

Introduction

Florian FIZAINÉ¹ et Xavier GALIÈGUE²

¹ IREGE, Université Savoie Mont Blanc, Annecy, France

² LEO, Université d'Orléans, Orléans, France

Pourquoi un ouvrage sur l'économie des ressources minérales ? En tant qu'économistes, nous serions tentés de dire que l'absence d'un titre français sur la question motive l'existence même de cet ouvrage. Néanmoins, cette réponse pourrait paraître bien sommaire, tant de multiples raisons ont poussé à la création de cet ouvrage collectif.

Pour commencer, il y a les fondements et les connaissances accumulés sur le sujet depuis des décennies par les chercheurs de différentes disciplines. Ces savoirs et ces représentations véhiculés au travers d'articles et ouvrages plus spécialisés nous convainquent des enjeux reliés à la thématique. Ces derniers, comme nous le verrons plus tard, sont d'ordres divers : environnementaux, sociaux, économiques, etc. Ces connaissances interpellent également. Parfois par leur originalité, plus souvent par leur gravité, elles nous pressent d'approfondir le champ des connaissances pour mieux comprendre causes, mécaniques et conséquences, et potentiellement, proposer des leviers d'action.

Ensuite, il y a les lacunes, les zones d'ombres et les mystères persistants autour de la thématique. Certains se dissipent avec l'accumulation des travaux d'une discipline et l'intérêt renouvelé des chercheurs pour comprendre ce qui ne s'explique pas aisément. D'autres – et c'est particulièrement le cas pour les problématiques associées à notre ouvrage – s'éclairent grâce au regard croisé de plusieurs disciplines avec lesquelles nous parvenons à appréhender totalement les intrications de problèmes complexes, mais surtout grâce à la boîte à outils interdisciplinaires susceptible de dénouer ces derniers.

Ces raisons, bien qu'importantes, ne sont pas spécifiques aux ressources minérales. Dès lors, un détour par différents horizons temporels peut permettre de mieux éclairer le rôle de ces ressources particulières pour les civilisations humaines. Nous verrons ensuite dans quel contexte particulier elles entrent aussi en jeu.

1.1. Pourquoi les ressources minérales sont-elles importantes ?

L'observation du passé peut fournir un éclairage bienvenu. Si l'on avait pu mesurer l'empreinte matière d'*homo sapiens* à ses débuts, on aurait probablement pu constater qu'il ne s'appuyait alors que très partiellement sur les ressources minérales, à l'exception peut-être de la fabrication d'outils comme le silex ou les bifaces hérités de ses aïeux. L'histoire évolue radicalement avec le passage de la révolution néolithique. Les trois caractéristiques de cette révolution : la sédentarisation, l'économie de production et l'adoption d'une nouvelle forme d'organisation sociale font encore débat parmi les chercheurs, notamment en ce qui concerne leur simultanéité.

Toutefois, ce « nouvel âge de la pierre polie » s'accompagne d'un renouveau au niveau de la consommation de matière, du fait même que la sédentarisation, l'agriculture et le développement de peuplements plus denses réclament plus de ressources. Le rôle joué par la pierre polie (comme les haches) s'intensifie dès lors. La poterie, bien qu'antérieure au néolithique, sert aussi de pierre angulaire à l'essor du commerce. Les surplus dégagés par l'agriculture permettent un premier pas vers la spécialisation des tâches et certains types de ressources (outils et autres ressources rares) peuvent alors être diffusées là où elles manquent *via* un vaste réseau d'échange contrôlé par les élites, produisant une extension de la frontière humaine (Barbier 2011). L'homme génère ainsi une première modification profonde de son environnement. Plus tard, des innovations techniques fondées sur la maîtrise de l'extraction et l'isolement de nouvelles ressources minérales marquent l'histoire, à travers l'âge de bronze (3000 avant Jésus-Christ) puis l'âge du fer (1200 avant Jésus-Christ).

Bien que l'extraction de ces ressources minérales se généralise et fait alors partie prenante au développement des civilisations humaines, les minéraux restent des ressources rares. Par exemple, le cours du fer à l'époque éponyme varie à ce moment entre huit fois le prix de l'or et deux fois celui de l'argent (Vioilleaud 1953). Aux XVII^e et XVIII^e siècles, une autre révolution, celle de l'industrie, naît de façon concomitante avec l'extraction massive d'une autre ressource minérale : le charbon. Les civilisations de l'Europe passent alors de sociétés agricoles et artisanales à des sociétés industrielles, et s'extrait ainsi un peu plus du rythme imposé par la biosphère.

Cette maîtrise d'une nouvelle forme d'énergie de stock plus abondante et concentrée que la biomasse, accompagnée par l'essor des connaissances (physique et chimie), suscitent une nouvelle envolée de la production/consommation de ressources minérales. Par exemple, la production de cuivre passe de 216 500 tonnes par an en 1800 (soit environ le niveau de l'époque romaine) à plus de 500 kt par an en 1900 (Hong *et al.* 1996). Ce siècle marque aussi la découverte de nouveaux éléments venant élargir les sept métaux connus depuis l'Antiquité. Finalement, la généralisation de l'industrialisation et du mode de vie occidental gagne le monde à partir de l'époque contemporaine (depuis 1945) conduisant à un autre saut dans la consommation de ressources minérales déjà existantes, mais également au jaillissement de la production de petits métaux restés jusque-là cantonnés au rôle de curiosités. Toutefois, cette dernière période, bien que récente, entraîne avec elle une nouvelle entaille profonde de l'Homme dans son environnement. Celui-ci devenant lui-même la première force de modification de la géosphère, de la biosphère et du climat. L'histoire bascule-t-elle dans une nouvelle ère : l'anthropocène (Steffen *et al.* 2015) ? Si l'ouverture d'une nouvelle ère est encore en débat, force est de constater qu'un regard tourné vers le passé nous conduit à penser **qu'à chaque fois que l'homme se libère un peu plus des contraintes et des temporalités que son environnement fait peser sur lui, il le fait par un recours plus intense aux ressources minérales.**

Au-delà du passé, les ressources minérales façonnent aussi le présent. Si la crise climatique reste, au premier abord, régulièrement associée à un usage croissant de ressources fossiles (charbon, gaz et pétrole), une analyse plus aguerrie comme celle de l'historien V. Smil (2013) montre qu'une partie notable de cette énergie est dédiée à l'extraction, la production et la mise à disposition des ressources matérielles pour l'économie. Ainsi, d'après ses travaux, 20 % de l'énergie primaire mondiale serait mobilisée pour la production de matière dont 13 % pour les seules ressources minérales (10 % pour les métaux et 3 % pour les matériaux de construction) soit à peu près l'importance des États-Unis dans la consommation primaire mondiale d'énergie. Ce rôle majeur des ressources minérales dans la consommation d'énergie est étroitement lié à leur impact environnemental en termes de gaz à effet de serre (GES) dans la mesure où l'énergie utilisée reste majoritairement carbonée (Mudd 2010 ; Northey *et al.* 2013). **La relation que nous entretenons avec les ressources minérales n'est donc pas sans lien avec la crise climatique actuelle et d'autres problèmes environnementaux.** Le dernier rapport du PNUE (2019) indique d'ailleurs la place prépondérante des métaux dans les impacts environnementaux liés aux ressources naturelles. Ainsi, les métaux représentent 18 % des impacts en termes de gaz à effet de serre liés aux ressources et 39 % des effets des particules sur la santé et l'environnement. Les autres matériaux minéraux non métalliques, bien que représentant l'essentiel de la masse et connaissant la plus forte croissance, génèrent moins de stress environnemental à l'échelle mondiale (moins de 2 % du total des ressources), même s'il existe là encore

des exceptions, notamment lorsque l'on s'intéresse à des cas de dégradations locales. L'essentiel de l'impact de cette autre importante catégorie de ressources minérales vient surtout aujourd'hui de leur utilisation dans la production du ciment et des fertilisants.

Si le rôle des ressources minérales dans les enjeux actuels n'est pas contestable, celles-ci apparaissent aussi de façon récurrente dans les utopies de notre temps, notamment celle de l'économie circulaire. Elles s'inscrivent donc aussi dans les futurs considérés (fantasmés ?) par les nouveaux penseurs du développement durable, aux côtés des ressources renouvelables (biomasse et énergies renouvelables). Les mots changent selon les contextes : économie circulaire, économie symbiotique (Delannoy 2017) ou économie bleue (Pauli 2011). Le point commun entre ces concepts consiste néanmoins à s'inspirer de la circularité présente dans les écosystèmes naturels pour assurer la soutenabilité des systèmes économiques humains. **Dans ce cadre, les ressources minérales, parce qu'elles sont recyclables pour la plupart, rentrent clairement dans ces concepts évoquant la régénération intrinsèque des futurs systèmes économiques.** Par exemple, le papier de pierre, un mélange de carbonate de calcium et de polyéthylène haute densité est souvent avancé par Pauli comme un exemple pratique d'économie bleue (Pauli 2011). Cette nouvelle forme de papier n'utilise pas d'eau et peut théoriquement être recyclée à l'infini (pas d'usine pilote pour l'instant). L'économie symbiotique, elle, s'inspire aussi de l'écologie industrielle, en évoquant la « symbiose de Kalundborg », l'écoparc industriel d'une ville portuaire danoise où les sous-produits non désirés de certains industriels deviennent des intrants pour d'autres. Là encore, les ressources minérales joueront un rôle déterminant car certaines activités futures devraient continuer à mobiliser du capital qui souvent passe par l'usage de métaux et d'autres ressources non métalliques, comme c'est le cas de la plupart des solutions de mobilités qu'elles rentrent ou non dans le cadre de l'économie du partage ou de la fonctionnalité.

Les ressources minérales jouent un rôle prépondérant dans de nombreuses périodes de l'histoire humaine et continueront certainement à l'accompagner dans son développement. Néanmoins, appelés dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, la transition énergétique et le basculement vers les énergies renouvelables engendrent de nouvelles interrogations dans la communauté scientifique. En effet, des preuves de plus en plus importantes semblent confirmer l'existence d'une relation croissante entre consommations de ressources minérales et développement d'énergie renouvelable.

1.2. Doit-on craindre un nouveau saut minéral provoqué par la décarbonation de l'énergie ?

À notre connaissance, la première étude à avoir fait état de cette hypothèse est celle de Lund (2007) *via* une analyse de l'intensité matérielle des différentes technologies de

production électrique. Plus tard, d'autres études générales confirmeront cette hypothèse (Kleijn *et al.* 2011 ; Phihl *et al.* 2012 ; Ashby 2013 ; Elshkaki et Graedel 2013 ; Vidal *et al.* 2013). Parallèlement, d'autres analyses ont également soulevé la sensibilité plus importante des énergies vertes à des catégories précises de ressources minérales comme les métaux rares (Yang 2009 ; Kleijn et Van der Voet 2010 ; Elshkaki et Graedel 2013 ; Fizaine 2013 ; Moss *et al.* 2013). **D'une manière générale, ces scientifiques mettent en avant la plus grande consommation de matières et de métaux occasionnées par le recours aux énergies vertes mais aussi plus largement aux énergies décarbonées** (on compare alors fossile sans capture et séquestration du CO₂ et fossile avec capture et séquestration du CO₂). Cela signifie qu'à production d'électricité constante, le basculement vers un mix électrique plus vert devrait nous conduire à consommer plus de métaux (et de ressources minérales).

Par exemple, la dernière étude en date, celle du BRGM (Boubault 2018), apporte des éclairages intéressants sur l'empreinte matière des systèmes de production d'électricité. À travers une analyse de cycle de vie et *a contrario* des études précédentes, elle montre que les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies fossiles sont plus intenses en matières premières par kWh, d'une part parce qu'ils consomment d'importantes masses d'énergies fossiles mais aussi du fait des déchets miniers générés pour accéder à ces ressources fossiles. La figure I.1 montre l'empreinte matière des systèmes électriques par ordre décroissant d'émissions de CO₂ équivalent. Si nous nous arrêtons à l'empreinte matière, la transition énergétique apparaît comme cohérente avec une politique de conservation des ressources. Le charbon étant loin devant à plus 2,715 kg/kWh contre seulement 0,036 kg/kWh pour l'hydraulique. Les énergies renouvelables continuent à consommer des énergies fossiles pour leur construction mais dans des proportions bien moindres que les systèmes électriques à base d'énergies fossiles. L'analyse plus spécifique de l'empreinte métaux dégage un schéma général beaucoup moins clair (figure I.2). En effet ici, la géothermie suivie par l'éolien et le solaire à concentration apparaissent désormais comme les plus consommateurs en métaux.

A contrario, d'autres énergies renouvelables comme le photovoltaïque ou la biomasse mais plus encore l'hydraulique font aussi bien que le nucléaire ou les énergies fossiles. Si l'on suit les résultats de cette étude, l'empreinte métaux du système électrique ne s'alourdirait pas nécessairement en cas de décarbonation, tout dépendrait du contenu précis de la transition énergétique et en particulier des parts respectives de chacune des énergies renouvelables. Une analyse plus fine encore, par métal, mène à des classements encore plus disparates (figure I.3). Ainsi, la figure I.3 montre la part de la consommation en métal du système électrique absorbée par chaque type de technologie. On peut tirer trois grandes conclusions de l'observation de ces résultats. En premier lieu, ce qui saute aux yeux, c'est l'importance du photovoltaïque qui concentre

une part importante de la consommation de plusieurs métaux mineurs (tantale, gallium, indium, strontium) mais aussi de certains métaux majeurs (aluminium, cuivre, zinc et plomb). En deuxième lieu, le nucléaire accapare une palette beaucoup plus restreinte de métaux mais y joue aussi un rôle majeur (uranium, platine, lithium, oxyde de titane, chrome, nickel). En troisième lieu, la consommation de l'éolien, importante aussi, reste plutôt concentrée sur des métaux majeurs (fer, cuivre, manganèse, nickel, chrome). En l'état actuel des choses, les autres formes de production d'électricité consomment des quantités moindres de métaux. Cette étude conclut que le basculement vers un mix « vert » comme décrit dans le *World Energy Outlook* de l'Agence internationale de l'énergie devrait à quantité d'électricité constante produite faire augmenter la consommation de fer du système électrique de 23 %, de cuivre de 242 %, d'argent de 633 % et de tellure d'un facteur 10. Évidemment, ces résultats doivent être relativisés, notamment parce que nous ne prenons pas en compte l'importance de la production de ces métaux et les capacités de hausse de la production, la consommation actuelle du système électrique jouant la plupart du temps un rôle mineur dans la consommation de la plupart des métaux.

Bien entendu, ces études amènent aussi avec elles d'autres zones d'ombres, d'une part parce qu'elles raisonnent souvent de façon isolée, c'est-à-dire en ne considérant que la matière nécessaire à la fabrication de l'éolienne mais pas nécessairement les déchets miniers amenés par l'extraction du néodyme appelé dans les aimants permanents de celle-ci (à l'exception de cette dernière étude). D'autre part, on exclut bien souvent l'environnement du système de production électrique, *quid* alors de l'empreinte matière du raccordement des éoliennes *off-shore*, des solutions de *back-up*, de *smart-grid* ou de stockage nécessaires aux énergies renouvelables intermittentes pour qu'elles se substituent parfaitement aux énergies fossiles ? Dans le même ordre d'idées, ces études ignorent souvent la complexité intratechnologique des systèmes de production électrique en ne considérant que les grands groupes (éolien terrestre, éolien *offshore*, photovoltaïque, etc.) alors qu'il existe une importante variabilité intratechnologique de l'empreinte matière, notamment pour certains métaux particuliers. On peut ajouter que si la part de l'électricité dans le mix énergétique est amenée à s'accroître dans le futur, les métaux utilisés dans le secteur de l'énergie ne se limitent pas à la seule production de l'électricité, mais concernent aussi d'autres secteurs de production ou d'usage de l'énergie, qui consomment eux-mêmes des métaux (LED, batteries, véhicule électrique, etc.). Pour finir, le raisonnement en équilibre partiel, faisant abstraction des autres secteurs, induit de larges angles morts, par exemple en ignorant les conflits d'usage entre le secteur du numérique et celui de l'énergie sur des métaux comme le cobalt et le lithium (batteries électrochimiques) mais aussi sur l'indium et le gallium (écran plat, carte imprimée d'ordinateur et PV à couches minces).

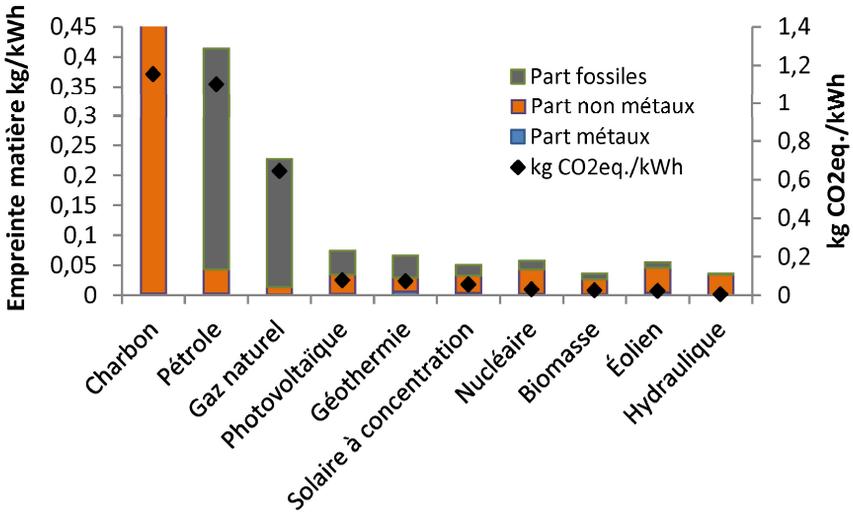


Figure I.1. Empreinte matière des différents systèmes de production électriques (source : données de (Boucault 2018))

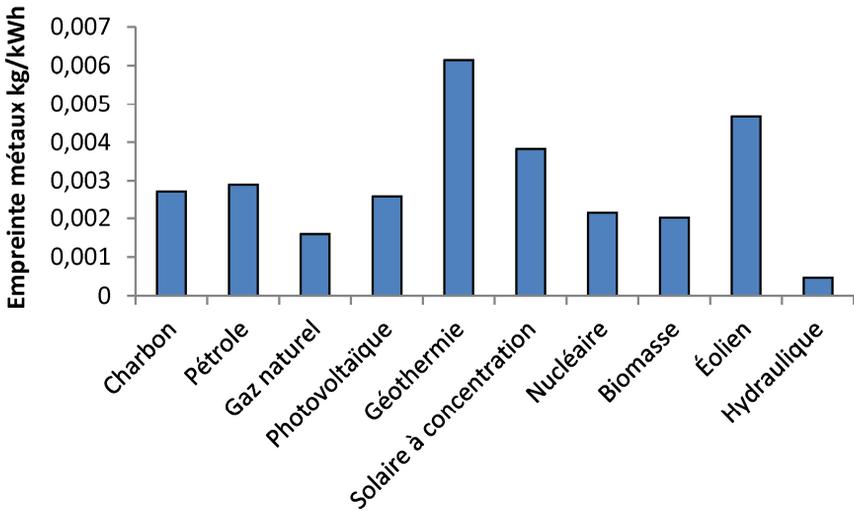


Figure I.2. Empreinte métaux par kWh par type de système de production d'électricité (source : données de (Boucault 2018))

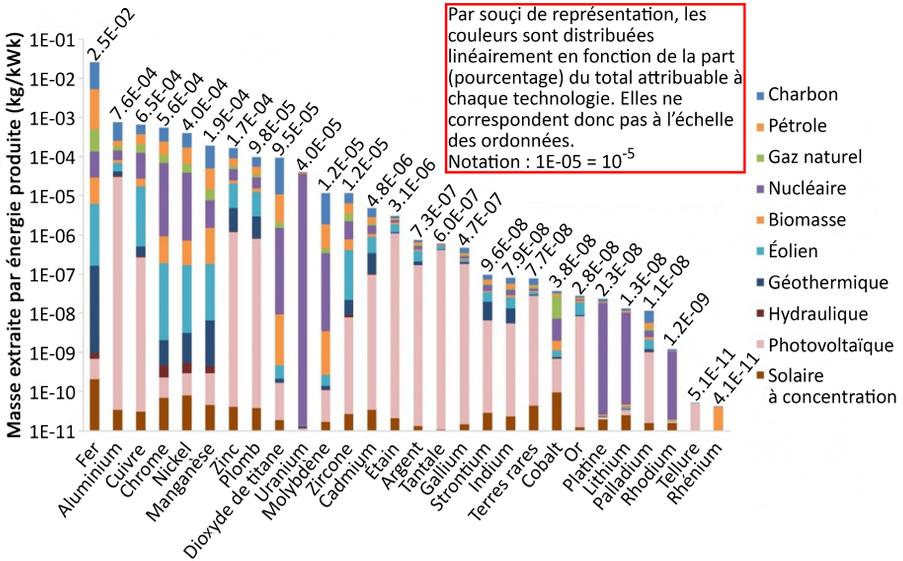


Figure I.3. Part de l’empreinte métal du secteur électrique par type de système de production électrique (source : données de (Boubault 2018))

Mais plus encore que ces études, la prise de conscience des médias, du public et des décideurs a probablement eu lieu au travers de l'épiphénomène de la crise des terres rares (mobilisées dans bon nombre d'éoliennes *off-shore*). L'envolée des prix des lanthanides a rapidement déclenché des inquiétudes profondes au sein des industriels et du grand public. Et si au-delà de la crise géopolitique, notre monde s'engageait dans une impasse minière, renvoyant à mi-chemin l'essor des énergies renouvelables dans les limbes faute de métaux ?

Par ailleurs, les multiples reportages et photos des travailleurs des mines artisanales de cobalt en République démocratique du Congo mais aussi des exploitations de terres rares en Chine, nous rappellent que la soutenabilité environnementale des pays industrialisés n'a pas véritablement de sens si elle ne s'insère pas aussi dans une soutenabilité juste socialement et garantissant un minimum économique pour tous les citoyens du monde.

Bien qu'un certain nombre d'impasses technologiques aient été identifiées et que de nombreux points de tensions sur des ressources particulières devraient être déjoués grâce à ces éclairages, la prise de conscience n'en a pas moins ouvert des réflexions tout azimut.

I.3. Des mécaniques systémiques associées à des corolaires multiples : l'éclairage apporté par l'interdisciplinarité

C'est bien l'objectif de cet ouvrage, d'explorer, d'identifier et d'explicitier les éventuels points de blocage associés à l'usage des ressources minérales. Car tant s'en faut, la question de l'usage des ressources minérales ne se pose pas qu'en termes de quantités disponibles. Une réflexion ouverte, prospective et interdisciplinaire est donc nécessaire pour accomplir cette tâche. Nous avons donc mobilisé une large équipe de chercheurs et penseurs sur différentes problématiques associées aux ressources minérales. Ils sont économistes bien sûr, mais également physicien, ingénieur, géologue, juriste et géographe. Cet ouvrage participe aussi à réunir les spécialistes travaillant sur cette thématique, bien souvent encore de façon trop isolée et sans véritable connexion pérenne. Certes, il existe bien des initiatives comme l'Association française des économistes de l'environnement et des ressources (FAERE), l'équipe réunie autour du rapport « Cyclope » où les contributions au site mineral-info.fr mais celles-ci restent encore trop fragmentées ou disciplinaires relativement à d'autres thématiques beaucoup plus unifiées comme l'énergie. C'est aussi parce que l'énergie a déjà droit à de larges équipes interdisciplinaires que nous avons choisi de nous concentrer sur les ressources minérales en excluant les minéraux énergétiques de notre périmètre d'analyse.

Pour engager cette réflexion, nous avons décidé d'adopter une démarche structurée selon trois axes : contexte, enjeux et leviers d'action s'étalant sur deux volumes distincts. Dans le [volume 1](#) de ce travail, le premier axe *contexte*, retrace quelques éléments permettant de mieux appréhender la situation dans laquelle s'inscrivent les ressources minérales.

Tout d'abord, si les ressources minérales sont au cœur des technologies les plus avancées, elles requièrent une connaissance fine de leurs flux pour en évaluer la demande. C'est ce à quoi s'attachent [Raphaël Danino-Perraud](#), [Maïté Legleuher](#) et [Dominique Guyonnet](#) (chapitre 1), à propos du marché du cobalt, dont l'extraction comme le raffinage sont fortement concentrés, respectivement en République démocratique du Congo et en Chine. L'évaluation de sa demande en Europe fait appel à l'approche des méthodes dites d'« analyse de flux de matière » (AFM), qui retrace ces flux en tenant compte des multiples formes et utilisations du cobalt et de ses possibilités de recyclage, jusqu'à la « mine urbaine ». Cette AFM du cobalt, couplée à une analyse de chaîne de valeur sur des données européennes, permet de s'interroger sur les stratégies des groupes européens qui, soucieux de se placer sur les segments à forte valeur ajoutée, en arrivent à se situer dans une situation de dépendance vis-à-vis des opérateurs travaillant en amont (extraction et raffinage).

Certaines ressources minérales sont financiarisées alors que d'autres ne le sont pas et cela a d'importantes conséquences sur la transparence et la dynamique des prix régnant sur ces marchés. Dans cette optique, [Yves Jégourel](#) (chapitre 2) décrit le rôle de la financiarisation du minerai et des métaux. Plus précisément, l'auteur passe en revue l'organisation et les mécanismes des contrats à terme et leurs alternatives. L'auteur traite également de l'effet de la financiarisation sur la dynamique des prix des minéraux mais aussi sur la mutation des secteurs les utilisant.

Au-delà des aspects financiers, l'offre de ressources minières s'insère aussi dans des institutions. En premier lieu, la politique des États. À ce titre, tous les pays ne semblent pas suivre les mêmes règles. Si beaucoup ont établi une doctrine pour la gestion des ressources énergétiques, tel n'est pas le cas pour les ressources minérales. [Didier Julienne](#) (chapitre 3) s'emploie à déconstruire ce mythe qui voudrait que les pays s'opposent véritablement pour faire main basse sur les métaux. En réalité, des pays comme la Chine disposant d'une véritable doctrine ressources avancent leurs pions pour sécuriser leurs approvisionnements futurs sans rencontrer véritablement de résistance de la part des pays industrialisés. L'auteur appelle à reconstruire une véritable stratégie ressources dans nos pays et cesser de sur-réagir à des informations conjoncturelles souvent tronquées.

Pour évaluer la quantité de ressources minérales disponibles pour nos économies, nous avons recours à des indicateurs que nous questionnons rarement. Ce que s'emploie à faire [Michel Jébrak](#) (chapitre 4). Il démontre notamment que la dotation minérale est une notion complexe, qui peut être mesurée à l'aide de différents paramètres, la production annuelle d'un minéral spécifique, ses réserves, et leur ratio qui peut connaître diverses évolutions, à la hausse ou à la baisse pour différents minéraux. Cette dotation peut être généralisée par la notion de *base reserves*, qui tente d'évaluer le potentiel géologique global d'un métal donné. Si la répartition géographique des ressources minérales est inégalement répartie, leur exploitation se déplace d'un pays à l'autre en fonction du mouvement d'industrialisation, comme dans le cas des mines principales de cuivre et d'étain. En fin de compte, la dotation minérale est une construction historique, qui dépend des données géologiques, des technologies d'extraction et de transformation des minéraux, et de l'économie de l'exploitation minière, qui est une industrie à forte intensité de capital.

La deuxième problématique de cet ouvrage rend compte des [défis](#) auxquels les ressources minérales vont être confrontées. Ils concernent les multiples facteurs qui peuvent affecter l'offre de ressources minérales.

Dans un chapitre axé sur la lutte entre le progrès technique et l'épuisement géologique des gisements de métaux, [Olivier Vidal](#) (chapitre 5) montre comment deux approches antagonistes (optimistes et pessimistes) peuvent être regroupées dans une approche

formelle de relation dilution-énergie et énergie-prix. À l'aide d'outils théoriques formels, mais aussi grâce à un calibrage empirique sur les données passées, il s'interroge sur la perpétuation des baisses de prix observables pour la plupart des métaux. Cette tendance à la baisse dans les prix devrait s'inverser d'ici la fin du siècle si le taux d'amélioration technique reste identique et si nous continuons à exploiter des gisements toujours moins concentrés.

Mesurer l'empreinte environnementale des ressources minérales est un défi que se proposent de relever [Jacques Villeneuve](#) et ses [co-auteurs](#) au BRGM (chapitre 6). En effet, l'empreinte environnementale des activités humaines dépasse sa seule mesure en termes de surface utilisée, pour prendre en compte l'ensemble des impacts environnementaux sur le cycle de vie des produits. Il s'agit ici de mesurer cette empreinte en utilisant un tableau d'entrées-sorties (TES) élargi qui détermine les consommations de ressources minérales et leurs impacts environnementaux, induits par la demande finale avec un niveau fin de désagrégation. Ces TES sont ensuite interconnectés au sein d'un modèle multirégional pour évaluer l'impact final, importations comprises, de la demande nationale. En dépit de limitations liées à la difficulté d'obtention de bases de données comparables à l'échelle mondiale, on constate que l'empreinte environnementale de la demande de métaux nécessaire à la demande finale française est réalisée majoritairement à l'étranger.

Parce que l'usage des ressources minérales s'inscrit dans une problématique économique, [Romain Debref](#) (chapitre 7) s'intéresse aux aspects liés à l'efficacité environnementale (énergétique et matérielle) souvent mis en œuvre dans de nombreuses technologies afin d'économiser ressources et énergie. Il donne un aperçu de l'histoire de l'éco-efficacité à travers les différents mouvements qui le soutiennent et ses limites en termes d'originalité et de finalité du concept. Dans un second temps, il démontre en détail les nombreuses formes d'effets rebond qui entravent encore l'éco-efficacité.

On a tendance à l'oublier mais la majeure partie de notre consommation de matière première nécessite que des pays se spécialisent dans l'extraction de ces ressources. Or, un nombre important de ces pays affichent une santé économique moins bonne que les pays non dotés en ressources. [Audrey Aknin](#) (chapitre 8) montre quels sont les principaux facteurs qui contribuent à cette malédiction des ressources. Loin du simple paradoxe de l'abondance, la malédiction des ressources s'enracine dans une variété de canaux comme le syndrome hollandais, l'augmentation des comportements de recherche de rente, l'échec des organisations, les dysfonctionnements institutionnels, la corruption et les guerres civiles. Le chapitre donne également un aperçu de l'échec récurrent des différents outils soutenus par les organisations internationales pour contenir ces phénomènes. L'auteure conclut avec quelques exemples de pays qui ont évité avec succès la malédiction des ressources et les options qui sont maintenant privilégiées.

La hausse de l'offre en ressources minérales est aussi confrontée à des enjeux sociaux et juridiques. Ainsi, [Victoire Girard](#) et [Agnès Zabsonré](#) (chapitre 9) démontrent que l'exploitation des ressources naturelles peut apporter une contribution majeure au processus de croissance économique et de développement, et qu'une part importante de la population des pays à bas revenus dépend de l'exploitation de ressources minérales à travers les mines artisanales. L'impact de cette exploitation est une question controversée, menant à une malédiction des ressources dans certains cas, ou à des avantages économiques dans d'autres. L'exploitation minière industrielle peut certes avoir certains impacts économiques locaux positifs, selon la qualité de la gouvernance des institutions locales et leur capacité à créer des retombées économiques sur les industries connexes. Cependant, l'exploitation minière artisanale semble, elle, avoir un effet positif plus important sur la consommation, les revenus et le bien-être de la population locale. Les impacts à long terme sur le bien-être, comme sur la santé, par la pollution locale, sont plus incertains et devraient être mieux documentés par de nouvelles recherches.

Dans le [second volume](#), [Emmanuel Hache](#) et ses [co-auteurs](#) (chapitre 1) reviennent sur les approches de criticité récemment déployées pour analyser le risque nouveau suscité par l'envolée des besoins en matières premières pour la transition énergétique. Leur survol des études les conduit à questionner l'absence de cadre théorique homogène et à souligner les faiblesses des indicateurs actuels (HHI, *World Governance Index*) notamment en ce qui concerne les aspects géopolitiques. Si les tentatives de cartellisation des matières premières ont toutes échoué par le passé (à l'exception peut être de l'OPEP), cette crainte refait surface aujourd'hui compte tenu de l'importante concentration des marchés de métaux relatifs au pétrole. Les chercheurs montrent ce qu'il en est vraiment pour le lithium, le cobalt, le cuivre et les terres rares. Finalement, les auteurs discutent de l'intérêt des différentes formes de politiques publiques pour gérer le risque d'approvisionnement en matières premières.

Nous verrons également que plus de ressources minérales, c'est aussi plus d'extraction. Or, l'ouverture de nouveaux gisements selon leur localisation ne va pas sans poser des problèmes juridiques. [Stéphanie Reiche-de Vigan](#) (chapitre 2) propose de revoir les différents régimes juridiques affectant les ressources minérales. Elle aborde les questions liées au droit interne des ressources minérales territoriales à travers les cas français et américain. La question de l'exploitation des ressources minérales se pose différemment en droit international, selon qu'il s'agit de ressources territoriales (dans le cas des fonds marins du plateau continental) ou extraterritoriales (fonds marins des eaux internationales et de l'Antarctique). Elle explique que les régimes juridiques actuels sont insuffisants, souvent tronqués et ne garantissent pas le respect de tous les aspects du développement durable.

Finalement, [Michel Deshaies](#) (chapitre 3) retrace comment la présence de ressources minérales influe sur l'évolution des mécanismes de peuplement à travers l'histoire. En particulier, l'auteur montre que les mécanismes de peuplement présentent des disparités historiques, régionales et matérielles (différence entre gisements métalliques et gisements de charbon). Il remarque aussi que les territoires où s'exercent des activités minières doivent surmonter plusieurs obstacles tels que des conflits récurrents avec les populations locales mais aussi d'énormes défis de reconversion pour la période post-minière.

Dans une troisième problématique, nous proposons d'explorer les grands leviers d'action souvent perçus comme des réponses, ou des éléments de réponse, aux défis évoqués précédemment : l'extraction minière domestique, la substitution, le découplage (ou efficacité matérielle), le recyclage et la sobriété associée au *low-tech*.

Pour commencer, [Johan Yans](#) (chapitre 4) discute de l'intérêt de l'extraction domestique sur le sol européen. Bien que celle-ci soit encore d'actualité en Europe, la production issue des pays européens ayant conservé ou développé une offre minière demeure marginale relativement à leurs besoins. Ceci se traduit inévitablement par une dépendance importante des industries européennes aux importations de ressources minérales. Comme le rappelle l'auteur, il existe pourtant des gains inhérents à l'extraction domestique de ressources existantes et bien caractérisées : des gains environnementaux liés aux circuits courts, la stimulation de l'emploi local et la substitution d'importations parfois extraites dans des conditions désastreuses. Néanmoins, des obstacles importants subsistent comme un déficit de compétences métiers (après des formations tombées en désuétude depuis les années 1990) et surtout une opposition locale générée par une perception citoyenne souvent négative (syndrome NYMBY). Ceci n'est pas une fatalité et l'auteur revient sur les leviers d'action susceptibles d'atténuer ces dissensions.

À travers l'analyse d'un autre levier d'action incontournable, [Florian Fizaine](#) (chapitre 5) se propose d'explorer la théorie standard qui sous-tend la substitution intramatérielle. Il revient notamment sur les notions de courbe de la demande, d'élasticité-prix et d'élasticité-prix croisée de la demande tout en soulignant leurs lacunes et limites lorsqu'on les applique aux ressources minérales. En particulier, il éclaire ce manque en évoquant l'hétérogénéité des situations en fonction des différentes échelles de substitution matérielle. Enfin, il termine en explicitant les multiples contraintes techniques, économiques, socioculturelles et juridiques qui limitent la substitution matérielle.

[Thierry Lefèvre](#) (chapitre 6) revient sur les études empiriques analysant le découplage (dématérialisation) entre le PIB et les différents indicateurs de consommation de matières premières. Il montre que le découplage est au mieux relatif et non absolu

comme le souhaiteraient les organisations internationales promouvant le développement durable et la transition énergétique. Ces indicateurs de découplage laissent également de côté plusieurs questions importantes comme celle des inégalités et de la qualité de vie des populations. Ces autres dimensions doivent être prises en compte à l'avenir pour aboutir à une véritable soutenabilité du développement.

Un peu plus loin, [Alain Geldron](#) (chapitre 7) décrit comment les activités de recyclage ont été progressivement mises en œuvre dans différents pays. Bien qu'elles présentent certaines similitudes, l'exploitation minière traditionnelle et l'exploitation minière urbaine sont différentes en termes de logique et de modèle économique. L'auteur examine ensuite quels sont les principaux facteurs d'efficacité du recyclage à travers ses étapes successives (collecte, transport, etc.). Dans un dernier temps, il revient également sur les contraintes les plus importantes pesant sur le recyclage, qu'elles soient liées à l'étape du recyclage ou au type de métal recyclé.

Finalement, dans un dernier chapitre, [Philippe Bihouix](#) (chapitre 8) fait valoir qu'il est impossible d'atteindre l'économie circulaire totale grâce au recyclage et à la dématérialisation. Par conséquent, il faudrait privilégier la frugalité et une forme particulière d'écoconception : le concept de *low-tech*. Il insiste également sur l'importance du choix d'une bonne échelle pour mettre en œuvre ces dernières, sur le rôle principal de l'Homme dans leur réparabilité et enfin sur la nécessité de poursuivre une nouvelle utopie avec des résultats positifs attendus pour les peuples afin d'atteindre cette transition écologique nécessaire.

Enfin, en conclusion, nous discutons des principaux enseignements établis par ces contributions mais aussi des autres questions qu'elles ont laissées ouvertes. Si les différentes contributions ont permis de déterminer que les limites à la croissance ne résidaient plus dans l'épuisement des ressources minérales et des énergies fossiles mais dans l'impact de leur exploitation sur l'environnement, toutes les solutions proposées ont leurs limites, qu'il s'agisse du progrès technique, du recyclage ou de l'économie circulaire. Il reste alors le recours à une plus grande frugalité dans nos comportements, à la condition que cette frugalité ne soit pas subie par les plus défavorisés. Et en tout état de cause, nous espérons que les éclairages apportés par ce travail collectif en appelleront d'autres, sur le long chemin qui reste à parcourir pour atteindre la soutenabilité.

I.4. Bibliographie

Ashby, M.F. (2013). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, 7^e édition. Butterworth-Heinemann/Elsevier, Oxford.

- Barbier, E.B. (2011). *Scarcity and Frontiers: How Economies Have Developed Through Natural Resource Exploitation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Boubault, A. (2018). La production mondiale d'électricité : une empreinte-matière en transition [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/production-mondiale-deelectricite-empreinte-matiere-en-transition>.
- Delannoy, I. (2017). *L'économie symbiotique : régénérer la planète, l'économie et la société*. Actes Sud, Paris.
- Elshkaki, A., Graedel, T.E. (2013). Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 59, 260–273.
- Fizaine, F. (2013). Byproduct production of minor metals: threat or opportunity for the development of clean technologies? The PV sector as an illustration. *Resources Policy*, 38(3), 373–383.
- Hong, S., Candelone, J.-P., Patterson, C.C., Boutron, C.F. (1996). History of Ancient Copper Smelting Pollution During Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice. *Science*, 272(5259), 246–249.
- Kleijn, R., Van der Voet, E. (2010). Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2784–2795.
- Kleijn, R., Van der Voet, E., Kramer, G.J., Van Oers, L., Van der Giesen, C. (2011). Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy*, 36(9), 5640–5648.
- Lund, P.D. (2007). Upfront resource requirements for large-scale exploitation schemes of new renewable technologies. *Renewable Energy*, 32, 442–458.
- Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J. (2013). The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies. *Energy Policy*, 35, 556–564.
- Mudd, G. (2010). The Environmental Sustainability of Mining in Australia: Key Mega-Trends and Looming Constraints. *Resources Policy*, 35(2), 98–115.
- Northey, S., Haque, N., Mudd, G. (2013). Using Sustainability Reporting to Assess the Environmental Footprint of Copper Mining. *Journal of Cleaner Production*, 40, 118–128.
- Pauli, G. (2011). *L'Économie bleue : 10 ans, 100 innovations, 100 millions d'emplois*. Caillade Publishing, Lyon.
- Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., Johnsson, F. (2012). Material constraints for concentrating solar thermal power. *Energy*, 44, 944–954.

- Smil, V. (2013). *Making the Modern World: Materials and Dematerialization*. Wiley, Hoboken.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347.
- Vidal, O., Goffé, B., Arndt, N. (2013). Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 6, 894–896.
- Virolleaud, C. (1953). Les nouveaux textes alphabétiques de Ras-Shamra (16^e campagne, 1952). *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, 30(3–4), 187–195.
- Yang, C.-J. (2009). An impending platinum crisis and its implications for the future of the automobile. *Energy Policy*, 37, 1805–1808.