



Matières premières critiques et
évolutions technologiques :
cas de l'énergie
et de la mobilité au 21^{ème} siècle

Auteurs :

Jean-Pierre Chevalier, Gérard Grunblatt et Patrice Simon,
membres de l'Académie des technologies

Table des matières

INTRODUCTION	3
1- LE CONTEXTE	4
2- LES TECHNOLOGIES LIEES A LA DECARBONATION DE L'ELECTRICITE	5
EOLIENNE TERRESTRE ET EN MER	6
ALTERNATEURS D'EOLIENNE : CHOIX TECHNOLOGIQUES AVEC OU SANS AIMANTS PERMANENTS FE-ND-B.	7
LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	10
ELECTRICITE NUCLEAIRE	10
3- LA MOBILITE ELECTRIQUE	11
BATTERIES, NOTAMMENT POUR VEHICULES ELECTRIQUES	13
PRODUCTION D'HYDROGENE PAR L'ELECTROLYSE ET MATERIAUX POUR PILE A COMBUSTIBLE	15
4- DISCUSSION	16
CONCLUSION	18

Introduction

Réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, mais aussi CH₄, NO₂) dans l'atmosphère est une nécessité incontestée au début du 21^{ème} siècle et un enjeu climatique, sociétal et économique primordial. Plus ou moins rapidement l'utilisation de combustible fossile comme source majoritaire d'énergie devra être très fortement réduite afin de diminuer les émissions de CO₂. Le vecteur énergétique principal deviendra l'électricité : le 21^{ème} siècle sera électrique. Cette transition sera possible grâce au développement de technologies pour la production d'électricité essentiellement décarbonée et de l'extension de son utilisation à des secteurs qui utilisent aujourd'hui des combustibles fossiles. Ces technologies mettent en oeuvre à des degrés d'intensité très variables des matériaux et sont donc consommateurs de matières premières.

Les besoins en matières premières et les risques d'approvisionnement ont été très largement traités par plusieurs organismes (UE, BRGM, COMES, USGS) et ont conduit à de très nombreux rapports et publications (rapport UE [1], analyses régulières par élément de l'USGS [2], rapports et site internet « mineral info » [3] du COMES (avec des éléments fournis par le BRGM), revues scientifiques spécialisées ...). Les Académies des Sciences et des Technologies ont également publié un rapport en mai 2018 [4], intitulé "Stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique". Ce rapport, très complet, abordait les ressources minières en grande partie, au regard des besoins pour assurer une transition énergétique. Il présentait les besoins chiffrés en matières premières pour la production d'électricité (photovoltaïque solaire et éoliennes) ainsi que pour les batteries des véhicules électriques pour la France d'ici à 2050. Le rapport concluait qu'une pénurie de matières premières de nature à empêcher cette transition était peu probable, mais mettait en garde sur les risques liés la chaîne d'approvisionnement (de la mine jusqu'au produits finals en passant par les étapes de raffinage et transformation) qui pourrait devenir un facteur limitant.

La Commission européenne a publié une mise à jour de sa liste de "métaux critiques" en 2020 [1]. Les risques d'approvisionnement sont soigneusement identifiés avec une méthodologie complète, qui prend en compte de nombreux risques y compris les risques géopolitiques. En croisant ce risque avec une mesure de l'impact économique de ces métaux, le rapport abouti à une liste de "métaux critiques".

En 2021, l'Agence International pour l'Énergie a publié un rapport [5] sur le thème de besoins en matières premières pour les technologies nécessaires pour passer des carburants fossiles à une électricité décarbonée. Ce rapport est particulièrement complet et ne se limite pas aux aspects ressources minières, mais aborde le lien entre matières premières et technologies. Il permet d'apprécier les possibilités de substitutions d'un élément par un autre et également l'utilisation de technologies alternatives notamment pour les moteurs et alternateurs électriques.

Cet article s'inscrit dans la continuité de ces travaux, qui sont largement consensuels. Il vise à approfondir les besoins de métaux pour chaque technologie, ce qui permet d'aborder avec un certain détail les possibilités de substitution d'éléments et d'utilisation de technologies alternatives. Un aspect important qui sera mis en avant, comme dans le rapport de AIE, concerne les constantes de temps nécessaires pour passer de la situation actuelle à une brusque augmentation de demande de ces métaux en volume et à un prix économiquement acceptable, pour les utilisations envisagées. Les aspects géopolitiques ne seront pas abordés, mais il suffit de

dire que la situation européenne n'est pas bonne, avec une forte dépendance à la Chine, à la fois pour certains métaux (par ex la famille des Terres Rares) et surtout pour les capacités industrielles de raffinage, traitement et transformation des matières premières. L'Etat chinois a fait preuve d'une grande anticipation. Le reste du monde, non.

Ce travail ne cherche pas à être complet, et seules les technologies "nouvelles" et clés pour la production d'électricité éolien et solaire PV et pour la mobilité électrique moteurs et surtout batteries seront abordées avec un peu de profondeur.

1- Le Contexte

Depuis la forte croissance chinoise entre 2000 et 2010, le sujet de la disponibilité de matières premières, notamment minérales, est redevenu d'actualité. Les rapports du McKinsey Global Institute sont marquants (voir par ex [6]). En suivant les indices des prix des "commodities" depuis 1900, on constate une baisse moyenne d'un indice composite entre 1900 et 2000, et une très forte et brusque inversion à partir de 2000. Les facteurs identifiés sont la croissance de la population mondiale et surtout la croissance d'une classe moyenne (au sens très large, à partir de \$10 à \$100/jour par personne selon les pays) consommatrice. On peut rajouter que l'exploitation des ressources facilement accessibles et de bonne qualité a déjà été réalisée depuis la révolution industrielle. Ce qui reste est moins facilement accessible et avec des teneurs en éléments d'intérêt nettement plus faible. Le monde n'est probablement pas confronté à une pénurie absolue de certains éléments, notamment métalliques, mais, malgré des gains de productivité, ils risquent fort d'être plus chers et avec une empreinte environnementale (CO₂ et eau notamment) plus importante.

De manière générale, les productions minières s'adaptent plus ou moins à la demande. Depuis 2000, les déséquilibres temporaires entre demande et production ont conduit à des fortes fluctuations de prix. Ces fluctuations rendent les décisions d'investissement minier à long terme (il faut compter entre 15 et 25 ans environ pour mettre une mine en exploitation) problématiques et sont source de difficultés pour anticiper les coûts de produits manufacturés à forte intensité en métaux. Par contre, lorsqu'une nouvelle application arrive sur le marché, avec une soudaine et forte demande d'un élément qui n'était pas en forte demande auparavant, des tensions sur l'approvisionnement et les prix surviennent. Un cas d'école concerne l'arrivée des écrans plats pour téléviseurs (LED-TV à partir des années 2000). Ces écrans nécessitent une couche mince d'un conducteur transparent pour évacuer les charges. Le seul composé qui présente ces propriétés est un oxyde mixte d'indium et d'étain (ITO : Indium Tin Oxide). Bien que les quantités d'indium nécessaires soient faibles dans l'absolu, cette nouvelle demande, en forte croissance, a généré une tension pour l'approvisionnement en indium (l'indium est un sous-produit des mines de plomb), avant que de nouveaux approvisionnements conduisent à un équilibre des marchés. C'est une situation importante à prendre en compte dans le contexte du remplacement, plus ou moins rapide, des combustibles fossiles par de l'électricité décarbonée. Même s'il n'y a pas de risque fort de pénurie absolue de certains éléments (on peut prendre la liste des métaux critiques de l'UE [1] ou celle du COMES [3]), il faut prendre en compte le temps nécessaire entre arrivée du besoin et la mise en place à grande échelle d'un produit ou d'une technologie peu employée auparavant. Il faut prendre en compte le temps nécessaire pour la mise en place de nouvelles mines, mais aussi

des usines de traitement et de transformation des minerais. Si les technologies ne sont pas pleinement matures, il faudra rajouter du temps (et des incertitudes). La mise en production massive des armements pendant la Deuxième Guerre mondiale montre que c'est possible, mais avec une très forte directivité des états. De plus les technologies de l'époque étaient relativement peu gourmandes en "métaux critiques", à l'exception du nickel, du chrome et du tungstène, par exemple.

Finalement, pour les métaux et matières premières "non critiques" (au sens de l'UE) il n'y a pas, a priori, de problèmes d'approvisionnement. Le fer, pour la production d'aciers, est abondant. L'aluminium l'est également. Il ne semble pas y avoir de problème pour le ciment. Il y a des tensions pour les granulats (sable et gravier). Par contre, les émissions de CO₂ pour la production d'acier, d'aluminium et de ciment sont très importantes (aujourd'hui, pour l'acier, 5,8% et pour le ciment, 3,1% des émissions mondiales [7] - la quantité d'aluminium produite est bien plus faible que celle de l'acier et bien que les émissions par tonne soient plus élevées, le total est faible), d'une part parce que les procédés produisent du CO₂ (le coke métallurgique est utilisé pour réduire les oxydes de fer, les électrodes en graphite de l'électrolyse du mélange fondu cryolite/alumine s'oxydent et la production de ciment conduit à l'émission de CO₂ par la décomposition de carbonate). Il faut aussi rajouter le CO₂ émis pour atteindre les températures de réaction. Même si l'approvisionnement n'est pas un problème, dans une démarche de décarbonation globale, les empreintes en CO₂ des matériaux utilisés sont à prendre en compte pour les technologies fortement consommatrices (par exemple le photovoltaïque, l'éolien et surtout l'éolien offshore).

2- Les technologies liées à la décarbonation de l'électricité

Dans cette partie, nous allons aborder avec un peu de profondeur les technologies majeures, soit pour la production d'électricité décarbonée, soit pour son utilisation (et stockage). Pour la production, il s'agit des énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque) et d'énergie nucléaire. L'énergie hydroélectrique ne sera pas abordée car à faible dépendance sur des "métaux critiques" - les barrages consomment essentiellement du béton armé. En ce qui concerne l'utilisation, on se focalisera surtout sur les usages pour la mobilité (véhicules électriques - VE). L'aviation ne sera pas abordée, car la croissance ne présente pas de forte augmentation prévisible, et le contenu métallique est connu (aluminium, nickel, titane et aciers). Un point dur semble être les matériaux pour le stockage, essentiellement pour les batteries. Si les objectifs de vente de véhicules électriques doivent se réaliser (50% de VE vendus aux États-Unis en 2030, interdiction de la vente des véhicules à moteur thermique entre 2030 et 2035 en Europe) cela correspondra à une très forte augmentation sur un temps très court. Cela provoquera vraisemblablement des tensions. En ce qui concerne l'hydrogène, les besoins en matériaux visent les catalyseurs, mais aussi le nickel pour les électrolyseurs alcalins.

Il convient aussi de ne pas oublier le développement nécessaire des réseaux électriques pour accompagner cette transition. En ce qui concerne le réseau haute tension (HT), celui-ci utilise exclusivement l'aluminium comme conducteur, au moins pour les câbles HT aérien en courant alternatif. Les matériaux conducteurs utilisés pour des câbles enfouis et la transmission en courant continu serait majoritairement en cuivre. La moyenne tension est transmise par des conducteurs

en cuivre, bien que l'utilisation de l'aluminium soit évoquée. En ce qui concerne la basse tension (y compris pour l'alimentation des bornes de recharges des VE), c'est le cuivre qui est utilisé et cela restera probablement le cas.

Il faut aussi réaliser que les besoins en matériaux pour ces technologies seront en concurrence avec des besoins antérieurs qui ne disparaîtront pas pour autant (industries agro-alimentaire, aviation, industries chimiques...). On peut anticiper que ces besoins vont croître avec la croissance de la "classe moyenne" mondiale.

Une grande partie des informations recourent celles déjà présentées dans le rapport des Académies des Sciences et des Technologies [4] et surtout dans le récent rapport de l'Agence Internationale de l'Energie [5].

Éolienne terrestre et en mer

Il convient d'abord de distinguer les besoins en fonction des éléments constitutifs d'une éolienne : il s'agit des fondations, de la structure (mât et nacelle), des pales (ou turbine), du générateur et enfin de la transmission électrique.

En ce qui concerne la structure, ce sont des aciers de construction courants qui sont utilisés. Ils doivent pouvoir être soudés aisément et il semble que des nuances avec des limites d'élasticité entre 250 et 400 MPa sont couramment utilisées. Ces nuances correspondent à des aciers faiblement alliés, avec notamment autour de 1,5% de Mn et entre 1,5% et 3,0% d'autres éléments, notamment du Mo, Cr, Ni et Cu. Pour donner un ordre de grandeur, il faut un peu moins de 200 t d'acier pour le mât d'une éolienne terrestre [8] ce qui requiert 3 t de Mn, quand même ! Pour les fondations des éoliennes terrestres il s'agit d'utiliser du béton et de l'acier. Pour les éoliennes en mer, différentes solutions sont utilisées, surtout à base d'acier. Les éoliennes en mer sont plus grandes, et l'ensemble mât et structure support (fixe ou flottant) consommeront nettement plus d'acier. Dans tous les cas, et encore plus pour les éoliennes en mer, ces structures doivent être protégées contre la corrosion. Des traitements conventionnels sont utilisés, en fonction des pièces à protéger. Il s'agit de métallisation Zn ou Zn/Al et des peintures époxydiques, contenant ou pas du Zn. La consommation de matières premières pour les éoliennes est considérable, même si les éléments consommés ne sont pas critiques (sauf pour certains éléments d'alliages).

Aujourd'hui les pales sont en composite époxy/fibres de verre. Il n'y a pas de problème de ressources, mais il faut noter que les résines époxydiques sont issues de la pétrochimie. En effet, les ressources fossiles sont aussi utilisées comme matière première. Des difficultés d'approvisionnement pourraient advenir si des fibres de carbone étaient utilisées. Le frein serait au niveau de la production de fibre, plutôt que des ressources. Il convient de signaler que le recyclage des pales n'est pas possible aujourd'hui, bien que des progrès sont en cours.

En ce qui concerne les échanges d'électricité, il faut distinguer le transfert de l'énergie produite par l'éolienne, qui se fait à moyenne ou haute tension, et l'alimentation de l'éolienne pour le fonctionnement de ses auxiliaires qui se fait à basse tension par des fils en cuivre. La transmission de données et commandes informatique est réalisée par fibre optique. Pour les lignes de puissance, à moyenne tension, elles peuvent être en cuivre ou en aluminium. Bien que la conductivité de l'aluminium soit environ 60% inférieure à celle du cuivre à section égale, il suffit d'augmenter de 30% la section du conducteur pour obtenir la même conductivité. Et, à iso-conductivité égale, un câble en aluminium est 50% moins lourd qu'un câble en cuivre. L'aviation,

depuis 40 ans, a choisi des câbles en aluminium pour alléger les avions. L'aluminium présente d'autres avantages aujourd'hui. Les fluctuations de prix de l'aluminium sont moins importantes que celle du cuivre, ce qui permet de mieux prévoir le coût d'un produit. A iso-conductivité, la résistance à la traction de câble est légèrement supérieure à celle d'un câble en cuivre. L'aluminium présenterait des avantages (poids et résistance) pour le câblage de puissance moyenne tension dans les mâts des éoliennes [9]. Il semblerait aussi être adapté pour le câblage des champs d'éolienne, même enterré en mer. De toute manière, l'utilisation massive de cuivre pour l'électricité d'origine éolienne n'est pas forcément essentielle. Les conducteurs aluminium présentent des possibilités de substitution réelles, voire plus intéressantes. Les catalogues des fournisseurs de câble présentent une large gamme de solution "aluminium" [10], y compris pour la connectique et les outils associés. Il ne faut pas non plus oublier les modules d'électronique de puissance (par ex. convertisseurs tension/fréquence) et les transformateurs. Ces derniers utilisent des bobinages en cuivre (mais qui pourraient être en aluminium) et des aciers dits "électriques" (matériaux magnétiques doux à faible champs coercitif et faibles pertes). Il n'y a pas de problèmes de ressources pour ces aciers qui sont des alliages Fe3%Si.

Pour l'alternateur, la criticité des éléments de la famille des Terres Rares est souvent mise en avant comme facteur pouvant limiter le développement des éoliennes. Il s'agit de néodyme et de dysprosium utilisés pour les aimants permanent Fe-Nd-B. L'addition du dysprosium est nécessaire pour augmenter le champ coercitif. Le terbium peut le remplacer au moins en partie, mais il est encore plus rare que le dysprosium [11]. Ces aimants permanents sont aujourd'hui les plus performants avec une aimantation très élevée. D'autres aimants permanents, comme les Al-Ni-Co et les Sm-Co, sont également à forte aimantation, mais ne présentent pas de réelles possibilités de substitution car le cobalt est également critique et rare.

Cependant, les alternateurs pour éoliennes ne sont pas tous à base d'aimants permanents (voir encadré ci-dessous). Pour les éoliennes terrestres, la majorité sont des alternateurs bobinés (sans aimants permanents) avec une boîte de vitesse entre l'axe des pales (qui tournent à moins de 20 tours par minute), et l'alternateur synchrone qui tourne à 1 500 tours par minute. Les alternateurs pour éoliennes en mer et les très grandes éoliennes à terre sont en général à aimant permanent sans boîte de vitesse, et ce pour réduire l'entretien ; ils tournent à la vitesse des pales et délivrent un courant continu qui est ensuite haché par de l'électronique de puissance et converti en courant alternatif à la fréquence du réseau.

Alternateurs d'éolienne : choix technologiques avec ou sans aimants permanents Fe-Nd-B

La transition énergétique se traduira par une demande accrue de ressources minérales comme l'AIE l'a développé dans son rapport de mai 2021 « *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* ». Par exemple, certaines éoliennes à aimants permanents ont recours au néodyme, au dysprosium et au terbium. Ces ressources, classées dans les terres rares, sont considérées comme des matières premières critiques, et ce d'autant plus qu'elles peuvent également être mobilisées par d'autres secteurs de l'économie (dont certains sont justement en phase d'expansion, comme le numérique). La consommation de terres rares dans ce secteur réside essentiellement dans l'utilisation d'aimants permanents pour certains segments de marchés de l'éolien.

Les éoliennes terrestres ont des puissances limitées ; la puissance moyenne d'une éolienne terrestre en France est de 3 MW et la puissance unitaire maximum pour des applications terrestres est actuellement de l'ordre de 5 MW.

Les éoliennes produisent du courant via un alternateur qui est relié au moyeu supportant les pales soit par l'intermédiaire d'un multiplicateur (boîte de vitesses, soit par un entraînement direct. L'alternateur peut être un générateur synchrone ou asynchrone.

Les deux types ont des constructions sensiblement différentes, par la conception de l'alternateur, le système de transmission et les solutions de connexion au réseau et le contenu en matériaux.

Ce n'est pas l'objet de cet article de détailler l'ensemble des types d'alternateurs pour éoliennes et leurs avantages respectifs (voir par ex [12] et [13]).

Le tableau ci-dessous présente les principales technologies d'éoliennes qui ont été utilisées durant les dix dernières années (certaines technologies qui ont été déployées au cours des dernières décennies, mais qui ont été progressivement supplantées et ne sont plus, ou très marginalement, adoptées de nos jours ne sont pas reprises dans ce tableau). La technologie HTS (supraconducteurs à haute température critique) est indiquée en italique pour refléter son statut actuel de technologie encore en phase de qualification.

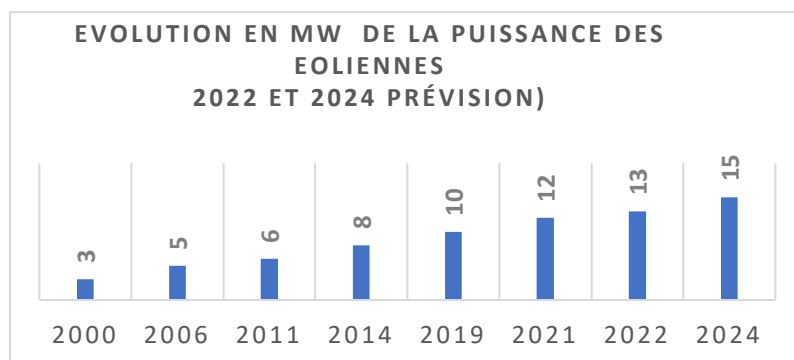
Terrestre			Marine		
Entraînement	alternateur	terres rares	Entraînement	alternateur	terres rares
direct	EESG	0	<i>direct</i>	<i>Supraconducteur</i>	<i>0</i>
direct	PMSG +	++	direct	PMSG +	++
Boite vitesse	PMSG -	+	Boite vitesse	PMSG -	+
Boite vitesse	DFIG	0	Boite vitesse	DFIG	0
			Boite vitesse	SGIC	0

EESG electrically Excited Synchronous Generator
PMSG Permanent Magnet Synchronous Generator
DFIC Double Fed Induction Generator
SGIC Squirrel Cage Induction Generator

Concernant les besoins en terres rares dans l'avenir, la puissance des éoliennes terrestres, qui n'est pas prévue évoluer notablement, est telle que des solutions à entraînement direct ou avec multiplicateurs existent sans besoin de terres rares. On se concentrera donc dans la suite sur l'éolien offshore.

Une étude Ademe [13] indiquait que la puissance moyenne des turbines offshore était de 6 MW, alors que c'était une puissance maximum en 2011. Il apparaît qu'en application marine la puissance des éoliennes a augmenté considérablement depuis 10 ans. Aujourd'hui cette puissance moyenne pour les sites en installation ou en prévision serait plutôt proche de 9 MW.

La puissance maximum d'éolienne offshore en opération est aujourd'hui de 12 MW et des éoliennes de 15 MW sont déjà commandées avec des unités en tests ou en production chez trois fabricants majeurs (General Electric, Siemens et Vestas) un producteur chinois MingYang Smart Energy venant d'annoncer une éolienne de 16MW pour 2024 et il est envisagé qu'elle atteigne 20 à 25MW à l'horizon 2030.



Les alternateurs synchrones à aimants permanents (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) sont apparus dans les années 2000 pour, entre autres, améliorer les rendements de conversion, réduire le poids et les besoins de maintenance, et allonger la durée de vie des systèmes. Seules les éoliennes à aimants permanents utilisent des terres rares en quantité notable.

La taille et la capacité croissantes des éoliennes offshore semblent exclure l'utilisation de la plupart des alternateurs conventionnels qui ne nécessitent pas d'aimants permanents. C'est le cas des turbines à entraînement direct EESG ou avec boîte de vitesse DFIG, qui, bien qu'ayant connu le succès à terre, ne sont pas adaptées aux installations offshore dans les scénarios futurs, en raison de leur poids considérable.

Une autre étude Ademe [15], partant de l'hypothèse que 120 GW d'éolien en mer seraient à installer dans le monde en 12 ans à l'horizon 2030, soit 10 GW par an (avec 23 GW déjà installés en date de 2018), évalue la consommation de néodyme à moins de 6 % de la production annuelle, mais à plus de 30 % de la production annuelle en dysprosium. Or il s'avère que déjà en 2020 trente-cinq GW (35GW) d'éolien offshore ont été installés.

La dernière publication du Global Wind Energy Council (GWEC) [16] fait quant à elle part d'un besoin prévisionnel de 2 000 GW d'éoliennes en mer d'ici 2050 pour atteindre des émissions nettes nulles d'ici à 2050 et maintenir une trajectoire de 1,5°C, soit un besoin annuel de 65GW. La dernière publication de l'AIE [17] fait état pour son « pathway » de besoins supplémentaires annuels de 80 GW d'éolien offshore jusqu'à 2030 huit fois l'estimation de l'Ademe. Dans ces conditions, le besoin serait de 60% de la production annuelle pour le néodyme et 240% pour le dysprosium.

Des recherches sont en cours chez les fabricants d'éoliennes pour réduire la quantité de terre rares dans les aimants permanents, mais à ce jour aucune percée majeure n'a été annoncée.

Une autre solution pour réduire le besoin de terres rares pour les éoliennes marines serait d'éliminer complètement leur besoin en recourant aux alternateurs supraconducteurs avec supraconducteur à haute température critique (HTS) typiquement le MgB_2 (température critique de 39K). Ces alternateurs réduiraient considérablement le poids de l'alternateur (au moins d'un facteur 2) [18], même si cela reste encore à démontrer par un prototype.

Des développements sont en cours sur ces technologies et des publications sur ce sujet existent au moins depuis 10 ans et deux des trois grands fabricants d'éoliennes offshore (GE et Siemens) sont aussi parmi les trois grands fabricants mondiaux de système d'imagerie IRM qui sont basés sur des aimants supraconducteurs (cette technologie apparue au début des années 80 s'est développée considérablement et aujourd'hui plusieurs dizaines de milliers de systèmes sont en opération dans le monde).

On peut donc raisonnablement penser que si le besoin se fait réellement pressant de réduire la consommation de terres rares et une fois résolues les difficultés fondamentales, cette solution pourrait s'imposer.

Le solaire photovoltaïque

Aujourd'hui, les panneaux photovoltaïques (PV) sont très majoritairement à base de silicium poly ou monocristallin. Des panneaux PV à base de couches minces de CdTe ou de CIGS (Cu(InGa)Se₂) à rendement plus élevé existent, mais leur arrivée massive n'est pas prévue avant une décennie ou deux. Ils seront abordés plus loin. Le rapport de l'AIE [5] présente une description complète des matériaux utilisés. Comme pour les éoliennes, il est utile de distinguer les panneaux eux-mêmes, les supports, la connectique et le câblage électrique. Il ne faut pas, non plus, oublier l'électronique de puissance associée, pour convertir le courant continu en courant alternatif.

Pour les panneaux en silicium, il n'y a pas de problème de ressources pour le silicium. Si, à terme, des couches minces en CdTe sont utilisées, il faudra veiller que la production de cadmium et tellure anticipe une demande potentiellement en forte croissance. Il en est de même pour l'indium, le gallium et le sélénium pour les couches minces en CIGS. Ces technologies nécessitent l'utilisation de quantités de verre plus importantes, mais cela ne pose pas de problème de ressources.

Les panneaux sont installés sur des supports en acier de qualité courante. Les contraintes sont faibles et donc des aciers de construction Fe-C-Mn peuvent être utilisés. Le Mn est aujourd'hui toujours présent en tant qu'élément d'alliage pour des raisons liées au procédé métallurgiques. Il se fixe sous la forme de précipités de MnS, le soufre issu des minerais et du coke. Il faut sans doute prévoir des traitements anticorrosion. Il faut prévoir 35 à 45 t d'acier pour chaque MW de puissance solaire [19] installée.

Pour la connectique des panneaux en silicium, l'argent est utilisé, mais les progrès technologiques ont permis de réduire notablement la quantité d'argent nécessaire. L'approvisionnement en argent est néanmoins à surveiller. Il n'est pas nécessaire d'utiliser de l'argent pour les technologies en couches minces. Le câblage électrique est couramment assuré par des câbles en cuivre, mais il serait possible d'utiliser des câbles en aluminium.

En ce qui concerne l'électronique de puissance, celle-ci utilise du Si, du SiC et du GaN. Comme souvent pour l'électronique, les quantités utilisées sont faibles et il n'y a pas de difficulté de ressources anticipées. De plus, les composants sont déjà en production et en volume depuis plusieurs années pour de nombreuses autres applications (réseaux électriques, commande de moteurs électriques ...) et une brusque augmentation de demande n'aura vraisemblablement pas lieu.

Electricité nucléaire

La production d'électricité par des réacteurs nucléaires est une technologie bien établie. Il n'y a pas d'émissions de CO₂ en service, et les émissions résultent essentiellement des matériaux nécessaires à la construction de centrales, aux opérations minières et à l'enrichissement en

uranium 235 du combustible. Il faut aussi ajouter les émissions liées au démantèlement des installations, au traitement et stockage du combustible usé. Le bilan complet par unité d'énergie produite est du même ordre de grandeur que celui de l'éolien et du solaire.

Les besoins des réacteurs nucléaires en matériaux sont faibles par rapport à l'énergie produite. En effet, l'énergie nucléaire est très concentrée. La structure de la centrale est essentiellement réalisée en béton et l'acier. La cuve est en acier. Des alliages de fer, chrome et nickel sont utilisés pour des pièces critiques comme les générateurs de vapeur dont les tubes sont constitués de 15% de chrome et 75% de nickel ; il y a aussi des tuyauteries en acier inoxydable Fe-Ni-Cr plus classique (~ 15% de nickel et 10% de chrome). Le combustible est inséré dans des gaines en Zircaloy, alliage de zirconium. Des problèmes de disponibilité de ressources ne sont pas attendus même dans l'hypothèse d'un déploiement plus important de réacteurs (le nombre absolu de réacteurs restera relativement faible, même si la puissance installée pourra être élevée).

3- La Mobilité électrique

Les technologies de mobilité électrique ont des origines anciennes. Le premier train électrique alimenté par batterie date de 1837 et de 1891 pour une alimentation par caténaire. Les métros sont en circulation partout dans le monde et les tramways après un déclin vers le milieu du 20ème siècle connaissent un fort renouveau. Le transport collectif est déjà largement électrique avec des évolutions technologiques incrémentales, mais à fort impact. Aucun problème de ressources n'est à prévoir, pour les structures, infrastructures et moteurs. L'alimentation électrique est à surveiller : les conducteurs des caténaires sont en alliages de cuivre et il n'y aurait pas de substitution possible.

Les premières voitures électriques datent de la fin du 19ème siècle. Les progrès des batteries à base de lithium et la nécessité de décarboner la mobilité individuelle conduisent à un mouvement fort pour remplacer les véhicules utilisant des combustibles fossiles par des véhicules électriques à batterie.

Il est utile d'analyser les composants principaux d'un véhicule électrique. Il s'agit de la structure porteuse (carrosserie, suspension, habitacle ...), du ou des moteurs, des conducteurs et finalement des batteries. Ici aussi, il faut rajouter l'électronique et l'électronique de puissance qui gèrent la batterie et contrôlent les moteurs. Chaque composant présente des choix technologiques et des besoins en matériaux évidemment différents.

Pour la structure porteuse, même si l'architecture du véhicule peut évoluer, on reste dans des solutions connues dans le domaine automobile : carrosserie autoporteuse en aciers (aciers emboutissables très minces pour les panneaux, aciers à haute et très haute limite d'élasticité pour les structures, aciers à déformation programmée pour la résistance au crash, etc.), en aluminium, en hybride acier/aluminium ou en composites, selon les performances recherchées et le prix. Il n'y a pas de raison de penser que les éléments de suspension, de liaison au sol ou de direction seront très différents. Ce sont surtout des aciers très résistants qui sont utilisés. Donc on ne s'attend à aucun problème de ressources pour la structure du véhicule, d'autant plus que la production de véhicules électriques se substituerait à celle des modèles thermiques.

En ce qui concerne les moteurs électriques, la situation est voisine de celle des éoliennes. Il peut y avoir des moteurs avec des aimants permanents Fe-Nd (Dy)-B et il y a aussi des technologies de moteurs avec des bobinages, et donc sans Terres Rares. De plus, les moteurs peuvent être alimentés, à partir des batteries, en courant continu ou en courant alternatif, grâce à un onduleur (électronique de puissance). Ces moteurs doivent aussi fonctionner comme générateurs d'électricité, pour alimenter les batteries en phase de décélération. On peut identifier quatre grandes familles de moteurs, même s'il existe un chevauchement de certaines technologies :

- Les moteurs à courant continu sans balais. Ils utilisent souvent des aimants permanents, mais peuvent être à induction, avec des bobines. Il semble que la majorité des véhicules hybrides et hybrides rechargeables est équipé de moteurs à courant continu à aimants permanents Fe-Nd (Dy)-B (c'est notamment le cas de Toyota). Ces moteurs produisent de la chaleur et il est donc nécessaire de rajouter du dysprosium pour maintenir le champ coercitif des aimants en température. Jusqu'à présent, et malgré de nombreuses recherches, il n'y a pas de substitution possible pour le dysprosium, qui est la Terre Rare la plus critique pour ces applications.

- Les moteurs synchrones (à courant alternatif). Ces moteurs peuvent comprendre des aimants permanents Fe-Nd-B. Les moteurs synchrones à excitation indépendante sont dépourvus d'aimants permanents. C'est la solution retenue par Renault pour la Zoé [20].

- Les moteurs asynchrones ("induction motor") ne comportent pas d'aimant permanent. Ce type de moteur serait utilisé dans les Tesla model S [21].

- Les moteurs à reluctance commutée ne comportent pas, en général, d'aimants permanents. Leur pilotage semble plus délicat, mais avec l'électronique de puissance d'aujourd'hui, tout à fait accessible. Il semble que Tesla a introduit ce type de moteur, mais avec de petits aimants Fe-Nd (Dy)-B pour améliorer les caractéristiques de démarrage, dans le Model 3 [22].

Tous ces moteurs présentent des caractéristiques différentes, en termes de facilité au démarrage, de couple et de puissance en fonction de la vitesse. L'efficacité est toujours élevée, mais certaines conceptions sont un peu plus efficaces que d'autres. Il s'agit donc de compromis de caractéristiques, avec en plus le coût à prendre en compte pour une diffusion à grande échelle. La conclusion est qu'il est tout à fait possible de trouver des solutions performantes de motorisation électrique sans l'utilisation d'aimants permanents Fe-Nd (Dy)-B.

En ce qui concerne les bobinages, ils sont en général en cuivre. Des progrès intéressants sont réalisés au niveau de l'isolation électrique [23], permettant un meilleur enroulement des fils et donc un meilleur remplissage. On trouve aussi des conceptions récentes où le cuivre est remplacé par l'aluminium. Les informations précises ne sont pas facilement accessibles car directement liées à un secteur industriel très concurrentiel.

Jusqu'à présent, les conducteurs utilisés dans les véhicules électriques étaient en cuivre. Des auteurs ont identifié la forte augmentation de la part de cuivre par véhicule comme étant une source de difficulté, pour un déploiement rapide des véhicules électriques. La situation est similaire à celle des éoliennes. Les conducteurs en aluminium seraient tout à fait adaptés à une utilisation dans un véhicule électrique, notamment en ce qui concerne les courants élevés. La géométrie prédéterminée du câblage, ainsi que des séries à fort volume, permettraient l'introduction de l'aluminium de manière industrielle. Grâce à 40 ans d'expérience de conducteurs en aluminium dans l'aéronautique, il ne semble plus y avoir de verrous technologiques. Le point

délicat de la connectique (l'aluminium possède un oxyde natif isolant en surface) est résolu grâce à des protocoles de sertissage, avec ou sans embouts en cuivre. Il y a aussi des règles de mise en œuvre pour éliminer les problèmes de corrosion galvanique dans les connexions avec d'autres métaux.

Il est intéressant de noter que depuis environ 50 ans, le cuivre a été remplacé dans de nombreux secteurs. Il convient de se souvenir que les radiateurs automobiles étaient en cuivre et que maintenant ils sont tous en aluminium, grâce au développement de procédés de brasage des ailettes sur les tubes. C'est le même cas pour les réfrigérateurs, les climatiseurs et les pompes à chaleur à échange air. Finalement, le remplacement du cuivre par de l'aluminium conduirait à une réduction du poids (et de coûts) des véhicules. La disponibilité du cuivre ne semble donc pas forcément être un facteur absolument déterminant pour l'introduction massive de véhicules électriques.

Batteries, notamment pour véhicules électriques

Les batteries lithium ion (Li-ion), couramment utilisées pour les véhicules électriques, mais aussi pour de nombreuses autres applications (ordinateurs portables, téléphonie, outillage électroportatif ...) méritent un paragraphe dédié. En effet, leur utilisation généralisée est aujourd'hui une réalité et les fabricants de batteries ont pu baisser les coûts de production tout en améliorant sensiblement les performances intrinsèques, et ce dans un contexte de forte croissance de la demande. On peut néanmoins se poser la question si dans une, voire deux décennies il sera possible de produire assez de batteries pour équiper une proportion importante (40% des ventes mondiales de véhicules en 2030) de véhicules.

Les cellules des batteries Li-ion sont constituées d'une cathode (un oxyde mixte de lithium, voir encadré ci-dessous), une anode en graphite (éventuellement avec du silicium), un électrolyte liquide et un collecteur de courant en cuivre. Les cellules sont assemblées ensemble dans un boîtier en acier ou en aluminium.

Le rapport de l'AIE comporte un chapitre, particulièrement détaillé, sur les batteries, y compris celles pour le stockage stationnaire. Il prévoit une augmentation d'un facteur de 40 de la demande des batteries entre 2020 et 2040. Ceci se traduit par des augmentations, selon les scénarios, pour les matériaux de cathodes, de la demande de nickel par un facteur de 41, du cobalt par un facteur 21 et du lithium par un facteur 43. Pour le cuivre, l'augmentation serait par un facteur de 28. Pour les anodes, il s'agirait d'une augmentation par un facteur de 25 pour le graphite et d'un facteur 460 pour le silicium (en substitution dans le graphite - partant de presque zéro en 2020). La part relative de ces différents métaux sera dictée par la chimie des cathodes et de son évolution. Ceci est traité dans l'encadré ci-dessous.

Les batteries Li-ion

Si les véhicules électriques sont un des leviers importants de la lutte contre le réchauffement climatique, c'est grâce à la découverte des batteries Li-ion que leur développement a été possible. Derrière l'appellation « Li-ion » se cache une diversité de chimie qui concerne au premier plan l'électrode positive, l'électrode négative étant constituée majoritairement de carbone graphite. La plus

populaire des technologies de batteries Li-ion utilise des électrodes positives à base d'oxydes métaux de transition à structure lamellaire, appelées NMC, pour $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ($x+y+z=1$). C'est la batterie qui a la plus grande densité d'énergie, c'est-à-dire celle qui permet d'avoir la plus grande autonomie pour le véhicule électrique. Les premières NMC utilisées avaient pour formule $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$, désignées par leur rapport stœchiométrique 1:1:1 (Ni:Mn:Co = 1:1:1). La Figure ci-dessous montre la composition massique d'une batterie assemblée à l'aide de cellules NMC 1:1:1 (3,7 V unitaire). Le graphite (matière active) et le cuivre (collecteur de courant) sont les constituants de l'électrode négative qui représente environ 18% de la masse de la batterie, tandis que l'électrode positive contribue à hauteur de 20% environ, l'aluminium étant utilisé comme collecteur de courant. Le coût du cobalt, l'instabilité thermique de son oxyde ainsi que les difficultés liées à son extraction font qu'aujourd'hui on cherche à diminuer au maximum la teneur en Co dans les cathodes NMC : on parle alors de cathodes riches en Ni (Ni-rich). On est donc passé à des chimies NMC 111 au 622 ($\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$) pour atteindre aujourd'hui le 811 ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$). En fin de charge, dans ces composés, le Ni est présent sous forme Ni^{+4} et cela peut entraîner également des problèmes de stabilité thermique ; la durée de vie des batteries est également impactée par les variations de volume durant les cycles de charge / décharge. Une autre approche similaire, également à base d'oxydes lamellaires, utilise la chimie NCA pour $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$. Ce sont aussi des matériaux riches en Ni (>0,6) avec une faible teneur en Al (typiquement 0,05) pour stabiliser la structure. Le Ni est donc le principal constituant des électrodes positives de batteries Li-ion. La pression économique et géopolitique sur le Co, le Ni et le Li font que les méthodes de recyclages des batteries, déjà existantes, se développent fortement avec des dizaines de sociétés qui se préparent à l'arrivée de plusieurs dizaines de GWh de batteries à recycler dans les prochaines années. La mine urbaine sera donc un enjeu majeur dans le futur proche pour assurer la pérennité de l'approvisionnement en matières premières. La chimie LFP - batterie Li ion MFP - utilise le phosphate de fer LiFePO_4 comme matériaux de cathode. Les batteries LFP sont aussi assemblées avec une électrode négative à base de carbone graphite ; elles fonctionnent à 3,4 V et ont une densité d'énergie inférieure à celle des chimies NMC ou NCA, ce qui fait que ce n'est pas le premier choix pour les véhicules électriques.

Les batteries LFP sont donc sans Ni, ni Co, et le Fe est un matériau abondant. Paradoxalement, l'absence de matériaux de prix élevé fait que des batteries sont difficilement recyclables.

La chimie LMNO pour $\text{LiMn}_{2-x}\text{Ni}_x\text{O}_4$ ne contient pas de Cobalt et le Ni et le Mn sont électrochimiquement actifs dans cette structure spinelle. La technologie LMNO fonctionne à un potentiel élevé (~4,7 V) mais qui a pour inconvénient d'entraîner une diminution de la durée de vie en cycle. Elle présente donc les mêmes problématiques au niveau du ressourcement en matières premières que les chimies Ni-rich, à l'exception du Co. La technologie Li métal « tout solide », dans laquelle l'électrolyte liquide est remplacé par un électrolyte tout solide de type oxyde, sulfure ou polymère, est en train de se développer fortement. En effet, les batteries Li tout solides permettraient d'augmenter la densité d'énergie pour atteindre environ 450 Wh par kg et d'améliorer la sécurité. Au niveau des matériaux, la différence importante est l'utilisation de Li métallique à l'électrode négative, ce qui va renforcer la nécessité de développer des procédés d'extraction du Li plus efficaces et respectueux de l'environnement, mais également d'améliorer l'efficacité des procédés de recyclage pour la récupération du lithium.

Vu les performances en termes de densité d'énergie et de coûts qu'ont atteint les batteries Li-ion, il y a fort à parier que la technologie Li sera présente pendant de nombreuses années. Cependant, parmi les technologies alternatives les plus avancées, nous pouvons citer le Na-ion qui utilise des électrodes à insertion d'ions Na^+ . Les batteries Na-ion utilisent du carbone dur à l'électrode négative et généralement des matériaux de type oxydes à l'électrode positive. Le Na-ion présente l'avantage de pouvoir délivrer de fortes densités de puissance tout en se rechargeant en quelques minutes.

Cependant, la densité d'énergie des batteries Na-ion est environ 40% plus faible que celle des Li-ion. Les applications des batteries Na-ion sont la puissance avec par exemple les batteries de véhicules hybrides, le remplacement de la batterie au plomb, la petite mobilité électrique (scooters, vélo, trottinettes) ou encore le stockage stationnaire (résidentiel ou industriel). Le sodium n'étant pas une ressource limitée, les problématiques de ressourcement en matières premières pour cette chimie dépendront principalement de la composition de l'électrode positive. Les premières batteries Na-ion commercialisées utilisent pour celle-ci des matériaux à base de fer, manganèse ou encore du vanadium.

L'accès aux matières premières est un point fondamental à considérer dans le cadre du développement des batteries en général et du Li-ion en particulier puisque ces dernières dominent actuellement le marché du véhicule électrique. Cependant, la filière de recyclage des batteries Li-ion, déjà existante, monte en puissance avec la mise au point de procédés pyro- et/ou hydrométallurgiques plus efficaces et respectueux de l'environnement. Ce n'est qu'à cette condition que pourront voir se développer la mobilité électrique, et des futurs systèmes de stockage stationnaire par batterie des énergies renouvelables.

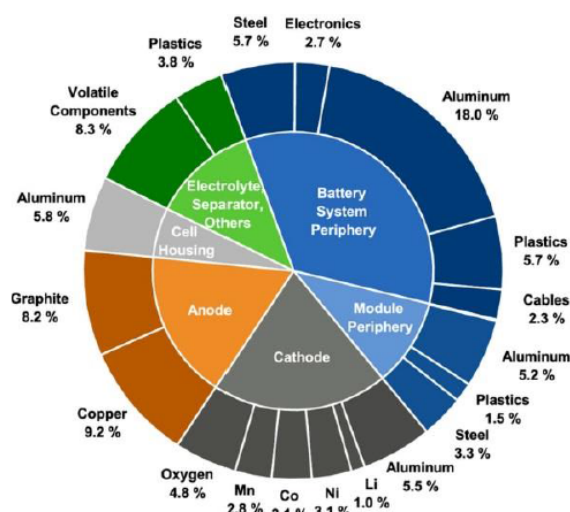


Figure : Répartition des masses dans une batterie type NMC 111 [23]

Production d'hydrogène par l'électrolyse et matériaux pour pile à combustible

Toutes ces technologies nécessitent des matériaux plus ou moins déjà sous tension. Pour les électrolyseurs, les besoins dépendent de leur technologie. Pour les électrolyseurs alcalins, il s'agit de nickel et de zirconium. Pour les électrolyseurs SOEC (Solid Oxide Electrolytic Cells), il faut toujours du nickel et du zirconium, avec en plus des oxydes de lanthane et d'yttrium et finalement pour les électrolyseurs PEM (Proton Exchange Membrane) il faut des platinoïdes en tant que catalyseur. En fonction de la vitesse de déploiement des électrolyseurs, on peut s'attendre à des tensions pour le nickel et il est probable que la production de zirconium n'est pas encore à l'échelle. Les platinoïdes resteront toujours rares, mais on peut s'attendre à long terme à une demande plus faible pour les pots catalytiques des voitures et des catalyseurs pour la pétrochimie. Par contre, il risque d'y avoir des tensions pendant la période de transition.

En ce qui concerne les piles à combustible, la demande essentielle vise les catalyseurs et notamment les éléments du groupe des platinoïdes (Platinum Group Metals – PGM), notamment platine et palladium.

4- Discussion

On constate que les besoins en matériaux sont très considérables pour atteindre les objectifs d'une production d'électricité décarbonée et d'une société où le vecteur énergétique principal est l'électricité. Afin d'optimiser la performance de tous les maillons, de la production d'électricité à son utilisation, il serait souhaitable de pouvoir disposer de tous les éléments chimiques nécessaires, en volume, sans délai et à bas coût. Ce n'est évidemment pas le cas, et il est possible d'identifier des points critiques.

Le néodyme et de dysprosium nécessaires pour la fabrication des aimants permanents Fe-Nd(Dy)-B pourrait être réservés, par exemple, aux applications jugées les plus critiques (éolienne en mer) et des technologies de moteurs électriques sans (ou avec beaucoup moins) d'aimants permanents pour les véhicules électriques pourraient être choisies. On pourrait même réaliser des éoliennes en mer, sans alternateurs à aimants permanents, au prix d'une maintenance plus compliquée et donc plus coûteuse à faire fonctionner, et à terme grâce à des systèmes supraconducteurs.

Les prévisions de forte demande en cuivre en tant que conducteur électrique ne semblent pas complètement prendre en compte les possibilités de substitution par l'aluminium. La disponibilité du cuivre ne semble plus être un verrou absolu.

Pour la production par électrolyse de l'hydrogène, l'approvisionnement en nickel risque d'être sous tension. Le nickel est incontournable pour sa résistance à la corrosion en milieu alcalin et pour les aciers inoxydables. Il est peut-être un peu tôt pour évaluer les technologies de substitution et leurs besoin respectifs en matières premières.

Le domaine des batteries Li-ion est sans doute celui où les substitutions possibles et les technologies alternatives butent sur l'utilisation presque incontournable du nickel et du cobalt. En effet, pour les batteries les plus performantes les cathodes contiennent toutes du nickel, parfois pour réduire la teneur en cobalt. Le cobalt est utilisé dans certaines parties à très haute température dans les turboréacteurs et turbofans aéronautiques. Son utilisation dans ce secteur ne devrait évoluer que lentement. Le cobalt est aussi présent en tant qu'élément d'alliage dans certains aciers à outils, pour usinage rapide. On peut s'attendre à une augmentation progressive avec les besoins industriels mondiaux, qui suivront approximativement la croissance d'une classe moyenne "consommatrice". La pression pour réduire la teneur en cobalt des batteries Li-ion risque de se poursuivre, et donc il y aurait une augmentation de la demande en nickel.

Or, le nickel et les alliages de nickel présentent des propriétés de résistance à la corrosion et une très bonne tenue en température. Il est très difficile de trouver des substitutions dans les secteurs d'utilisation ayant des volumes significatifs. Les alliages de nickel les plus utilisés sont les aciers inoxydables Fe-Ni-Cr. Ils sont utilisés dans de très nombreux secteurs où une grande résistance à la corrosion est nécessaire. On peut citer, par exemple, l'utilisation essentielle des aciers inoxydables Fe-Ni-Cr dans le traitement de l'eau et la désalination, dans les industries agro-

alimentaires, les articles ménagers (de cuisine, mais aussi dans les lave-linges et lave-vaisselles), dans les industries chimiques, pharmaceutiques et pétrochimiques (on peut imaginer une baisse de la demande à terme pour les raffineries, mais pas forcément de manière significative dans la prochaine décennie), pour l'industrie papetière, pour le traitement de la biomasse, en médecine, pour les électrolyseurs pour la production d'hydrogène et pour la production d'électricité (nucléaire, solaire thermique et aussi à partir de gaz). Le nickel est utilisé dans les industries chimiques en tant que catalyseur et pour la production de soude caustique. Les alliages de nickel (la famille des superalliages) sont utilisés dans des applications critiques où il faut une très bonne tenue à haute température, une très bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion, ainsi qu'une grande marge de sécurité. Il s'agit surtout de moteurs d'avion et de centrales nucléaires. Dans toutes ces applications, l'utilisation du nickel est incontournable et il y a toutes les raisons de prévoir une augmentation de la demande qui suivra la croissance de la consommation mondiale. De manière très simplifiée, en suivant McKinsey [6], la classe moyenne était de 1,8 milliards de personnes en 2010, et il est prévu qu'elle atteigne presque 5 milliards de personnes en 2030 (c'est-à-dire environ la moitié de l'humanité). Si on suppose que la consommation de nickel (hors batterie) suive cette tendance, la demande de nickel pour les usages courants d'aujourd'hui devrait doubler. Il y a un réel risque de tension pour le nickel. Etant donné que les nouveaux usages ne remplacent pas de manière significative les usages antérieurs, le recyclage (déjà à 60% pour le nickel et ses alliages) ne pourra apporter une contribution significative avant une mais plus probablement deux décennies.

Le lithium est également difficilement remplaçable pour les batteries pour véhicule électrique, bien que des projets de batteries Na-ion soient en cours. Pour la prochaine décennie, il semble que les batteries Li-ion soient dominantes. Les réserves de lithium sont en principe suffisantes pour des demandes futures et la question qui peut se poser concerne la vitesse à laquelle la production peut évoluer par rapport à la croissance de la demande.

En ce qui concerne le recyclage, il faut réaliser qu'il y a un décalage d'une durée d'au moins la durée de vie d'un produit avant que les matières recyclées contribuent de manière notable aux besoins. Pour la batterie d'un véhicule électrique, ce décalage sera d'au moins 10 ans. Néanmoins le recyclage doit être intégré dès la conception des produits. En effet, pour des produits complexes, multimatériaux, comme des batteries, il faut prévoir comment désassembler dès la conception.

Finalement, le prix des éoliennes, panneaux solaires et des batteries ont diminué de manière spectaculaire, ce qui a permis leur introduction à grande échelle. Le rapport de l'AIE indique clairement que les économies liées à la production (courbe d'apprentissage) et les économies d'échelle ne sont pas des bases fiables pour prévoir l'évolution des prix à l'avenir. En effet, selon ce rapport, le coût des matières premières correspond déjà à entre 50% et 70% du prix d'une batterie. Si l'augmentation massive des volumes de production des batteries se réalise à échéance d'une décennie, il risque d'y avoir une tension sur l'approvisionnement de matières premières, notamment nickel et cobalt, avec une augmentation des prix. L'effet d'échelle fonctionnerait donc de manière inverse, avec une augmentation des prix avec le volume.

Conclusion

Il y a un fort consensus qu'une transition vers la production et l'utilisation d'électricité décarbonée nécessitera beaucoup de matières premières minérales (par ex. ciment et granulats) et métalliques. La chaîne complète de la mine aux produits aura un impact en termes d'émission de CO₂, de consommation d'eau et conduira à de grandes quantités de résidus miniers. A terme, une transition vers une société dont le vecteur principal serait l'électricité ne serait pas limitée par la disponibilité de matières premières. Il est possible de trouver des substitutions pour des éléments qui deviendraient moins disponibles et trop chers. La substitution du cuivre par de l'aluminium pour les conducteurs est un exemple, bien que la forte demande prévisible conduise malgré tout à une tension pour le cuivre. Il existe aussi des technologies de substitution pour réduire ou éviter l'utilisation d'aimants permanents à base de Terres Rares (Fe-Nd(Dy)-B) pour les alternateurs et les moteurs électriques. Dans ces deux situations, les compromis pourraient être moins efficaces, mais néanmoins acceptables. Le cas des très grandes éoliennes offshore est plus problématique. En effet il semble difficile de se passer d'alternateurs à aimants permanents Fe-Nd(Dy)-B et il est vraisemblable qu'il y ait des difficultés d'approvisionnement, notamment pour le dysprosium. Les alternateurs supraconducteurs pourraient éviter ce problème, mais il reste à voir si et quand ils seront disponibles industriellement.

La situation d'autres éléments, surtout des matières premières pour les batteries, c'est-à-dire le lithium, le nickel et le cobalt, est plus préoccupante. Il semblerait que la production de lithium puisse suivre la demande. Il est possible de produire des batteries avec moins de cobalt et plus de nickel. L'approvisionnement du nickel risque de poser des difficultés, car d'une part son utilisation pour des batteries pour véhicules électriques est difficile à éviter pour obtenir les performances souhaitées et d'autre part il est déjà fortement utilisé dans de nombreuses autres applications où il n'existe pas de substitution. De plus la demande dans ces secteurs (par ex. industries agroalimentaires, chimie, pharmacie ...) va vraisemblablement croître avec la croissance prévue d'une classe moyenne de consommateurs dans le monde.

Un point absolument essentiel concerne la cinétique de la transition. En effet, les chaînes de production, de la mine aux produits, sont très longues à mettre en place et nécessitent des investissements très considérables (l'unité de compte pour une usine ou une mine est de l'ordre d'environ 1 à 10 milliards d'euros). Cet aspect est probablement insuffisamment pris en compte dans les objectifs des politiques publiques et ceux-ci risquent de ne pas être atteints dans les délais annoncés. Il est également devenu vital de mettre en place une politique nationale et européenne pour assurer les disponibilités pour l'ensemble de la chaîne, de l'extraction jusqu'aux sous-produits. Ce point a été souligné dans un récent rapport de l'Ifri [25].

Des recherches sont à mener, avec une certaine urgence, sur :

- les procédés métallurgiques d'extraction de minerais de moins bonne qualité (y compris pour les « mines urbaines »),
- le recyclage et les procédés de recyclage,
- les technologies des moteurs électriques et des alternateurs, en intégrant plus les possibilités de l'électronique de puissance,
- les technologies de batteries, et notamment les batteries Li-ion à électrolyte solide et les batteries pour utilisation stationnaire (stockage d'électricité intégré au réseau électrique).

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Joseph Puzo (membre de l'Académie des technologies et Président Directeur Général d'Axon' Câble), M. Ning YU (ingénieur R&D, Axon' Câble) et M. Gérard Bacquet, (Directeur Général de l'ESCOM, ancien Directeur Scientifique Corporate de Nexans) pour leur éclairage sur l'utilisation de l'aluminium en tant que conducteur électrique. Nous remercions nos confrères de l'Académie des technologies, MM. Patrick Ledermann, Pierre Touhoat et Dominique Vignon pour leur relecture critique et leurs commentaires très utiles.

Bibliographie :

[1] Commission européenne (2020)

“Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité”

[2] United States Geological Survey : <https://www.usgs.gov/>

[3] <https://www.mineralinfo.fr/page/comite-metaux-strategiques>

[4] Académie des Sciences et Académie des Technologies des Technologies (2018)

“Stratégie d’utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique”

[5] AIE (2021)

“The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>”

[6] McKinsey Global Institute (2011)

McKinsey Sustainability & Resource Productivity Practice

“Resource Revolution: Meeting the world’s energy, materials, food, and water needs”

[7] <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

[8] voir par ex. <https://www.freeingenergy.com/math/wind-turbine-weight-pound-mwh-gwh-m148/>

[9] voir par ex : <https://www.windsystemsmag.com/aluminum-vs-copper-conductors/>

Et : <https://www.incore-cables.com/wind-energy-cables/>

[10] voir par ex : <https://www.helukabel.com/ca/products/wind-turbine-cables/wind-turbine-cables-overview.html>

Et : <https://www.nexans.com/business/Industry---Solutions/Wind-turbines.html>

[11] <https://roskill.com/news/rare-earths-changing-magnet-compositions-to-manage-supply-availability/>

[12] International Journal of Dynamics and Control, **1** 192-202 (2013)

Navid Goudarzi et W.D. Zhu

“A Review of the Development of Wind Turbine Generators Across the World”

https://www.researchgate.net/profile/WZhu/publication/257810928_A_Review_of_the_Development_of_Wind_Turbine_Generators_Across_the_World/links/0046352cdd7fa3bbb000000/A-Review-of-the-Development-of-Wind-Turbine-Generators-Across-the-World.pdf

[13] Resources Policy, **52** 349-357 (2027)

Claudiu C. Pavel, Roberto Lacal-Arántegui, Alain Marmier, Doris Schüler, Evangelos Tzimas, Matthias Buchert, Wolfgang Jenseit, Darina Blagoeva,

“Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines”

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0301420717300077?token=680B6C2A5B9579078D739574937B0623AEFB079BADC49E6018A57C33527B33159CA2AB24F7B816575DCADFB AE9379B91&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210918142604>

[14] ADEME 2017/09

Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières

[15] ADEME Fiche Technique Novembre 2019

Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie

[16] Global Wind Energy Council 2021

Global Offshore Wind Report 2021

[17] IEA 2021

Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector

[18] par ex IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **28** no. 4, 1-5 (2018)

T. Hoang, L. Quéval, C. Berriaud and L. Vido, "Design of a 20-MW Fully Superconducting Wind Turbine Generator to Minimize the Levelized Cost of Energy"

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01729944/document>

[19] par ex <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/steel-is-the-power-behind-renewable-energy>

[20] <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-moteur-de-voiture-electrique/>

[21] par ex https://www.tesla.com/fr_FR/blog/induction-versus-dc-brushless-motors

Et <https://www.evspecifications.com/en/model/399355>

[22] par ex <https://cleantechnica.com/2018/03/11/tesla-model-3-motor-in-depth/>

[23] <https://www.solvay.com/en/chemical-categories/specialty-polymers/automotive/e-mobility/e-motors>

[24] Journal of Electrochemical Society, **164** A6184 (2017)

J. Diekmann, C. Hanisch, L. Froböse, G. Schällicke, T. Loellhoeffel, A.-. Fölster, A. Kwade, "Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes"

<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0271701jes>

[25] ifri, Etudes de l'ifri, août 2021

Raphaël Danino-Perraud, « Géoéconomie des chaînes de valeur : des matières premières minérales à la filière batterie »

https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/danino-perraud_geoéconomie_chaines_de_valeur_2021.pdf