

Quels matériaux pour les transitions énergétiques et digitales ?

Alexandre NOMINÉ

Institut Jean Lamour – École des Mines de Nancy, Université de Lorraine

Institut Jozef Stefan, Ljubljana, Slovénie

Laboratoire lorrain d'Informatique et Applications (LORIA), Université de Lorraine/INRIA

1 Introduction

Les historiens ont pour habitude de décrire différentes périodes de la Préhistoire en leur associant les matières prédominantes découvertes puis utilisées. On parle d'âge de pierre, puis d'âge du bronze, puis du fer. Cette classification n'est plus utilisée pour définir les périodes de l'Histoire en raison du fait que l'on associe à différentes périodes des avancées qui peuvent être intellectuelles (l'écriture est associée à l'Antiquité) ou politiques (la fin du Moyen Âge est définie par, soit la chute de Constantinople en 1453, soit la découverte de l'Amérique en 1492). De plus, il aurait été caduc d'associer

des matériaux à des périodes de l'Histoire en raison des décalages conséquents qui pouvaient exister entre les civilisations dans leur appropriation de certains matériaux ou certaines techniques. On notera en effet que la sidérurgie chinoise a longtemps possédé plusieurs siècles d'avance sur la sidérurgie européenne. Il est en revanche communément admis qu'une ère industrielle a démarré entre la fin du XVIII^e siècle et le courant du XX^e siècle pour toute l'Humanité. Cette nouvelle ère est liée à une invention technologique majeure : la machine à vapeur.

Développée par James Watt entre 1763 et 1788, cette

machine permet de transformer la chaleur générée par la combustion du charbon en mouvement, c'est-à-dire, dans le langage de la thermodynamique, en travail. La machine à vapeur est à l'origine de nombreuses innovations dans le domaine du transport (les navires à vapeur, le chemin de fer, l'automobile) qui ont contribué à réduire les distances temporelles entre les différents points du Globe.

On ne mesure que trop peu à quel point la révolution industrielle a marqué un tournant majeur dans l'histoire de l'humanité, et ses effets se font encore sentir aujourd'hui. Sur le plan sociétal, la révolution industrielle a entraîné d'importants changements dans l'organisation de la société. Les populations rurales ont afflué vers les villes pour travailler dans les usines, ce qui a donné naissance à une classe ouvrière urbaine. Les conditions de travail dans les usines étaient souvent difficiles, avec de longues heures de travail et des salaires bas, ce qui a conduit à l'émergence d'un mouvement ouvrier et à la lutte pour de meilleures conditions de travail. On ne parlerait pas de communisme ou de capitalisme sans cette révolution industrielle.

Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'une ère nouvelle qui devra voir nos sociétés diminuer, voire cesser leur dépendance aux énergies fossiles. La difficulté principale vient de l'exceptionnelle concentration d'énergie contenue dans les énergies fossiles. En effet, un simple litre d'essence contient suffisamment d'énergie pour déplacer une

masse d'une tonne (voiture) sur une distance de 10 km. Le plein de kérosène d'un avion correspond à une injection de puissance comparable à celle d'une centrale nucléaire. Ces deux exemples donnent une idée de la difficulté de la tâche à accomplir en termes de puissance énergétique « verte » à déployer pour réaliser la transition énergétique.

La question de l'énergie *stricto sensu* ne doit cependant pas oblitérer la question des matières premières. Déjà à l'ère du pétrole, les entreprises et les nations ont développé des politiques de sécurisation des approvisionnements en pétrole et en gaz afin d'assurer leur prospérité. La transition énergétique ne changera pas fondamentalement cette approche. En effet, nous allons voir dans cet article que la transition énergétique va engendrer une demande croissante en matériaux, principalement des métaux, qui nécessitera donc une sécurisation des approvisionnements. Cela pose bien entendu la question de la rareté de certains métaux, mais également celle du lieu, des conditions et du volume de production de ces métaux par l'industrie minière. Nous verrons également que l'extraction minière, indispensable à la transition énergétique, n'est pas une industrie neutre tant d'un point de vue environnemental que sociétal. Cet article ne doit en aucun cas alimenter l'éco-anxiété, car les constats qui y sont faits doivent au contraire stimuler les initiatives lucides et réalistes pour faire de la transition énergétique un succès.

2 Une question de transformation d'énergie

Richard Feynman, célèbre physicien, théoricien et lauréat du prix Nobel, a abordé la difficulté d'expliquer la nature de l'énergie dans ses cours de physique. Il a souligné que bien que l'énergie soit un concept fondamental en physique, il est extrêmement difficile de donner une définition claire et précise de ce qu'elle est réellement (« Il est important de réaliser que, en physique, aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce que l'énergie est.¹ »). Il a souligné que l'énergie est une grandeur abstraite qui ne peut être directement mesurée, mais seulement observée à travers ses effets sur d'autres objets ou systèmes. Richard Feynman a expliqué que l'énergie peut prendre différentes formes, comme l'énergie cinétique, l'énergie potentielle, l'énergie thermique, l'énergie électrique, etc.

À la lumière de la phrase de Richard Feynman, prenons un peu de recul pour comprendre les phénomènes et constantes de temps sous-jacents à l'utilisation des énergies fossiles. En présence de carbone et d'oxygène, et dans les conditions de pression et de température de la Terre, la molécule la plus stable est normalement le CO_2 . Cependant, en présence de lumière, le processus peut être inversé. C'est ce que l'on appelle la photosynthèse qui réduit le CO_2 . La photosynthèse

est un processus vital réalisé par les plantes, les algues et certains organismes photosynthétiques. Grâce à la lumière du soleil et à la présence de chlorophylle, ces organismes captent l'énergie lumineuse et utilisent le CO_2 atmosphérique pour synthétiser des glucides, comme le glucose, en libérant de l'oxygène. Cette conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique stockée dans les molécules organiques est essentielle pour la vie sur Terre.

Lors de la décomposition des végétaux, ou lors de feux, tout ou partie du carbone contenu dans les végétaux est retransformé en CO_2 . Cependant, ce processus peut être interrompu lorsque des végétaux meurent et se déposent dans des environnements favorables à leur conservation, tels que des marécages, des lacs ou des océans. Au fil du temps, ces matières organiques sont soumises à des pressions et des températures élevées, provoquant leur transformation en combustibles fossiles tels que le gaz naturel, le charbon et le pétrole. Ce piégeage des végétaux et la formation de ces combustibles fossiles sont des processus qui prennent plusieurs millions d'années.

De nos jours, nous extrayons ces matières premières fossiles, principalement pour les brûler et ainsi restituer leur énergie chimique par combustion. Ce processus libère de la chaleur, ce qui transforme l'énergie chimique en énergie thermique. Cette énergie thermique peut être utilisée de différentes manières. Par

1. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands [2013]. "The Feynman Lectures on Physics, vol. 1 for tablets", Basic Books.

exemple, dans un moteur à combustion interne, tel qu'un moteur à explosion, l'énergie thermique est convertie en énergie cinétique pour propulser des véhicules et permettre le transport.

L'énergie thermique issue de la combustion des combustibles fossiles peut également être utilisée dans des centrales électriques. Dans ces centrales, la chaleur est utilisée pour générer de la vapeur, qui fait tourner des turbines connectées à des générateurs électriques. Ainsi, l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique dans les turbines, puis en énergie électrique dans les générateurs.

Stricto sensu les énergies fossiles sont renouvelables dans la mesure où elles sont le fruit d'un processus cyclique. Le problème est que ce processus prend des millions d'années et que nous avons utilisé une bonne partie des réserves en quelques centaines d'années. Elles ne sont donc pas renouvelables à l'échelle de la vie humaine. De plus nous avons rapidement déstocké une grande partie du carbone que la croûte terrestre avait piégé, ce qui a mécaniquement fait augmenter le taux de CO₂ dans l'atmosphère. Aujourd'hui nous devons complètement repenser notre cycle d'utilisation de l'énergie en utilisant des sources qui sont renouvelables à l'échelle humaine. Voitures électriques, éoliennes, panneaux solaires, moteur à hydrogène font tous appel à des transformations de l'énergie, mais avec des technologies et des matériaux différents de ceux dont nous avons l'habitude à l'ère du

pétrole. Nous allons en voir les principes et surtout comprendre les besoins en métaux qu'impliquent ces transformations d'énergie.

2.1. Énergie mécanique et énergie électrique

Les équations de Maxwell fournissent un cadre mathématique pour comprendre les phénomènes électromagnétiques, y compris le transfert d'énergie entre les formes mécanique et électrique. Dans le cas d'une turbine, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique grâce à l'induction électromagnétique, découverte par Faraday et décrite par les équations de Maxwell. Lorsque les pales de la turbine tournent dans un champ magnétique variable, cela génère un flux magnétique changeant à travers les bobines de cuivre entourant les pales.

Selon la loi de Faraday, cette variation du flux magnétique induit une force électromotrice dans les bobines, ce qui génère un courant électrique. Ainsi, l'énergie mécanique initiale des pales est transformée en énergie électrique utilisable. Ce processus est utilisé dans les centrales électriques, où une turbine est entraînée par différentes sources d'énergie, telles que la vapeur, l'eau ou le vent, pour produire de l'électricité.

Inversement, dans un moteur électrique, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique. Lorsqu'un courant électrique est fourni aux bobines situées dans un champ magnétique créé par

des aimants permanents, la loi de Lorentz indique qu'une force est exercée sur les bobines, les faisant tourner (Figure 1). Cela entraîne un mouvement rotatif de l'arbre mécanique du moteur, qui peut être utilisé pour accomplir un travail utile, comme faire tourner les roues d'une voiture ou faire fonctionner des machines industrielles.

La contribution de Nikola Tesla est essentielle dans cette compréhension et cette application. Tesla a développé le système de courant alternatif (AC), qui a révolutionné la production et la distribution d'électricité. Grâce au courant alternatif, il a été possible de générer et de transporter efficacement l'électricité sur de longues distances. Cela a permis d'alimenter les turbines des centrales électriques à distance, en transformant l'énergie mécanique en énergie électrique pour la distribution.

En termes de matériaux, cela signifie donc que nous avons besoin de faire passer du courant dans des bobines avec le moins de pertes possible d'une part, et d'un champ magnétique d'autre part. Nous allons donc avoir besoin d'un volume conséquent de matériaux conducteurs au premier rang desquels on trouve le cuivre. Le cuivre est parfois substitué par l'aluminium, bien que cette option soit peu utilisée dans le cas des moteurs électriques en raison de problèmes d'encombrement (l'aluminium étant moins conducteur, il faut une section de fil plus grande pour assurer la même conduction). Concernant la génération d'un champ magnétique,

elle peut se faire soit à l'aide d'autres bobines, soit à l'aide d'aimants. Historiquement, le matériau de prédilection pour les aimants était le fer. Cependant, dans les années 1980, les chercheurs ont découvert des matériaux permettant de générer une énergie magnétique bien supérieure. Ces matériaux, tels que le SmCo (Samarium Cobalt), NdFeB (Néodyme-Fer-Bore, auxquels on peut ajouter du Praséodyme ou du Dysprosium), nécessitent l'utilisation de terres rares. On voit donc le choix qui se présente entre, d'une part l'utilisation d'aimants qui offrent un champ magnétique à coût énergétique nul mais nécessitant des matériaux critiques et, d'autre part, l'utilisation de

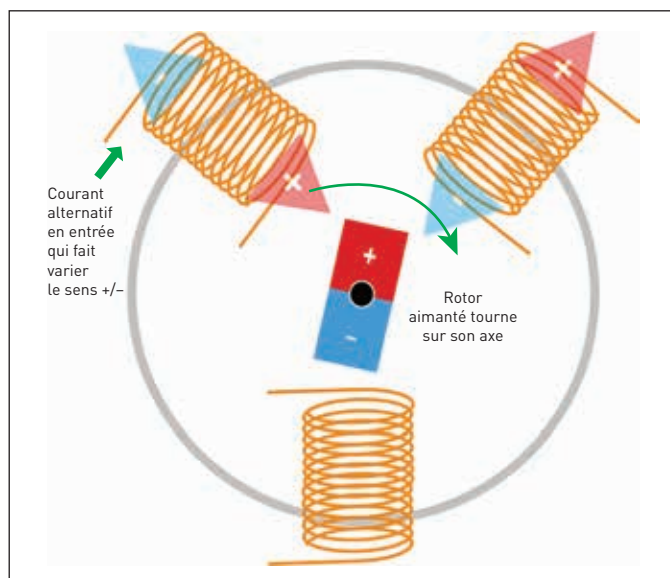


Figure 1

Schéma simplifié d'un moteur électrique.

Source : www.fiches-auto.fr :

<https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-730-fonctionnement-d-un-alternateur.php>

bobines faites avec des matériaux moins critiques mais qui nécessitent une alimentation en énergie.

2.2. Énergie chimique et énergie électrique

Le stockage d'énergie dans les batteries repose sur des réactions électrochimiques réversibles (réactions d'oxydo-réduction). Les batteries utilisent des matériaux d'intercalation pour stocker et libérer des ions chargés, ce qui permet de stocker l'énergie chimique sous forme électrique.

Les batteries rechargeables, telles que les batteries lithium-ion (**Figure 2**), sont basées sur des matériaux d'intercalation. Lors de la charge, des ions, généralement des ions lithium, sont insérés dans une structure cristalline du matériau

d'intercalation, ce qui génère un courant électrique et stocke l'énergie. Lors de la décharge, les ions sont libérés de la structure cristalline, fournissant ainsi un courant électrique et libérant l'énergie stockée.

Les matériaux d'intercalation jouent un rôle clé dans le stockage d'énergie efficace des batteries. Ils doivent avoir une structure cristalline stable capable d'absorber et de libérer les ions de manière répétée sans subir de dommages. De plus, ils doivent avoir une conductivité électrique suffisante pour permettre un transfert rapide des ions et des charges électriques.

Certains exemples courants de matériaux d'intercalation comprennent les oxydes métalliques, les sulfures, les phosphates et les polymères conducteurs. Les matériaux d'intercalation à base de

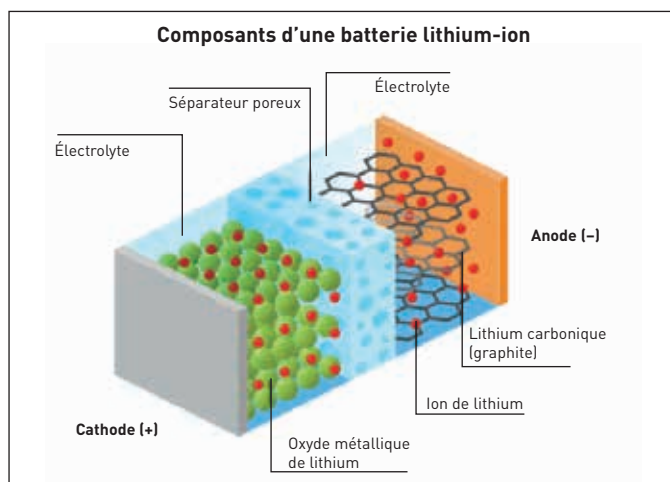


Figure 2

Schéma simplifié d'une batterie.

Source : Parlons Science. Les composants d'une batterie lithium-ion. © 2019 Parlons sciences, à partir d'une image de ser_igor sur iStockphoto.

lithium, tels que les oxydes de cobalt, de nickel et de manganèse, sont largement utilisés dans les batteries lithium-ion en raison de leurs propriétés électrochimiques favorables.

L'utilisation de l'hydrogène est également une question de transformation de l'énergie chimique en énergie électrique. En effet, le dihydrogène H_2 n'est pas une molécule stable en présence d'oxygène car celle-ci se transforme en eau H_2O . Pour produire du dihydrogène, il faut donc « casser » (réaction de réduction) une molécule contenant des atomes d'hydrogène. Parmi ces molécules, on a donc l'eau, le méthane CH_4 , l'ammoniac NH_3 ou des molécules plus complexes issues de la biomasse. C'est cette molécule d'origine qui a donné la classification par couleur de l'hydrogène qui, en tant que molécule, n'a pas réellement de couleur. L'hydrogène gris et l'hydrogène bleu sont produits par reformage à la vapeur à partir respectivement du charbon ou du gaz. Cette réaction émet donc du CO_2 , qui, dans le cas de l'hydrogène bleu, peut être stocké géologiquement dans d'anciennes « poches » de gaz naturel ou de pétrole vides (séquestration géologique). Lorsque l'hydrogène est produit à partir d'eau, il est qualifié d'hydrogène vert. Dans ce cas, la réaction de réduction se fait sous l'effet d'un courant électrique (électrolyse) (Figure 3). Le réactif est l'eau et les produits de la réaction sont le dioxygène d'une part O_2 et le dihydrogène d'autre part H_2 . Ce procédé n'émet donc pas de CO_2 et au contraire émet du dioxygène.

Il faut cependant bien comprendre que l'hydrogène n'est pas une énergie en soit. C'est un vecteur énergétique, en d'autres termes, une manière de transporter de l'énergie. En effet, réduire des molécules stables demande de l'énergie, car on éloigne le système de l'état d'équilibre. Le dihydrogène porte donc de l'énergie chimique car il est réactif. L'hydrogène peut ensuite être transporté et utilisé et ainsi restituer de l'énergie, souvent sous forme électrique. On effectuera alors la réaction inverse à celle de la réduction par électrolyse, c'est-à-dire une oxydation. Puisqu'il aura fallu un courant (un flux d'électron) pour réduire la molécule d'eau en H_2 et O_2 , un courant pourra être récupéré lors de la réaction entre le H_2 et le O_2 qui reformera de l'eau. C'est le principe de la pile à combustible.

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est donc basée sur un cycle électrochimique et nécessite de l'électricité. Il est également important de noter que le réel impact positif de l'hydrogène vert pour l'environnement dépend de la nature de l'électricité utilisée. Si celle-ci provient de sources fossiles, alors le gain environnemental est nul, voire négatif en raison d'un rendement des réactions qui n'est pas parfait. En revanche, l'hydrogène est vu comme une manière de stocker l'énergie produite à partir d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne qui ont le défaut d'être intermittentes et dont les lieux de production peuvent être éloignés

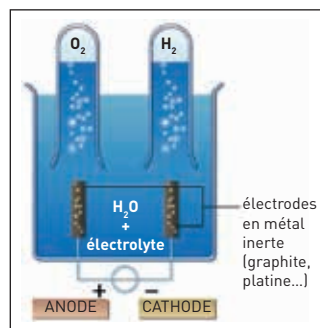


Figure 3

Réaction d'électrolyse de l'eau permettant la production de dihydrogène.

Source : Larousse. © Larousse/ J. Pajoues (https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/%C3%89lectrolyse_de_l%E2%80%99eau/1313208#:~:text=L'%C3%A9lectrolyse%20de%20l'eau,interm%C3%A9diaire%20d'un%20g%C3%A9n%C3%A9rateur.)

des lieux de consommation (ex. : déserts). Le Chili, pays de plus de 4 000 km de long, possède un fort potentiel de production d'énergie solaire au nord (désert d'Atacama) et éolienne au sud (Patagonie) qui sont cependant éloignés de plusieurs centaines, voire de milliers de kilomètres, des zones de consommation. Un transport par câbles serait coûteux en infrastructures et générerait également des pertes importantes. Le pays développe un plan ambitieux de génération d'hydrogène à partir d'électricité verte qui pourra ensuite être transporté par pipeline ou par bateau dans la région centrale du pays, voire exporté.

Le second défi de l'hydrogène réside dans l'efficacité du procédé. Comme tout cycle chimique, une barrière énergétique doit être dépassée. Celle-ci est élevée dans le cadre de l'eau (ce qui explique sa stabilité). Pour améliorer

le rendement de la réaction, on doit utiliser des catalyseurs pour accélérer la réaction et abaisser la barrière énergétique. Ces catalyseurs sont principalement des platinoïdes (platine, ruthénium, iridium, etc.) qui sont des matériaux rares et chers. Il y a aujourd'hui une réelle interrogation quant à la disponibilité de ces ressources et c'est pourquoi des matériaux alternatifs sont actuellement recherchés (ex. : alliages de haute entropie).

2.3. Énergie lumineuse et énergie électrique

La conversion entre lumière et électricité a été expliquée théoriquement par Einstein en 1905 et lui a valu le prix Nobel de Physique en 1921 pour la découverte de l'effet photoélectrique. Selon sa théorie, lorsque les photons frappent la surface d'un matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de ce matériau. Ce concept est au cœur du principe physique d'une cellule photovoltaïque (**Figure 4**), mais n'est possible qu'en présence d'un type particulier de matériaux : les semi-conducteurs. Pour comprendre l'importance des semi-conducteurs, il convient d'expliquer la spécificité de ces matériaux.

Dans un matériau cristallin, les atomes sont arrangés de manière périodique, formant une structure régulière. Les électrons des atomes peuvent se déplacer à travers le matériau, et leur comportement est décrit par les niveaux d'énergie permis. La théorie des bandes considère ces niveaux d'énergie permis sous forme

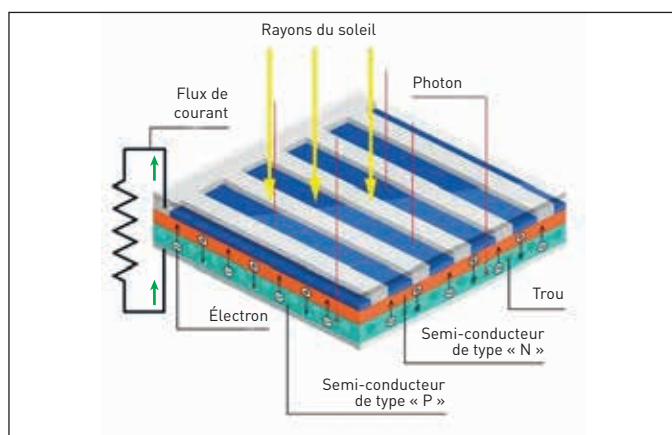


Figure 4

Schéma simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque.

Source : monkitsolaire <https://www.monkitsolaire.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-n307>

de « bandes d'énergie ». Les bandes d'énergie sont des plages d'énergies possibles pour les électrons à l'intérieur du matériau. Elles sont formées par la superposition des niveaux d'énergie des atomes voisins.

Les deux bandes d'énergie les plus importantes sont la bande de valence et la bande de conduction. La bande de valence contient les niveaux d'énergie occupés par les électrons liés aux atomes et ne contribuant pas à la conductivité électrique du matériau. La bande de conduction, quant à elle, contient les niveaux d'énergie non occupés par les électrons et qui sont disponibles pour la conductivité électrique.

La bande interdite, également appelée « gap » d'énergie, est la plage d'énergie interdite aux électrons entre la bande de valence et la bande de conduction. Dans un matériau isolant, cette bande interdite est relativement large, ce qui signifie qu'il faut fournir une quantité importante d'énergie pour qu'un électron puisse passer de la bande de valence à la bande de conduction. En conséquence, les matériaux isolants ont une faible conductivité électrique.

En revanche, dans les matériaux conducteurs, la bande interdite est partiellement ou complètement remplie, ce qui signifie que les électrons peuvent facilement passer de la bande de valence à la bande de conduction et contribuer à la conductivité électrique. Les semi-conducteurs se situent entre les matériaux isolants et conducteurs. Leur bande

interdite est plus étroite que celle des isolants, ce qui permet aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction avec une certaine quantité d'énergie.

Or pour beaucoup de matériaux semi-conducteurs, cette énergie du gap est comparable à celle des photons émis par le soleil. Le soleil émet des photons dont la longueur d'onde va de 300 à environ 2 500 nm, soit en unité d'énergie de 0,5 à 4,1 eV (électronvolt). Dans le cas d'un matériau isolant tel que l'alumine (Al_2O_3), cette énergie de gap s'élève à 7 eV et la lumière du soleil ne peut donc contribuer à faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. En revanche, le gap du silicium est de 1,14 eV, ce qui signifie qu'une partie conséquente des photons du spectre solaire ont une énergie suffisante pour faire passer certains électrons de la bande de valence à la bande de conduction.

Une fois que le photon a transféré son énergie à un électron de la bande de valence, celui-ci est transféré à la bande de conduction et laisse un trou – c'est-à-dire une énergie positive – dans la bande de conduction. On appelle cela la génération de paire électron-trou. Pour générer un courant, il faut désormais séparer ces charges. Pour cela, il faut créer une interface entre deux régions de semi-conducteurs distinctes, le matériau de type p (p pour « positif ») et le matériau de type n (n pour « négatif ») qui sont tous deux des semi-conducteurs. La région de type p (dopée positivement) et la région de

type n (dopée négativement) du semi-conducteur sont en contact, créant une interface. Cette jonction permet de séparer les charges positives et négatives. C'est la jonction p-n qui crée un champ électrique interne dans le semi-conducteur. Le champ électrique dirige les électrons libérés vers la région n et les trous vers la région p, créant ainsi un déséquilibre de charges. Des contacts métalliques sont placés aux extrémités de la cellule photovoltaïque pour collecter les électrons et les trous séparés. Les électrons sont collectés par la couche de contact métallique à la région n, tandis que les trous sont collectés par la couche de contact métallique à la région p. Ce flux de charges crée un courant électrique.

Pour créer des cellules photovoltaïques, il faut donc un empilement de plusieurs matériaux semi-conducteurs qui permettent la génération de porteurs de charge électriques libres et des matériaux métalliques pour les transporter. Parmi les semi-conducteurs, le plus répandu est le silicium. On notera cependant qu'il existe d'autres matériaux tels que le CdTe (Cadmium Tellure), le CIGS (Cuivre Indium Galium Sélénium), le GaAs (Arséniure de Galium)... Le choix de ces matériaux correspond au fait que le maximum théorique d'efficacité d'une cellule photovoltaïque s'établit à un rendement de 33,7 % pour un matériau dont le gap d'énergie est de 1,34 eV.

Le fait qu'il existe un rendement maximal s'explique facilement par le fait que tout

photon d'énergie inférieure au gap ne va pas permettre de faire passer un électron dans la bande de conduction. Ces photons seront donc « perdus ». Prenant comme exemple le silicium, tous les photons solaires d'une énergie comprise entre 0,5 et 1,14 eV seront perdus. D'un autre côté, l'énergie récupérable par une transition de la bande de valence à la bande de conduction sera égale à celle du gap, même si le photon incident possède une énergie supérieure. En d'autres termes, lorsqu'un photon de 2 eV arrive à la surface du silicium, il permettra de générer une énergie électrique de 1,14 eV, le reste de l'énergie étant perdue lors des transferts intra-bande (souvent en échauffement thermique). Un optimum s'établit donc et il a été établi par l'équation de Shockley-Quessier. Cette limite peut être dépassée en créant plusieurs jonctions dont les gaps sont différents et permettent de transformer une plus large portion du spectre solaire. Dans ce cas, la limite de Shockley-Quessier s'établira à 42 % pour une double jonction et 86 % pour une infinité de jonctions. Aujourd'hui le record absolu de conversion solaire s'établit à 47,6 % pour une cellule à quadruple jonction. Les cellules à multi-jonction restent cependant très onéreuses et réservées à des marchés de niche tels que le domaine spatial.

Concernant les électrodes métalliques, on utilisera des métaux tels que le molybdène ou l'argent. Dans certaines technologies, on pourra utiliser des couches minces de

matériaux métalliques tels que l'oxyde d'étain dopé à l'indium (ITO) ou au fluor (FTO) ou plus rarement l'oxyde d'aluminium dopé au zinc (AZO).

2.4. Des métaux pour l'énergie

À ce stade, nous avons donc vu que même si les sources d'énergies renouvelables existent, les transformer en électricité ne peut se faire sans l'utilisation de matériaux. La transition énergétique va donc générer une augmentation spectaculaire en métaux. Une étude récente de l'Université KU Leuven en Belgique estime que la demande en lithium va être multipliée par 21, celle du cobalt et du dysprosium par 4 d'ici 2030. On estime que l'électrification de nos sociétés va nécessiter d'extraire d'ici 30 ans autant de cuivre que depuis le début de l'Humanité. Le défi de la transition énergétique est donc lié à celui de la production et de l'utilisation des métaux.

3 Extraire les métaux

Dans la précédente section, nous expliquions que la constante de temps de la formation des ressources fossiles était sans commune mesure avec celle de la vie humaine. Malheureusement, la situation est encore pire dans le cas des métaux. Les métaux se sont formés sur Terre au cours de processus géologiques complexes sur de très longues périodes. Les éléments métalliques ont été créés lors de la nébuleuse solaire et certaines supernovæ. Lors de la formation de la Terre, les métaux se

sont regroupés principalement dans le noyau terrestre et se sont ensuite déplacés vers la croûte terrestre grâce à des processus géologiques tels que la tectonique des plaques et les activités hydrothermales. Les réactions chimiques entre les métaux et les fluides géologiques ont donné lieu à des réactions chimiques et à la formation de gisements minéraux riches en métaux. Ainsi, les métaux formés lors de la formation de la planète sont une ressource non renouvelable. Forts de nos erreurs lors de l'ère du pétrole, nous devons d'ores et déjà anticiper la forte demande en matériaux.

Il faut souligner que l'extraction de métaux n'est pas un procédé neutre à plusieurs points de vue. Tout d'abord il convient de rappeler que peu de métaux sont présents à l'état métallique (natif). C'est le cas de l'or et du platine, mais pas du fer ou de l'aluminium qui sont présents sous forme oxydée et souvent mélangés avec d'autres composés. Il faudra donc procéder à des opérations chimiques permettant de réduire les minerais pour obtenir du métal. Ces opérations émettent de grandes quantités de CO₂ et font parfois appel à de grandes quantités de produits toxiques. La production d'un kilo de fer ou d'aluminium, matériaux abondants dans la couche terrestre, émet respectivement 2 et 12 kg de CO₂. En conséquence, la production d'acier est responsable de 7 % des émissions de gaz à effet de serre. Un effort important de recherche est actuellement mené pour remplacer le charbon par l'hydrogène pour la production

de l'acier et en réduire ainsi les émissions. Les matériaux tels que l'or sont certes présents à l'état natif, mais en très faibles quantités dans les roches. Ainsi, la production d'un volume correspondant à une bouteille d'or nécessite d'extraire un volume équivalent à une piscine olympique de roches. Cela nécessite une quantité d'énergie extrêmement importante et on estime que l'empreinte CO₂ de la production d'un kilo d'or est de 50 tonnes de CO₂. L'industrie minière travaille actuellement à la réduction de l'impact carbone de l'extraction par l'électrification des procédés.

Au-delà des émissions, les conditions de sécurité dans lesquelles sont faites ces opérations d'extraction et de raffinage des métaux varient énormément d'un pays à l'autre. L'exploitation à bas coût économique des terres rares en Chine et au Myanmar s'est faite à un coût environnemental et social exorbitant. On pourrait également citer l'extraction du cobalt nécessaire aux batteries, qui se fait principalement en République démocratique du Congo qui est un État ravagé par les conflits armés. Ce dernier exemple illustre une crainte actuelle des entreprises et des États quant à la politisation des approvisionnements. En effet, avec le regain de tensions internationales, les États souhaitent diversifier leurs approvisionnements auprès de différents pays, voire acquérir une souveraineté sur ces approvisionnements. Cela nécessite une diplomatie des métaux critiques et des ouvertures de mines. Il

est cependant intéressant d'observer que malgré des prévisions de demande extrêmement élevée, et ce sur des temps longs, l'investissement dans l'extraction minière est au plus bas. Ceci est dû à un décalage entre la constante de temps de la demande (année) et celle d'une mine qui nécessite 10 à 15 ans avant d'ouvrir. Enfin, beaucoup d'investisseurs sont réticents à l'investissement dans le secteur minier en raison d'un risque réputationnel.

Il existe également un risque peu connu lié au fait que plus de la moitié des éléments du tableau périodique ne sont pas extraits pour eux-mêmes mais comme des sous-produits d'autres métaux. C'est par exemple le cas de l'indium (nécessaire aux panneaux solaires, aux écrans tactiles et à l'électronique) qui est un sous-produit du zinc. Cela signifie que l'offre en indium n'est pas corrélée à la demande en indium, mais à celle du zinc. Il y a donc des risques de flambée des cours en cas de décalage entre la demande en sous-produit et celle en métal hôte. Cela limite également la quantité de métal disponible et augmente le risque de pénurie.

Pour pallier tous les risques susmentionnés, le recyclage est souvent présenté comme une solution miracle. Le recyclage permet en effet de réduire l'empreinte carbone de manière substantielle (pour l'aluminium, on passe de 12 à 2,5 kg de CO₂ par kg de métal) et limite l'exposition aux risques sociaux, environnementaux et géopolitiques. Cependant, le taux

de recyclage n'atteint jamais 100 %. Il est de 40 % pour l'aluminium et quasiment nul pour les terres rares. Ces taux de recyclage sont dus au fait que le recyclage n'est pas toujours viable économiquement, qu'il dépend de la collecte et de la difficulté à séparer les métaux, par exemple dans l'électronique. Des progrès importants peuvent cependant être espérés dans les années à venir.

Il n'en demeure pas moins que l'on ne recycle les matériaux qu'à la fin de leur vie. En d'autres termes, les 11 millions de voitures électriques que l'Union européenne souhaite construire seront équipées de batteries neuves qui ne pourront provenir de matériaux recyclés faute de batteries usagées. Le recyclage est donc une solution absolument nécessaire mais pas suffisante.

Conclusion

La transition énergétique est liée à une augmentation de la demande en métaux. L'extraction de ces derniers n'est malheureusement pas neutre à différents points de vue. Pour réduire les risques liés à cette transition, quatre piliers apparaissent cruciaux : la limitation de l'impact de la mine, l'augmentation du recyclage, une consommation raisonnée et une recherche active dans la substitution des métaux critiques. Ces quatre chantiers sont parfois présentés comme différentes options possibles parmi lesquelles nous pourrions choisir. La réalité des chiffres montre qu'il ne s'agit pas d'un choix « à la carte », mais de chantiers qui devront être menés de front et de manière concomitante.

Dès la primaire, on apprend aux enfants qu'on « ne mélange pas les choux et les carottes » et qu'on n'additionne pas les joules avec les kilogrammes. Nous risquons pourtant d'être confrontés à ce type d'équations dans les années à venir. En effet nous allons devoir prendre en compte des paramètres d'une grande diversité lors de nos décisions. Comment considérer à la fois la réalité économique, géopolitique, environnementale, sociale dans la conception et

le choix de technologies vertes dont on attend qu'elles soient également performantes ? Il n'y a aujourd'hui aucun modèle permettant d'effectuer de tels choix et le scientifique, s'il peut aider à quantifier les différents risques, ne peut utiliser la science pour choisir entre les différentes options car il s'agit d'un choix de société. Cependant un tel débat nécessite une connaissance par le plus grand nombre des questions liées à la transition énergétique. Ce débat doit être éclairé d'arguments chiffrés et rationnels, loin des idéologies simplistes, afin que les sociétés puissent faire des choix en âme et conscience.

REMERCIEMENTS

Cette contribution fait partie du projet européen HERawS (*Highlights on Europe Raw Materials Sustainability*) qui rassemble l'Université de Lorraine, l'Université du Luxembourg, l'Université de Belgrade (Serbie), l'Institut Jozef Stefan (Ljubljana, Slovénie), l'Université Galatasaray (Istanbul, Turquie) et l'Université d'Alberta (Edmonton, Canada). Je remercie tous les membres de ce projet pour leurs contributions à cet article. Je remercie également la Fondation Mines Nancy pour son indéfectible soutien. Je remercie également la Société française des Matériaux et de la Métallurgie pour le soutien moral qu'elle m'a apporté par l'intermédiaire de la médaille Jean et André Rist. Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à la Fondation de la Chimie pour m'avoir donné l'opportunité de présenter ces travaux.