: Local community initiatives and the transition to sustainable energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.089>.
 16. Frank N. Laird (2013) Against Transitions? Uncovering Conflicts in Changing Energy Systems, *Science as Culture*, 22:2, 149-156, DOI: 10.1080/09505431.2013.786992
 17. Cowell, Richard & Bristow, Gillian & Munday, Max. (2011). Acceptance, acceptability and environmental justice: The role of community benefits in wind energy development. *Journal of Environmental Planning and Management*. 54. 539-557. 10.1080/09640568.2010.521047.
 18. Frank N. Laird (2013) Against Transitions? Uncovering Conflicts in Changing Energy Systems, *Science as Culture*, 22:2, 149-156, DOI: 10.1080/09505431.2013.786992
 19. Sharlissa Moore (2013) Envisioning the Social and Political Dynamics of Energy Transitions: Sustainable Energy for the Mediterranean Region, *Science as Culture*, 22:2, 181-188, DOI: 10.1080/09505431.2013.786994
 20. Gwen Ottinger (2013) The Winds of Change: Environmental Justice in Energy Transitions, *Science as Culture*, 22:2, 222-229, DOI: 10.1080/09505431.2013.786996
 21. United Nation- Energy Reports : [A/RES/71/233 – Ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all](#)
 22. Jones CF. Routes of power: Energy in modern America. Cambridge: Harvard University Press; 2014. A major new history of the rise and significance of energy transport infrastructures in the USA, focused on the Northeast in the late 19th century.

Général:

https://eolienne.f4jr.org/generateur_electrique

<https://www.ademe.fr/>

Acier:

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf>

Béton:

<http://ethicologique.org/index.php/750-eoliennes-1-reacteur-nucleaire/>

<https://blogs.alternatives-economiques.fr/vidalenc/2018/07/12/30-millions-de-tonnes-de-beton-pour-les-eoliennes-c-est-affreux-vraiment>

Cuivre:

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/epuisement-metiaux-mineraux-fiche-technique.pdf>

<https://copperalliance.fr/lindustrie/extraction-et-metallurgie/>

<http://cocomagnanville.over-blog.com/article-chili-chuquicamata-l-enfer-sur-terre-116289594.html>



<http://www.chilivoyages.com/mine-de-chuquicamata-plus-grande-mine-de-cuivre-du-monde/>

Aimants permanents :

https://twitter.com/AlexDevecchio/status/955047307480850432/photo/1?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E955047307480850432%7Ctwgr%5E393039363b636f6e74726f6c&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.20minutes.fr%2Fplanete%2F2207615-20180124-transition-energetique-bilan-ecologique-extraction-metaux-rares-deplorable

<https://www.20minutes.fr/planete/2207615-20180124-transition-energetique-bilan-ecologique-extraction-metaux-rares-deplorable>

<https://www.dailymotion.com/video/xudrnw>

<https://www.youtube.com/watch?v=LVWUDLBYb-Q>

Partie Implantation et exploitation :

Rapport de l'ADEME "filiale éolienne française" de 2017

Rapport de La LPO 2015

Rapport de La SFEPM "Diagnostic Chiroptérologique des projets éoliens terrestres" 2016

Rapport EDF "sécurité des installations éoliennes" 2014

Rapport de l'académie nationale de médecine "Nuisances sanitaires des éoliennes terrestres" 2017

