



HAL
open science

Matériaux pour la transition énergétique : importance du recyclage

Régis Olives, Enrique Ribeiro, Xavier Py

► **To cite this version:**

Régis Olives, Enrique Ribeiro, Xavier Py. Matériaux pour la transition énergétique : importance du recyclage. Congrès SFGP 2022, Nov 2022, Toulouse, France. hal-03859923

HAL Id: hal-03859923

<https://hal.science/hal-03859923>

Submitted on 18 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Matériaux pour la transition énergétique : importance du recyclage

Régis OLIVES¹, Enrique RIBEIRO¹, Xavier PY²

Affiliation 1 : PROMES-CNRS, UPVD, Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan

Affiliation 2 : Laboratoire de thermique et énergie de Nantes LTeN, UMR 6607 Nantes Université-CNRS, 44000 Nantes.

Introduction

La transition énergétique a pour objectif, entre autres, de réduire les impacts sur le dérèglement climatique, et en particulier les émissions de CO₂ liées à la très forte consommation d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz). La solution réside d'abord dans la sobriété énergétique, deuxièmement dans l'amélioration de l'efficacité et enfin, dans le développement des énergies décarbonées avec, en particulier, les énergies renouvelables (EnR). Sur ce dernier point, le déploiement des procédés EnR requiert la mobilisation de matériaux en quantité relativement importante du fait de la faible concentration de la ressource énergétique (Vidal, 2018). Nous mettons, ici, en évidence les quantités de matériaux nécessaires à la mise en œuvre des différents systèmes de production d'énergie en se focalisant sur les matières principales que sont le béton, l'acier, le cuivre, l'aluminium, le verre et les polymères. Nous ne traiterons ici que de ces matériaux. Il ne faut cependant pas oublier les matériaux dits critiques qui sont également utilisés, certes en quantité moindre, mais qui peuvent poser problème en termes de ressources du fait de leur rareté (IEA 2021). L'attention est portée sur le recyclage des matériaux qui modifie nettement le point de vue. Il est montré l'intérêt de, bien entendu, maximiser ce recyclage.

Afin de pouvoir comparer les différentes technologies de conversion de l'énergie en électricité, le rapport entre l'énergie restituée durant la durée de vie et l'énergie investie (*EROEI*) est aussi étudié. La prise en compte de la soutenabilité nous conduit à analyser le rapport *EROEI_{sust}* qui compare l'énergie restituée à la part d'énergie non renouvelable investie. De manière similaire, le rapport *EROMI_{sust}* est proposé. Il s'agit du rapport entre l'énergie restituée et la quantité de matière non recyclée investie. On met ainsi en évidence le caractère soutenable d'une technologie de conversion de l'énergie en électricité aussi bien en termes d'énergie que de matériaux.

Nous nous focalisons sur le cas de l'éolien avec la problématique du recyclage des pales et de façon plus générale des matériaux composites. L'étude porte, plus particulièrement, sur les éoliennes installées en région Occitanie. Un état des lieux est présenté afin d'évaluer les quantités de matériaux composites qu'il s'agira de recycler d'ici 2040.

Matériaux pour la transition énergétique : critères

Le déploiement des systèmes à énergies renouvelables s'avère nécessaire pour répondre au défi climatique et, en particulier, remplacer les énergies fossiles par des énergies décarbonées. Compte tenu de la plus faible densité énergétique offerte par les EnR par rapport aux énergies fossiles, le développement massif des EnR engendre une mobilisation importante de matériaux. Il en résulte d'accentuer les efforts en matière de sobriété pour pouvoir ensuite mieux intégrer les EnR. Il n'en reste pas moins que les quantités de matériaux à utiliser pour construire les systèmes à EnR seront très élevées. Il s'agit donc d'être attentifs aux besoins exprimés par les acteurs du domaine afin d'éviter d'accélérer la déplétion des ressources. À partir de données issues de la littérature et en particulier d'inventaires établis lors d'analyses de cycle de vie (ACV), il est possible de déterminer les principales quantités de matière à mobiliser pour la construction des infrastructures et des éléments constituants

les systèmes de production. Nous nous focalisons sur les différents procédés de production d'énergie électrique : solaire PV (en toiture et au sol), solaire thermodynamique (à concentrateur cylindro-parabolique et à tour), éolien (onshore et offshore), centrale géothermique, centrale hydroélectrique, centrale au charbon et centrale nucléaire. Dernièrement, un grand nombre d'inventaires et d'ACV a été mené sur l'ensemble des systèmes de production d'électricité à partir d'énergie solaire [Fthenakis 2020, Burkhardt 2011], d'éolien [Bonou 2016], de géothermie haute température [Tosti 2020], d'hydraulique [Ribeiro 2010], de charbon et de nucléaire [Wilson 2010]. Ces études proposent un inventaire des matériaux employés sur le cycle de vie. Afin de comparer ces différents systèmes en termes de quantités de matériaux investis mi , nous rapportons, dans un premier temps, cette quantité à la production d'électricité sur toute la durée de vie. Nous n'analysons que quelques familles de matériaux, a priori représentatives de ces systèmes : béton, acier, cuivre, aluminium, verre et polymères. Les matériaux dits critiques ne sont pas ici considérés. Leur quantité est bien souvent nettement plus faible. Il ne faut cependant pas oublier ces matériaux critiques tels que les métaux rares qui sont utilisés, certes en quantité moindre, mais qui peuvent poser problème en termes de ressources du fait précisément de leur rareté. En appliquant le taux de charge annuel correspondant à un nombre d'heures de fonctionnement au cours d'une année, Nh_{an} et la durée de vie LT , on obtient la quantité de matériaux Me (t/TWh) qui est donc donnée par :

$$Me = \frac{mi}{ELT} \quad \text{avec} \quad ELT = P \cdot Nh_{an} \cdot LT \quad [1]$$

Les taux de charge sont propres à chaque technologie et peuvent dépendre du lieu d'implantation.

Concernant les systèmes de production d'électricité, différents indicateurs ont été proposés afin d'aider à leur sélection. En particulier, il est désormais courant de calculer le taux de retour énergétique standard : $EROEI_{sta}$ (Energy Return of Energy Invested) [Murphy 2022, Weissbach 2017]. Il s'agit du rapport sans dimension de l'énergie restituée et de l'énergie investie. L' $EROEI_{sta}$ peut a priori être obtenu à partir de l'énergie produite sur la durée de vie (ELT) et de la demande énergétique cumulée (CED) :

$$EROEI_{sta} = \frac{ELT}{CED} \quad [2]$$

La demande énergétique cumulée est déterminée selon la norme NF EN ISO 14044 et dans le cadre de l'analyse de cycle de vie (ACV). Il s'agit de la somme des énergies nécessaires à l'extraction des ressources, à la construction, à l'exploitation, à l'élimination et au recyclage en fin de vie.

En introduisant le temps de retour énergétique, $EPBT$ (Energy payback times), on a la relation :

$$EROEI_{sta} = \frac{LT}{EPBT} \quad [3]$$

Néanmoins, si l'on souhaite dorénavant introduire la notion de soutenabilité, il nous faut prendre en compte le fait que l'énergie réellement à investir n'est que de type non renouvelable. À l'instar de Horsin Molinari et Multon (2018), on introduit l' $EROEI_{sust}$:

$$EROEI_{sust} = \frac{ELT}{CED_{NoR}} \quad [4]$$

où CED_{NoR} correspond à la demande énergétique cumulée d'origine non renouvelable. Ainsi, on met en évidence qu'un système soutenable satisfera la condition suivante $EROEI_{sust} > 1$. De même, il est possible d'introduire un indicateur similaire à l' $EROEI$ mais relatif aux matériaux investis avec toujours comme référence l'énergie restituée ELT . On peut alors établir le rapport suivant exprimé en kg/kWh:

$$EROMI_{sta} = \frac{ELT}{mi} = \frac{1}{Me} \quad [6]$$

De la même façon, il est possible de tenir compte des fractions de matériaux recyclés et de matériaux non recyclés (Me_{NoRec}), qui conduit à former l' $EROMI_{sust}$:

$$EROMI_{sust} = \frac{1}{Me_{NoRec}} \quad [7]$$

Cet indicateur rend compte de l'énergie restituée à partir de matériaux non recyclés. Un $EROMI_{sust}$ sera donc d'autant plus grand que le système fera appel à davantage de matériaux recyclés.

Matériaux pour la production d'électricité

Il s'agit désormais de comparer différents systèmes de production d'électricité à l'aide des indicateurs présentés précédemment. Ainsi, à partir des inventaires de cycle de vie des différents procédés de conversion d'énergie, on obtient les résultats présentés dans la figure 1. Pour chaque procédé, nous avons retenu les quantités de matière prépondérantes et classé selon les principales familles de matériaux (béton, acier, aluminium, cuivre, verre, polymères). Dans la famille « autres », sont rassemblés les matériaux tels que les céramiques, les autres métaux, les sels fondus, les huiles...

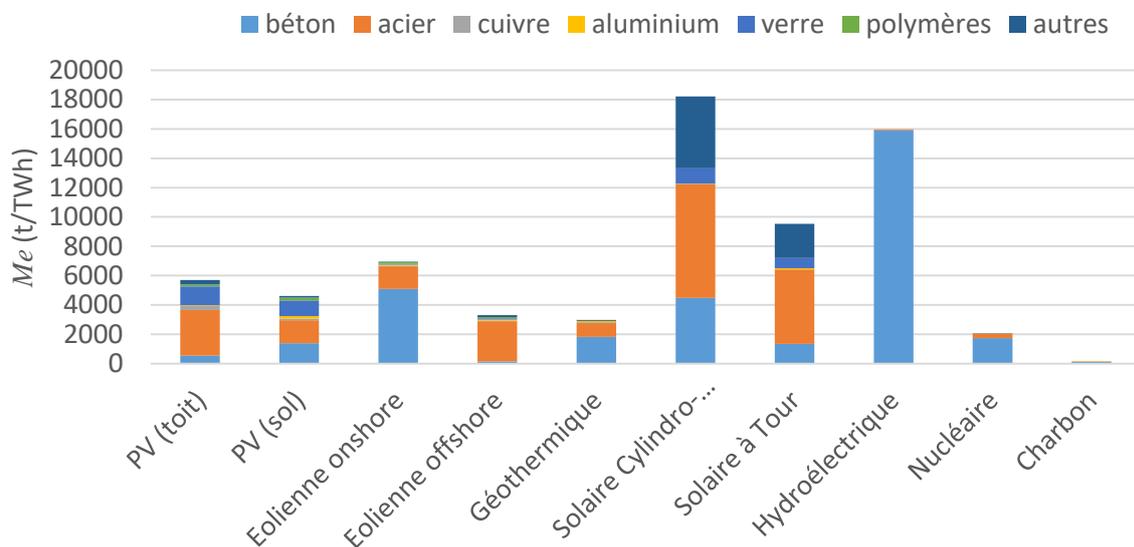


Figure 1 : Quantités de matériaux Me (t/TWh) pour différents types de centrales de production d'électricité avec la répartition selon les principaux matériaux considérés (béton, acier, cuivre, aluminium, verre, polymères). Les autres matériaux peuvent être des céramiques, des métaux, des sels fondus, des huiles...).

Tout d'abord, il est à remarquer que la quantité de matériaux mobilisés est liée à la densité énergétique de la ressource, bien plus élevée pour les énergies fossile et fissile que pour les EnR. Pour les EnR, il s'avère nécessaire de mettre en place des systèmes de collecte de l'énergie de grande taille. A priori, les énergies photovoltaïque et éolienne requièrent en moyenne près de 5000 t/TWh à plus ou moins 2000 t/TWh selon le type d'installation. Le PV au sol fait appel à moins d'acier mais plus de béton que le PV en toiture. Concernant l'éolien, le béton est fortement réduit pour l'offshore par rapport à l'onshore. Les centrales solaires à concentration et les centrales hydroélectriques nécessitent davantage de matériaux dû à l'acier et les autres matériaux tels que les sels et l'huile pour le solaire et le béton pour l'hydroélectricité. Pour ces deux derniers types de systèmes, la fonction stockage se révèle « gourmande » en matériaux. Cependant, cette fonction, inexistante dans le photovoltaïque et l'éolien, est cruciale pour le réseau électrique. Aussi, l'hydroélectricité et le solaire à concentration constituent les deux systèmes les plus développés proposant un stockage massif de l'électricité. Avec

cet indicateur Me et malgré une densité énergétique faible, la centrale géothermique se révèle le système EnR le moins gourmand en matériaux.

Enfin, notons juste que du fait de la densité énergétique, la quantité d'uranium consommé tout au long de la vie de la centrale est de 280 t/TWh, alors que pour une centrale au charbon, le charbon consommé tout au long de la vie de la centrale s'élève à 300 000 t/TWh qu'il va bien falloir prendre en compte dans ce type de calcul !

Matériaux et recyclage

Afin de pouvoir développer de façon massive les EnR sans subir les limitations matérielles, il s'avère nécessaire de mettre en place le recyclage des matériaux et construire ces procédés, au moins en partie, à partir de matériaux recyclés.

Tout d'abord, le recyclage est à distinguer de la valorisation énergétique. En effet, la valorisation énergétique se base sur l'exploitation des matériaux en tant que combustible. Ainsi, la combustion conduit à la formation d'eau sous forme vapeur, de CO_2 , d'un certain nombre de gaz à filtrer et de cendres de composant principal la silice. Ainsi, la seule ressource de valorisation matérielle disponible via ce processus est la silice. A contrario, le recyclage consiste à réaliser une valorisation matérielle. La dégradation est en quelque sorte évitée et permet de partir d'une base matérielle plus complexe et donc avec des potentialités plus larges.

Certains matériaux bénéficient depuis de nombreuses années d'un effort conséquent sur le recyclage. On constate des taux de recyclage élevés dans les secteurs du verre et de certains métaux. Les aciers, en particulier, sont recyclés avec des taux supérieurs à 90 %. L'aluminium et le cuivre font partie aussi des matériaux de plus en plus recyclés (respectivement plus de 50% et de 60%). Parmi les matériaux les plus employés en termes de masse, le béton est recyclé de façon très variable selon les secteurs. Le béton utilisé pour les fondations est plus rarement recyclé que le béton structurel.

Concernant les polymères, les thermoplastiques ont des taux de recyclage de plus en plus élevés qui conduit à des contenus en matériaux plastiques recyclés de 20 % en France et dans certains pays d'Europe de 30 %. Du fait de leurs propriétés, ils peuvent réintégrer de nouveaux cycles de vie après un traitement thermique adéquat. Les thermodurcissables, quant à eux, sont plus difficiles à réutiliser car ils ne peuvent pas subir de traitement thermique sans dégradation. Ils sont bien souvent réemployés après déchetage sous une forme de plus faible valeur ajoutée (downcycling), voire plutôt valoriser énergétiquement.

Pour les systèmes de production d'énergie, il apparaît intéressant de reprendre la figure 1 et de l'analyser en tenant compte du recyclage ou du moins de la possibilité d'employer des matériaux recyclés. Ainsi, en retirant les quantités de matériaux recyclés et en ne gardant que les matériaux mobilisés sans être valorisés matériellement, il est possible de déterminer les quantités de matériaux non recyclés, rapportées à l'énergie produite sur toute la durée de vie Me_{NoRec} . Compte tenu des taux moyens actuels de recyclage en Europe (béton 10%, acier 80%, cuivre 60%, aluminium 50%, verre 80%, polymères 30% [ADEME]) on obtient les résultats présentés à la figure (2). Tout d'abord, il est à noter que les technologies nécessitant de grandes quantités de béton restent pénalisées. En effet, même si le béton est recyclable et peut être revalorisé, celui concerné par la figure (1) sert bien souvent de fondation dont le retraitement coûte encore trop cher. Par exemple, les fondations d'une éolienne onshore sont de l'ordre de 250 à 300 t/MW, soit près de 95% de la masse totale.

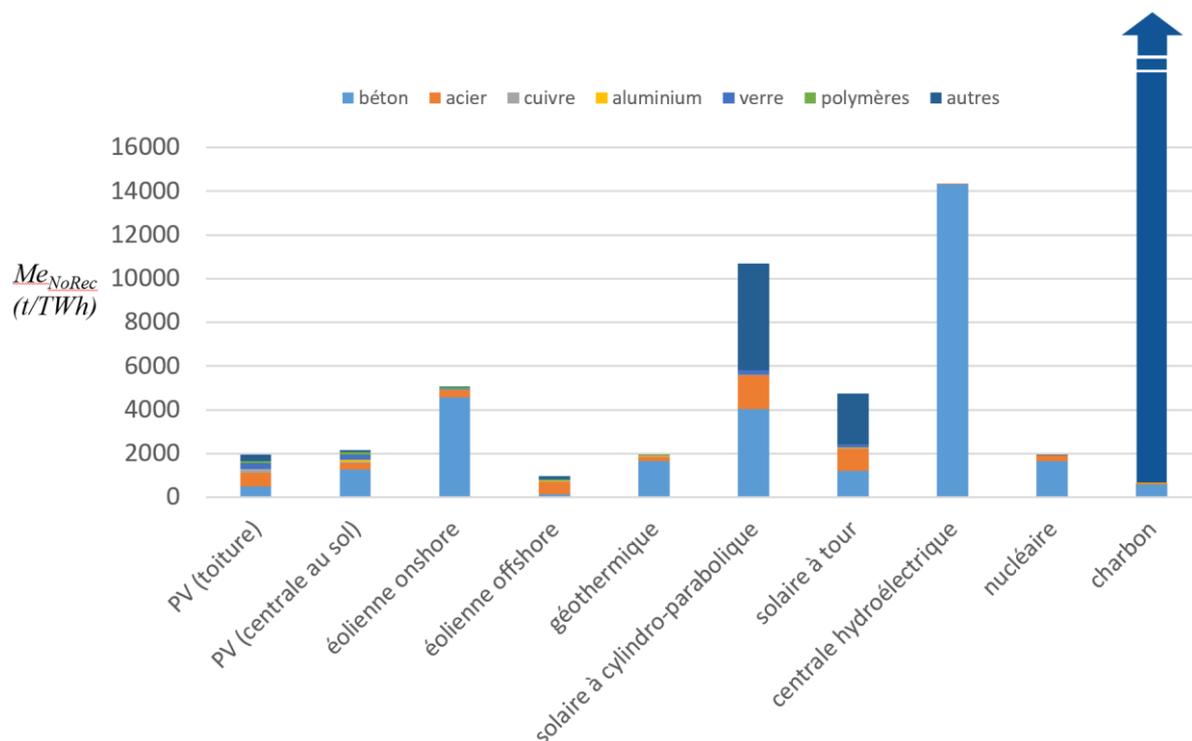


Figure 2 : Quantités de matériaux non recyclés Me_{NoRec} (t/TWh) mobilisés pour différents types de centrales de production électrique.

Néanmoins, il en ressort que le PV, l'éolien offshore et la centrale géothermique se retrouvent avec des quantités de matériaux non recyclés Me_{NoRec} d'environ 2000 t/TWh, comparables avec le nucléaire qui n'intègre encore que très peu de matériaux recyclés. On met aussi en évidence l'intérêt de l'éolien onshore et de la centrale solaire à tour en termes de quantités de matériaux investis comparées à l'énergie restituée sur l'ensemble du cycle de vie avec des quantités de matériaux de l'ordre de 4500 t/TWh. À noter que les centrales solaires présentent le net avantage d'intégrer la fonction de stockage conférant à ce type de technologie un intérêt supplémentaire quant à la gestion de l'électricité sur le réseau. La prise en compte de matériaux recyclés voire plusieurs fois recyclables dans la construction de ces systèmes rend d'ailleurs encore plus pertinent le choix de ces systèmes par rapport, par exemple, au nucléaire. Enfin, les centrales au charbon nécessitent des quantités de matériaux non renouvelables considérables rapportées à la quantité d'énergie restituée (300 000 t/TWh de charbon).

Énergie, matériaux et soutenabilité

Afin de comparer les différentes technologies, il est souvent fait appel à l' $EROEI_{sta}$ qui est donc le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie investie [Weissbach 2017]. L' $EROEI_{sust}$ défini précédemment est aussi un indicateur intéressant pour qualifier ces technologies. Il ne tient compte que de la part d'énergie non renouvelable investie et donc prélevée à l'environnement de façon définitive. À noter que, dans le cas des procédés à énergie fossile ou fissile, la différence entre l' $EROEI_{sta}$ et l' $EROEI_{sust}$ consiste à inclure l'énergie relative à la quantité de matériaux fossiles ou fissiles utilisée tout au long de la vie, soit environ 300 000 t/TWh pour le charbon et 280 t/TWh pour le nucléaire, par exemple. La figure (3) montre les différentes valeurs d' $EROEI_{sust}$ et d' $EROMI_{sust}$ pour les différentes technologies considérées. On met ainsi en évidence les procédés qui répondent le mieux au critère de soutenabilité ($EROEI_{sust} > 1$) avec des valeurs d' $EROMI_{sust}$ les plus élevées. Cette figure traduit le fait que les procédés à énergies renouvelables possèdent l'avantage indéniable de pouvoir

exploiter des énergies de flux contrairement aux centrales nucléaires ou au charbon qui exploitent des énergies de stock. En outre, la figure met en évidence les technologies intéressantes quant à, à la fois, l'énergie et la quantité de matériaux réellement à investir pour restituer la même quantité d'énergie électrique.

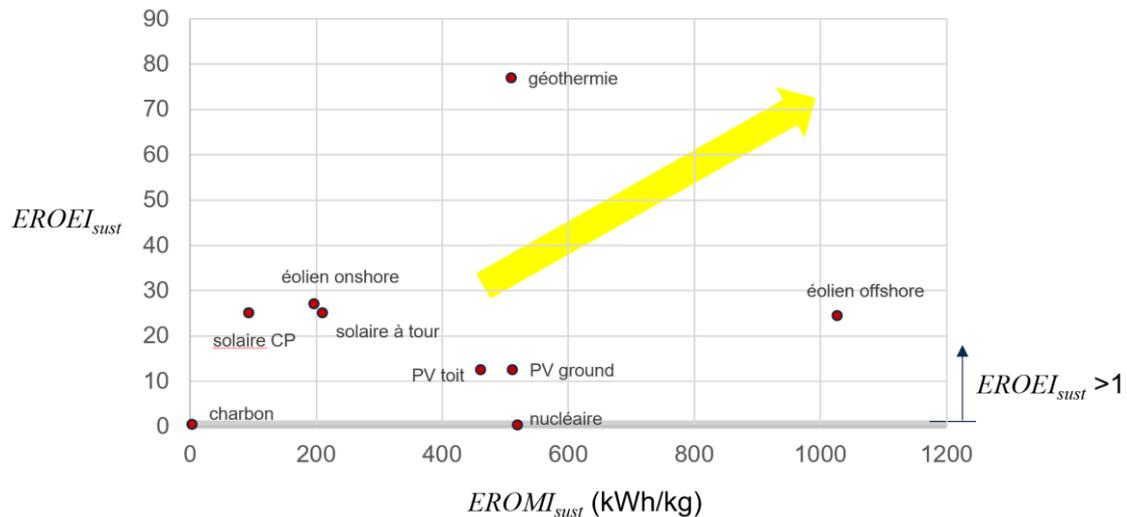


Figure 3 : $EROEI_{sust}$ vs $EROMI_{sust}$: énergie restituée selon l'énergie non renouvelable investie et la quantité de matériaux non recyclés investis.

Cas de l'éolien en région Occitanie

Nous nous focalisons désormais sur le cas de l'éolien, en particulier onshore. Les éoliennes comportent quatre principaux éléments qui vont se distinguer par la nature des matériaux utilisés : les fondations constituées de béton et d'acier, le mât essentiellement réalisé en acier, la nacelle constituée, en masse, principalement en acier mais comportant aussi d'autres matériaux en quantité moindre, et enfin les pales en matériau composite. Autant le mât et la nacelle peuvent être grandement recyclés, autant les fondations implantées dans le sol et les pales ne bénéficient pas de recyclages systématiques. En effet, le recyclage du béton enfoui dans le sol exige une excavation avec déchiquetage. Ce procédé reste actuellement trop coûteux pour la faible valorisation qui pourrait s'ensuivre. Concernant les pales, le recyclage n'est actuellement pas réellement établi. On constate la valorisation sous forme de mobilier urbain qui reste de portée limitée ainsi que le déchiquetage et la valorisation thermique. Le recyclage des pales est rendu difficile par la nature même des matériaux composites : résine thermosable qu'il faut arriver à séparer des fibres de verre (ou de carbone selon les technologies).

Dans le cas de l'éolien en région Occitanie, un inventaire des quantités de déchets issus des pales a été effectué. L'histogramme de la figure 4 montre les quantités de déchets qui seront à recycler au cours des prochaines années. Il en ressort qu'au bout de 20 ans, les déchets composites constitueront plus de 13 000 t à recycler juste en Région Occitanie. Ces matériaux composites nécessiteront le développement de systèmes de recyclage adaptés. Des pistes de valorisation sont actuellement proposées [Ribeiro 2022]. La carte présentée à la figure 5 établit, plus précisément, les différents sites éoliens avec les quantités de déchets composites et selon la période correspondant à la fin de vie des systèmes. La filière de recyclage pourra ainsi intégrer encore plus précisément l'énergie à investir. Ce sera en fonction de ses sites et donc de la localisation de ces nouvelles ressources de déchets à traiter que la filière de recyclage devra s'établir et répondre ainsi efficacement aux critères de soutenabilité présentés précédemment.

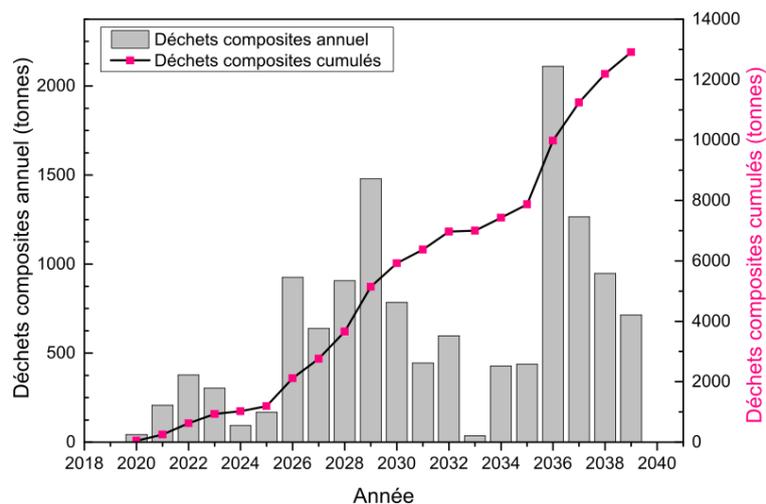


Fig. 4 : Quantité de déchets composites des éoliennes à traiter pour la période de 2020 à 2040 en région Occitanie (Q. H. Nguyen).

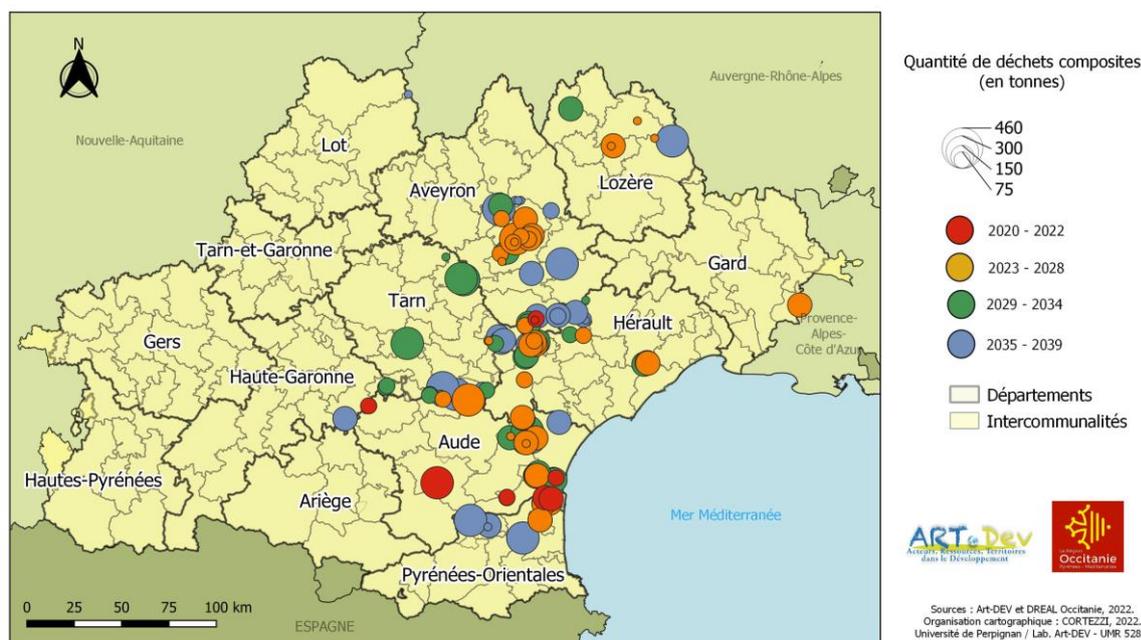


Fig. 5 : Quantité de matériaux composites issues des pales d'éolienne au cours des années 2020-2040 en région Occitanie (Cartographie F. Cortezzi).

Conclusion

L'évaluation des quantités déchets est un paramètre important quant au dimensionnement des procédés de recyclage dédiés à des matériaux spécifiques et en particulier, utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie électrique. Plusieurs indicateurs existent ou ont été proposés afin d'éclairer les choix. L'utilisation de matériaux recyclés dans la construction des systèmes devient une nécessité et peut être quantifiée afin d'évaluer la pertinence de ces systèmes. La détermination d'indicateurs rendant compte de la soutenabilité des procédés conduit à privilégier les systèmes à énergies renouvelables, certains pouvant être plus pertinents que d'autres. On a mis aussi en évidence pour les éoliennes installées en région Occitanie la quantité de matériaux composites qu'il faudra recycler dans les 20 prochaines années. Ainsi, la conception des systèmes de conversion doit être repenser afin de

favoriser l'utilisation de matériaux recyclés. Dans le domaine de l'éolien, il est nécessaire de privilégier des matériaux de composition simple et facilement recyclables. La société Arkema a proposé récemment des pales utilisant des thermoplastiques offrant des taux de recyclage plus élevés. Néanmoins, il faut faire attention à ces indicateurs basés sur la masse et non le caractère critique de certains matériaux. Ils peuvent augmenter l'efficacité et donc la productivité mais du fait de leur faible proportion, ils peuvent s'avérer difficile à séparer et à isoler pour les reconcentrer afin de faciliter leur traitement. Pour ces matériaux, il semblerait plus opportun de considérer leur valeur exergétique comme Valero et al. (2018) le développent.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Occitanie pour le financement du projet MACISEB (R&S 2019 MP0021724) dans lequel s'inscrit cette étude ainsi que Q. H. Nguyen pour l'inventaire des déchets et F. Cortezzi pour la cartographie.

Références bibliographiques :

Bonou A., Laurent A., Olsen S.I., Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application, *Applied Energy*, 2016, 180, 327-337.

Fthenakis V., Leccisi E., Raugei M., Solar Cells: Energy Payback Times and Environmental Issues, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer Nature 2020.

Horsin Molinaro H. et Multon B., Conversion d'énergie et efficacité énergétique, *Educsol*, sept. 2018.

IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, *W. E. O. Specific Report*, IEA, May 2021.

Murphy D. J., Raugei M., Carbajales-Dale M., Rubio Estrada B., Energy Return on Investment of Major Energy Carriers: Review and Harmonization, *Sustainability*, 2022, 14, 7098.

Oliveux G., Dandy L.O., and Leeke G.A., Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 2015, 72, 61 - 99.

Ribeiro E., Plantard G., Olivès R., Elaboration de céramiques innovantes à partir de déchets de la filière éolienne, *Récents Progrès en GP*, 2022, Congrès SFGP 2022.

Ribeiro F. M., Silva G.A., Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18, 44–54.

Tosti L., Ferrara N., Basosi R., Parisi M. L., Complete data inventory of a geothermal power plant for robust cradle-to-grave life cycle assessment results, *Energies*, 2020, 13, 2839

Valero A., Valero A., Calvo G., Ortego A., Material bottlenecks in the future development of green technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, 93, 178–200.

Vidal O., Matières premières et énergie, ISTE Editions, 2018.

Weissbach D., Herrmann F., Ruprecht G., Huke A., Czerski K., Gottlieb S., Hussein A., Energy intensities, EROI (energy returned on invested), for electric energy sources, *EPJ Web of Conferences* 2018, 189, 00016.

Wilson K. et al. Environmental product declaration of electricity from Sizewell B nuclear power station : A study for EDF Energy undertaken by AEA, 2010.