



Comment évaluer l'externalité carbone des métaux

À eux seuls, l'extraction et le raffinage des métaux sont à l'origine d'un dixième des émissions mondiales de gaz à effet de serre, avec toutefois des variations considérables. Certains métaux rares ou précieux ont ainsi une très grande intensité en carbone : 20 600 tonnes de CO₂ émises pour une tonne extraite et raffinée de platine, 5 100 tonnes de CO₂ pour une tonne d'or, quand l'acier ne consomme que 2 tonnes de CO₂ et l'aluminium 17. En volume, deux métaux concentrent l'essentiel des émissions : l'acier et l'aluminium produisent à eux seuls près des neuf dixièmes des émissions de CO₂ des dix-sept métaux étudiés dans cette note.

Ces chiffres permettent de calculer une valeur à l'externalité carbone des métaux, en réponse à un objectif fixé par la *Feuille de route pour l'économie circulaire* initiée par le gouvernement en 2018. Il en ressort deux principales conclusions. Premièrement, si on prend pour référence une taxe carbone de 57 euros par tonne – soit la valeur moyenne retenue par le rapport Stern-Stiglitz –, la prise en compte de cette externalité carbone renchérirait le prix de marché, toutes choses égales par ailleurs, de 25 % pour l'acier et de 60 % pour l'aluminium. Pour tous les autres métaux étudiés, le coût additionnel serait inférieur à 11 %, voire souvent inférieur à 5 % – à l'exception du magnésium (plus de 100 %). Deuxièmement, si on fait l'hypothèse que l'ajout d'un prix du carbone, sous forme d'une taxe ou du paiement d'un droit de type ETS¹, ne change rien au prix de vente, à la consommation, aux alternatives à l'emploi d'un métal donné, etc., le surcroît de coût serait généralement modeste, compte tenu des volumes produits. Font cependant exception l'aluminium et l'acier – et là encore le magnésium, sujet de moindre ampleur.

En raison des importants volumes produits, l'aluminium et l'acier sont responsables d'une grande partie des émissions de carbone liées au secteur de l'extraction et du raffinage : ils auraient logiquement à supporter l'essentiel d'une tarification du carbone. Cependant, l'attention doit porter sur l'ensemble des métaux, en vue de respecter les objectifs de l'Accord de Paris et de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). L'internalisation de l'externalité carbone pourrait ainsi conduire à une transformation substantielle de leur usage, favorisant la sobriété et l'économie circulaire.

Émissions de CO₂ par tonne produite de métal et coût carbone par rapport au prix du métal

Famille de métaux	Métal	Production totale (en tonnes)	Émissions de CO ₂ (en tCO ₂ /t)	Émissions mondiales de CO ₂ (MtCO ₂)	Coût carbone en €/t (avec un prix de 57 €/tCO ₂)	Coût carbone par rapport au prix du métal
Métaux de base	Aluminium	60 000 000	17	1 025	974	60 %
	Chrome	36 000 000	5	185	293	4 %
	Magnésium	970 000	36	35	2 051	117 %
	Nickel	2 300 000	11	25	608	5 %
	Acier	1 800 000 000	2	3 346	106	25 %
Métaux d'alliage	Cobalt	140 000	3	0	155	1 %
	Cuivre	21 000 000	4	82	223	4 %
	Titane	5 400 000	30	161	1 704	11 %
	Zinc	13 000 000	4	47	207	9 %
Métaux précieux	Antimoine	140 000	1	0	57	1 %
	Platine	160	20 600	3	1 174 200	4 %
	Or	3 260	5 100	17	290 700	1 %
	Argent	27 000	104	3	5 900	1 %
Métaux high-tech	Néodyme	23 000	33	1	1 865	4 %
	Molybdène	300 000	11	3	616	5 %
	Tungstène	82 000	29	2	1 666	4 %
	Yttrium	7 100	63	0	3 619	11 %

Note : sur les deux colonnes de droite, les coûts carbone sont calculés sur la base d'une taxe carbone de 57 euros par tonne, prix moyen proposé par la commission Stern-Stiglitz.

Source : France Stratégie

1. *Emission trading scheme* (en français, système communautaire d'échange de quotas d'émission).

Julien Bueb
et Evelyne To

Département Développement durable et numérique

La *Note d'analyse* est publiée sous la responsabilité éditoriale du commissaire général de France Stratégie. Les opinions exprimées engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement.

INTRODUCTION

Fondement du système productif au même titre que l'énergie, l'exploitation des matières premières métalliques génère de nombreuses nuisances environnementales et sanitaires. Le coût social et écologique peut être très élevé, voire irréparable. Que ce soit lors de l'extraction ou du raffinage, ces externalités négatives prennent diverses formes : altération du cycle de l'eau, disparition d'espèces, destruction d'écosystème, émissions de gaz à effet de serre (GES), résidus radioactifs, présence de métaux lourds dans les déchets, etc.

À ce jour, toutes ces externalités restent mal prises en compte, car elles varient avec la ressource extraite, le lieu d'extraction ou de transformation. S'agit-il d'une mine souterraine ou à ciel ouvert ? Située dans une forêt primaire ? Des populations résident-elles à proximité ? La substance recherchée est-elle un coproduit ? Les nouvelles mines exigent-elles davantage d'énergie que les anciennes ? Le procédé de raffinage, la quantité et le type d'énergie employés ou le mix énergétique du pays où l'activité est implantée sont souvent différents, parfois sans commune mesure. Il est donc difficile d'approcher avec exactitude les nuisances environnementales et sanitaires des substances métalliques – et d'autant plus délicat de fixer des règles générales.

Cependant il existe une externalité plus homogène, donc mieux appréhendée : les émissions de gaz à effet de serre. Facteur du réchauffement climatique, ces émissions résultent principalement de la production énergétique. Très énergivores, l'extraction et le raffinage des métaux conduisent donc à des émissions de carbone importantes. La littérature s'est efforcée d'en faire l'évaluation, principalement pour comparer les dépenses énergétiques nécessaires à la production des systèmes d'énergies renouvelables et celles des systèmes fissiles et fossiles², ou pour estimer globalement la contribution du secteur extractif au réchauffement climatique³. Une analyse plus fine des émissions carbone par substance métallique paraît nécessaire. Même si la plupart des métaux ne sont pas extraits ni raffinés en France⁴, il importe de tenir compte de l'empreinte carbone du pays exportateur dans la politique climatique française, comme le recommande le Haut Conseil pour le climat.

Après avoir retracé l'évolution du marché des ressources métalliques et des externalités associées, cette note se propose d'évaluer le contenu carbone d'une sélection de

métaux. Elle examine enfin les possibilités d'internaliser l'externalité climatique de l'extraction des ressources. Une meilleure prise en compte dans les décisions des agents doit en effet permettre de limiter l'empreinte carbone liée à la consommation de ces matières. La note apporte ainsi des éléments de réponse pour « établir des valeurs de référence représentant le coût, pour l'ensemble de la société, de l'utilisation de ces ressources stratégiques », conformément à la *Feuille de route pour l'économie circulaire* présentée par le gouvernement en avril 2018.

FORTE CROISSANCE DE LA CONSOMMATION DE RESSOURCES

Consommation de métaux : plus 250 % entre 1970 et 2017

Le boom des économies émergentes, l'essor des technologies de l'information et de la communication mais aussi la demande pour développer les énergies renouvelables ont créé une pression à la hausse sur l'extraction des ressources naturelles. En 2017, l'humanité a consommé 92 milliards de tonnes de biomasse⁵, d'énergies fossiles, de métaux et de minerais non métalliques – regroupés sous l'appellation de ressources naturelles –, contre 27 milliards en 1970. Ce niveau jamais égalé représente une hausse de 240 %⁶. Au rang des ressources les plus exploitées figurent les granulats, le ciment, le sable, les métaux et les minéraux industriels, qui servent à bâtir l'infrastructure urbaine, les biens de consommation et de production, dont la production et l'utilisation d'énergie. Le passage anticipé à 9 milliards d'habitants en 2050, le développement économique et social et la hausse du niveau de vie des pays les plus pauvres devraient entraîner une augmentation des besoins jusqu'au milieu du XXI^e siècle. Si la tendance se poursuit, c'est 190 milliards de tonnes de ressources naturelles qui pourraient être consommées en 2060, soit une hausse de 110 % par rapport à 2017. Concernant les seuls métaux, la consommation en volume est passée de 2,6 milliards de tonnes en 1970 à 9,1 milliards de tonnes en 2017 : cela représente une hausse moyenne de 2,7 % par an et de 250 % sur la période, soit un rythme comparable à celui constaté pour l'ensemble des ressources. On pourrait atteindre les 18 milliards de tonnes en 2060 (voir graphique 1), un niveau jugé insoutenable par le Programme des Nations unies pour l'environnement, compte tenu des conséquences sur l'environnement et sur les sociétés⁷.

2. Ces mesures permettent des analyses en cycle de vie des différentes sources d'énergie primaire. Voir par exemple Court V. et Fizaine F. (2017), « Long-term estimates of the energy-return-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas global productions », *Ecological Economics*, vol. 138, p. 145-159.

3. IRP (International Resource Panel) (2019), *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future we Want*, Programme des Nations unies pour l'environnement, Nairobi, Kenya.

4. Voir « Les différents métaux et l'évolution de leurs usages dans la production industrielle », annexe 1 associée à cette note.

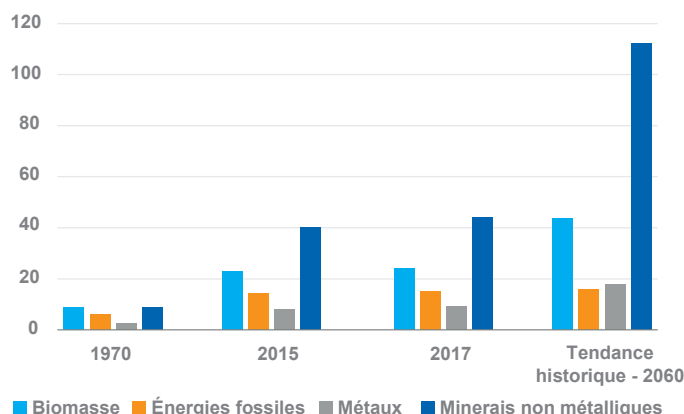
5. Mesurée en tonnes, la biomasse représente ici la somme de la production agricole, les résidus de cultures, l'herbe des pâturages, le bois et la pêche de poissons sauvages.

6. IRP (2019), *op. cit.*, p. 126.

7. IRP (2019), *op. cit.*



Graphique 1 – Extraction de ressources naturelles, 2015-2060 (en milliards de tonnes)



Source : UN Environment International Resource Panel, Global Resources Outlook 2019, Scenarios infographic, [Global Resources Outlook 2019](#)

Pour extraire et raffiner ces ressources métalliques, on consacre à l'échelle mondiale 7 % à 10 % de l'énergie primaire⁸ – autrement dit l'énergie contenue dans les ressources énergétiques à l'état brut (pétrole, gaz, uranium, vent, soleil, biomasse)⁹. En volume, cela représente 30 exajoules par an, un exajoule valant 1 018 joules : pour donner un ordre de grandeur, c'est l'équivalent de l'énergie que produiraient environ 8 000 réacteurs nucléaires de 1 000 mégawatts électriques chacun¹⁰. Sur longue période, la consommation énergétique a augmenté plus ou moins fortement selon les métaux, mais de manière toujours nettement supérieure à la consommation d'énergie finale globale¹¹.

Des externalités nombreuses

Outre un bilan humain difficilement quantifiable¹², ces activités extractives induisent toutes des dommages environnementaux, voire sanitaires, qui souvent se renforcent les uns les autres¹³. Les émissions de GES proviennent en

partie du changement d'affectation des sols – *via* la déforestation, notamment – mais surtout de la source d'énergie utilisée pour l'extraction et la transformation des métaux. On a vu que ces opérations étaient très énergivores. D'abord parce que le degré de pureté exigé pour obtenir les propriétés de certaines substances métalliques est très élevé, de l'ordre de 99,9999 %¹⁴. Ensuite parce que le mix énergétique des pays producteurs de substances métalliques reste à ce jour fortement carboné. Enfin, parce que la hausse de la production mondiale de métaux a une forte incidence sur la consommation énergétique – incidence qui se trouve encore renforcée par la qualité moindre des gisements. La dépense énergétique est en effet inversement proportionnelle à la concentration des minerais et cette concentration connaît une tendance à la baisse¹⁵. Il fallait par exemple 55 tonnes de minerai pour extraire une tonne de cuivre dans les années 1930, il en faut 125 tonnes aujourd'hui : le taux de concentration moyenne est ainsi passé de 1,8 % à 0,8 %¹⁶. Les matières premières étant toujours moins concentrées, il faut de plus en plus d'énergie par tonne de minerai produite, ce qui accroît en parallèle les externalités négatives¹⁷ : les résidus miniers par exemple forment des volumes toujours croissants de déchets, de plus en plus difficiles à gérer¹⁸.

Les métaux sont aussi nécessaires à la production des énergies renouvelables. Il faut de l'énergie pour produire des métaux qui serviront à générer de l'énergie. Cette boucle est à prendre en compte dans l'évaluation carbone des produits technologiques « verts » : ces derniers peuvent voir leur impact de réduction des émissions de GES être en partie annulé, voire totalement annulé par d'autres effets liés à leur cycle de vie¹⁹. La double dégradation de la qualité des ressources énergétiques et des ressources métalliques compromet l'efficacité des actions visant à réduire les émissions de GES. Pour le dire autrement, il faut de plus

- L'énergie *primaire* est l'amont de la chaîne de transformation énergétique, comme l'énergie *utile* est son aval. L'énergie *finale* est l'énergie consommée par l'utilisateur final : elle est égale à l'énergie primaire moins les pertes dues à la transformation, à l'acheminement et à la distribution. L'énergie *utile* est l'énergie qui sert réellement à rendre le service énergétique attendu : elle est égale à l'énergie finale moins les pertes liées à l'utilisation. La quantité d'énergie primaire mobilisée est donc plus importante que l'énergie utile, de l'ordre de 38 % en France. Voir Commissariat général au développement durable (2019), « Chiffres clés de l'énergie et du climat », Datalab, Édition 2019, septembre.
- Voir Bihouix P. et de Guillebon B. (2010), *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, Les Ulis, EDP Sciences, p. 31 ; UNEP (2013), *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, Van der Voet E., Salminen R., Eckelman M., Mud G., Norgate T. et Hirschier R., p. 83. D'autres auteurs comme Rankin ou Fizaine ont estimé à 10 % la part de la production mondiale d'énergie consommée par les métaux.
- Sachant qu'il y a aujourd'hui 400 réacteurs en activité dans le monde, d'après l'AEIA.
- Fizaine F. et Court V. (2015), « Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI », *Ecological Economics*, vol. 110, p. 106-118.
- Les coûts humains de l'ensemble des activités extractives sont élevés, mais le nombre de décès est mal connu, notamment parce que peu d'entreprises participent à ce recensement et que le secteur recourt largement, au moins dans certains pays, à des activités non déclarées. Voir Responsible Mining Foundation, *Responsible Mining Index 2018*.
- Voir annexe 2, « Les autres externalités liées aux activités extractives et de raffinage des métaux ».
- C'est le cas en particulier des terres rares. Assemblée nationale, *Rapport d'information n° 1846*, déposé en application de l'article 145 du Règlement par la Commission des Affaires économiques sur l'énergie photovoltaïque et présenté par M. Serge Poignant, 16 juillet 2009.
- Des découvertes géologiques majeures peuvent remettre en cause cette tendance baissière. Toutefois, si elles se réalisent pour un métal en particulier, elles n'auront pas d'effet significatif sur l'ensemble des métaux.
- Bihouix P. et de Guillebon B. (2010), *op. cit.*, p. 29.
- Voir Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (2014), « L'économie circulaire, ou la compétition pour les ressources », *Étude annuelle du Conseil général de l'économie*, p. 70 ; Court V. et Fizaine F. (2017), *op. cit.*, p. 145-159.
- Guyonnet D., Reuter M. et Bleischwitz R. (2012), « Vers une utilisation éco-efficace des matières premières minérales », *Géoscience*, BRGM, p. 56-63.
- Cela renvoie au concept d'« énergie grise » qui désigne l'énergie incorporée à laquelle on ajoute l'énergie utilisée au déploiement du bien, à son exploitation et jusqu'au recyclage du bien en fin de vie.

en plus d'éoliennes pour produire des éoliennes. Schématiquement, l'énergie produite par une éolienne aujourd'hui pourrait servir à en produire 18, si on prend en considération son cycle de vie, et ce rapport énergétique peu avantageux pourrait bien se détériorer dans les années à venir (voir encadré 1). Compte tenu du peu de temps disponible pour opérer la transition énergétique et de la part élevée des énergies carbonées dans le mix énergétique de la plupart des pays²⁰, il y a là une donnée capitale pour l'élaboration des politiques publiques²¹.

Étant donné la forte demande mondiale et malgré les gains en efficacité énergétique²², les effets de l'extraction et du raffinage des métaux sur le changement climatique ont doublé entre 2000 et 2015 (voir graphique 2)²³. En 2011, les métaux étaient responsables de 18 % du changement climatique²⁴. Émanation onusienne, le Groupe international d'experts sur les ressources (IRP en anglais, pour *International Resource Panel*) espère qu'avec une production et une consommation rationalisées, l'utilisation mondiale de toute forme de ressources pourrait voir sa croissance ralentir de 25 % d'ici 2060 par rapport à la tendance historique. Des politiques ambitieuses pourraient réduire les

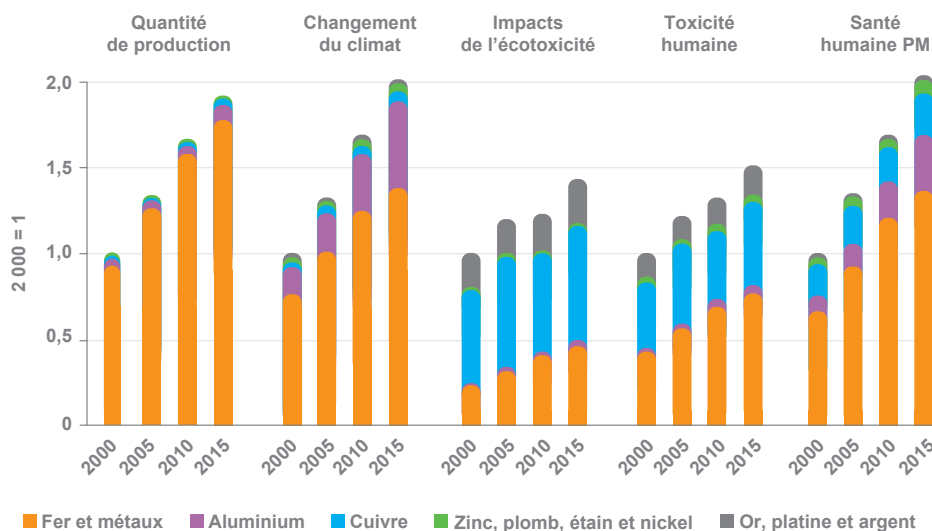
émissions de GES de 90 % par rapport au scénario tendanciel²⁵. L'étude de l'IRP ne tient toutefois pas compte de la dégradation qualitative des minerais métalliques²⁶.

Parmi les dix métaux étudiés par l'IRP, la chaîne mondiale de production de fer et d'acier est à l'origine des impacts les plus importants sur le changement climatique : elle représente environ un quart de la demande énergétique mondiale du secteur de l'industrie. Avec un gros volume de production et des besoins en énergie élevés, l'aluminium contribue également de manière significative aux effets des métaux sur le changement climatique²⁷, tandis que les effets toxiques constituent l'inquiétude majeure pour le cuivre et les métaux précieux (voir graphique 2).

ÉVALUATION DU CONTENU CARBONE DES RESSOURCES

Comment évaluer les émissions carbone liées à l'extraction des métaux ? Cette note propose une approche par les dépenses énergétiques. Toute activité, en particulier l'extraction des ressources naturelles, nécessite des quantités plus ou moins importantes d'énergie. Or ce sont ces

Graphique 2 – Production de dix métaux et impacts environnementaux, 2000-2015 (indice 1 en 2000)



Note : cette sélection de dix métaux couvre plus de 95 % de l'extraction mondiale de métaux en volume. Les impacts environnementaux concernent l'extraction et le raffinage.

Source : IRP (2019), *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*, p. 76

20. Généralement au-delà de 80 % et au-delà de 50 % pour la France.

21. Voir Fizaine F. (2015), *Les métaux rares. Opportunité ou menace ? Enjeux et perspectives associés à la transition énergétique*, Éditions Technip, collection « Géopolitique », p. 106 ; Fizaine F. et Court V. (2015), *op. cit.* ; Caminel T., Frémaux P., Giraud G., Lalucq A. et Roman P. (2014), *Produire plus, polluer moins : l'impossible découplage ?*, Institut Veblen / Les petits matins.

22. Les gains d'efficacité énergétique sont plus que compensés par les besoins croissants en énergie, conséquence de la baisse de la qualité des gisements.

23. UNEP (2013), *op. cit.*, p. 84.

24. Les activités extractives dans leur globalité étaient responsables d'environ la moitié des émissions mondiales de GES, les ménages et le reste de l'activité économique (hors extraction et raffinage) générant le reste des émissions : IRP (2019), *op. cit.*, p. 76.

25. IRP (2019), *op. cit.*, p. 112 et p. 114.

26. Fizaine F. et Court V. (2014), « Épuisement des métaux et énergie nette dans une perspective de transition énergétique », Présentation à la Chaire d'économie et du climat, 11 avril.

27. Environ 1 % des émissions de GES mondiales du secteur industriel. Source : Gautam M., Pandey B. et Agrawal A. (2018), « Carbon footprint of aluminum production: Emissions and mitigation », in S. S. Muthu (ed.), *Environmental Carbon Footprints. Industrial Case Studies*, chapitre 8, Butterworth-Heinemann, p. 197-228.

dépenses énergétiques qui génèrent le plus de gaz à effet de serre. Certes, le changement d'affectation des sols et leur artificialisation jouent aussi un rôle sur les émissions comme sur le captage des gaz à effet de serre, mais ces deux facteurs étant très difficiles à évaluer, la note choisit de se concentrer sur le volet des dépenses énergétiques rapportées en émissions de CO₂.

Les 17 métaux retenus

On retient ici une liste de 17 métaux, qui répond à une logique de besoins industriels, de volumes produits, d'énergie incorporée, de besoins pour les énergies renouvelables mais aussi de données disponibles. Par exemple, la construction d'une éolienne peut nécessiter plusieurs métaux dont l'aluminium, le chrome, le cuivre, le fer, le molybdène, le néodyme et le zinc²⁸. Les panneaux solaires mobilisent quant à eux de l'aluminium, du cuivre, du molybdène, du nickel, de l'argent, de l'acier et du zinc²⁹. Les métaux ont été classés par famille selon la classification du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)³⁰ : métaux de base, métaux précieux, métaux d'alliage ou métaux high-tech. La sélection s'est faite aussi en fonction des risques pesant sur les industriels. En 2018, la matrice du BRGM met en évidence comme matières présentant les risques d'approvisionnement les plus élevés le tungstène, les terres rares, l'antimoine, les platinoïdes et le cobalt. Les substances considérées comme les plus stratégiques sont le cuivre, le chrome, le nickel, le molybdène ou encore le titane.

On retient donc ici :

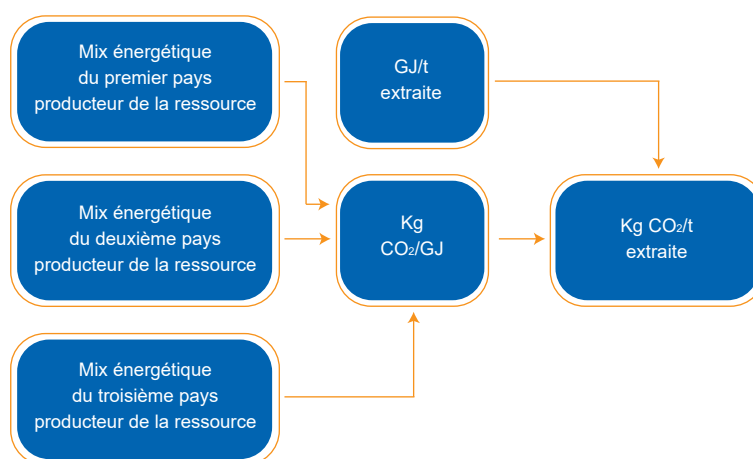
- 5 métaux de base : aluminium, magnésium, acier (fer), chrome, nickel ;
- 4 métaux d'alliage : cuivre, zinc, titane, cobalt ;
- 4 métaux précieux : or, argent, platine, antimoine ;
- enfin 4 métaux high-tech³¹ : molybdène, tungstène, yttrium (terre rare lourde), néodyme (terre rare légère)³².

Une méthode en deux temps

La méthodologie est articulée en deux étapes (voir schéma). On calcule d'abord l'énergie nécessaire à l'extraction et au raffinage (en GJ/t), puis on évalue les émissions de carbone par unité d'énergie utilisée (kgCO₂/GJ ou tCO₂/GJ). On s'appuie notamment sur les travaux réalisés pour mesurer l'EROI (*Energy Returned On Energy Invested*) ou « taux de retour sur investissement énergétique » des énergies renouvelables (voir encadré 1 page suivante). Si l'EROI mesure l'efficacité énergétique des énergies primaires, on évalue ici le coût carbone des métaux qui pourraient être utilisés pour produire une énergie décarbonée.

Dans un premier temps donc, pour chaque substance métallique retenue, on se réfère à la littérature pour évaluer les dépenses énergétiques – mesurées en gigajoules (GJ) –

Graphique 3 – Méthodologie de calcul du contenu carbone des métaux



Source : France Stratégie

28. The World Bank, *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*, juin, p. 64.

29. The World Bank (2017), *op. cit.*, p. 65.

30. Certains métaux appartiennent à plusieurs groupes.

31. Cette catégorie regroupe trois sous-catégories : les métaux spéciaux ou high-tech, les petits métaux ou métaux rares et les métaux stratégiques ou métaux critiques.

32. Les terres rares désignent des ressources naturelles précises. Elles regroupent les lanthanides, au nombre de quinze métaux, ainsi que le scandium et l'yttrium. Les terres rares sont des éléments chimiques qui ne sont pas vraiment rares mais qui sont très réactifs. Il est donc inhabituel de trouver ces oxydes sous forme pure ou concentrée. Leurs applications traditionnelles concernent la métallurgie, le polissage et la coloration de verres spéciaux, les catalyseurs de raffinage du pétrole, etc. Ils sont également employés dans l'informatique, les alliages spéciaux, le nucléaire, la luminescence et les aimants permanents, l'industrie de défense, les technologies de pointe, etc., ce qui les rend particulièrement recherchés. À noter que les terres rares lourdes sont plus rares et plus demandées pour leurs propriétés que les terres rares légères.

Encadré 1 – Le taux de retour sur investissement énergétique

Pour une technologie de production d'énergie, l'EROI (Energy Returned On Energy Invested) ou taux de retour sur investissement énergétique est le ratio entre l'énergie utilisable et l'énergie consommée pour l'obtenir. Cet indicateur permet d'approcher la dégradation de la qualité des ressources. Plus l'EROI est élevé, plus la technologie est rentable. Par exemple, dans les années 1930, l'EROI du pétrole était de 100, quand les sables bitumineux ont un EROI estimé entre 4 et 1 (voire inférieur à 1) : autrement dit, il faut dépenser une unité énergétique en extraction, transformation et transport pour obtenir une (voire moins) à quatre unités d'énergie³³.

L'EROI étant un indicateur d'efficacité énergétique, on ne le calcule pas pour les métaux, mais pour l'usage de ces métaux à des fins de production énergétique. Mené en cycle de vie complet, le calcul suppose de nombreuses données, notamment l'énergie nécessaire à l'extraction et au raffinage, la durée de vie de la centrale énergétique, son facteur de charge, la possibilité de recyclage, et jusqu'aux engins nécessaires à l'activité minière. On estime ainsi que les panneaux photovoltaïques ont un EROI moyen compris entre 4 et 12 ; contre 18 pour l'éolien, 20 pour les centrales solaires, entre 5 et 15 pour le nucléaire et 50 pour l'hydroélectrique³⁴. Comme pour les ressources énergétiques, l'EROI des énergies décarbonées risque de diminuer avec le temps à cause de la baisse de la teneur en métaux des mines.

nécessaires pour l'extraction et le raffinage³⁶. Les coûts énergétiques de la production (GJ/t) exprimés dans le tableau 1 (colonne 6) sont des moyennes, entourées d'un certain degré d'incertitude : les coûts sont estimés à différentes années, la méthode de répartition du coût en cas de coproduction avec d'autres métaux peut varier d'une étude à l'autre et les données disponibles pour de tels gisements ne sont pas représentatives de l'ensemble, les dépenses énergétiques variant selon les situations géographiques ou géologiques.

Par ailleurs, pour affiner la compréhension de la relation énergie et métal, plusieurs facteurs devraient être pris en compte. Certains peuvent contribuer à ralentir la tendance haussière de la dépense énergétique, sans toutefois la remettre en cause :

- le recyclage ;
- la sobriété énergétique des processus de production et l'efficacité de la production ;
- la substitution de métaux par d'autres moins énergivores ou les économies d'énergie par production de coproduits.

D'autres facteurs peuvent au contraire accélérer la tendance haussière de la dépense énergétique pour extraire et raffiner les métaux :

- les gisements de nouveaux minerais sont plus profonds dans la croûte terrestre et contiennent davantage d'impuretés ;
- pour certains métaux, il existe une « barrière minéralogique ». Selon le géologue B. J. Skinner, franchir cette barrière entraîne une augmentation forte de la consommation énergétique nécessaire à l'extraction des métaux. Les métaux plus communs suivent un taux de croissance constant, tandis que les métaux rares ou high-tech connaîtraient un « mur énergétique » avant de croître à un taux constant³⁵.

Dans un deuxième temps, pour passer de la dépense énergétique aux émissions liées aux activités extractives, il est nécessaire de transformer les joules en CO₂. Cela implique d'abord de prendre en compte le mix énergétique des pays où se fait l'extraction, pour estimer la part de la production énergétique d'origine fossile. Il existe néanmoins deux obstacles à cette mesure. D'une part, si la production de certaines substances comme le néodyme ou le tungstène est géographiquement très concentrée, ce n'est pas le cas pour l'or. D'autre part, pour les métaux high-tech, certaines

33. Notons que si cette activité est non rentable du point de vue énergétique et émettrice de gaz à effet de serre, elle demeure rentable du point de vue financier. Grâce à des prix du gaz naturel très faibles sur le marché nord-américain, ce gaz est utilisé pour raffiner et extraire un pétrole de ces sables. La marge financière est alors positive.

34. Voir Fizaine F. (2015), *Les métaux rares : opportunité ou menace ? Enjeux et perspectives associés à la transition énergétique*, coll. « Géopolitique », éditions Technip, p.106, septembre ; Fizaine F. et Court V. (2015), « Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI », *op. cit.*

35. Voir « L'énergie des métaux », EcolInfo, sur le site du CNRS.

36. Ces données ont été mises en cohérence par l'article de Court V. et Fizaine F. (2015), *op. cit.*, en se basant sur : Rankin W. J. (2011), *Minerals, Metals and Sustainability: Meeting Future Material Needs*, CRC Press Inc. ; Tharumarajah A. et Koltun P. (2011), « Cradle to gate assessment of environmental impact of rare earth metals », 7th Australian Conference on Life Cycle Assessment, Melbourne, Vic, Australia ; Valero A. et Botero E. (2002), « Exergetic evaluation of natural mineral capital: Application of the methodology to current world reserves », Proceedings of ECOS 2002, 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, TU Berlin, Germany, p. 62-98.



substances peuvent être produites en fonction des prix, parfois volatils, car elles sont des coproduits ou des sous-produits d'une ressource principale : un pays peut être producteur une année et pas la suivante. En conséquence, pour chaque substance, on fait ici le choix de ne prendre en compte que les trois principaux pays producteurs (voir tableau 1, colonne 3)³⁷.

Une fois connue la part carbonée des mix énergétiques, il est possible de quantifier le contenu carbone ou l'intensité carbone de chaque joule grâce aux émissions de CO₂ de

chaque source primaire d'énergie. Cette intensité a une dimension technologique qui dépend de la source d'énergie primaire consommée et de la localisation géographique³⁸. On obtient ainsi une évaluation exprimée en kgCO₂/GJ. Rappelons que seules les émissions liées à la production d'énergie sont considérées³⁹. Ainsi, en combinant l'énergie nécessaire pour extraire une tonne de métal (GJ/t) et les émissions liées au mix énergétique des pays producteurs de métal (kgCO₂/GJ), on obtient les émissions de chaque tonne de métal mesurées en tonne de CO₂ par tonne de métal extraite (tCO₂/t) (voir tableau 1, colonne 7).

Tableau 1 – Estimation du coût énergétique de la production des métaux et émissions de CO₂ par tonne de métal produite

Famille de métaux	Métal	Principaux pays producteurs	Production totale (en tonnes)	Part de la production d'un métal dans sa famille	Coût énergétique de la production [GJ/t]	Émissions de CO ₂ (en tCO ₂ /t)	Émissions mondiales de CO ₂ (en MtCO ₂)
Métaux de base	Aluminium	Chine, Russie, Inde	60 000 000	3,16 %	212	17	1 025
	Chrome	Afrique du Sud, Turquie, Kazakhstan	36 000 000	1,90 %	64	5	185
	Magnésium	Chine, Russie, Israël	970 000	0,05 %	437	36	35
	Nickel	Indonésie, Philippines, Russie	2 300 000	0,12 %	194	11	25
	Acier	Chine, Inde, Corée	1 800 000 000	94,77 %	23	2	3 346
Métaux d'alliage	Cobalt	Congo, Russie, Australie	140 000	0,35 %	322	3	0
	Cuivre	Chili, Pérou, Chine	21 000 000	53,11 %	64	4	82
	Titane	Chine, Canada, Australie	5 400 000	13,66 %	430	30	161
	Zinc	Chine, Pérou, Australie	13 000 000	32,88 %	48	4	47
Métaux précieux	Antimoine	Chine, Russie, Tadjikistan	140 000	82,15 %	13	1	0
	Platine	Afrique du Sud, Russie, Zimbabwe	160	0,09 %	270 500	20 600	3
	Or	Chine, Australie, Russie	3 260	1,91 %	68 400	5 100	17
	Argent	Mexique, Pérou, Chine	27 000	15,84 %	1 582	104	3
Métaux high-tech	Néodyme	Chine, Australie, Russie	23 000	5,58 %	392	33	1
	Molybdène	Chine, Chili, États-Unis	300 000	72,80 %	148	11	3
	Tungstène	Chine, Vietnam, Russie	82 000	19,90 %	357	29	2
	Yttrium	Chine, Inde, Brésil	7 100	1,72 %	756	63	0

Source : France Stratégie

37. Voir les annexes « Part de production des métaux des trois plus gros producteurs pour chaque métal et quantité mondiale extraite par substance en 2018 » et « Mix énergétique des pays producteurs des substances identifiées et part carbonée du mix en 2016 ».

38. C'est pourquoi nous ne prenons en considération que la localisation de la production des métaux ainsi que le mix énergétique des différents pays producteurs de métaux.

39. Voir les annexes disponibles en ligne. Si on prenait en compte les émissions analysées en cycle de vie (ACV), le contenu carbone de la production d'énergie issue du nucléaire, de l'hydraulique, de la géothermie et des biocarburants et des déchets ne serait pas nul.

On constate que les émissions de carbone varient très fortement selon les substances, avec pour facteurs principaux les dépenses énergétiques et le mix énergétique des pays producteurs. Le rapport est de 1 à 20 000 entre l'antimoine et le platine. Comme il s'agit là de deux métaux précieux, on ne peut pas dire que les émissions sont liées à la rareté des substances. Les écarts sont moins importants mais significatifs pour les autres familles : le rapport est de 1 à 18 pour les métaux de base, de 1 à 10 pour les métaux d'alliage et de 1 à 6 pour les métaux high-tech. Pour autant, lorsqu'on regarde par famille de métaux, on remarque que les dépenses énergétiques sont davantage en rapport avec leur rareté, voire leur utilisation industrielle ou leur préciosité. Ainsi, les métaux précieux (or, argent, platine) émettent en moyenne plus de CO₂ par tonne que les métaux de base (aluminium, acier, cuivre). En effet, pour extraire une tonne d'or, il faut 68 400 GJ/t dont environ 62 100 GJ/t carbonés (91 % d'énergie carbonée), ce qui équivaut à 5 100 tCO₂/t. Cette analyse d'ensemble est toutefois moins pertinente, car elle lisse les fortes disparités : l'antimoine, métal précieux, occasionne des émissions par tonne extraite deux fois moins importantes que l'acier, métal de base. La quantité d'énergie nécessaire à la production d'une matière première varie considérablement en fonction des métaux produits et des procédés employés pour la produire.

Si on raisonne en volume et non par unité de tonne extraite, on s'aperçoit que les métaux les plus abondants, exploités et consommés de manière beaucoup plus importante que les métaux high-tech ou précieux, sont la source des émissions de GES les plus élevées : ce sont les métaux de base, du type aluminium, acier et chrome, qui émettent le plus de CO₂ au moment de l'extraction et du raffinage.

De nombreux écueils

Cette approche comporte un certain nombre de limites que des calculs ultérieurs pourront corriger ou atténuer. Tout d'abord, la transition énergétique en cours agit à plusieurs niveaux – sur le mix énergétique, sur les technologies utilisées, sur l'intensité matérielle, etc. –, ce qui entraîne des incertitudes sur les quantités de métaux produits, sur leur contenu énergétique et carbone, sur la demande et sur le progrès technique.

Concernant la méthodologie, faute de données à jour pour tous les éléments, nous n'avons pris que les trois premiers pays producteurs des différents métaux et non pas l'en-

semble des pays, en nous référant aux données de l'USGS⁴⁰. Les dernières données liées aux mix énergétiques de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) datent de 2016. Or il est important de mettre à jour régulièrement les données, car la dépense en énergie carbonée pour extraire et raffiner un métal s'inscrit dans un cadre dynamique. Plusieurs paramètres qui jouent en sens contraire évoluent sur le moyen terme, ce qui peut forcer à recalculer les dépenses énergétiques par métal et les mix énergétiques des pays : le mix énergétique de certains pays tend à se décarboner ; la qualité des ressources se dégrade, occasionnant des dépenses énergétiques supplémentaires pour l'extraction et la transformation des métaux comme de l'énergie primaire ; enfin, la demande d'énergie croît à l'échelle mondiale.

Par ailleurs, nous n'avons pas étendu notre recherche au sujet du recyclage (voir encadré 2). Le recyclage des métaux permet une baisse de l'intensité énergétique⁴¹ mais induit d'autres contraintes, énergétiques ou non. La note se focalise sur l'énergie mobilisée pour les ressources primaires. Estimer les dépenses énergétiques du recyclage des métaux permettrait de compléter l'analyse en cycle de vie de l'externalité carbone des métaux⁴².

Enfin, l'échelle spatiale retenue est source d'approximation. En effet, on retient ici l'hypothèse que, dans un pays donné, le mix énergétique utilisé pour extraire les métaux est le même que le mix énergétique du pays dans son ensemble. Or l'extraction des métaux ne se fait pas au niveau du pays, mais bien à une échelle infranationale⁴³, et parfois avec des installations dédiées de production d'énergie.

COMMENT INTERNALISER L'EXTERNALITÉ CLIMATIQUE DE L'EXTRACTION DE RESSOURCES ?

Quelle prise en compte dans les politiques publiques ?

Une fois estimé le contenu carbone des différents métaux, on peut explorer les moyens d'« internaliser cette externalité », autrement dit d'intégrer le coût environnemental de cette teneur en carbone dans les prix. Il convient d'abord de connaître l'origine du produit. Si le métal est extrait et raffiné en France ou en Europe, l'entreprise extractive est soumise, selon sa taille et la quantité des émissions, soit à une réglementation carbone nationale (généralement *via* une taxe carbone), soit au marché carbone européen (EU ETS,

40. United States Geological Survey, Institut d'études géologiques des États-Unis.

41. En outre, le recyclage s'avère être un levier efficace pour augmenter les réserves. Relever le taux de recyclage de 40 % à 80 % reviendrait à multiplier les réserves par trois. Voir Bihouix P. (2013), « Matérialité du productivisme », in A. Sinai (dir.), *Penser la décroissance*, Presses de Sciences Po, collection « Nouveaux débats ».

42. Le recyclage constitue une source très importante d'approvisionnement en métaux pour l'industrie française : 100 % du plomb produit en France provient du recyclage des batteries, 90 % des matières premières utilisées dans la production de laiton sont des déchets métalliques et 53 % de l'acier produit est obtenu à partir de ferrailles. Voir www.mineralinfo.fr/page/minerais-metaux-1.

43. Infranationale désigne un phénomène dont la dimension est inférieure à celle d'un pays, comme c'est par exemple le cas pour une région.



Encadré 2 – Les enjeux de la prise en compte du recyclage et ses limites

Grâce au recyclage, les économies d'énergie liées à la production des métaux pourraient être significatives. Ainsi, l'énergie utilisée pour recycler l'aluminium est beaucoup plus faible que pour la production primaire, de l'ordre de 90 % à 97 %. On obtient des gains de même ordre pour l'or, l'argent, le palladium, etc. Pour l'acier, le métal le plus consommé, les bénéfices sont plus faibles (60 % à 75 %) mais demeurent importants⁴⁴.

Il peut paraître aisé d'intégrer ces estimations à nos évaluations – en supposant disponibles les données de la part de métaux recyclée dans la production des différents acteurs à travers le monde. Cependant, ces estimations occultent de nombreuses contraintes, énergétiques ou non, liées au cycle de recyclage. Par exemple, l'énergie dépensée pour la collecte et le retraitement est très difficilement quantifiable. Par leur nature même, les métaux se prêtent à un usage répété, mais trois limites au recyclage obèrent la possibilité de passer à une économie circulaire :

- *l'usage dispersif* : une partie de la matière est perdue par dispersion, que ce soit lors du recyclage ou de la production. Il est très difficile de récupérer les substances contenues dans les alliages ou de collecter les matières utilisées de manière dispersive⁴⁵;

système d'échange de quotas d'émission). Il n'y a donc pas lieu d'appliquer de nouvelles mesures pour internaliser l'externalité carbone des ressources métalliques⁴⁷. Il en est de même si le métal est recyclé.

En revanche, si le métal est extrait, raffiné et transformé à l'extérieur des frontières européennes – et les métaux sont principalement un produit d'importation –, il conviendrait d'appliquer un ajustement carbone aux frontières (ACF) intégrant cette externalité. L'ACF peut prendre la forme d'une taxe (ou droit de douane) ou d'une obligation à participer au marché du carbone européen. La mise en œuvre d'un tel instrument suppose d'avoir calculé l'empreinte carbone des métaux, qu'ils soient primaires ou secondaires (recyclés ou réutilisés), mais aussi le contenu

- *la perte mécanique de matière liée à l'entropie* ;
- *la dégradation d'usage* : le métal connaît une perte fonctionnelle. Pour qu'un métal puisse être considéré comme pleinement recyclé, il faudrait qu'il conserve toutes ses propriétés initiales.

Les métaux de base sont plus facilement recyclables car le degré de pureté habituellement nécessaire est plus faible que pour les métaux high-tech. Ils sont plus facilement récupérables et utilisés en plus grande quantité. Plus un produit est complexe, plus il est difficile de séparer ses composants et de récupérer les métaux d'origine.

En résumé, si le recyclage est à développer pour réduire les besoins énergétiques, il ne pourra pas remplacer le besoin de matière supplémentaire. D'une part, l'extraction des métaux et les externalités contingentes existeront toujours, au-delà de la croissance des besoins. D'autre part, le recyclage ne constitue en fine qu'un décalage temporel de quelques années de la rareté d'une ressource⁴⁶. Le recyclage suppose donc un travail à part entière afin que l'intensité énergétique des métaux de seconde main puisse être pleinement intégrée dans nos calculs.

en métal des biens importés, ce métal pouvant entrer pour la première fois sur le territoire européen de manière plus ou moins transformée et être incorporé dans d'autres biens⁴⁸. Il faut également connaître la chaîne de valeur des produits pour qu'ils ne soient pas assujettis plusieurs fois à la contrainte carbone. Une approximation du contenu carbone du produit métallique par la « meilleure technologie disponible » ou par de « bonnes pratiques » peut être envisagée pour pallier la difficulté d'évaluer le contenu en métal des produits⁴⁹. Ainsi, à l'expérimentation d'un ACF portant sur le ciment ou l'électricité⁵⁰, il pourrait être opportun d'ajouter à la liste l'acier ou l'aluminium.

En attendant la mise en place d'un tel instrument aux frontières de l'Union européenne, il paraît souhaitable d'inté-

44. UNEP (2013), *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*, Table 4.4, p. 86.

45. Bihouix P. (2013), « Matérialité du productivisme », *op. cit.*

46. Voir Grosse F. (2010), « Le découplage croissance/matières premières. De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage », *Futuribles*, n° 365, juillet-août.

47. Nous ne débattons pas ici du montant de la taxe carbone ou du prix du carbone sur l'EU ETS dont l'économie aurait besoin pour stimuler les changements structurels nécessaires.

48. Nous n'abordons pas ici les difficultés d'évaluation du contenu carbone ou en ressources de chaque bien.

49. Il faudrait répondre aux questions suivantes : quelle forme prendrait cet ajustement carbone ? taxe ou quotas ? quotas gratuits ? quelle compatibilité juridique avec le droit international du commerce ? Voir Bueb J., Hanania L. et Le Clézio A. (2017), « Border adjustment mechanisms: Elements for economic, legal, and political analysis », in Douglas A., Arndt C., Miller M., Tarp F. et Zinaman O., *The Political Economy Of Clean Energy Transitions*, Oxford University Press.

50. Lamy P., Pons G. et Leturcq P. (2020), « Verdir la politique commerciale européenne : oui, mais comment ? », *Policy Paper*, n° 241, Notre Europe, Institut Jacques Delors, juillet.

grer dans l'évaluation socioéconomique le contenu carbone des métaux importés. En se limitant dans un premier temps au cadre réglementaire actuel, les grands projets d'investissement publics pourraient se voir progressivement obligés d'intégrer dans l'analyse coûts-bénéfices les externalités liées aux ressources mobilisées. Ils devraient ainsi prendre en compte le coût carbone des métaux utilisés dans l'ensemble des projets, en retenant des hypothèses sur la part de matériaux recyclés dans les ressources utilisées (et sur l'économie carbone associée). Les investissements les plus économes en matière primaire seraient ainsi favorisés et l'industrie nationale et européenne ne serait plus désavantagée.

Les différentes valeurs de la tonne de carbone

Une fois déterminés les instruments capables d'intégrer la teneur en carbone des métaux se pose la question du montant à donner à cette externalité. On peut d'emblée exclure le prix actuel de la tonne de CO₂ fixé par l'EU ETS, jugé bien trop faible pour être significativement incitatif⁵¹. La littérature avance plusieurs propositions de valeur qui ont tantôt une portée nationale, tantôt une vocation internationale. La Commission Stern-Stiglitz⁵² propose une fourchette de prix allant de 38 euros à 76 euros par tonne de CO₂⁵³ à l'horizon 2020, qui augmente de 48 euros à 95 euros par tonne de CO₂ à l'horizon 2030⁵⁴. Ces montants sont applicables à l'ACF envisagé. Dans le cas d'une évaluation

Tableau 2 – Prix de la tonne de métal selon la valeur carbone en 2020 (Rapport Stern-Stiglitz) et en 2030 (Valeur d'action pour le climat et Special Report on Global Warming inférieur à 1,5°C) et part du coût carbone dans le prix final d'un métal

Famille de métaux	Métal	Émissions de CO ₂ (en tCO ₂ /t)	Émissions mondiales de CO ₂ (en MtCO ₂)	Prix du métal (en €/t)	Stern-Stiglitz 2020			VAC 2030		
					Coût carbone : prix moyen de 57€/tCO ₂ (38-76€/tCO ₂)	Coût carbone par rapport au prix du métal	Part de la composante carbone dans le prix final du métal*	Coût carbone : 250€/tCO ₂	Coût carbone par rapport au prix du métal	Part de la composante carbone dans le prix final du métal*
Métaux de base	Aluminium	17	1 025	1 613	974	60 %	38 %	4 271	265 %	73 %
	Chrome	5	185	6 790	293	4 %	4 %	1 284	19 %	16 %
	Magnésium	36	35	1 752	2 051	117 %	54 %	8 994	513 %	84 %
	Nickel	11	25	13 007	608	5 %	4 %	2 666	20 %	17 %
	Acier	2	3 346	421	106	25 %	20 %	465	110 %	52 %
Métaux d'alliage	Cobalt	3	0	25 610	155	1 %	1 %	679	3 %	3 %
	Cuivre	4	82	5 374	223	4 %	4 %	980	18 %	15 %
	Titane	30	161	14 833	1 704	11 %	10 %	7 475	50 %	34 %
	Zinc	4	47	2 207	207	9 %	9 %	909	41 %	29 %
Métaux précieux	Antimoine	1	0	6 813	57	1 %	1 %	252	4 %	4 %
	Platine	20 600	3	2 751 3713	1 174 200	4 %	4 %	5 150 000	19 %	16 %
	Or	5 100	17	291 441	290 700	1 %	1 %	1 275 000	3 %	3 %
	Argent	104	3	543 540	5 900	1 %	1 %	25 875	5 %	5 %
Métaux high-tech	Néodyme	33	1	53 000	1 865	4 %	3 %	8 180	15 %	13 %
	Molybdène	11	3	13 382	616	5 %	4 %	2 702	20 %	17 %
	Tungstène	29	2	41 617	1 666	4 %	4 %	7 307	18 %	15 %
	Yttrium	63	0	34 000	3 619	11 %	10 %	15 873	47 %	32 %

* Le coût carbone par rapport au prix du métal est le coût carbone rapporté au prix du métal. Il représente le poids de l'externalité carbone par rapport au prix de marché du métal sans régulation carbone. La part de la composante carbone dans le prix final du métal renvoie au poids du coût carbone dans un prix de vente du métal intégrant une réglementation carbone. Il s'agit de diviser le coût carbone par la somme du prix du métal et du coût carbone.

Source : France Stratégie

51. Voir par exemple l'article du CITEPA, « SEQUE : la Commission a publié le nombre total de quotas d'émissions en surplus en 2019 », 12 juin 2020.

52. World Bank Group (2019), *Report of the High-Level Commission on Carbon Pricing and Competitiveness*, World Bank Group, Washington, D.C.

53. L'ensemble des prix proposés est en euros 2018.

54. Ces valeurs pourraient dépendre du niveau de développement des pays assujettis. De plus, le rapport insiste pour mobiliser également les instruments réglementaires afin d'atteindre l'objectif climatique.



socioéconomique, les travaux de la commission Quinet définissent une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat (VAC) qui s'élève à 250 euros en 2030⁵⁵. Le *Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C* du GIEC recense également de nombreuses évaluations de tarification du carbone sous forme de taxe, de prix d'un marché carbone ou de valeur socioéconomique⁵⁶.

On retient ici les prix du carbone proposés par la commission Stern-Stiglitz et par la valeur socioéconomique déterminée par la VAC et on les applique aux émissions carbone des métaux étudiés. On remarque l'inégal poids des dépenses énergétiques dans le prix de vente de chaque métal. Le prix de chaque métal n'est pas directement et principalement corrélé à l'énergie mobilisée. D'autres facteurs – géologiques, industriels, géopolitiques, à caractère financier ou de thésaurisation pour les métaux précieux – peuvent jouer un rôle plus important dans la formation des prix. En conséquence, le poids d'une éventuelle internalisation de l'externalité climatique est fortement variable et ne dépend pas des seules dépenses énergétiques associées.

En retenant le milieu de la fourchette de prix estimé du rapport Stern-Stiglitz en 2020 (respectivement, la VAC en 2030), soit 57 euros (250 euros), l'externalité carbone de

l'extraction et du raffinage de l'aluminium sera évaluée à 974 euros en 2020 (4 271 euros en 2030). Ce montant représente 60 % (265 %) du prix de l'aluminium échangé aujourd'hui. Ce coût carbone est très élevé. Il reflète l'importance des émissions de la filière aluminium.

Intégrée dans le prix final du produit à hauteur de 57 euros (250 euros), la part de la composante carbone oscille de 1 % du prix final à 54 % (de 3 % à 84 %). Globalement, ce sont les métaux de base qui seraient les plus affectés par l'internalisation de la contrainte carbone. Au contraire, les métaux précieux seraient peu affectés : leur rôle comme valeur refuge et bien de luxe – même si certains sont aussi utilisés dans les nouvelles technologies – a un impact majeur sur la formation de leur prix.

Notons que l'application d'une tarification de l'externalité carbone ou de dispositifs équivalents ne conduirait pas à une modification des prix à proportion. Ceux-ci réagiraient plus ou moins fortement en fonction de l'élasticité prix des métaux, de la possibilité de substitution de ceux-ci ou de leur nature de coproduit ou de sous-produit. Un prix du carbone suffisamment élevé affectera néanmoins l'ensemble des métaux, au contraire d'un prix faible.

CONCLUSION

Dans le cadre de la transition écologique amorcée par la France, la *Feuille de route pour l'économie circulaire* préconise de « mieux gérer nos ressources naturelles » car leur exploitation est source de nombreuses externalités. Parmi ces ressources figurent en bonne place les métaux, qui lors de leur extraction et de leur raffinage génèrent d'importantes émissions de carbone. Ils mobilisent des quantités élevées d'énergie, notamment dans les pays où les mix énergétiques sont fortement dépendants des énergies fossiles. Internaliser cette externalité des métaux par une valorisation des émissions peut contribuer à orienter l'investissement des acteurs de la filière, à financer la transition et à réduire la dépendance de la croissance économique à la consommation de métaux.

Les métaux étant principalement des matières importées, valoriser l'externalité carbone des métaux ou des produits intégrant des métaux dans un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières paraît souhaitable. Élément clé du débat actuel, face à un marché de métaux fortement internationalisé, un tel mécanisme pourrait inciter les pays extracteurs et raffineurs de métaux à investir dans l'efficacité énergétique de leur production. Ils participeraient ainsi à la réduction des émissions de GES du secteur. En attendant la mise en place d'un tel mécanisme à l'échelle européenne, il semble possible d'intégrer rapidement les valeurs de l'externalité carbone des ressources dans l'évaluation socioéconomique.

L'extraction et le raffinage des métaux engendrent de nombreuses externalités négatives. Nous avons étudié les rejets de CO₂ liés à ces processus. Internaliser ces coûts, au moyen de taxes, ou de droits, en incluant les métaux importés grâce à un ajustement carbone aux frontières, est un outil important pour parvenir à limiter ces émissions. De la même manière, étudier les émissions engendrées par le recyclage et y appliquer la même logique devrait permettre de favoriser l'utilisation de métaux recyclés.

Mots clés : ressources métalliques, externalité carbone, extraction et raffinage des métaux, EROI, recyclage

55. Cette VAC n'a pas nécessairement vocation à se traduire directement en taxe. Elle consiste avant tout en une référence à retenir dans l'évaluation socioéconomique. Voir France Stratégie (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, février.

56. Ce rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat relève des fourchettes de prix s'établissant entre 128 et 5 217 euros/tCO₂ en 2030, avec pour cible de limiter le réchauffement sous 1,5 °C (entre 10 et 190 euros en 2030 pour 2 °C). L'écart entre les bornes basse et haute nous conduit à considérer les valeurs de ce rapport comme davantage applicables à une évaluation socioéconomique. GIEC (2018), *Special Report on Global Warming of 1.5 °C*.

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)

Directeur de la publication :
Gilles de Margerie,
commissaire général

Directeur de la rédaction :
Cédric Audenis,
commissaire général adjoint

Secrétaire de rédaction :
Olivier de Broca,
Valérie Senné

Impression :
France Stratégie

Dépôt légal : octobre 2020
N° ISSN 2556-6059

Contact presse :
Matthias Le Fur,
directeur du service
Édition-Communication-Événements
01 42 75 61 37
matthias.lefur@strategie.gouv.fr



FRANCE STRATÉGIE

Institution autonome placée auprès du Premier ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens

Note d'analyse n° 96, octobre 2020

Comment évaluer l'externalité carbone des métaux

Julien Bueb et Évelyne To, département Développement durable et numérique

Annexe 1 – Les différents métaux et l'évolution de leur usage dans la production industrielle

Un métal est une matière issue le plus souvent d'un minerai ou d'un autre métal. Il a des caractéristiques de conduction de chaleur et d'électricité, de dureté et de malléabilité qui peuvent se combiner avec celles d'autres métaux pour former des alliages utilisables dans l'industrie. Les métaux se différencient entre eux par leurs propriétés physico-chimiques, électriques et magnétiques¹. Sur des critères métallurgiques ou économiques, des groupes de métaux peuvent être formés, sachant que certains métaux appartiennent à plusieurs groupes et que la liste n'est pas exhaustive² :

- métaux de base ferreux et non ferreux (fer, manganèse, aluminium, cuivre, plomb, etc.) ;
- métaux d'alliage (cobalt, aluminium, cuivre, zinc, titane, nickel, étain, etc.) ;
- métaux précieux (ex. or, argent, platine, palladium, rhodium, etc.) ;
- métaux spéciaux ou high-tech ;
- petits métaux ou métaux rares ;
- métaux stratégiques ou métaux critiques.

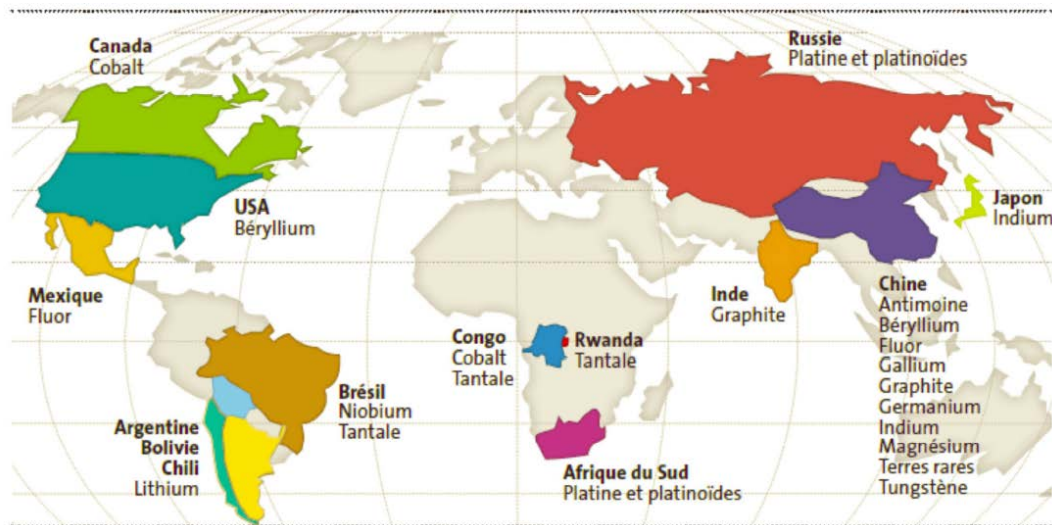
Depuis la révolution industrielle, l'usage des métaux a été modifié à mesure que les innovations et les besoins évoluaient. Ainsi, les métaux lourds (plomb et mercure en particulier), très polluants, furent les premiers à être employés. La demande qui leur est adressée à l'heure actuelle est en déclin, principalement à cause des réglementations environnementales. Ils sont néanmoins encore utilisés dans les pays en développement. Les métaux ferreux (hors métaux lourds) sont nécessaires à l'urbanisation, l'industrialisation et aux infrastructures. La demande croît faiblement (2,5 % par an en moyenne sur vingt-cinq ans), mais les volumes consommés sont élevés. Les métaux d'alliages (cuivre, zinc) ont une croissance et une cyclicité plus fortes (de 3 % à 5 % de croissance). Les métaux high-tech, petits métaux et métaux stratégiques, constituent une ou plusieurs autres catégories. Leur demande suit les innovations. Leur croissance peut dépasser les 20 % par an. Une large part des métaux high-tech ont une production inférieure à 200 000 tonnes par an et géographiquement très concentrée.

De manière générale, la consommation des métaux correspond au stade de développement des pays. Ainsi, les pays en développement (PED) utilisent relativement davantage de métaux ferreux et de base tandis que les pays développés ont une consommation plus importante de high-tech. Ces différents besoins en matières premières soulignent le clivage de développement entre le Nord et le Sud, tant au niveau des quantités consommées que de la qualité des métaux utilisés.

¹ On distingue les métaux alcalins, les alcalino-terreux, les métaux de transition, les métaux pauvres et les alliages.

² Pour les besoins de notre travail, nous retenons dix-sept métaux répertoriés dans quatre catégories de métaux (voir *infra*).

Figure 1 — Carte de répartition des principaux pays producteurs de matières premières minérales essentielles aux industries high-tech



Source : Bersani F. (2012), « Les ressources minérales métalliques, enjeu pour le développement durable », BRGM, *Géoscience*, n° 15

Peu sollicités dans les années 1980 – une dizaine seulement de ces différents métaux étaient employés –, les métaux high-tech ont depuis fait l’objet d’études poussées afin de permettre leur intégration dans de nouveaux processus de production. Une soixantaine environ servent désormais aux industriels. Utilisés dans un premier temps à des fins militaires (pièces d’artillerie, guidage balistique, batteries de véhicules), ils participent désormais activement au développement des nouvelles technologies et particulièrement à celui des technologies vertes. Ainsi, engagés politiquement dans la problématique du changement climatique, les pays industrialisés cherchent à diminuer leur consommation énergétique (que ce soit au niveau de la consommation énergétique ou de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)) en remplaçant les biens énergivores par de nouveaux produits « verts » qui intègrent des métaux high-tech. Par exemple, les lampes électroluminescentes ou LED nécessitent du gallium et les batteries des voitures hybrides du lithium. Les énergies renouvelables sollicitent également et fortement les ressources métalliques. Le néodyme et le dysprosium sont utilisés dans les aimants permanents pour les génératrices d’éoliennes. Les gallium, indium, sélénium, cadmium ou tellure sont mobilisés dans certains panneaux photovoltaïques³. Les centrales nucléaires font encore davantage appel aux métaux⁴.

Il est donc vital pour ces pays, contributeurs historiques au changement climatique, d’assurer un accès pérenne à ces ressources tant du point de vue des besoins environnementaux que du développement des industries de pointe – industries à forte valeur ajoutée potentielle.

³ Technologies dites CIGS ou Cd-Te. Voir Philippe Bihouix, « Matérialité du productivisme », in. Sinaï A. (2013), *Penser la décroissance. Politiques de l’Anthropocène*, Presses de Sciences Po, coll. « Nouveaux Débats ».

⁴ Par exemple, titane, cobalt et tantale sont présents dans les aciers inoxydables et les alliages à haute teneur en nickel, très largement employés dans la robinetterie nucléaire. Le zirconium sert à emballer les barres de combustible. Le hafnium, le cadmium, l’indium, l’argent, le sélénium absorbent les neutrons. Le lithium est employé comme réfrigérant pour les réacteurs ou comme dissolvant de combustible nucléaire. Voir P. Bihouix, « Matérialité du productivisme », in. Sinaï A. (2013), *Penser la décroissance*, op. cit.

Annexe 2 – Les autres externalités liées aux activités extractives et de raffinage des métaux

Hors GES, les externalités peuvent être réparties en deux catégories :

- les impacts sur la biodiversité, les écosystèmes et la qualité de l'eau – déforestation, altération du cycle de l'eau, rupture de la continuité écologique, artificialisation des sols, perte des capacités de filtration naturelle de l'eau, bruit et vibrations dus à l'activité minière, risques liés au transport, à la manipulation, au stockage, à l'émission et à l'élimination des matières dangereuses – figurent parmi les dommages directs à la biodiversité et aux écosystèmes. Ce sont des externalités liées essentiellement à l'extraction, moins au raffinage qui dépend des conditions de mise en œuvre de processus industriels. Indirectement, l'eutrophisation⁵ des eaux, par la contamination des eaux de surface ou souterraines, peut nuire à la bonne santé de la biodiversité et des écosystèmes. L'impact des exploitations sur les écosystèmes locaux peut entraîner une augmentation en volume des déchets. Certaines substances métalliques peuvent être radioactives. De manière générale, l'utilisation massive de produits chimiques dans les procédés d'extraction ou de traitement du minerai conduit à des pollutions à très long terme, après la fin de l'exploitation. De plus, si les modifications profondes des écosystèmes par les activités minières et de traitement des métaux sont relativement concentrées, l'impact peut être plus diffus et global dans le cas de l'utilisation et des rejets en fin de vie ;
- les enjeux sanitaires : si la biodiversité, les écosystèmes et le cycle de l'eau peuvent être endommagés, la santé des populations dépendantes s'en trouvera altérée. Par exemple, en 2011, les métaux étaient responsables de 39 % des impacts sur la santé causés par les émissions de particules fines. Entre 2000 et 2015, ce chiffre a doublé. Sur la même période, les effets en termes de toxicité ont également progressé, mais à un rythme moins soutenu⁶.

⁵ L'eutrophisation des milieux aquatiques désigne le déséquilibre d'un milieu provoqué par la concentration de substances telles que l'azote ou le phosphore. Elle se traduit par une croissance excessive de plantes ou d'algues qui absorbent l'oxygène, conduisant à l'appauvrissement puis à la mort de l'écosystème.

⁶ International Resource Panel (2019), *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*, p.76.

Annexe 3 – Tableaux

Figure 1 — Part de production des métaux des trois plus gros producteurs pour chaque métal et quantité mondiale extraite par substance en 2018

Pays / Production en tonne	Aluminium	Antimoine	Chrome	Cobalt	Cuivre	Or	Magnésium	Molybdène	Néodyme	Nickel	Platine	Argent	Acier	Titane	Tungstène	Zinc	Yttrium
Chine	55%	71%			8%	12%	82%	43%	90%			13%	49%	16%	82%	33%	99%
Russie	6%	10%		4%		9%	7%		1%	9%	13%				3%		
Inde	6%												6%				1%
Tadjikistan		10%															
Afrique du Sud			46%								69%						
Turquie			18%														
Kazakhstan			13%														
République démocratique du Congo				64%													
Australie				3%		10%			5%				13%			7%	
Chili					28%			20%									
Etats-Unis								14%									
Israël							3%										
Pérou					11%							16%				12%	
Indonésie										24%							
Philippines										15%							
Zimbabwe											9%						
Mexique												23%					
Canada													16%				
Vietnam														7%			
Corée													6%				
Brésil																	0%
Monde	60 000 000	140 000	36 000 000	140 000	21 000 000	3 260	970 000	300 000	23 000	2 300 000	160	27 000	1,8 x 10 ⁹	5 400 000	82 000	13 000 000	7 100
Représentativité des 3 premiers pays	67%	91%	86%	72%	41%	31%	92%	73%	96%	48%	91%	52%	62%	44%	92%	53%	100%

Source : U.S. Geological Survey, "Mineral Commodity Summaries 2019"

Figure 2 — Mix énergétique des pays producteurs des substances identifiées et part carbonée du mix en 2016

Pays	Charbon	Gaz naturel	Pétrole primaire et secondaire	Nucléaire	Hydraulique	Géothermie, solaire, etc	Biocarburants et déchets	Part carbonée du mix
Chine	65%	6%	18%	2%	3%	2%	4%	89%
Russie	15%	51%	24%	7%	2%	0%	1%	90%
Inde	44%	5%	25%	1%	1%	1%	22%	74%
Etats-Unis	16%	30%	36%	10%	1%	2%	5%	82%
Australie	34%	27%	33%	0%	1%	1%	4%	94%
Chili	19%	12%	43%	0%	5%	1%	21%	74%
Congo	0%	0%	2%	0%	3%	0%	95%	2%
Brésil	6%	11%	39%	1%	12%	1%	30%	56%
Canada	6%	33%	35%	9%	12%	1%	4%	74%
Indonésie	19%	17%	31%	0%	1%	8%	25%	67%
Pérou	4%	34%	41%	0%	9%	1%	12%	79%
Pologne	50%	15%	26%	0%	0%	1%	8%	91%
Tadjikistan	20%	0%	32%	0%	48%	0%	0%	52%
Afrique du Sud	70%	3%	15%	3%	0%	1%	9%	88%
Turquie	28%	28%	31%	0%	4%	6%	2%	87%
Kazakhstan	43%	35%	20%	0%	1%	0%	0%	98%
Israël	23%	34%	41%	0%	0%	2%	0%	98%
Philippines	26%	6%	34%	0%	1%	18%	15%	66%
Zimbabwe	17%	0%	10%	0%	2%	0%	71%	27%
Mexico	7%	36%	48%	1%	1%	2%	5%	91%
Vietnam	34%	12%	28%	0%	7%	0%	19%	74%
Corée	29%	15%	39%	15%	0%	0%	2%	83%
Monde	27%	22%	32%	5%	3%	2%	10%	81%

Source: International Energy Agency (2016) "Statistics data browser Total primary Energy Supply (TPES) by source World 1990-2016" (TPES excludes electricity and heat trade)

Figure 3 — Émissions de CO₂ en kg CO₂/GJ pour chaque source d'énergie primaire

Source primaire	Charbon	Gaz naturel	Pétrole primaire et secondaire	Nucléaire	Hydraulique	Géothermie, solaire, etc.	Biocarburants et déchets
Émissions de CO ₂ [kg CO ₂ /t]	104	56,1	73,6	0	0	0	0

Source : Ademe : http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm

Note : Les émissions exprimées en kg CO₂e/GJ ont été estimées sur un périmètre européen. Pour le charbon, le calcul a été fait en prenant en compte les émissions en amont et en combustion. Étant donné que le charbon à coke et le charbon vapeur représentent près de 99 % des usages du charbon⁷, nous avons retenu que le facteur d'émission s'établissait à 104 kgCO₂e / GJ PCI^{8 9}. Pour le pétrole (périmètre Europe), les émissions s'élèvent à 73,6 kgCO₂e / GJ PCI. Les émissions du gaz naturel sont estimées à 56,1 kgCO₂e / GJ PCI.

⁷ <https://jancovici.com/transition-energetique/charbon/a-quoi-sert-le-charbon/>

⁸ Il existe une grande variété de types de charbon liée à des niveaux d'houillification différents. Ils se distinguent notamment par leur humidité, leur teneur en carbone ou leur pouvoir calorifique. Il n'y a pas de définition unique internationalement retenue permettant de classer précisément les charbons.

⁹ PCI désigne le pouvoir calorifique inférieur du combustible exprimé en GJ/t. 104 kgCO₂e / GJ PCI est le facteur d'émission du charbon à coke comme du charbon vapeur.