

Économie des métaux : un aperçu de la littérature académique

Maylis Peyret*, Frédéric Gonand*

@ 56834

Mots-clés : métaux, durabilité, long terme, pic, épuisement, transition énergétique

Cet article dresse un panorama de la littérature en analyse économique sur la production des matières premières métalliques. Ce panorama permet d'éclairer les différentes façons d'étudier l'épuisement des ressources minérales et la durabilité de la demande mondiale de métaux, dans un contexte de transition énergétique et de transformation numérique, toutes deux intensives en consommation de minerais métalliques. L'article se décompose en cinq sections : 1) le modèle de production d'Hotelling et 2) ses limites, 3) le paradigme du stock fixe et la courbe en cloche à la Hubbert, 4) la Cumulative Availability Curve et 5) les modèles dits de marché. L'article conclut sur la pertinence de chaque approche au regard des enjeux de modélisation de long terme.

Cet article présente et met en perspective un panorama rapide de la littérature en analyse économique sur la production de matières premières métalliques. L'objectif est d'appréhender les principales questions abordées par les économistes depuis un siècle, leur pertinence au vu des données disponibles et les derniers développements de la recherche depuis une vingtaine d'années. L'intérêt du sujet pour la politique économique est significatif : il s'agit de mieux comprendre le fonctionnement d'un marché où la demande est vigoureuse (en lien avec les transitions bas carbone et numérique qui utilisent intensivement des métaux), l'offre inerte (il faut au moins dix ans pour mettre en exploitation une mine de cuivre *greenfield*) donc les prix volatils (d'autant que les stocks sont très limités) alors que le modèle d'affaires est par ailleurs intensif en capital. Une bonne connaissance des comportements de production de métaux primaires constitue ainsi une composante préliminaire des réflexions sur la soutenabilité de la demande actuelle de

métaux liée à la transition bas carbone et l'économie numérique.

Afin de circonscrire notre sujet, nous précisons que cet article suit une démarche d'analyse économique et n'abordera en conséquence pas particulièrement les aspects géopolitiques. Ceci explique par exemple que l'approche suivie s'inscrit dans un cadre d'optimisation de l'emploi de ressources rares et de maximisation de l'utilité intertemporelle, plutôt que dans une approche d'équité intergénérationnelle (encore très minoritaire à ce stade dans la recherche en ce domaine).

Par ailleurs, le plan adopté opère la distinction classique en analyse économique entre le long terme et le court terme, le premier étant défini comme la tendance lourde (ou d'équilibre, ou « filtrée ») autour de laquelle oscillent les variations du second, comme le fait la macroéconomie contemporaine. En l'espèce, les études empiriques disponibles (e.g., [Ulloa, 2015]) permettent de considérer raisonnablement que les

* Université Paris Dauphine-PSL, LEDA-CGEMP.

variations de court terme des prix des métaux n'ont en moyenne pas d'effet sensible sur leurs trajectoires de long terme.

Nous suivons un plan globalement chronologique qui présente les différents aspects et subtilités du schéma d'Hotelling (souvent cité, moins souvent connu dans ses différentes dimensions), son intérêt théorique (1) mais ses limites empiriques (2), l'apport limité des modèles de production dits en cloche (*peak models*) (3) avant de présenter les développements récents de l'approche dite de la *Cumulative Availability Curve* (4) et d'ajouter quelques remarques sur les modèles de marché qui s'intéressent davantage aux fluctuations de court terme de la demande (5).

1. L'analyse d'Hotelling : un cadre théorique riche...

1.1. Une analyse de l'extraction de ressources naturelles dans un cadre intertemporel

Hotelling [1931] étudie le comportement optimal d'un producteur de matières premières. À cette fin, il assimile un site de production de ressources naturelles (hydrocarbures ou minerais métalliques) à un actif dont le rendement doit correspondre à celui des marchés financiers (donc, pour simplifier, au taux d'intérêt de long terme). Par rapport à un actif financier, le gisement de matière première présente toutefois la particularité de ne verser ni intérêt ni dividende. En conséquence, son rendement ne peut qu'être lié à une augmentation du prix de la quantité de matière première extraite. Chez Hotelling, ce prix dépend du comportement d'offre du producteur qui arbitre entre produire aujourd'hui au prix actuel, ou produire demain à un prix plus élevé. Hotelling analyse ainsi l'offre de matières premières dans un cadre dynamique (ou intertemporel).

Le cadre intertemporel du modèle d'Hotelling est riche de plusieurs aspects importants. Il conduit, dans un premier temps, à intégrer dans le raisonnement la notion de coût d'opportunité (souvent, mais improprement, appelée «rente d'Hotelling»). Dans la théorie standard, une

entreprise sur un marché concurrentiel produit jusqu'à ce que le coût marginal de production soit égal au prix de marché. Dans le cas des industries extractives, Hotelling remarque qu'à ce coût de production il convient d'ajouter un coût d'opportunité associé au fait suivant : produire une unité supplémentaire aujourd'hui diminue les réserves disponibles de ressources non renouvelables¹ pour le futur, et donc la production future de matières premières. Ce coût d'opportunité est égal à la valeur actualisée nette de la perte de profits futurs due à la production aujourd'hui d'une unité marginale de ressource non renouvelable. Cette perte reflète soit une baisse du stock de ressources disponibles (comme le pensait Hotelling), soit une dégradation de la qualité des réserves futures (car le contenu en métal des roches extraites tend à diminuer au fil de l'exploitation de la mine)² qui rend donc la ressource plus coûteuse à produire.

En d'autres termes, si les propriétaires de ressources non renouvelables suivent la règle d'Hotelling, c'est-à-dire qu'ils extraient et vendent ces ressources au fil du temps de manière à maximiser leur valeur présente nette au regard du taux d'intérêt, alors ils extrairont plus rapidement la ressource lorsque le prix augmente (en raison de sa raréfaction ou d'une dégradation de la qualité des réserves futures) et laisseront moins de ressources pour l'avenir.

On remarque notamment que la demande n'est pas prise en compte dans la modélisation intertemporelle à la Hotelling : le producteur observe un prix au regard des conditions de marché (stock de matières premières et taux d'actualisation) et ajuste son rythme d'extraction au regard de ces paramètres, et eux seuls. Cette approche se justifie par l'hypothèse selon laquelle les fluctuations de marché au court terme (liées à l'interaction entre offre et demande) n'affectent pas sensiblement la valeur nette de la ressource au long cours (voir section 5). La version standard du modèle d'Hotelling suppose aussi un coût d'extraction fixe, et une absence de progrès technique d'extraction, hypothèses sur lesquelles nous reviendrons.

Toutes ces intuitions peuvent être mises en forme de façon sommaire mais suggestive. Soit y le stock de matières premières, y_t la production de ressources à une année t , $G(y_t)$ la valeur actualisée nette des profits liés à l'extraction sur l'ensemble de la vie de la mine, p_t le profit marginal (égal au prix de marché diminué du coût d'opportunité mentionné au paragraphe précédent et des coûts d'extraction) à l'année t et γ le taux d'actualisation privé (supposé en première approximation égal au taux d'intérêt de long terme). Le modèle d'Hotelling repose en outre sur plusieurs hypothèses majeures : a) le stock complet de la ressource est entièrement connu dès le départ; b) les coûts marginaux d'extraction sont constants; c) le marché est parfaitement concurrentiel (*i.e.*, les producteurs sont *price takers*); d) les coûts de stockage sont négligeables, de sorte que la ressource extraite est immédiatement vendue sur le marché.

Chez Hotelling, le producteur minier cherche à maximiser son profit intertemporel :

$$G(y_t) = \sum_{t=0}^T \frac{p_t y_t}{(1+\gamma)^t}$$

sous la contrainte d'épuisement de la ressource

$$\sum_{t=0}^T y_t = \bar{y}.$$

C'est cette contrainte qui fait toute la singularité du producteur de matière première chez Hotelling, elle matérialise le principe évoqué *supra* selon lequel extraire plus aujourd'hui implique d'extraire moins demain. Un calcul de Lagrangien sommaire permet d'obtenir la condition de maximisation du profit pour le producteur de ressources non renouvelables :

$$p_t = p_0(1+\gamma)^t$$

Cette formule, qui repose sur d'assez nombreuses hypothèses implicites sur lesquelles nous allons revenir, signifie que le producteur de ressources minières va définir sa trajectoire de production de sorte que son profit net (égal au prix de marché diminué des coûts d'extraction et du coût d'opportunité lié à la baisse du stock futur disponible comme évoqué *supra*) augmente à

un taux égal au taux d'intérêt, d'année en année. Telle est la condition d'optimalité de son profit et du rendement de son investissement.

En d'autres termes, quand le stock de matière première à produire est connu et fixe, le sentier d'extraction optimal du point de vue de l'utilité intertemporelle implique, chez Hotelling, que les producteurs soient indifférents entre extraire la ressource ou la laisser dans le sol, au regard de l'appréciation attendue de la valeur de cette ressource.

Si les coûts d'opportunité et d'extraction sont constants, alors le producteur n'extraira de minerai que si le prix de marché augmente à un taux au moins égal au taux d'intérêt : c'est la règle d'Hotelling dans sa version la plus simple. Il s'agit, dans la littérature anglo-saxonne, de la *r-percent rule* (où le taux d'actualisation privé est assimilé au taux d'intérêt de long terme r). L'intuition est que le profit actualisé d'une unité de ressource extraite du sol doit être la même dans toutes les périodes : il n'y a alors pas de gain à déplacer l'extraction d'une période à l'autre. Pour que la valeur actuelle du prix net du coût d'extraction soit la même à toutes les périodes, la valeur non actualisée doit croître précisément à un taux égal au taux d'intérêt. Dans ce schéma, si la demande *ex ante* est stable d'une année sur l'autre, la production diminue de façon monotone au fil du temps.

Quelques remarques sont d'ores et déjà utiles sur ce modèle simple mais riche d'intuitions.

Le raisonnement d'Hotelling est un raisonnement d'économiste car le prix y joue un rôle qui influence directement les décisions des agents. Le modèle permet de tenir compte des effets du progrès technique qui diminue les coûts d'extraction (qui modifient p_t) ou augmente le stock y de minerai économiquement exploitable (nous y reviendrons). Le modèle soulève la question d'une éventuelle différence entre le taux d'actualisation de l'entreprise (γ) et le taux d'escompte de la société. Il reflète les spécificités du secteur de l'extraction (à la fois parce que p_t tient compte

du coût d'opportunité et parce que la production totale est plafonnée à y).

Le modèle tient aussi compte de la notion de coût d'opportunité de la production d'une ressource renouvelable, qui dépend — par définition (cf. *supra*) — du choix du niveau de production à l'instant t . C'est l'existence de ce coût d'opportunité que le prix de marché doit couvrir en sus du coût marginal d'extraction qui explique que le prix de la matière première échangée sera toujours supérieur au coût marginal d'extraction. Hotelling en conclut à l'absence de risque de surexploitation des ressources minières : un prix plus élevé que le coût marginal de production implique une demande plus faible que celle d'un marché standard où l'équilibre est atteint pour un prix égal au seul coût marginal de production.

En termes de profil de production, Hotelling prévoit une trajectoire en cloche asymétrique, avec une accélération de la production jusqu'à un maximum rapidement atteint, puis une diminution du rythme de production. Une éventuelle interception entre cette courbe et l'axe des abscisses n'est pas explicitée, mais peut être déduite de l'hypothèse d'existence d'un horizon temporel fini T , à l'issue duquel la ressource sera totalement épuisée.

1.2. Une attention renouvelée des économistes dans les années 1970 et 1980

Dans le sillage de l'article remarquable de Solow [1974] sur Hotelling, de nombreuses contributions ont vu le jour dans les années qui suivirent (e.g., [Levhari et Liviatan, 1977; Dasgupta et Heal, 1979; Devarajan et Fisher, 1981; Farzin, 1984; Farzin, 1992]). Comme dans l'ensemble de cet article introductif, nous ne prétendons pas ici à l'exhaustivité. Pour simplifier, nous présenterons des extensions du modèle de base suivant trois thématiques : la dynamique des coûts d'extraction, la prise en compte de l'incertitude, et la prise en compte du risque dans le taux d'actualisation.

Les coûts d'extraction

A priori, les coûts d'extraction marginaux diminuent en cas de progrès technologique, ce qui augmente le profit marginal net p_t dans le modèle d'Hotelling — égal au prix de marché diminué du coût d'opportunité et des coûts d'extraction. Une nouvelle technologie d'extraction plus performante allège la structure de coût d'une industrie minière. Par exemple, Schmitz [2005] étudie l'augmentation de la productivité totale des facteurs dans l'industrie du minerai de fer au Canada et aux États-Unis, et estime qu'elle a augmenté de 51 % sur la période assez courte de 1981 à 1995.

La dynamique des coûts dans le secteur des métaux est en réalité plus complexe. Slade [1982] et Gaudet [2007] rappellent que le contenu en métal des roches extraites tend à diminuer graduellement en cours d'exploitation. Au fur et à mesure que le stock de production historique s'accumule, les minerais de qualité supérieure s'épuisent et le producteur a recours à des minerais de qualité inférieure. L'hypothèse implicite est que les minerais de meilleure qualité sont épuisés en premier : c'est ici que l'on retrouve la notion géologique d'épuisement (*depletion*).

Pour autant, à court terme, le déclin de la concentration en métal des roches extraites n'est pas exclusivement lié au phénomène d'épuisement. West [2011] dénote trois mécanismes spécifiques à l'industrie minière (par opposition aux autres industries extractives de ressources non renouvelables) : a) le progrès technologique, dont le taux est significativement élevé pour les technologies extractives de métaux, rend accessibles des gisements auparavant subéconomiques ; b) une orientation moyenne de l'industrie vers des technologies d'extraction « *high volume, lower cost* », qui permettent une meilleure extraction des minerais pour un volume de roche donné ; c) la meilleure rentabilité des projets d'extension de mines déjà existantes, par rapport à l'ouverture de nouvelles mines.

À cet égard, Mudd [2007] mène une étude sur l'exploitation cuprifère en Australie depuis ses débuts, et en déduit notamment que « la baisse

massive des teneurs en minerai de cuivre n'est pas due à l'épuisement des gisements de qualité supérieure, et n'a donc pas résulté en une hausse des prix du cuivre. Elle est au contraire le résultat direct de l'innovation, qui a permis de transformer en minerai de valeur des quantités massives de roches "stériles" (*waste*) auparavant sans valeur.»

Cela dit, à long terme, la diminution du contenu en métal des roches extraites tend à peser sur les coûts d'extraction marginaux, et donc à alourdir la structure de coût à mesure que la production passée cumulée augmente. Ce résultat a été démontré de manière rigoureuse dans un certain nombre d'études précoces sur l'épuisement optimal de gisements de différentes qualités [Herfindahl, 1967; Heal, 1976; Solow et Wan, 1976; Weitzman, 1976; Hartwick, 1978]. Ce mécanisme géologique contrarie les effets économiques favorables du progrès technologique. À titre indicatif, les mines de cuivre au début du xx^e siècle exploitaient des roches contenant environ 4 % de minerai de cuivre, alors que les roches actuellement extraites en contiennent moins de 1 %. Dans son modèle théorique examinant les prix mondiaux du nickel, Stollery [1983] affirme que la réduction de la qualité du minerai représente un déterminant important du prix et que la validité du modèle de base d'Hotelling s'améliore considérablement en assouplissant l'hypothèse d'un stock de réserve de qualité homogène.

Des études empiriques sont requises pour calculer l'effet net sur les coûts et les prix de ces deux mécanismes de signe opposé. Lasserre et Ouellette [1988] étudient leur effet dans le secteur d'extraction de l'amianté au Canada entre 1953 et 1982. Ils suggèrent que l'augmentation de la productivité des seules techniques d'extraction a été de 76 % sur la période, mais partiellement compensée par une perte de productivité liée à la baisse de contenu des roches en métal (*depletion*), amenant les gains de productivité globaux du secteur à 13 % sur la période.

Les ordres de grandeur sont très variables selon les études empiriques. Dans leur étude sur les coûts d'extraction d'un groupe de matières premières (agricoles, minérales, sylvestres et

piscicoles) sur 1870-1957, Barnett et Morse [1963] observent une diminution nette sensible des coûts d'extraction du secteur des minéraux (-78 % sur la période).

Les dynamiques relatives à ces deux effets (progrès technique vs *depletion*) peuvent aussi être différentes selon le stade d'exploitation d'un site minier. Slade [1982] étudie l'évolution des principaux métaux et combustibles fossiles³ entre 1870 et 1978 et suggère que presque toutes ces matières premières présentent sur long terme une trajectoire de prix en U. Selon cet auteur, le progrès technique prédomine en début d'exploitation et pèse sur les coûts et les prix, avant d'être plus que compensé par l'effet défavorable de la réduction de la qualité du minerai et les augmentations de prix associées.

Dans son étude sur les prix du cuivre de 1910 à 1996, Buñuel [2002] arrive à une conclusion un peu différente sur les influences respectives des deux facteurs. Selon cet auteur, l'effet du progrès technique a dominé jusqu'à la fin des années 1930 et donc conduit à une baisse des prix réels, avant une inversion de tendance sur la période 1938-1976, avant un nouveau mouvement de repli sensible des prix réels dans les années 1980.

La prise en compte de l'incertitude

L'activité d'exploration minière est par nature risquée : un forage coûte cher et peut ne donner aucun résultat probant. À titre illustratif, un forage de prospection dans le secteur du pétrole coûte *a minima* 100 M\$ potentiellement dépensés à perte si aucun gisement significatif n'est découvert. Les acteurs d'une industrie peuvent adopter un comportement stratégique qui attend qu'un concurrent effectue à ses frais un investissement d'exploration, révèle ainsi une information publique sur la localisation de gisements, pour décider ensuite s'ils vont concentrer ou non leurs efforts sur la zone. Dans ce contexte, l'investissement en exploration minière risque d'être sous-optimal [Peterson, 1975; Stiglitz, 1975] à cause de ces problèmes d'information.

Au-delà des questions informationnelles, une source d'incertitude importante concerne la quantité de réserves métalliques effectivement disponible sur un site (ou dans le monde entier) et ses conséquences dans un modèle de type Hotelling. Gilbert [1979], Heal [1976] et Loury [1978] se sont penchés sur les caractéristiques des trajectoires d'extraction en cas d'incertitude sur les réserves. L'intuition globale est ici que le producteur adopte une trajectoire d'extraction plus conservatrice car il souhaite éviter un épuisement inattendu et précoce de sa ressource. En d'autres termes, si la ressource métallique est de qualité uniforme, de taille fixe mais inconnue, alors le propriétaire l'épuisera à un rythme plus lent que s'il connaît avec certitude la taille du stock disponible. Pindyck [1980] développe un modèle d'Hotelling élargi qui inclut l'exploration comme un moyen de réduire l'incertitude et aussi d'accumulation de réserves. Sous l'hypothèse de coûts d'extraction constants et d'entreprises risquoneutres, il suggère que l'incertitude des réserves n'affecte pas la dynamique des prix attendus et la règle du pourcentage r d'Hotelling [1931] s'applique toujours. Mais si les coûts d'extraction sont fonction du niveau des réserves, alors l'incertitude des réserves affecte le profil de variation des prix. En effet, Pindyck montre qu'une diminution soudaine du niveau des réserves entraîne une hausse des coûts d'extraction plus importante, en valeur absolue, que la baisse des coûts liée à une augmentation du même ordre du niveau des réserves (via la découverte d'un nouveau gisement par exemple). Ainsi, le producteur est incité à accélérer le rythme de production en vue de réduire l'augmentation globale des coûts liée à l'incertitude des réserves. Par conséquent, le prix de la ressource est plus bas au début de l'activité extractive et croît plus vite au cours de celle-ci.

L'analyse économique des années 1980 a rapidement suggéré que le profil de production de minerai est sans doute moins simple que la décroissance progressive imaginée par Hotelling. Si d'autres réserves de la ressource considérée existent quelque part, la pression à la hausse sur le prix causée par la raréfaction tel qu'envisagé par Hotelling se traduira par une incitation accrue à explorer et à essayer de trouver de nouveaux

gisements. En supposant qu'une partie de cette exploration soit couronnée de succès, l'augmentation de l'offre fera baisser les prix et prolongera la trajectoire des prix d'Hotelling.

Ainsi, plutôt qu'un ensemble fini et fixe de réserves s'épuisant au fil du temps (comme avec Hotelling), Pindyck [1978b] considère que les réserves sont créées et épuisées par des producteurs confrontés à des incitations économiques. Les producteurs ne sont pas «dotés» de réserves, mais doivent les développer par le biais du processus d'exploration. L'épuisement est traité en supposant que les ajouts de réserves («découvertes») résultant de l'activité exploratoire diminuent au fur et à mesure que les découvertes cumulées augmentent. Pindyck souligne que les «réserves potentielles» sont illimitées, mais qu'à mesure que l'épuisement se produit, les activités exploratoires répétées aboutissent à des découvertes de plus en plus réduites. Compte tenu de ces contraintes, les producteurs de ressources doivent déterminer simultanément leurs taux optimaux d'activité exploratoire et de production (et donc d'épuisement).

Pindyck [1978b] en déduit la stratégie optimale intertemporelle d'exploration-production pour les marchés concurrentiels et les marchés monopolistiques. Au début, la production augmente à mesure que les réserves augmentent par l'effort d'exploration, puis la production diminue à mesure que l'activité d'exploration — et le taux de découverte — chute. Les paramètres clés de cet arbitrage sont le niveau de réserves initial et le taux d'épuisement de la ressource. Si la dotation initiale en réserves est faible, le profil des prix sera en forme de U, plutôt que d'augmenter régulièrement comme dans le modèle d'Hotelling. Cela explique en partie le fait que les prix réels de nombreuses ressources non renouvelables ont baissé au fil des ans. Par exemple, la baisse du prix réel de la bauxite avant la cartellisation du marché mondial de la bauxite peut être attribuée aux augmentations significatives des réserves prouvées de ces ressources qui ont permis à la production d'augmenter régulièrement. À un stade plus tardif de l'exploitation des ressources (ou dès le début, si la dotation initiale

en ressources est importante), le prix augmentera à un taux constant au fil du temps, tel que prévu par Hotelling. Toutefois, l'activité exploratoire réduira le taux d'augmentation du prix.

Le taux d'intérêt et la prime de risque

Le modèle d'Hotelling fait jouer un rôle important au taux d'actualisation (γ). Le taux d'intérêt γ utilisé dans le modèle de base du modèle d'Hotelling peut être modifié pour être ajusté d'une prime de risque : $\gamma_{ra} > \gamma$ (cf. [Copeland et al., 2005, p.157]). Young et Ryan [1996] ont élargi le modèle d'Hotelling en ce qui concerne le risque, et leur étude de diverses matières premières métalliques a établi des primes de risque positives pour le cuivre et le zinc. Dans ce cas, la trajectoire des prix est plus pentue que dans le scénario original. Plus le niveau de risque opérationnel est élevé, plus la pente de la trajectoire des prix sera positive et élevée.

Par ailleurs, Gaugler [2015] suggère qu'une hausse des taux d'intérêt peut déclencher un ajustement ponctuel supplémentaire du prix à la hausse. L'intuition est que la hausse des taux d'intérêt entraîne une augmentation du coût du capital : l'activité des mines dont la valeur actuelle nette n'est pas positive après l'augmentation des taux d'intérêt est mise en péril, et par conséquent, un saut de prix est observé. Le raisonnement pourrait être revisité aujourd'hui alors que les pays occidentaux enregistrent le resserrement monétaire le plus important et rapide des quarante dernières années.

2. ... mais dont la portée empirique est souvent limitée

À tort ou à raison, la postérité a retenu d'Hotelling l'idée qu'un producteur de matière première non renouvelable et disponible en quantité finie tend à préserver la ressource disponible à l'avenir et restreint son offre pour augmenter le prix et maximiser son profit intertemporel.

Le lecteur a sans doute déjà compris à ce stade que, si les hypothèses de base d'Hotelling sont levées (réserves fixes, absence de progrès

technique, pas d'incertitude...), alors les prédictions empiriques du modèle pour la dynamique du prix deviennent hétérogènes voire, selon les cas et les hypothèses, divergentes.

De fait, les études empiriques qui testent la règle d'Hotelling sur des données réelles n'ont pas fait émerger de consensus à ce jour. McRae [1978] qui examine les prix de cinq minerais⁴ sur 1922-1974 conclut plutôt à une évolution des prix proche d'une marche aléatoire. Smith [1979] sur la période 1900-1973 indique une tendance globalement baissière des prix dans l'ensemble de l'industrie extractive, ainsi que, individuellement, pour l'industrie agricole et minière. Lee et al. [2006] évoquent quant à eux, sur 1870-1990, une trajectoire de prix de matières premières non renouvelables⁵ « stationnaire autour d'une tendance déterministe avec des ruptures structurelles », ce qui ne fait qu'assez moyennement avancer la réflexion. Gaudet [2007] analyse l'évolution des prix de ressources minérales⁶ au cours du xx^e siècle, pour conclure que leur taux de variation est approximativement centré sur zéro, et non sur le taux d'intérêt. Livernois [2009] passe en revue 34 études empiriques sur la règle d'Hotelling et a conclu que les données ne permettent pas de valider la règle de façon claire. D'autres tests empiriques récents sur des aspects spécifiques du modèle d'Hotelling, ou sur des extensions élémentaires du modèle de base, aboutissent à la même conclusion (cf. [Hart et Spiro, 2011; Gaugler, 2015; Atewamba et Nkuiya, 2017; Karp, 2017]). Farrow [1985], Heal et Barrow [1981], Tilton [1999] et Cuddington [2000] ne trouvent pas non plus de confirmation de l'hypothèse d'augmentation du prix des ressources, qui sous-tend le modèle d'Hotelling. L'applicabilité du modèle d'Hotelling aux données réelles soulève ainsi des difficultés significatives (cf. [Svedberg et Tilton, 2006]).

Les études empiriques peuvent en particulier être sensibles au traitement des séries de prix réels (ou déflatés de l'inflation) des matières premières. Svedberg et Tilton [2006] examinent les prix du cuivre avec des déflateurs ajustés afin d'éliminer certains biais de l'indice des prix à la production américain ou d'autres déflateurs de

prix standard, dont des recherches récentes ont suggéré qu'ils surestiment l'inflation. Ces auteurs constatent que la tendance des prix des matières premières, significativement baissière quand le déflateur n'est pas ajusté, ne montre plus de tendance nette — voire devient tendancielle hausse — quand le déflateur est ajusté. De là à voir une confirmation empirique du modèle d'Hotelling, le pas à franchir est encore important. Berck et Roberts [1996] démontrent que la modélisation des séries de prix à l'aide de modèles *trend-stationary* prédit une forte augmentation du prix des ressources, dans le sens de la théorie d'Hotelling qui prévoit une hausse de la rente d'extraction au cours du temps. En revanche, la modélisation des mêmes séries mais avec des modèles de différenciation temporelle ne permet pas de prédire une hausse des prix de la ressource au long terme avec autant de certitude.

En fin de compte, de nombreuses études empiriques, utilisant des techniques économétriques modernes, n'ont pas réussi à détecter de tendance à la hausse statistiquement significative dans le prix réel à long terme des matières premières minérales (cf. [Krautkraemer, 1998]). Dans le passé, abstraction faite des fluctuations de court terme, le prix des matières premières minérales est globalement demeuré plus ou moins constant, voire s'est tassé en termes réels, depuis le milieu du XIX^e siècle [Tilton et Guzman, 2016]. L'explication habituelle est que les nouvelles technologies, la découverte de nouveaux gisements, le recyclage et d'autres forces ont plus que compensé les coûts de l'épuisement au fil du temps (*depletion*).

Une branche parallèle de la recherche empirique s'est développée ces dernières années : elle étudie la validité de la règle d'Hotelling dans un contexte où les producteurs de matières premières sont davantage *price-makers* que *price-takers*, c'est-à-dire que leur comportement d'offre définit les prix, plus que les prix ne définissent leur comportement d'offre comme c'est le cas dans un marché standard. Empiriquement, il s'agit d'un problème de causalité que seules des méthodes statistiques récentes permettent d'étudier (VAR, test de causalité de Granger : cf.

[Ahumada et Cornejo, 2014; Chai et al., 2011; Klotz et al., 2014; Papiez et al., 2014]).

Si la littérature sur les prix des hydrocarbures est abondante, elle est plus restreinte en ce qui concerne les métaux. Stuermer [2018] et Jacks et Stuermer [2020] étudient les prix de quatre métaux (cuivre, plomb, étain et zinc) entre 1870 et 2013. Ces études suggèrent que seuls les comportements des offreurs de cuivre et d'étain exerceraient une influence significative sur le prix de marché, et à long terme.

En outre, ces articles soulignent le poids du niveau de demande — qui n'est pas considérée par la théorie d'Hotelling — dans la formation du prix de marché, avec pour exemple central le boom économique chinois qui a fortement tiré à la hausse les prix de l'ensemble des commodités métalliques. Ces nouvelles considérations sont abordées en section 5.

3. Les *peak models*, une démarche plus empirique mais sans base théorique ni gain prédictif

3.1. La démarche d'Hubbert (1956)

M. King Hubbert, géologue chez Shell dans les années 1950, a rédigé pour une conférence au Texas un document intitulé «Nuclear energy and the fossil fuels» dont la conclusion était que le nucléaire est seul en mesure d'assurer la durabilité (*sustainability*) de la demande mondiale d'énergie, et qu'il convient donc de le substituer aux ressources fossiles.

Ce papier, très souvent cité mais plus rarement lu, ne repose sur aucun fondement théorique, ce qui n'est pas une critique mais un constat. Hubbert constate qu'entre le milieu du XIX^e siècle et le milieu du XX^e siècle, le taux de croissance de la production de charbon et de pétrole aux États-Unis tend à décliner au cours du temps. Plus précisément, il constate que le profil sur longue période de production de pétrole brut dans l'Ohio et l'Illinois présente approximativement un profil en cloche sur cette période, avec

un pic de production suivi d'un ralentissement ultérieur rapide.

Hubbert, qui fait systématiquement l'hypothèse de stabilité des ressources disponibles, généralise et considère que le profil en cloche est une donnée naturelle de l'extraction minière.

Dès lors, son travail consiste exclusivement à estimer, sur la base du rythme actuel de production et de la taille estimée des réserves, le pic de production et plus encore la date d'épuisement des ressources minérales associée. L'effort de réflexion porte exclusivement sur l'estimation des réserves disponibles. À aucun moment n'interviennent dans la réflexion le coût d'extraction, le prix, le risque, la qualité des roches, le progrès technique...

Si le modèle d'Hotteling ne manquait pas de riches intuitions théoriques mais souffrait d'une confrontation peu conclusive avec données réelles, la démarche d'Hubbert repose, à l'inverse, sur quelques cas concrets, une généralisation *a minima* un peu douteuse, et un manque de construction théorique avéré. Dans les deux cas, il faut convenir que l'amateur de méthodologie scientifique rigoureuse reste sur sa faim — et spécialement dans le deuxième cas.

3.2. Les « *peak models* »

À tort ou à raison, les *peak models* — ou modèles de production en cloche de ressources naturelles — qui ont été développés dans le sillage du travail d'Hubbert ont eu un succès relatif dans la littérature. Dans ces modèles n'existe qu'une seule donnée qui définit la production de pointe : les « ressources ultimes récupérables » (en anglais, *Ultimate Recoverable Resources*, ou URR) qui définissent l'ensemble de l'offre au fil du temps. L'URR est une estimation supposée des ressources minérales totales qu'une économie peut récupérer à partir des gisements minéraux, aujourd'hui et à l'avenir [Prior et al., 2012].

Une version plus statistiquement élaborée du *peak model* consiste à utiliser une fonction de production qui ne dépend que des réserves

récupérables (URR) et dont le graphe est en cloche, par exemple :

$$S_t = \frac{URR}{b} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_{peak}}{b} \right)^2}$$

où (S_t) est le niveau de production à l'année t et URR (*Ultimate Recoverable Resource*) l'estimation géologique des réserves naturelles, considérées comme fixes et intangibles (cf. [Calvo et al., 2017]). Il s'agit alors d'estimer économétriquement, sur données réelles, les paramètres b et t_{peak} (l'année du pic de production). Dans ce contexte, le pic de production est atteint pour :

$$S_{t_{peak}} = \frac{URR}{b\sqrt{2\pi}}.$$

Les *peak models* supposent explicitement que les autres déterminants de l'offre (prix, technologie, coûts d'exploration ou de production) ne sont pas pertinents pour étudier l'épuisement à long terme des ressources non renouvelables [Tilton, 2018]. La quantité demandée dans les modèles de pointe n'est pas une variable pertinente tant qu'elle est supérieure ou égale à la production de la fonction de pointe. Cette condition de demande est implicitement garantie par une demande par habitant non décroissante. Toutes ces hypothèses semblent très fortes, et assez peu raisonnables.

En pratique, les *peak models* envisagent différents scénarios d'URR. De fait, la modification de l'URR n'entraîne pas de grands changements dans l'année de pointe t_{peak} [Northey et al., 2014; Sverdrup et al., 2014], ce qui peut fournir une impression de robustesse. Dans le cas des *peak models* appliqués au cuivre, la littérature des quinze dernières années s'accorde sur une pénurie au cours des 20 à 30 prochaines années [Bardi et Pagani, 2007; Prior et al., 2012; Laherrère, 2010; Northey et al., 2014; Sverdrup et al., 2014]⁷ et qui dépend peu de l'hypothèse sur l'URR⁸. Il n'y aurait donc pas grand-chose à gagner à ajouter des composantes dynamiques au modèle en cloche le plus simple [Calvo et al., 2017] et la pénurie nous menacerait donc dans l'ensemble de ces modèles en cloche. Rappelons qu'au début du xx^e fleurissaient des discours relatifs à l'épuisement rapide des ressources minières de cuivre dans le sillage

de la généralisation de l'électricité [Golding et al., 2017, p. 27] — mais le xx^e siècle montre que cette crainte n'a finalement pas eu de fondement réel.

Dans le droit fil de l'approche à la Hubbert, certains auteurs suggèrent que les prix ne donneront pas lieu à de véritables alertes fiables en cas de pénurie absolue de métaux. Ils s'appuient sur le constat que les tendances de prix ne semblent pas différer entre les minéraux abondants et les minéraux rares et que les marchés ne reflètent pas les coûts miniers externes [Henckens et al., 2016]. Selon ces auteurs, les *peak models* pourraient devenir une approche privilégiée pour étudier l'épuisement des ressources minérales grâce à différentes mesures des stocks physiques [Ali et al. 2017; Calvo et al., 2017; Northey et al., 2014; Prior et al., 2012]. Par exemple, Ali et al. [2017] suggèrent que l'épuisement des ressources minérales — tel que reflété par la baisse de la production — pourrait intervenir rapidement.

3.3. Des critiques sérieuses

Les critiques des modèles de pointe ont été largement débattues par les partisans d'une prise en compte des coûts d'extraction et du coût d'opportunité comme le suggère un cadre à la Hotelling :

- Une première critique est que ces modèles confondent souvent disponibilité géologique et disponibilité économique. L'incertitude des stocks géologiques économiquement disponibles est un fait. Pourtant, elle n'affecte pas le comportement des agents dans les *peak models* qui considèrent les réserves et les ressources comme des stocks fixes [May et al., 2012; Meinert et al., 2016; Wellmer et Scholz, 2018].
- Par ailleurs, les *peak models* ne tiennent pas compte de l'effet de la technologie qui augmente la disponibilité économique des réserves, des ressources et des gisements non découverts [Kharitonova et al., 2013].
- Les *peak models* ne tiennent souvent pas compte du fait que l'intensité d'utilisation des matériaux métalliques diminue à mesure que

les pays se développent [Criqui, 2013; Crowson, 2011; Ericsson et Söderholm, 2013].

Tout bien considéré, il est possible de craindre avec Tilton [2018] que les hypothèses des modèles de pointe soient très discutables et sans doute biaisées en faveur d'une prévision pessimiste de l'épuisement des ressources minérales métalliques.

En effet, l'utilisation du modèle à la Hubbert a été à l'origine de nombreuses mauvaises estimations quant à un épuisement théorique des ressources minières : Arribas [2007] prévoyait un épuisement des réserves de platine en 2022, alors que ses réserves n'ont baissé que de 2,8 % entre 2007 et 2017, en débit d'un rythme de production de 2000 tonnes par année. Arribas [2017] toujours prévoyait également un risque d'épuisement de l'indium — coproduit du zinc — entre 2012 et 2017, qui n'a pas été observé.

Bardi [2007], chimiste et auteur d'un rapport sur les mines pour le Club de Rome en 2013, annonçait un «net» pic de production pour onze minerais⁹ sur les cinquante-sept étudiés. Par exemple, Bardi jugeait que la production de gallium avait plafonné en 2002, à environ 85 tonnes, alors qu'elle atteignait près de 450 tonnes en 2014. De plus, le potentiel de production de ce métal extrait de la bauxite serait selon certaines estimations d'environ 2100 tonnes par année, bien au-dessus de la demande actuelle.

Enfin, dans le cas du cuivre, on constate que la ressource est abondante et que la réserve se maintient. L'US Geological Survey (USGS, agence géologique américaine) a inventorié en 2018 le ratio réserves/production — exprimé en nombre d'années de consommation (puisque les «réserves» sont *a priori* un stock tandis que la production est un flux annuel) tel que calculé depuis le début du xx^e siècle. En 120 ans de statistiques, ce ratio a toujours été relativement constant, oscillant entre 30 et 50 années de consommation.

L'USGS estime qu'environ 700 millions de tonnes de cuivre ont été extraites dans l'histoire de l'humanité et que les gisements identifiés en

contiennent 2 100 tonnes supplémentaires. Les gisements non encore découverts pourraient représenter 3 500 millions de tonnes de plus. De quoi chasser les mauvais rêves de *peak copper*, nés en 1924 avec Ira Joralemon¹⁰ et notamment partagés par Lahérrere [2010].

4. Un nouveau paradigme? L'approche dite CAC (« *Cumulative Availability Curve* »)

Entre une réflexion à la Hotelling qui emploie des concepts d'analyse économique mais souffre d'un manque clair de confirmation dans les données, et une démarche très empirique à la Hubbert qui n'a pas de fondement théorique ni gain de pouvoir prédictif, une troisième voie est-elle possible?

La courbe de disponibilité cumulée (en anglais *Cumulative Availability Curve* ou CAC) d'une ressource naturelle épuisable est le graphe de la fonction qui relie un prix donné de cette ressource au stock total mondial économiquement exploitable à ce prix. Cette CAC diffère de la traditionnelle courbe d'offre des manuels d'économie qui décrit le flux de biens offerts sur le marché et pour une période donnée (le plus souvent, un an) en fonction du prix. La CAC correspond non à un flux sur une période donnée, mais à un stock mondial disponible pour le futur. Elle montre la quantité totale de ressource naturelle récupérable au sens économique du terme en fonction du niveau de prix [Tilton et Lagos, 2007; Tilton et al., 2018]. Toutefois, comme la courbe d'offre traditionnelle, la courbe de disponibilité cumulée suppose qu'en dehors du prix, tous les autres déterminants de la disponibilité du métal

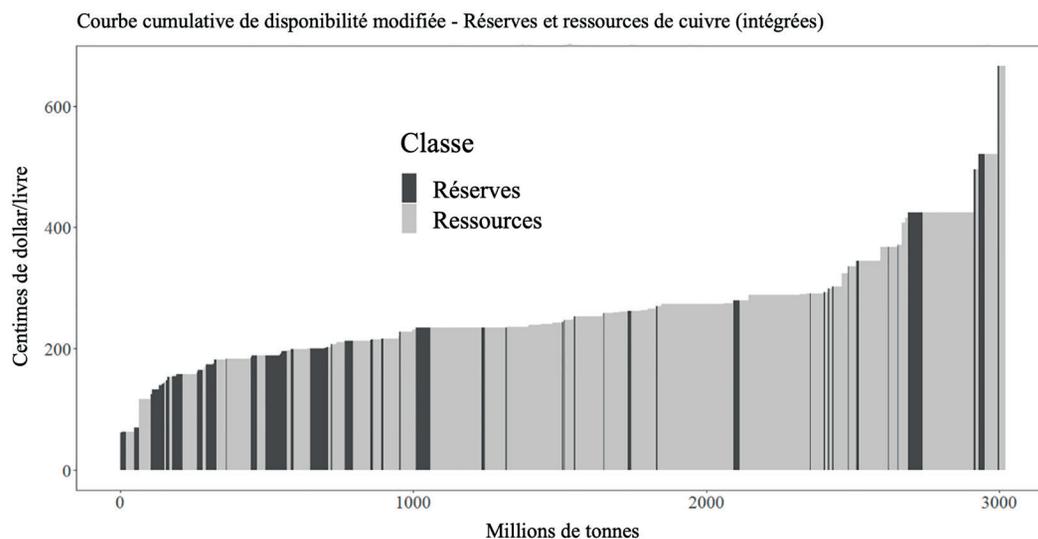


Figure 1. Courbe cumulative de disponibilité estimée par Castillo et Eggert [2020] pour les réserves et ressources de cuivre à partir des données de Mudd et Jowitt [2018]

Source : [Castillo et Eggert, 2020]

L'axe vertical représente les différents coûts d'extraction dans l'ensemble des pays producteurs (unité : centimes de dollars par livre). L'axe horizontal représente la quantité de cuivre contenue dans les gisements connus (unité : millions de tonnes).

Note : les réserves correspondent à la quantité de métal dans le sol qui est à la fois découverte et économiquement exploitable. Les ressources incluent les réserves connues et les réserves potentielles (*i.e.*, découvertes mais actuellement pas encore exploitables à des conditions économiques, ou pas encore précisément découvertes mais possiblement exploitables à des conditions économiques – cf. US Geological Survey).

sont fixes (coûts d'exploration, de production, niveau technologique).

La Figure 1 représente une CAC établie récemment pour le cuivre.

La courbe cumulative de disponibilité est un outil de réflexion, et plus encore de projection, qui s'avère bien utile. Elle permet de distinguer les effets économiques de trois types de facteurs qui influencent la durabilité de la demande mondiale de métal :

- Les variables qui déterminent la forme de la courbe reflètent surtout les phénomènes géologiques (teneur des roches en minerai, profondeur...) qui affectent les coûts futurs d'extraction.
- Les variables qui influencent la vitesse à laquelle la demande mondiale va augmenter et déplacer le point d'équilibre du marché sur la courbe d'offre sont liées à des phénomènes économiques : croissance mondiale par tête, niveau de développement industriel des pays émergents, intensité métallique des transitions bas carbone et des transitions numériques, effet des politiques gouvernementales en faveur du recyclage des métaux...
- Enfin, un troisième groupe de facteurs rassemblent les mécanismes qui conduisent à translater la CAC vers la droite — comme, notamment, le progrès technologique qui réduit les coûts d'extraction et de production des métaux.

Le premier groupe de facteurs définit donc la forme de la courbe, le deuxième la vitesse avec laquelle l'économie mondiale se déplace sur la courbe et le troisième rassemble les facteurs qui translatent la courbe au cours du temps. Les deux premiers groupes reflètent l'effet à la hausse sur les coûts lié à l'épuisement (*depletion*) des ressources naturelles en fonction des conditions géologiques et de la demande mondiale. Le dernier groupe est lié à l'effet baissier du progrès technologique sur les coûts d'extraction. On voit donc que la CAC permet d'intégrer dans

le raisonnement les deux facteurs qu'avait déjà envisagés Hotelling.

La forme de la courbe cumulative de disponibilité de la ressource naturelle peut être plutôt lisse et monotonement croissante, ce qui constitue naturellement un cas de figure relativement favorable à la durabilité de la demande pour la ressource naturelle en question. C'est le cas pour la CAC sur le cuivre, présentée ici. Des raisons existent, toutefois, pour que cette situation favorable ne soit pas systématique.

L'une d'entre elles, assez spécifique aux métaux, est liée à des phénomènes minéralogiques qui impliquent que certains métaux sont des coproduits de la production d'autres métaux principaux. Le cobalt (obtenu surtout à partir de carrollite qui est un sulfure de cuivre), le gallium (contenu dans des minerais d'aluminium), le lithium (contenu dans des silicates complexes) et d'autres sont aujourd'hui souvent coproduits au cours du cycle de production d'autres métaux extraits en quantités plus importantes dans la même mine. En conséquence, une part importante du coût complet d'extraction et de transformation de ces métaux coproduits est supportée et incluse dans le prix de vente des métaux principaux avec lesquels ils sont produits. Si, un jour, la demande mondiale pour ces métaux coproduits excède l'offre disponible issue de la transformation de leurs coproduits principaux, alors ces métaux secondaires devront être produits comme les métaux principaux, ce qui impliquerait une hausse immédiate et sensible de leur coût de production. Graphiquement, la CAC présenterait une discontinuité à la hausse à partir d'un certain niveau de demande mondiale¹¹.

Des courbes de disponibilité cumulée ont été réalisées pour le pétrole [Aguilera et al., 2009], le lithium [Yaksic et Tilton, 2009, p. 190], le thorium [Jordon et al., 2015, pp. 87-89] ou le cuivre [Castillo et Eggert, 2020, pp. 7-8]. Les établir implique de déterminer les coûts de production de certains lieux qui n'ont pas encore été exploités. Cette question n'est pas insurmontable mais requiert un travail empirique soigneux, le cas échéant en retenant un scénario bas et un scénario haut (cf.

[Yaksic, 2008] avec le lithium). Il convient toutefois de rester toujours prudent quant à ces évaluations quantitatives qui requièrent l'emploi de données pas toujours publiques, et donc parfois sujettes à caution quand elles proviennent de producteurs qui n'ont pas toujours intérêt à dévoiler trop d'informations.

La démarche de la CAC est intéressante pour des exercices de prospective sur la durabilité de la demande de métaux. En effet, la forme de la CAC dépend de facteurs géologiques qui ont eu lieu dans le passé — et non pas d'événements qui pourraient ou ne pourraient pas intervenir dans le futur — : elle est donc possible à calculer de façon relativement objective.

Les calculs combinés de CAC et d'évolution de la demande mondiale¹² ont permis d'établir de façon raisonnable — avec la prudence qui s'impose en matière de projections — que la demande mondiale de lithium devrait demeurer soutenable à l'horizon du siècle, même avec des hypothèses optimistes de demande et conservatrices en matière d'offre [Yaksic et Tilton, 2009]. Encore une fois, la prudence reste de mise dans ce genre d'exercice, la géologie et les techniques d'extraction réservant parfois des surprises de taille.

Le paradigme de la CAC pour évaluer la durabilité de la demande mondiale de métaux ne fait pas l'objet d'un consensus complet sur la manière d'évaluer l'épuisement des ressources minérales. Les critiques portent notamment sur les points suivants :

- La capacité des marchés à fournir les signaux nécessaires pour compenser l'épuisement des ressources n'est pas assurée. Des coûts sociaux et environnementaux externes élevés de l'exploitation minière ne sont pas internalisés par les marchés [Segura-Salazar et Tavares, 2018]. Les tendances des prix ne semblent pas signaler l'épuisement des ressources minérales car les trajectoires de prix ne diffèrent pas clairement entre les minéraux géologiquement abondants et les minéraux rares [Henckens et al., 2016].

- D'autres critiques soutiennent que le paradigme du coût d'opportunité pourrait surestimer le rôle de la technologie pour compenser l'épuisement [Gordon et al., 2006; Humphreys, 2013].

Ces critiques soulèvent des points importants mais elles ne nous paraissent pas fondamentales. Plus fondamentales, en revanche, nous semblent deux limites méthodologiques de la méthode de la CAC.

- La première est qu'il s'agit d'une méthode purement comptable — et non économique, *i.e.*, elle n'inclut pas de comportement de maximisation comme le modèle d'Hotelling.
- La seconde est qu'elle constitue une analyse en équilibre partiel et non en équilibre général. L'épuisement progressif des ressources minérales est supposé faire augmenter les prix, freiner la demande, augmenter les solutions de substitution, favoriser le recyclage, encourager de nouvelles sources d'approvisionnement permises par la technologie (nanotubes de carbone...). La méthode de la CAC n'intègre aucun effet de bouclage par les prix où la progression de la demande serait freinée par l'envolée des prix. Or ce canal est potentiellement important pour une analyse de la durabilité de la demande mondiale d'un métal.

5. Les modèles dits « de marché » et les variations de prix à court terme

Les modèles d'Hotelling et Hubbert ainsi que leurs héritiers présentés dans les deux premières sections ne considéraient le plus souvent pas la demande de métal comme facteur explicatif du profil d'évolution du prix de la ressource. Toutefois, des approches analytiques déjà anciennes, réalisées pour l'essentiel par Pindyck, intégraient des mécanismes de demande dans un modèle à la Hotelling. Grâce à de nouveaux outils économétriques et statistiques, la corrélation entre phénomènes de court terme, souvent mais non exclusivement liés à des chocs de demande, et dynamiques de long terme connaît

un regain d'intérêt dans la littérature à partir des années 2000, dans le sillage du rebond sensible des prix des matières premières observé au tournant du siècle.

Ces facteurs ont été étudiés dans une littérature qui se divise en deux branches. La première étudie les cycles de prix en les décomposant en composantes transitoires et permanentes, mais sans déterminer les facteurs explicatifs des prix. En général, cette littérature confirme l'existence de cycles de prix qui affectent l'ensemble des matières premières, alors que des chocs transitoires affectent différemment les différents produits de base. En particulier, les prix des métaux sont sensiblement influencés par des chocs conjoncturels à court terme.

La deuxième branche de la littérature se concentre sur les facteurs déterminants (*drivers*) des prix des matières premières, en décomposant les changements de prix en demande globale, demande spécifique aux matières premières et chocs d'offre spécifiques aux matières premières. La plupart de ces études concernent les prix du pétrole. La littérature sur les déterminants des prix des métaux est moins abondante, mais elle s'accorde davantage sur le fait que la demande globale est le principal déterminant des chocs sur les prix des métaux à court terme.

5.1. Une prise en compte de la demande déjà ancienne dans des modèles à la Hotelling

Pindyck [1980] s'intéresse à l'effet de la prise en compte du niveau de demande et de ses variations sur la validité des conclusions d'Hotelling. À cette fin, il modélise une demande de marché qu'il suppose incertaine, de sorte que la fonction de demande évolue de façon aléatoire, selon un processus stochastique constant dans le temps et où chaque choc est indépendant du précédent. Ainsi, la demande future est entourée d'incertitude et le degré de cette incertitude (variance stochastique) augmente avec l'horizon temporel. Par ailleurs, il suppose que les réserves sont disponibles de manière aléatoire par rapport au niveau actuel, selon un processus stochastique analogue. Par conséquent, les producteurs de ressources

peuvent découvrir que les réserves disponibles pour la production sont plus ou moins importantes que ce qui avait été prévu à l'origine.

Dans un tel contexte où la demande et les réserves disponibles suivent des marches aléatoires, Pindyck [1980] conclut que l'évolution du prix de marché observée sera elle aussi aléatoire. Par conséquent, le lien entre fluctuations de court terme des prix et tendance de long terme serait *a priori* très ténu. C'est ce que les « modèles de marché » développés au cours des dernières années étudient de plus près.

5.2. Modèles de cycles de prix

La recherche sur l'existence de cycles de prix communs à plusieurs groupes de produits de base ne s'est vraiment développée qu'au début des années 2000, dans le sillage de l'envol du prix des matières premières énergétiques de 60 % entre 1998 et 2001. Cette littérature décompose généralement les mouvements de prix en composantes transitoires et permanentes. Cela inclut les cycles à court terme (cycles économiques), les cycles à moyen terme (de 8 à 20 ans) et d'éventuels « supercycles », qui concernent de nombreux produits de base et durent plusieurs décennies. Les cycles à court et moyen terme sont alimentés par des chocs transitoires qui peuvent avoir plusieurs origines : récessions (*e.g.*, crise financière mondiale de 2007-2009), accidents (*e.g.*, accident de Vale au Brésil en 2019 qui a perturbé l'approvisionnement en minerai de fer), conflits ou attaques terroristes.

Pour les métaux, la composante conjoncturelle des chocs représente une part beaucoup plus importante de leur volatilité que pour les autres produits de base : la variance est deux fois plus élevée pour les prix des métaux que pour ceux de l'énergie et des biens agricoles [Baffes et Kabundi, 2023].

5.3. Facteurs explicatifs des prix

La littérature qui étudie les facteurs de chocs des prix des matières premières s'appuie généralement sur l'étude séminale de Kilian [2009] et

son modèle économétrique vectoriel autorégressif structurel (SVAR) avec des restrictions de signe pour identifier l'importance relative des différents facteurs de chocs¹³. En utilisant des données sur les prix, la demande et l'offre de matières premières, les chocs de prix sont décomposés en chocs de demande globale, en chocs d'offre spécifiques aux matières premières et en chocs de demande spécifiques aux matières premières.

Les chocs globaux de la demande mondiale comprennent les récessions mondiales (comme celle associée à la crise financière mondiale de 2008-2009) ou les expansions prononcées liées par exemple à l'industrialisation ou l'urbanisation (e.g., Chine dans les années 2000-2010). Les chocs d'offre spécifiques aux matières premières comprennent les accidents, les grèves, les conflits, les décisions de production des cartels, les politiques gouvernementales et les événements météorologiques.

Les chocs de demande spécifiques aux matières premières sont généralement pris en compte en tant que composante résiduelle du modèle SVAR et reflètent l'influence des stocks (résultant de la constitution de stocks gouvernementaux, des stocks des producteurs et des achats sur le marché), de changements technologiques, de changements des préférences des consommateurs, et des politiques gouvernementales (e.g., taxe carbone).

Stuermer [2018] et Jacks et Stuermer [2020] suggèrent que, dans le cas des métaux et à la différence des hydrocarbures, les chocs de demande globale et les chocs de demande spécifiques aux matières premières jouent un rôle plus sensible que les chocs d'offre, et que leur impact s'est accru au fil du temps.

Au-delà de l'approche VAR, la littérature récente confirme qu'en moyenne, les chocs de demande ont relativement peu d'effet sur la tendance des prix à long terme. Ainsi, Ulloa [2015] montre grâce à des tests de racine unitaire menés sur de nombreuses séries temporelles que, pour le cuivre, les chocs de demande n'affectent que les mouvements de court terme des prix.

De même, Wets et Rios [2015] modélisent les prix du cuivre grâce à un modèle structurel qui sépare les dynamiques de court et de moyen-long terme et concluent en mentionnant que leur approche «devrait être applicable à un large éventail de commodités». Cependant, depuis 2015, aucune étude appliquant le modèle de Wets et Rios [2015] à d'autres métaux n'a vu le jour, probablement par manque de données, que ce soit en termes de longueur des séries temporelles de prix ou de production, ou de fiabilité.

Conclusion

Deux façons principales existent aujourd'hui pour étudier l'épuisement de ressources minérales et la durabilité de la demande mondiale de métaux. Le paradigme du stock fixe retenu par les *peak models* considère que l'offre de minerais métalliques est définie à l'avance et intangible : on en déduit la durée de vie des réserves en fonction des scénarios de demande future. Cette démarche en apparence logique bute en réalité sur des difficultés méthodologiques sérieuses. Elle fait abstraction des prix et des coûts, du progrès technique, du recyclage, et ne considère pas que des réserves physiques effectivement disponibles peuvent ne pas être effectivement exploitables en termes économiques.

L'autre approche de la durabilité de la demande mondiale de métaux privilégie une approche plus économique où les prix jouent un rôle central (approche dite CAC). Elle étudie, en fonction du disponible géologique et de ses conditions économiques d'exploitation, les changements au cours du temps de ce qu'une société est prête à payer pour obtenir une tonne supplémentaire de métal.

Les modèles dits de marchés permettent d'étudier, souvent de façon économétrique, les variations des prix des métaux à court terme, dont les approches théoriques comme statistiques suggèrent que les effets sur les prix à moyen-long terme restent à prouver.

Le futur en ce domaine continuera probablement de refléter d'une part les effets de

l'épuisement des réserves minérales (*depletion*) qui influencent la forme de la courbe CAC et la vitesse de déplacement de l'économie mondiale le long de cette courbe, et d'autre part les effets du progrès technologique qui réduisent les coûts d'extraction. En cela, Hotelling avait eu les bonnes intuitions, mais ne les avait pas forcément modélisées de la manière la plus performante pour étudier la durabilité de la demande de métaux.

NOTES

1. Pindyck [1978b] plaide en faveur du remplacement du mot «épuisable» par «non renouvelable», étant donné que les concepts de réserves et de leur épuisement sont en fin de compte des notions économiques plutôt que géologiques ou physiques. Ici se noue une forte tension entre économistes et géologues dans le mode de raisonnement, et que nous retrouverons plus loin : les premiers considèrent en moyenne davantage que les réserves exploitables en métal primaire ne sont pas tant fixées par la nature que variables en fonction de différents paramètres économiques.

2. Pour quelques références qui traitent de l'ordre d'exploitation des gisements, cf. [Herfindahl, 1967; Hartwick, 1978; Drury, 1982; Hanson, 1980; Cairns et Lasserre, 1985].

3. La classification des métaux comme principaux suit Peterson et Maxwell [1979]. Les combustibles fossiles étudiés sont le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Lorsque les données le permettent, sont étudiés à la fois le minerai et le métal (bauxite et aluminium, par exemple). En outre, Slade [1982] exclut l'or de ce groupe de métaux car pour la majeure partie de la période étudiée, le prix de l'or était lié au dollar. Son prix déflaté est donc proportionnel à l'inverse de l'indice de déflation.

4. Chrome, fer, manganèse, molybdène et tungstène.

5. Aluminium, charbon, cuivre, fer, plomb, gaz naturel, nickel, pétrole, argent, étain et zinc.

6. Cuivre, plomb, zinc, aluminium, étain, nickel et argent.

7. Sverdrup et al. [2014] développent un modèle dynamique mondial complexe qui combine la population, le recyclage, les marchés et l'offre minière. Dans leur modèle,

l'augmentation de la demande après le pic devrait être couverte par l'augmentation des taux de recyclage. Giurco et al. [2012] proposent une évaluation détaillée au niveau de la mine où les décisions de production suivent un profil de production en forme de trapèze au fil du temps. Northey et al. [2014] s'appuient sur la recherche de Giurco et al. [2012], en incluant la teneur en minerai comme principal facteur définissant les gisements qui seront exploités en premier.

8. Les estimations de réserves de cuivre restant à exploiter dans le monde (supposées fixes) varient par exemple de 1,4 Gt [Laherrère, 2010] à 1,8 Gt [Henckens et al., 2014; Northey et al., 2014] et, plus récemment, 2,1 Gt [Calvo et al., 2017].

9. Mercure, tellure, plomb, cadmium, potasse, roche phosphatée, thallium, sélénium, zirconium, rhénium et gallium.

10. "The age of electricity and of copper will be short. At the intense rate of production that must come, the copper supply of the world will last hardly a score of years. [...] Our civilization based on electrical power will dwindle and die", "Copper and electricity to vanish in twenty years?", *Engineering and Mining Journal*, 118 (4): 122. 26 July 1924.

11. Par ailleurs, il n'est théoriquement pas impossible (mais géologiquement à vérifier) que la configuration géologique d'un minerai puisse se traduire par des roches à contenu élevé puis, dans d'autres zones, à contenu faible en minerai, sans qu'il y ait de couches à contenu intermédiaire. Une fois exploitées les mines à taux élevé de métal, on devra exploiter des mines où le contenu en métal sera faible, et donc coûteuses à exploiter, ce qui peut aussi générer un saut à la hausse dans la CAC de la ressource naturelle considérée.

12. La CAC ne fournit aucune indication sur la vitesse avec laquelle l'économie mondiale consomme les stocks disponibles jusqu'à l'épuisement.

13. L'étude initiale de Kilian [2009] porte sur les prix du pétrole.

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilera, R.F., Eggert, R.G., CC, G.L., Tilton, J.E., 2009. Depletion and the future availability of petroleum resources. *The Energy Journal*, 30(1).
- Ahumada, H., Cornejo, M., 2015. Explaining commodity prices by a cointegrated time series-cross section model. *Empirical Economics*, 48(4), pp. 1667-1690.
- Ali, S., Rehman, S.A.U., Cai, Y., Mirjat, N.H., Walasai, G.D., Shah, I.A., 2017. The future of sustainable energy production in Pakistan: A system dynamics-based approach for estimating hubbert peaks. *Energies*, 10(11), p. 1858.
- Atewamba, C., Nkuiya, B., 2017. Testing the assumptions and predictions of the Hotelling model. *Environmental and Resource Economics*, 66(1), pp. 169-203.
- Baffes, J., Kose, M.A., Ohnsorge, F., Stocker, M., 2015. The great plunge in oil prices: Causes, consequences, and policy responses, June 2015.
- Bardi, U., Pagani, M., 2007. Peak minerals. *The Oil Drum*, 15.
- Barnett, H.J., Morse, C., 2013. *Scarcity and growth: The economics of natural resource availability*. Routledge.
- Berck, P., Roberts, M., 1996. Natural resource prices: will they ever turn up?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31(1), pp. 65-78.
- Berndt, Ernst R., 2023. The Contributions of Robert S. Pindyck, MIT Sloan Research Paper No. 6837.
- Calvo, G., Valero, A., Valero, A., 2017. Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, pp. 208-217.
- Castillo, E., Eggert, R., 2020. Reconciling diverging views on mineral depletion: a modified cumulative availability curve applied to copper resources. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, p. 104896.
- Chai, J., Guo, J.E., Meng, L., Wang, S.Y., 2011. Exploring the core factors and its dynamic effects on oil price: an application on path analysis and BVAR-TVP model. *Energy Policy*, 39(12), pp. 8022-8036.
- Criqui, P., 2013. *Peak Oil: Myth or Impending Doom?*. In *Global Resources: Conflict and Cooperation* (pp. 187-205). London: Palgrave Macmillan UK.
- Crowson, P.C.F., 2011. Mineral reserves and future minerals availability. *Mineral Economics*, 24, pp. 1-6.
- Cuddington, J.T., 2000. Finding Costs in the US Petroleum Industry: Assessing the Opposing Effects of Technological Change and Depletion with Error Correction Modeling (No. 00-03).
- Dasgupta, P., Eastwood, R., Heal, G., 1978. Resource management in a trading economy. *The Quarterly Journal of Economics*, 92(2), pp. 297-306.
- Dasgupta, P.S., Heal, G.M., 1979. *Economic theory and exhaustible resources*. Cambridge University Press.
- Dasgupta, P., Gilbert, R., Stiglitz, J., 1983. Strategic considerations in invention and innovation: The case of natural resources. *Econometrica*, pp. 1439-1448.
- Devarajan, S., Fisher, A.C., 1981. Hotelling's economics of exhaustible resources: Fifty years later. *Journal of Economic Literature*, 19(1), pp. 65-73.
- EIA (Energy Information Administration), 2020. "Today in Energy, February 6, 2020", U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, <https://www.eia.gov/todayinenergy>.
- Ericsson, M., Söderholm, P., 2013. *Mineral depletion and peak production*. In *Global Resources: Conflict and Cooperation* (pp. 222-231). London: Palgrave Macmillan UK.
- Farrow, S., 1985. Testing the efficiency of extraction from a stock resource. *Journal of Political Economy*, 93(3), pp. 452-487.
- Farzin, Y.H., 1984. The effect of the discount rate on depletion of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 92(5), pp. 841-851.

Farzin, Y.H., 1992. The time path of scarcity rent in the theory of exhaustible resources. *The Economic Journal*, 102(413), pp. 813-830.

Ferreira da Cunha, R., Missemer, A., 2020. The Hotelling rule in non-renewable resource economics: A reassessment. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 53(2), pp. 800-820.

Fisher, A., Peterson, F., 1975. Natural Resources and the Environment in Economics. University of Maryland, pp. 1-33.

Gaudet, G., 2007. Natural resource economics under the rule of Hotelling. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 40(4), pp. 1033-1059.

Gilbert, R.J., 1979. Optimal depletion of an uncertain stock. *The Review of Economic Studies*, 46(1), pp. 47-57.

Golding, B., Golding, S.D., 2017. *Doctor Copper and King Coal*. Metals, Energy and Sustainability: The Story of Doctor Copper and King Coal, pp. 1-20.

González, M.B., 2001. Estimating the Effects of Technology and Depletion on the Real Price of Copper in the US Using a Cointegration Approach. Papeles de trabajo sobre medio ambiente y economía. Working papers on environment and economics, (2), pp. 1-63.

Gordon, R.B., Bertram, M., Graedel, T.E., 2007. On the sustainability of metal supplies: A response to Tilton and Lagos. *Resources Policy*, 32(1-2), pp. 24-28.

Hart, R., Spiro, D., 2011. The elephant in Hotelling's room. *Energy Policy*, 39(12), pp. 7834-7838.

Hartwick, J.M., 1978. Substitution among exhaustible resources and intergenerational equity. *The review of economic studies*, 45(2), pp. 347-354.

Heal, G., 1976. The relationship between price and extraction cost for a resource with a backstop technology. *The Bell Journal of Economics*, pp. 371-378.

Heal, G., Barrow, M., 1981. Empirical investigation of the long-term movement of resource prices: A preliminary report. *Economics Letters*, 7(1), pp. 95-103.

Henckens, M.L.C.M., Driessen, P.P.J., Worrell, E., 2014. Metal scarcity and sustainability, analyzing the necessity to reduce the extraction of scarce metals. *Resources, Conservation and Recycling*, 93, pp. 1-8.

Henckens, M.L., van Ierland, E.C., Driessen, P.P., Worrell, E., 2016. Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 49, pp. 102-111.

Herfindahl, O.C., 1967. *Depletion and economic theory. Extractive resources and taxation*, pp. 63-90.

Hotelling, H., 1931. The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), pp. 137-175.

Hubbert, M.K., 1956. Nuclear energy and the fossil fuels (Vol. 95). Houston, TX: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division.

Humphreys, D., 2013. New mercantilism: A perspective on how politics is shaping world metal supply. *Resources policy*, 38(3), pp. 341-349.

Iralemon, J., 1924. "Copper and electricity to vanish in twenty years?". *Engineering and Mining Journal*. 118 (4): 122. 26 July 1924.

Jacks, D.S., Stuermer, M., 2020. What drives commodity price booms and busts?. *Energy Economics*, 85, p. 104035.

Jordan, B.W., Eggert, R.G., Dixon, B.W., Carlsen, B.W., 2015. Thorium: Crustal abundance, joint production, and economic availability. *Resources Policy*, 44, pp. 81-93.

Karp, L., 2017. *Natural resources as capital*. MIT Press.

Kharitonova, M., Mikhailov, A., Matsko, N., 2013. Influence of the time factor on the availability of deposits of nonferrous metals. *Resources Policy*, 38(4), pp. 490-495.

Kilian, L., 2009. "Not All Oil Price Shocks are Alike: Disentangling Demand and Supply Shocks in the Crude Oil Market." *American Economic Review* 99 (3): 1053-69.

Klotz, P., Lin, T.C., Hsu, S.H., 2014. Global commodity prices, economic activity and monetary policy: The relevance of China. *Resources Policy*, 42, pp. 1-9.

Économie des métaux : un aperçu de la littérature académique

- Krautkraemer, J.A., 1998. Nonrenewable resource scarcity. *Journal of Economic literature*, 36(4), pp. 2065-2107.
- Laherrère, J., The peak of peaks or the peak peak. Professor Rui Namorado Rosa, p. 43.
- Laherrère, J., de Sousa, L., 2010. *Copper peak. The oil-drum Europe*, 6307, pp. 1-27.
- Lasserre, P., Ouellette, P., 1988. On measuring and comparing total factor productivities in extractive and non-extractive sectors. *Canadian Journal of Economics*, pp. 826-834.
- Lee, J., List, J.A., Strazicich, M.C., 2006. Non-renewable resource prices: Deterministic or stochastic trends?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(3), pp. 354-370.
- Levhari, D., Liviatan, N., 1977. Notes on Hotelling's economics of exhaustible resources. *Canadian Journal of Economics*, pp. 177-192.
- Livernois, J., 2009. On the empirical significance of the Hotelling rule. *Review of Environmental Economics and Policy*.
- Loury, G.C., 1978. The optimal exploitation of an unknown reserve. *The Review of Economic Studies*, 45(3), pp. 621-636.
- May, D., Prior, T., Cordell, D., Giurco, D., 2012. Peak minerals: Theoretical foundations and practical application. *Natural Resources Research*, 21, pp. 43-60.
- McRae, J.J., 1978. The Effects of Energy Price Changes on Commodity Prices, Interprovincial Trade, and Employment.
- Meinert, L.D., Robinson Jr, G.R., Nassar, N.T., 2016. Mineral resources: Reserves, peak production and the future. *Resources*, 5(1), p. 14.
- Mudd, G.M., 2007. An analysis of historic production trends in Australian base metal mining. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2), pp. 227-261.
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G.M., Weng, Z., Giurco, D., 2014. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, pp. 190-201.
- Papież, M., 2014. A dynamic analysis of causality between prices of corn, crude oil and ethanol.
- Peterson, F.M., Fisher, A.C., 1977. The Exploitation of Extractive Resources A Survey. *The Economic Journal*, 87(348), pp. 681-721.
- Peterson, U., Maxwell, R.S., 1979. Historic mineral production and price trends, *Mining Eng.*, pp. 25-34.
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., Behrisch, J., 2012. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global environmental change*, 22(3), pp. 577-587.
- Pindyck, R.S., 1978a. Gains to producers from the cartelization of exhaustible resources. *The Review of Economics and Statistics*, pp. 238-251.
- Pindyck, R.S., 1978b. The optimal exploration and production of nonrenewable resources. *Journal of Political economy*, 86(5), pp. 841-861.
- Pindyck, R.S., 1980. Uncertainty and exhaustible resource markets. *Journal of Political Economy*, 88(6), pp. 1203-1225.
- Pindyck, R.S., 1984. Uncertainty in the theory of renewable resource markets. *The Review of Economic Studies*, 51(2), pp. 289-303.
- Schmitz Jr, J.A., 2005. What determines productivity? Lessons from the dramatic recovery of the US and Canadian iron ore industries following their early 1980s crisis. *Journal of Political Economy*, 113(3), pp. 582-625.
- Scholz, R.W., Wellmer, F.W., 2021. Endangering the integrity of science by misusing unvalidated models and untested assumptions as facts: General considerations and the mineral and phosphorus scarcity fallacy. *Sustainability science*, 16(6), pp. 2069-2086.
- Segura-Salazar, J., Tavares, L.M., 2018. Sustainability in the minerals industry: Seeking a consensus on its meaning. *Sustainability*, 10(5), p. 1429.

Slade, M.E., 1982. Trends in natural-resource commodity prices: an analysis of the time domain. *Journal of Environmental Economics and Management*, 9(2), pp. 122-137.

Smith, V.K., 1979. Natural resource scarcity: a statistical analysis. *The Review of Economics and Statistics*, pp. 423-427.

Solow, R.M., 1974. *The economics of resources or the resources of economics*. In Classic papers in natural resource economics (pp. 257-276). London: Palgrave Macmillan UK.

Solow, R.M., Wan, F.Y., 1976. Extraction costs in the theory of exhaustible resources. *The Bell Journal of Economics*, pp. 359-370.

Stiglitz, J.E., 1976. Monopoly and the rate of extraction of exhaustible resources. *The American Economic Review*, 66(4), pp. 655-661.

Stollery, K.R., 1983. Mineral depletion with cost as the extraction limit: A model applied to the behavior of prices in the nickel industry. *Journal of Environmental Economics and Management*, 10(2), pp. 151-165.

Stuermer, M., 2018. 150 years of boom and bust: what drives mineral commodity prices?. *Macroeconomic Dynamics*, 22(3), pp. 702-717.

Sverdrup, H.U., Ragnarsdottir, K.V., Koca, D., 2014. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, pp. 158-174.

Svedberg, P., Tilton, J.E., 2006. The real, real price of nonrenewable resources: copper 1870-2000. *World Development*, 34(3), pp. 501-519.

Tilton, J.E., 1999. The future of recycling. *Resources policy*, 25(3), pp. 197-204.

Tilton, J.E., 2010. On borrowed time: assessing the threat of mineral depletion. Routledge.

Tilton, J.E., Lagos, G., 2007. Assessing the long-run availability of copper. *Resources Policy*, 32(1-2), pp. 19-23.

Tilton, J.E., Guzmán, J.I., 2016. Mineral economics and policy. Routledge.

Tilton, J.E., 2018. The Hubbert peak model and assessing the threat of mineral depletion. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, pp. 280-286.

Tilton, J.E., Crowson, P.C., DeYoung Jr, J.H., Eggert, R.G., Ericsson, M., Guzmán, J.I., Humphreys, D., Lagos, G., Maxwell, P., Radetzki, M., Singer, D.A., 2018. Public policy and future mineral supplies. *Resources Policy*, 57, pp. 55-60.

Ulloa, A., 2015. Tendencia y volatilidad del precio del cobre. In: Meller, P. (ed.) Dilemas y debates entorno al cobre, Chapter 7. Dolmen, Santiago.

Van Orstrand, C.E., 1925. "On the Empirical Representation of Certain Production Curves," *Journal of the Washington Academy of Sciences* 15, 19-33.

Wanner, M., Gaugler, T., Gleich, B., Rathgeber, A., 2015. Determinants of the price of high-tech metals: an event study. *Natural Resources Research*, 24, pp. 139-159.

Weitzman, M.L., 1976. On the welfare significance of national product in a dynamic economy. *The Quarterly journal of economics*, 90(1), pp. 156-162.

West, J., 2011. Decreasing metal ore grades: Are they really being driven by the depletion of high-grade deposits?. *Journal of Industrial Ecology*, 15(2), pp. 165-168.

Yaksic, A., Tilton, J.E., 2009. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy*, 34(4), pp. 185-194.

BIOGRAPHIES

MAYLIS PEYRET, diplômée de l'École Normale Supérieure Paris-Saclay, est doctorante en sciences économiques au LEDa-CGEMP (Université Paris-Dauphine-PSL). Ses recherches portent sur la durabilité de l'offre mondiale de métaux dans le contexte de transition énergétique et de transformation numérique. Elle travaille également sur la modélisation des prix des métaux stratégiques à moyen terme au sein de l'OFREMI (Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles).

FRÉDÉRIC GONAND est professeur d'économie à l'Université Paris Dauphine-PSL (HDR, CNU), directeur de masters et d'executive master, consultant, conseiller économique de l'UIMM, ancien commissaire de la Commission de Régulation de l'Énergie, ancien conseiller économique du ministre de l'Économie (2007-2011), ancien élève de l'ENA, docteur en économie, docteur en histoire de l'art.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Séminaire : les ressources non énergétiques, un frein aux transitions énergétiques? (n° 643, mars-avril 2019)
- Actes du 9^e Forum Européen de l'Énergie – La sécurité énergétique : un enjeu d'une étonnante modernité, (n° 664, septembre-octobre 2022)

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.