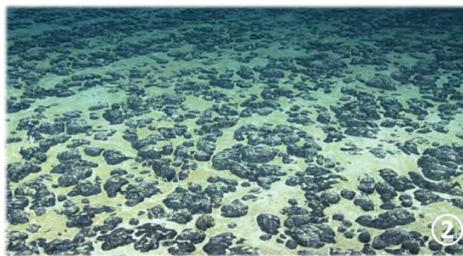


RAPPORT DE SYNTHÈSE

Entretien Thinkerview du 25 janvier 2022

Sources et compléments

Synthèse des principaux faits traités durant l'entretien, sources documentaires associées et compléments d'information.



Juin 2022

► Illustrations page de couverture

- ① Déversement de résidus suite à la rupture de digue de janvier 2019, mine de fer de Brumadinho, Brésil | TV NBR · 2019 · cc by 3.0
- ② Nodules polymétalliques | NOAA Office of Ocean Exploration and Research, 2019 Southeastern US Deep-sea Exploration ; tiré de (Fauna & Flora International (FFI), 2020, p.12)
- ③ Parc à résidus miniers à Rouyn-Noranda, Canada | Gabriel Legaré · 2011 · cc
- ④ Fonderie de nickel de Doniambo, Nouvelle-Calédonie | Tim Waters · 2003 · cc-by-nc-nd 2.0
- ⑤ Rivière Animas entre Silverton et Durango, 24 heures après le déversement des boues contaminées ; catastrophe de Gold King, Colorado, États-Unis, en août 2015 | Riverhugger · 2015 · cc by-sa 4.0
- ⑥ Carte électronique | Luke Jones · 2015 · cc by-sa 2.0
- ⑦ Décharge de déchets électroniques à Accra, Ghana | Axel Drainville · 2019 · cc by-nc 2.0
- ⑧ Exploitation de charbon, Kalimantan Est, Indonésie | Moses Ceaser/CIFOR · 2010 · cc by-nc-nd 2.0

► L'association SystExt

SystExt pour « Systèmes extractifs et Environnements » est une association de solidarité internationale, née en 2009. L'association se donne pour objectif d'obtenir la transparence et la démocratisation des enjeux associés aux filières minérales. Elle se concentre sur l'industrie minière et ses impacts humains, sanitaires, sociaux et environnementaux. La spécificité de SystExt réside dans le fait que ses membres soient des professionnels du secteur, ou confrontés à ce secteur dans l'exercice de leur métier. Ses missions s'organisent autour de quatre champs d'action : veille citoyenne, accompagnement de la société civile, sensibilisation, formation et expertise.

► Crédits des contenus de ce rapport (sauf si précisé)



SystExt, Juin 2022, CC BY-NC-SA 3.0 FR

Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 France

SOMMAIRE

1. Industrie du déchet dangereux.....	7
1.1. Mine, minerais et métaux	7
1.1.1. Distinction entre matières premières minérales, métaux et minéraux industriels	7
1.1.2. Rareté géochimique	8
1.1.3. Cortège de substances associées	9
1.2. Quantités considérables de déchets et d'effluents miniers	10
1.2.1. Mine industrielle et grande échelle.....	10
1.2.2. Premier producteur industriel de déchets solides, liquides et gazeux	11
1.2.3. Gestion inadaptée des résidus miniers et problématiques graves associées	13
1.3. Ruptures de digues minières.....	13
1.4. Modèle minier actuel intrinsèquement insoutenable	16
2. Métaux et modèle de développement : les dérives	17
2.1. Monde matériellement fondé sur les minéraux et métaux.....	17
2.1.1. Liens historiques entre industrie et matières premières minérales.....	17
2.1.2. Industrie minière en France et en Europe	18
2.1.3. Croissance métallique hors effets associés à la transition	19
2.2. Paradoxe du lien entre mine et transition énergétique	19
2.2.1. Dispositifs de la transition énergétique très consommateurs de métaux.....	19
2.2.2. Intégration des ressources renouvelables dans l'industrie minière	20
2.2.3. Secteur énergivore.....	21
2.2.4. Pratiques discursives de « verdissement » de la mine par la transition.....	22
2.3. Repenser l'utilisation des métaux au regard des besoins	23
2.3.1. Rapport Varin sur la sécurisation des approvisionnements	23
2.3.2. Filières minérales « polarisées » et « concurrentes »	23
2.4. Pour une « dénumérisation » de nos sociétés	25
2.4.1. Dépendance du secteur du numérique en métaux de spécialité.....	25
2.4.2. Démystification nécessaire des terres rares	26
2.4.3. Diversification métallique et conception défavorable au recyclage	26
3. Véhicule électrique.....	28
3.1. Bilan actuel en demi-teinte par rapport aux émissions et rejets	28
3.1.1. Davantage d'émission de gaz à effet de serre au moment de la fabrication	28
3.1.2. Prise en compte très insuffisante de l'amont et de l'aval filière	30
3.1.3. Augmentation exponentielle de la quantité de métaux.....	30
3.2. Cas particulier de la batterie.....	31
3.2.1. Polarisation des attentions sur la cathode.....	31
3.2.2. Technologies NMC répandues mais d'autres à l'étude	31

4.	Violation des droits humains et impacts sociaux	33
4.1.	Conflits socio-environnementaux et criminalisation des populations.....	33
4.1.1.	Criminalisation des mouvements de protestation.....	33
4.1.2.	Impacts associés pour les entreprises en termes réputationnels et financiers.....	34
4.2.	Graves violations des droits humains	35
4.2.1.	Secteur responsable du plus grand nombre d'abus et des pires violations.....	35
4.2.2.	Sécurisation des sites miniers par des forces privées ou publiques	35
4.2.3.	Expropriations et déplacements forcés	36
5.	Limites et aberrations de la mine industrielle d'or	38
5.1.	Intérêt minier pour cette substance	38
5.2.	Usages de l'or	39
5.2.1.	Principaux usages de l'or : joaillerie, produits financiers et bancarisation	39
5.2.2.	Recyclage de l'or performant et suffisant	40
5.3.	Cyanuration.....	40
5.3.1.	Premier procédé utilisé par l'industrie aurifère	40
5.3.2.	Maintien de cette technique de traitement pour des raisons économiques.....	41
5.4.	Opposition stricte au projet Montagne d'Or	42
5.4.1.	Importante mobilisation de SystExt durant plus de 4 ans.....	42
5.4.2.	Risques environnementaux et sanitaires majeurs.....	42
6.	Ampoules	44
6.1.	Performance énergétique versus dopage métallique.....	44
6.1.1.	Promotion des ampoules « basses consommation »	44
6.1.2.	Économie d'énergie et augmentation de la durée de vie	44
6.1.3.	Métaux contenus dans les ampoules fluocompactes	45
6.1.4.	Métaux contenus dans les ampoules LED	46
6.2.	Difficultés de recyclage	46
6.2.1.	Vers des déchets dangereux	46
6.2.2.	Recyclage très partiel et mise en décharge	47
6.2.3.	Recyclage jugé non intéressant économiquement.....	48
6.3.	Prise en compte insuffisante des impacts environnementaux.....	48
6.3.1.	Impacts environnementaux beaucoup plus élevés.....	48
6.3.2.	Substitution progressive de l'ampoule fluocompacte par la LED	49
6.3.3.	Nécessité de changer d'approche.....	49
7.	Exploitation minière en eaux profondes.....	51
7.1.	Conditions d'exploitation extrêmes	51
7.2.	Impacts environnementaux graves prévisibles	51
7.3.	Seule solution viable : l'interdiction	53

8. Questions complémentaires	55
8.1. Que penser de l'exploitation minière spatiale ?.....	55
8.2. Quel métal pour remplacer le cuivre dans ses usages électriques ?.....	55
8.3. Quelles perspectives pour le lithium en France ?	55
8.4. Comment réintégrer le coût des externalités dans le prix ?.....	56
8.4.1. Premier levier : Définir des teneurs en-dessous desquelles un gisement ne peut pas être exploité	56
8.4.2. Deuxième levier : Interdire l'exploitation dans les zones trop fragiles	57
8.4.3. Troisième levier : Vendre à un prix « juste » les produits issus de l'exploitation minière	57

CONTEXTE

Le 25 janvier 2022, Aurore STEPHANT, représentant l'association SystExt, a été interviewée dans l'émission Thinkerview. L'entretien, intitulé « *L'effondrement : le point critique ?* » d'une durée de 03h10min¹, porte sur plusieurs thématiques relatives aux mines et filières minérales, notamment : les impacts environnementaux, sociaux et humains de l'industrie minière ; l'omniprésence des métaux dans tous les biens du quotidien et dans tous les secteurs ; les paradoxes associés aux « transitions » numérique et énergétique (avec le cas particulier des véhicules électriques et des ampoules « basse consommation ») ; les limites associées à notre modèle de développement et aux prévisions de « croissance métallique » ; l'exploration et l'exploitation minière des grands fonds marins.

Le présent rapport de synthèse se donne pour objectif de **diffuser au plus grand nombre les informations traitées durant l'entretien** et d'**accompagner celles et ceux qui souhaitent approfondir un ou plusieurs sujets**. Pour ce faire, ce document : (1) rappelle les principaux faits (ou « faits marquants ») traités durant l'entretien (au nombre de 120) ; (2) étaye ces faits et en fournit les sources documentaires (livres, rapports, publications scientifiques, articles de presse) ; (3) propose des compléments d'information « pour aller plus loin ».

Pour une meilleure lisibilité, ce rapport a été organisé par thématique, en prenant en compte autant que possible l'ordre chronologique de l'entretien. Chaque fait est présenté dans un tableau de synthèse sous le format suivant² :

	(1) Temps à partir duquel le fait marquant est discuté
	(1) Fait marquant, rappel des informations et des données fournies lors de l'entretien
	Information apportée par SystExt pour compléter le fait marquant
	(2) Extraits sourcés étayant le fait marquant
	(2) Sources documentaires (livres, rapports, publications scientifiques, article de presse) associées
	(3) Compléments d'information « pour aller plus loin », extraits sourcés
	(3) Sources documentaires associées aux compléments d'information

Dans le cas où les données fournies durant l'entretien nécessitaient d'être corrigées ou précisées (une trentaine d'occurrences au total), une mention en rouge a été apposée en précisant la donnée initiale ainsi que la donnée corrigée ou précisée.

Pour chaque source documentaire, un lien internet permettant d'accéder à ladite source est fourni, hormis pour les livres et quelques rares références non disponibles en ligne. Tous les liens étaient fonctionnels en date du 20 juin 2022.

¹ La vidéo de l'entretien est disponible sur la chaîne Youtube de Thinkerview [au lien suivant](#).

² Crédit des icônes : Licence Flaticon · www.flaticon.com. Auteurs : Sablier · Roundicons ; Citation · adapté de juicy_fish ; Engrenages · Freepik ; Loupe · bqlqn ; Livre · Freepik ; Jumelles · Gregor Cresnar.

1. Industrie du déchet dangereux

1.1. Mine, minerais et métaux

1.1.1. Distinction entre matières premières minérales, métaux et minéraux industriels



00:01:56



On distingue les métaux des minéraux industriels.



- Les **métaux** consistent en des corps simples, c'est-à-dire qu'ils se composent d'un seul élément chimique. On les utilise pour de nombreuses applications, en valorisant leurs propriétés diverses. En général, ils sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, et sont reconnus pour leur dureté (même s'il existe des exceptions, comme le lithium ou le mercure). D'autres de leurs propriétés peuvent être mises à profit, comme : la malléabilité, l'élasticité, la résistance à la corrosion, la résistance à l'oxydation, le magnétisme, etc. (SystExt, 2020, p.3)
- Un **minéral** se définit comme un solide naturel composé de plusieurs (voire de nombreux) éléments chimiques et ayant une structure atomique ordonnée. Il existe quelques exceptions cependant, comme le diamant, qui est un minéral composé d'un seul élément chimique : le carbone. (SystExt, 2020, p.3)
- On regroupe les métaux, les métalloïdes et les minéraux sous le nom de **matières premières minérales**. (SystExt, 2020, p.3)
- Les **minéraux industriels** recouvrent une large gamme de minéraux, qui nécessitent en général moins de transformations que les métaux pour obtenir un produit « fini », utilisable dans l'industrie. On trouve notamment : des argiles (illite, kaolinite, smectite, bentonite...), des carbonates (calcite, dolomite, sidérite...), des silicates (silice, feldspaths...), des sulfates (gypse, barytine...). (SystExt, 2020, p.4)



SystExt. (2020). Outil | Métaux boulot dodo · Livret d'animation. [Lien](#).



00:02:45



La distinction entre carrière et mine dépend de la substance exploitée (notamment dans la réglementation française) ; certaines relevant du régime carriériste, comme les minéraux industriels, et d'autres du régime minier (et donc du code minier), comme la plupart des métaux.



Relèvent du régime légal des mines les gîtes renfermés dans le sein de la terre ou existant à la surface connus pour contenir les substances minérales ou fossiles suivantes :

1° Des hydrocarbures et des combustibles fossiles, la tourbe exceptée, qu'ils soient sous forme solide, liquide ou gazeuse, du graphite, du diamant ; 2° Des sels de sodium et de potassium à l'état solide ou en dissolution, à l'exception de ceux contenus dans les eaux salées utilisées à des fins thérapeutiques ou de loisirs ; 3° De l'alun, des sulfates autres que les sulfates alcalino-terreux ; 4° De la bauxite, de la fluorine ; 5° Du fer, du cobalt, du nickel, du chrome, du manganèse, du vanadium, du titane, du zirconium, du molybdène, du tungstène, de l'hafnium, du rhénium ; 6° Du cuivre, du plomb, du zinc, du cadmium, du germanium, de l'étain, de l'indium ; 7° Du cérium, du scandium et autres éléments des terres rares ; 8° Du niobium, du tantale ; 9° Du mercure, de l'argent, de l'or, du platine, des métaux de la mine du platine ; 10° De l'hélium, du lithium, du rubidium, du césium, du radium, du thorium, de l'uranium et autres éléments radioactifs ; 11° Du soufre, du sélénium, du tellure ; 12° De l'arsenic, de l'antimoine, du bismuth ; 13° Du gaz carbonique, à l'exception du gaz naturellement contenu dans les eaux qui sont ou qui viendraient à être utilisées pour l'alimentation humaine ou à des fins thérapeutiques ; 14° Des phosphates ; 15° Du béryllium, du gallium, du thallium ; 16° De l'hydrogène natif.

(Code minier français, Article L111-1)



Art. L111-1 du Code minier. [Lien](#).

1.1.2. Rareté géochimique



00:05:00



Il y a une certaine mythologie autour de la rareté des métaux (certains le seraient plus que d'autres), alors que dans les faits, la plupart des métaux sont des substances rares puisque leur abondance moyenne dans la croûte terrestre est généralement très faible, exception faite de : l'aluminium (Al), du fer (Fe), du magnésium (Mg) (*non cité), du titane (Ti) et du manganèse (Mn). Dans les gisements, la majorité des métaux se trouvent à des teneurs de l'ordre du pourcent ou du dixième de pourcent, voir au gramme par tonne.



[...] la plupart des métaux sont des substances rares puisque leur abondance moyenne dans la croûte terrestre est généralement très faible [...], **exception faite de l'aluminium (Al), du fer (Fe), du magnésium (Mg), du titane (Ti) et du manganèse (Mn)** (Skinner, 1979). Certes, ils se concentrent dans des gisements mais les quantités restent alors très faibles. [...] Si les cinq métaux listés ci-dessus présentent des teneurs élevées, pour les autres substances métalliques, les teneurs dans les gisements sont généralement **de l'ordre du pourcent ou du dixième de pourcent**. Quant aux métaux précieux comme l'or (Au), l'argent (Ag) ou le platine (Pt), les teneurs s'expriment en gramme par tonne (g/t), signifiant qu'il sera nécessaire d'extraire et de traiter une tonne de roche pour récupérer quelques grammes de métal. (SystExt, 2021, p.14)



SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).



00:05:45

00:25:10 (pour la teneur moyenne des mines de cuivre)



- Exemples de teneurs d'éléments métalliques « classiques ». tungstène (W) : **0.3 à 2 % (*au lieu de 0.2 à 3%)** ; uranium : 0,1 à 0,3 % ; lithium : 0,05 à 0,15 % dans les salars.
- Dans les mines de cuivre, la teneur moyenne des gisements de cuivre au Chili est de **0.64 % (*donnée 2020, mises à jour)**. Cela a diminué de 2 en une trentaine d'années (*vingtaine).



- Tungstène : [...] teneurs comprises entre **0.3 et 2 % de W**. (L'Élémentarium, *Fiche Tungstène*)
- Lithium : La production de lithium est assurée à partir de deux sources : [...] L'exploitation de saumures de lacs salés en partie asséchés, appelés « salars » et présents principalement dans l'Altiplano de la Cordillère des Andes et au Tibet. **La teneur en lithium de ces lacs salés peut atteindre 0.16 % pour le « salar » d'Atacama, 0.05 % pour celui de Zhabuye, au Tibet**. [...] L'exploitation, généralement à ciel ouvert, de gisements de pegmatites granitiques, roches lithinifères, [...]. Par exemple, pour le gisement de spodumène de Greenbushes, en Australie, qui a une teneur de 1,43 % de Li₂O [...]. (L'Élémentarium, *Fiche Lithium*)
- Cuivre : Les teneurs des minerais exploités sont généralement comprises entre 0,3 et 2 %, exceptionnellement jusqu'à 5 % par exemple au début de l'exploitation de la mine de Neves Corvo, au Portugal. La teneur moyenne des minerais exploités est passée de 1.34 % en 1990 à 0,78 % en 2008. Au Chili, en 2020, la teneur moyenne des minerais exploités est de 0.64 %. (L'Élémentarium, *Fiche Cuivre*)



- L'Élémentarium, Fiche Tungstène. [Lien](#).
- L'Élémentarium, Fiche Lithium. [Lien](#).
- L'Élémentarium, Fiche Cuivre. [Lien](#).



- Voir Teneurs moyennes des gisements exploités dans le monde pour certains métaux ([Tableau 1 ; SystExt, 2021, p.14](#))



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- L'Élémentarium : <https://lelementarium.fr>. Concernant les teneurs moyennes d'exploitation pour chaque substance, voir fiche individuelle puis "matières premières".



00:06:20



Les teneurs sont particulièrement faibles dans les gisements de métaux précieux (or, argent, platine), de l'ordre du gramme par tonne. Moyenne des **199 (*au lieu de 399)** gisements d'or exploités en 2013 : **1.18 g/t (*au lieu de 1.15 g/t)**



- 1,18 g/t : Teneur moyenne dans l'industrie minière de l'or ; 5,3 g/t pour les 50 premières mines mondiales (Croharé, 2015, p.18)
- Réserves mondiales totales en 2013 : Réserves non exploitées = 68 898 tonnes ; 0.89 g/t ; 381 gisements ; Réserves exploitées = 46 726 tonnes ; 1,18 g/t ; 199 gisements. (Croharé, 2015, p.15)



Croharé, P. (2015). La production mondiale minière d'or en danger ou vers une pénurie d'or physique et une hausse record des cours de l'or ? [Lien](#).



Natural resource holdings. (2013). Global 2013 gold mine and deposit rankings. [Lien](#).

1.1.3. Cortège de substances associées



00:07:10



Contrairement aux idées reçues, un gisement contient toujours plusieurs, voire de nombreux métaux et métalloïdes, autre que le(s) métal(aux) d'intérêt. Il est très fréquent que les mines de cuivre produisent aussi du molybdène. Substances souvent associées à l'or dans les gisements aurifères : argent (Ag), cuivre (Cu), zinc (Zn), antimoine (Sb), uranium (U), mercure (Hg), arsenic (As), baryum (Ba).



- Le sulfure de molybdène est extrait soit de mines de molybdène (Mo), particulièrement aux États-Unis, au Canada et en Chine pour environ 28 % de la production mondiale, **soit est coproduit dans des mines de cuivre, par exemple, aux États-Unis, au Chili, au Pérou..., pour 72 % de la production mondiale**. La teneur des mines de molybdène (Mo) est comprise entre 0,1 et 0,3 % de Mo, celle des mines de cuivre coproduisant du molybdène, comprise entre 0,02 et 0,2 % de Mo. (L'Élémentarium, Fiche Molybdène)
- Dans les gisements, les métaux ne se présentent pas sous forme pure. Ils s'associent avec d'autres éléments comme de l'oxygène, du soufre, du carbone... et forment des minéraux (oxydes, sulfures, carbonates...). Dans le minerai, ces minéraux dits « d'intérêt » (car ils portent le métal recherché), sont imbriqués avec d'autres minéraux. Ainsi, un minerai contient une (ou plusieurs) substance(s) d'intérêt mais aussi de nombreuses autres substances. [...] **Exploiter une mine d'or permet certes de produire de l'or (Au) et de l'argent (Ag) (qui est un co-produit fréquent des filières aurifères) mais implique de prendre le risque de libérer de l'uranium (U), de l'antimoine (Sb), du cuivre (Cu), du zinc (Zn), du baryum (Ba), de l'arsenic (As) et du mercure (Hg).** [...] Bien que toutes ces substances ne soient pas systématiquement associées aux minerais d'or de toutes les mines du monde, il s'agit de celles qui sont fréquemment rencontrées. Par ailleurs, il n'est pas rare que d'autres métaux accompagnent les gisements aurifères, tels que : le plomb (Pb), le cadmium (Cd) ou le bismuth (Bi). (SystExt, 2021, pp.14-15)
- Voir Roue de la complémentarité des métaux, représentant, pour certains des principaux métaux, les co-produits possibles ainsi que les substances associées qui sont le plus souvent émises dans les rejets et les effluents (Nassar, et al., 2015, p.3)



▪ SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).

▪ L'Élémentarium, Fiche Molybdène. [Lien](#).

▪ Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product Metals Are Technologically Essential but Have Problematic Supply. *Science Advances*, 1(3), 1-10. [Lien](#).



00:08:15



Exemple de l'ancienne mine d'or de Salsigne (11), pendant longtemps plus grande mine d'or de France ; et premier producteur mondial d'arsenic.



La mine de Salsigne (11), fermée fin 2004, a été au cours du XXème siècle la plus importante mine européenne. Elle a été exploitée depuis 1892 pour l'arsenic et 1924 pour l'or. [...] Au total, la production a été de 100 t d'or et 300 t d'argent. [...] Pendant longtemps, la mine de Salsigne a produit de l'arsenic à partir d'arsénopyrite et a été le plus important producteur mondial (10 000 t/an). ([L'Élémentarium, Fiche Or](#))



L'Élémentarium, Fiche Or. [Lien](#).



- Pujol, H. (2014). Tristes mines : Impacts environnementaux et sanitaires de l'industrie minière. Salsigne : la mine dort, la pollution veille. *Les études hospitalières, A la croisée des regards*.
- SystExt. (2019). La mine d'or de Salsigne : Panorama d'un échec environnemental. [Lien](#).

1.2. Quantités considérables de déchets et d'effluents miniers

1.2.1. Mine industrielle et grande échelle



00:27:20



Industrie dont l'emprise en surface est particulièrement importante. La majorité des mines du monde sont exploitées à ciel ouvert (57% en nombre, 88% en production) et sont à grande échelle.



Actuellement, la technique d'exploitation à ciel ouvert est celle qui est la plus mise en œuvre (Drezet, 2014a ; Bailey, 25/04/2016, *Mining.com*), représentant 57 % des sites miniers dans le monde et 88 % du minerai brut produit (Martino, et al., 13/07/2021, *MacKinsey & Company*). ([SystExt, 2021, p.57](#))



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Drezet, E. (2014). Les mines de minerais métallifères. *EcoInfo, CNRS*. [Lien](#).
- Bailey, R. (2016). Emerging trends in the mining industry. *Mining.com*. [Lien](#).
- Martino, R., McCann, P., Ray, R., & van der Ende, O. (2021). Digging deeper: Trends in underground hard-rock mining for gold and base metals. *McKinsey & Company*. [Lien](#).



00:27:47



La mine industrielle produit l'essentiel des matières premières minérales dans le monde. En effet, celle-ci représente 88 % de la production globale de métaux, **69 % (*au lieu de 60)** des minéraux industriels et 80 % du charbon.



Other assessments claim that small mines account for 12% of the global metal production, 31% of industrial minerals and 20% of coal [...]. ([Lottermoser, 2010, p.29](#))



Lottermoser, B. (2010). Mine Wastes - Characterization, Treatment and Environmental Impacts. *Third Edition. Springer*.



00:28:40



La plus grande mine à ciel ouvert d'Afrique du Sud est Palabora. La fosse fait 2 km sur 762 m de haut. À partir du travail de **Dillon Marsh** (*au lieu de Dillon Marshall), SystExt a représenté la quantité de cuivre produite, par rapport à l'emprise des installations de surface et des dépôts miniers (25 km²). Mise en évidence entre le bénéfice que l'on tire de de cette exploitation et les externalités que cette production induit.



Mine de cuivre de Palabora, Afrique-du-Sud. L'exploitation y a débuté en 1964 par une mine à ciel ouvert, devenue la plus grande cavité artificielle du continent africain, avec un diamètre de presque 2 km et une profondeur de 762 m (2,5 fois la hauteur de la Tour Eiffel) (Mining Technology, 2020). Sur la Figure 9 à gauche, est représentée la quantité de cuivre métal produite par la mine jusqu'à environ 2007. Cette « boule métallique » est représentée à droite de la même figure par un point blanc sur une vue satellitaire du site minier en 2021. Bien que cette représentation ne permette de comparer que des surfaces (et non des volumes), elle permet tout de même d'appréhender l'écart entre l'emprise des déchets miniers et des installations minières, que SystExt évalue à environ 25 km², et la quantité de métal récupérée. (Figure 9 ; SystExt, 2021, p.26)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Travaux du photographe Dillon Marsh : <http://dillonmarsh.com/>

1.2.2. Premier producteur industriel de déchets solides, liquides et gazeux



00:09:55

00:26:20 (sur le fait que la mine soit le plus gros producteur de déchets)



- La mine est le secteur industriel qui génère le plus de contaminants métalliques.
- L'industrie minière est le plus gros producteur industriel de déchets solides, liquides et gazeux.



- Mining operations are understood to have some of **the highest concentrations of potential harmful contaminants derived through anthropogenic activities**, along with the highest particulate emissions and the highest risk to both human and environmental health (Stewart, 2020, p.1155)
- The mining industry is the most significant industrial producer of solid, liquid and gaseous wastes. (Lottermoser, 2010, p.41)



- Stewart, A. (2020). Mining is bad for health: a voyage of discovery. *Environmental Geochemistry and Health*, 1153-1165. [Lien](#).
- Lottermoser, B. (2010). Mine Wastes - Characterization, Treatment and Environmental Impacts. *Third Edition*. Springer.



00:11:20



Le volume de déchets miniers se compte en millions, dizaines de millions voire centaines de millions de tonnes par an à l'échelle d'un site minier.



- Mine wastes present the highest proportion of solid waste produced by industrial activity, with approximately 20,000-25,000 Mt [Millions of tons] being produced annually. (Lottermoser, 2010, p.41)
- The Global Tailings Review estimates that the total number active, inactive and closed storage facilities is 8 500 with 217 km³ of tailings, enough to fill a cube of 6 km high. Annual tailings growth : 12.3 km³. (Le Pan, 2021)
- For example, more than 4700 Mt of mining waste and 1200 Mt of tailings are stored all over the European Union, most of the mine waste in Finland, Germany, Greece, Ireland, Portugal, Spain, Sweden, and the United Kingdom [...]. (Lottermoser, 2010, p.11)
- The global area covered with mine waste is probably in the order of 100 million hectares containing several hundred thousand million tonnes of mine wastes. (Lottermoser, 2010, pp.18-19)



- Le Pan, N. (2021). Visualizing the Size of Mine Tailings, *Visualcapitalist*. [Lien](#).
- Lottermoser, B. (2010). Mine Wastes - Characterization, Treatment and Environmental Impacts. *Third Edition*. Springer.



00:12:05



Impacts majeurs sur les eaux souterraines, exemple de la mine d'uranium-or d'Olympic Dam en Australie. Cette mine se trouve au-dessus du *Great Artesian Basin*, qui est la plus profonde et la plus importante nappe artésienne au monde. À l'horizon 2055, c'est-à-dire au terme de ce que l'on pense être la fin de l'activité minière, le niveau d'eau souterrain devrait avoir diminué de 10 m sur 4 400 km².



Dans la mine d'uranium-or d'Olympic Dam (Australie), la conduite des travaux d'exploitation requérait en 2013 le pompage journalier de 35 millions de litres d'eaux souterraines dans le *Great Artesian Basin*, qui est la plus grande et la plus profonde nappe artésienne au monde. Il est estimé qu'en 2055, à l'arrêt prévu des travaux miniers et donc de l'exhaure, le niveau de la nappe aura diminué de 10 m sur une surface de 4 400 km² (Northey, et al., 2016). ([SystExt, 2021, p.22](#))



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., & Haque, N. (2016). Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*, 135, 1098-1116. [Lien](#).



00:15:02



Pour illustrer la difficulté de stockage des résidus miniers qui se présentent sous forme de boues, exemple de la mine de cuivre-or de Rio Tinto, en Espagne. L'aire de stockage des boues résiduelles s'étend sur une emprise de 500 hectares et présente une profondeur de quelques dizaines de mètres.



Mesures réalisées par SystExt à partir de vues satellitaires (environ 540 hectares et environ 30-40m de haut). ([Google Earth, 2019](#))



Vue satellitaire de Google Earth · Date des images satellite : 15/06/2019. Latitude : 37.727152° ; Longitude : -6.601447°.



[...]. C'est le cas du district minier de cuivre, argent et or de Río Tinto, en Espagne, qui s'étend sur 628 km² [...]. La contamination des sols, des eaux de surface et de l'air est entretenue par les gigantesques volumes de déchets miniers et d'eaux minières [...]. ([SystExt, 2021, p.129](#))



- Castillo, S., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., González-Castanedo, Y., Fernández-Caliani, J., Gonzalez, I., & Romero, A. (2013). Contribution of mine wastes to atmospheric metal deposition in the surrounding area of an abandoned heavily polluted mining district (Rio Tinto mines, Spain). *Science of The Total Environment*, 449, 363-372. [Lien](#).
- Davis, R., Welty, A., Borrego, J., Morales, J., Pendon, J., & Ryan, J. (2000). Rio Tinto estuary (Spain): 5000 years of pollution. *Environmental Geology*, 39(10), 1107-1116. [Lien](#).
- Fernández-Caliani, J., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., González-Castanedo, Y., & Castillo, S. (2013). Mineralogy of atmospheric dust impacting the Rio Tinto mining area (Spain) during episodes of high metal deposition. *Mineralogical Magazine*, 77(6), 2793-2810. [Lien](#).
- Olias, M., & Nieto, J. (2015). Background Conditions and Mining Pollution throughout History in the Río Tinto (SW Spain). *Environments*, 2(3), 295-316. [Lien](#).
- Sánchez de la Campa, A., de la Rosa, J., Fernández-Caliani, J., & González-Castanedo, Y. (2011). Impact of abandoned mine waste on atmospheric respirable particulate matter in the historic mining district of Rio Tinto (Iberian Pyrite Belt). *Environmental Research*, 111(8), 1018-1023. [Lien](#).
- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).

1.2.3. Gestion inadaptée des résidus miniers et problématiques graves associées



00:15:38



Technique de réintroduction des résidus dans les vides créés par l'exploitation minière (en souterrain ou en ciel ouvert) *ou backfilling*. Au maximum, on peut réintroduire 52 % dans le meilleur des cas en Europe.



Dans tous les cas, la totalité des déchets miniers (stériles et résidus) ne pourra pas être réintroduite dans les chantiers souterrains. Si pour les stériles miniers, des taux de remblayage élevés peuvent être atteints (les trois-quarts étant une proportion fréquemment rencontrée), pour les résidus miniers, ces taux sont plus faibles. Une réintroduction de 50 % des résidus miniers sous forme de remblais miniers ferait déjà partie des meilleurs taux appliqués dans les mines de métaux « communs » en Europe. 16 à 52 % du volume total de résidus est utilisé comme remblai dans les mines souterraines européennes qui extraient des métaux « communs ». (SystExt, 2020, p.66-67)



- SystExt. (2020). PERM dit de « la Fabrié », commune de Fontrieu (81) - Analyse des risques associés à l'implantation d'un projet minier de tungstène. [Lien](#).
- Commission européenne. (2009). Document de référence sur les meilleures techniques disponibles - Gestion des résidus et stériles des activités minières. [Lien](#).



00:16:35



Technique de gestion des résidus miniers par déversement volontaire.



La pratique consiste à évacuer les résidus (et les stériles miniers dans certains cas, plus rares), le plus souvent sans traitement préalable, dans les rivières, les lacs ou les mers [...]. Les conduites d'évacuation sont généralement placées à une profondeur élevée dans la masse d'eau (quelques dizaines à quelques centaines de mètres), lorsque cela est possible. Cette gestion des résidus miniers, compte-tenu de leur nature [...], soulève des problématiques environnementales majeures, ce qui remet en cause la pertinence même de poursuivre cette pratique. Selon SystExt, **il s'agit de la technique de gestion des déchets miniers la plus polluante et destructrice qui soit**. (SystExt, 2021, p.89)



SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#). *De façon générale sur les déversements volontaires : voir chapitre 4 de la page 89 à 112.*

1.3. Ruptures de digues minières



00:19:22



Les digues de stockage de résidus miniers sont régulièrement soumises à des accidents. En fonction des années, **3 à 7 (*au lieu de 4 à 6 en moyenne)** accidents majeurs se produiraient par an. Sachant que les statistiques dont on dispose sont partielles puisqu'il arrive que des accidents de plus petite ampleur ne soient pas nécessairement référencés dans les bases de données publiques auxquelles SystExt (et la société civile en général) a accès.



Nombre d'accident référencés sur les 10 dernières années dans la base de données Wise Uranium Project : 4 en 2021 ; 3 en 2020 ; 7 en 2019 ; 4 en 2018 ; 3 en 2017 ; 6 en 2016 ; 3 en 2015 ; 6 en 2014 ; 3 en 2013 ; 3 en 2012. (Wise Uranium Project)



Wise Uranium Project. (2022). Chronology of major tailings dam failures. [Lien](#).



00:19:57



On a peu entendu parler des ruptures de digues, pourtant il s'en est produit de très importantes en Europe : 1998, Aznalcollar, Espagne (7 millions de mètres cubes de déchets) ; 2000, Baia Mare, Roumanie ; 2000, Borsa, Roumanie ; **2010 (* au lieu de 2008)**, Kolontar, Hongrie. Libération massive et brutale de volumes de boues de l'ordre du million de m³.



1998, Aznalcollar, Espagne : A la suite de la rupture d'une digue d'un bassin de stockage, 7 millions de tonnes d'effluents miniers acides à forte teneur en métaux lourds polluent 80 km de cours d'eau et contaminent près de 10 000 ha. [...] Le 25 avril 1998 vers 2h30, un glissement de terrain provoque les ruptures successives du barrage de séparation des deux bassins, puis de la digue périphérique sur 50 m. Les 2 bassins contiennent alors au total 31 millions de tonnes de déchets. 3 millions de tonnes de boues et 4 millions de tonnes d'eaux acides se déversent et rejoignent le Rio Agrio et le Guadiamar dont le niveau monte alors de 3,6 m en 30 min. [...] Le GUADIAMAR déborde de 200 à 300 m sur près de 20 km, répandant des boues sur des milliers d'hectares et sur une épaisseur moyenne de 10 cm. Les abords immédiats du bassin sont recouverts d'une couche de plus de 3 m d'épaisseur. D'importantes teneurs en plomb (8 g/kg MS), en zinc (7 g/kg MS), en arsenic (3 g/kg MS) et en cuivre (2 g/kg MS) seront mesurées dans les boues déposées. ([Ministère de l'Environnement, 2008a, pp.1-3](#))



Ministère de l'Environnement. (2008a). Effondrement de la digue d'un bassin de stockage de déchets miniers - Le 25 avril 1998 - Aznalcollar, Espagne. *Fiche ARIA n°12831*. [Lien](#).



▪ **2000, Baia Mare, Roumanie** : A la suite de la rupture d'une digue d'un bassin de stockage le 30 janvier 2000, 300 000 m³ d'effluents cyanurés détruisent totalement la faune et la flore sur plus de 600 km de cours d'eau. [...] 287500 m³ d'effluents contenant des cyanures (115 t) et des métaux lourds (Cu [cuivre] : 54,7 mg/l, Zn [zinc] : 2,1 mg/l) contaminent une superficie de 14 ha et polluent la Sasa [...] Une « vague » de 30 à 40 km de long contenant des effluents cyanurés se propagera les jours et semaines suivantes sur la Lapus, la Szamos, la Tisza et le Danube. [...] Le 18 février, la trainée de cyanure est encore mesurable (CN⁻ [cyanure libre] : 0,05 mg/l) dans le delta du fleuve, 2 000 km en aval du lieu de l'accident [...] ([Ministère de l'Environnement, 2008a, pp.1-3](#))

▪ **2000, Borsa, Roumanie** : Two months later, this failure was followed by another upstream dam failure at the nearby Borsa lead and zinc mine, which also occurred as a result of overtopping. These two incidents released more than 200 000 cubic metres of contaminated water and 40 000 tonnes of tailings into tributaries of the Tisza River, a major tributary of the Danube [...]. ([GRID-Arendal, 2017](#))



▪ Ministère de l'environnement. (2008b). Pollution des eaux par des effluents cyanurés en Europe de l'Est - Le 30 janvier 2000 - Baia Mare - Roumanie. *Fiche ARIA n°17265*. [Lien](#).

▪ GRID-Arendal. (2017). The location of the Baia Mare and Borsa tailings disasters in Romania and the affected rivers. *GRID-Arendal*. [Lien](#).



▪ **2010, Kolontar, Hongrie** : L'usine déverse la boue rouge dans des bassins de rétention dans la vallée de la Torna située entre Ajka et Kolontár. [...] L'usine s'étend sur 49 hectares et les réservoirs couvrent 207 hectares supplémentaires. Le volume du réservoir 10 est de 4 500 000 m³ et il occupe à sa base 19 hectares. [...] Le 4 octobre 2010 vers midi, une fissure (d'environ 50 mètres de long) apparaît sur le mur d'enceinte du bassin de rétention de boue rouge du réservoir 10. Une eau fortement alcaline issue du processus Bayer pour le traitement de la bauxite, contenant des résidus d'aluminium et de métaux toxiques, inonde immédiatement la ville de Kolontár, puis celle de Devecser ainsi que d'autres villes. En raison de la rupture de la digue, la rivière Torna et la vallée sont contaminées par plus d'1 million de m³ de boue rouge alcaline. [...] Cet accident est la plus grave catastrophe industrielle survenue en Hongrie. On dénombre au total 10 morts, 286 blessés [...]. ([Ministère de l'Environnement, 2011, pp.2-5](#))



Ministère de l'environnement. (2011). Rejet massif de boue rouge d'aluminium après rupture d'un bassin de stockage - Le 4 octobre 2010 - Kolontár - Hongrie. *Fiche ARIA n°39047*. [Lien](#).



00:21:25



Récemment, deux épisodes au Brésil dans des mines de fer : en 2015, à Samarco, une coulée de boue qui a parcouru plus de 500 km le long du Rio Doce, avec la mort de 19 personnes dans le village de Bento Rodrigues ; en 2019, à Brumadinho, la rupture d'une digue fermée (qui n'était plus utilisée pour stocker des déchets), avec 300 personnes mortes et disparues. [...] . Autre épisode dramatique : 2014, Mount Polley, Canada.



A Brazilian mining disaster, also known as the **Samarco disaster**, occurred on **5th November 2015** at the Fundão dam located around Mariana city, Minas Gerais State. The mud wave produced by the dam failure, estimated at 43 million m³, spread over several kilometers down the slope, reaching the Doce River, the second-longest river in Brazil [...], turning it into a “sea” of red mud [...]. This river served as a primary source of water and fish for several local communities. Subsequently, the contaminants in the Doce River were delivered to the Atlantic Ocean, after travelling around 665 km [...], seriously affecting coastal environments and marine ecosystems [...]. Besides the extensive and serious water pollution, the disaster also killed 20 people, caused mass death of fishes, flooded almost 7000 km² that covered the Bento Rodrigues district, and adversely affected the Abrolhos Marine National Park [...].

After 3 years of the **Mariana tragedy**, on **25th January 2019**, another mining dam consisting of iron ore tailings failed catastrophically in the Brumadinho city, Minas Gerais State, Brazil. The rupture produced more than 11 [millions of] m³ of mining waste – equivalent to a 10-m high wave of mud that spread 10 km the downhill – that reached the Paraopeba River; a major tributary of the São Francisco River. Although the volume of mud derived from the Brumadinho disaster is less than the case of Mariana, the event caused far more significant loss of lives. As of January 2020, the death toll hit 259 people, while 11 individuals remain missing. (Silva Rotta, et al., 2020, pp.1-2)



Silva Rotta, L.H., Alcântara, E., Park, E., Negri, R.G., Lin, Y.N., Bernardo, N., Gonçalves Mendes, T.S., & Souza Filho, C.R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90. 1-12. [Lien](#).



2014, Mount Polley, Canada : On August 4th, 2014, a partial embankment breach of the Mount Polley tailings storage facility (TSF) in British Columbia, Canada, led to the release of approximately 25 [millions of] m³ of mine tailings and supernatant water into the Quesnel River Watershed [...]. The embankment breached due to a geotechnical failure of a layer of glacio-lacustrine clay in the foundation materials below the dam [...]. (Byrne, et al., 2018, p.64)



- Byrne, P., Hudson-Edwards, K., Macklin, M., Brewer, P., Bird, G., & Williams, R. (2015). The long-term environmental impacts of the Mount Polley mine tailings spill, British Columbia, Canada. Proceedings of the EGU General Assembly Conference. [Lien](#).
- IEEIRP. (2015). Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel - Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach. [Lien](#).



00:23:05



En 2017, le Programme des Nations Unies s’empare de la question des ruptures de digues et rédige un rapport dans lequel il explique que ce sont systématiquement des problématiques de négligence et de sous-estimation qui sont en cause. L’étude conclue que l’on peut intervenir et que l’on ne met pas assez de moyens pour entretenir ces ouvrages, principalement pour des raisons économiques.



▪ For many years the overall number of annual tailings dam failures has been in decline, however, the number of serious failures has increased [...]. There is no publicly accessible inventory of tailings dams, however, one estimate has put the number of tailings dams at 3 500 [...]. This is likely an underestimate as there could be more than 30 000 industrial mines [...]. (Roche, et al., 2017, p.6)

▪ **The authors found that all 221 failures examined were avoidable** – that the technical knowledge to build and maintain tailings storage facilities existed, but that **an inadequate commitment to safe storage combined with poor management was the cause of most failures**. Unfortunately, despite this realization and the development of many new measures, guidelines and improved practices, tailings storage facilities have continued to fail. Furthermore, the issue of safely storing tailings may become even more challenging as the volume of waste from mines increases due to lower ore grades [...] and as climate change brings about more intense and variable weather events. An inadequate response will see failures continue, impacting communities, human rights and environments, and the reputation and profitability of mining ventures. (Roche, et al., 2017, p.10)



Roche, C., Thygesen, K., & Baker, E. (2017). Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. *United Nations Environment Programme and GRID-Arendal*. [Lien](#).

1.4. Modèle minier actuel intrinsèquement insoutenable



02:42:28
02:43:00



Question posée : Est-ce que l'on peut faire une mine durable ?

- Il faut se rendre compte des limites intrinsèques de la mine, dans la façon dont on peut (ou non) l'exploiter. À partir du moment où on travaille avec des quantités importantes (on parle de millions de tonnes) de matériaux, en souterrain, alors qu'il y a de l'eau (qu'il faut pomper), qu'il y a de nombreux métaux et métalloïdes (la plupart étant toxiques), il faut avoir conscience que c'est ça la mine, et que ça ne va pas bien se passer.

- En revanche ce qu'on peut faire, c'est minimiser au maximum. Le problème, pour cela, est qu'il faut avoir des technologies qui permettent de minimiser. Force est de constater que dans ce domaine d'activité (n'en déplaise à beaucoup qui prétendent qu'il y a beaucoup d'alternatives et de meilleures pratiques) on n'est pas du tout au même niveau que d'autres secteurs industriels.



- [...] SystExt démontre que l'industrie minière n'est pas comme les autres industries, du fait de la gravité des dommages humains, environnementaux et sociaux qu'elle occasionne, le plus souvent irréversibles, et de son emprise temporelle et géographique. [...] **sa principale caractéristique est d'être une industrie extrêmement polluante, qui relargue des quantités considérables de substances toxiques, principalement des métaux et métalloïdes.** Aux États-Unis, par exemple, ce secteur est le premier pollueur du pays selon l'Agence de protection environnementale américaine (US EPA) (Kuipers, 2003, p. 3) : "The EPA [...] ranks the mining industry as the nation's top toxic polluter, reporting more toxic releases annually than any other industry sector." [...] : "dans la plupart des pays du monde [...] l'activité minière reste largement une activité prédatrice" (Deshaies, 2007, p. 7). (SystExt, 2021, p.13)

- Consequently, **the current mining paradigm can be considered inherently unsustainable**, and there is a recognized need for the development of new approaches for more sustainable exploitation of known but currently unviable metal deposits. (Martens, et al., 2021, p.1)

- To be frank, **no modern, large-scale, open-pit mine can be operated without significant long-term impacts**, partly because most [...] of all rock moved and processed at modern open-cast metal (e.g., gold, copper, uranium, silver) mines ends as waste [...]. (Goodland, 2012, p.2103)

- Across the world, mining contributes to erosion, sinkholes, deforestation, loss of biodiversity, significant use of water resources, dammed rivers and ponded waters, wastewater disposal issues, acid mine drainage and contamination of soil, ground and surface water, all of which can lead to health issues in local populations [...]. (Stewart, 2020, p.1154)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).

- Martens, E., Prommer, H., Sprocati, R., Sun, J., Dai, X., Crane, R., . . . Fourie, A. (2021). Toward a more sustainable mining future with electrokinetic in situ leaching. *Science Advances*, 7(18), 1-10. [Lien](#).

- Goodland, R. (2012). Responsible Mining: The Key to Profitable Resource. *Sustainability*, 2099-2126. [Lien](#).

- Stewart, A. (2020). Mining is bad for health: a voyage of discovery. *Environmental Geochemistry and Health*, 1153-1165. [Lien](#).

2. Métaux et modèle de développement : les dérives

2.1. Monde matériellement fondé sur les minéraux et métaux

2.1.1. Liens historiques entre industrie et matières premières minérales



00:32:20
00:33:00 (liens entre mine et industrie)



- Polarisation des débats actuellement sur le contenu métallique du numérique et plus particulièrement des téléphones ou des ordinateurs portables. Ce que l'on n'a pas dit, peu dit, ou mal dit, c'est que tout est comme un téléphone portable. Tout notre monde est matériellement fondé sur le métal. Cela ne date pas de l'apparition des selfies, cela date de plusieurs siècles et cela a toujours été le cas.
- L'industrie et la mine sont extrêmement liées. Selon Christmann en 2020, elles sont liées par « *des boucles complexes de rétroaction* »



Ce développement et celui, parallèle, de l'ingénierie industrielle ont permis à la fois une forte et rapide croissance de la production de matières premières minérales et de celles de biens industriels de plus en plus complexes, ces productions étant liées par des boucles complexes de rétroaction. (Christmann, 2020, p.36)



Christmann, P. (2020). Matières premières minérales stratégiques : quels enjeux ? *Géologues* (204), 36-40.



00:33:45



Basculement de l'utilisation de l'acide sulfurique de l'industrie chimique vers les engrais à la fin du XIXème siècle offrant de nouveaux débouchés pour les mines de pyrite (sulfure de fer).



Dans le cycle des productions chimiques, la pyrite joue un rôle de première importance puisqu'elle permet la production de l'acide sulfurique, base du procédé Leblanc. Cependant, la place de l'acide sulfurique dans l'industrie chimique est remise en cause par le procédé Solvay de fabrication de la soude à l'ammoniac, qui se développe à la fin du XIXème siècle et l'électrolyse du chlore au début du XXème siècle. L'acide sulfurique, par là même, n'entre plus dans le processus de fabrication de nombreux produits chimiques. **Mais le développement de la fabrication d'engrais (superphosphates) offre un débouché nouveau pour l'acide sulfurique [...].** (Grange, 1994, p.68)



Sur le basculement de l'utilisation de l'acide sulfurique de l'industrie chimique vers les engrais :
Grange, A. (1994). L'exploitation des mines de pyrites de Saint-Gobain à Sain-Bel 1870-1914. *Entreprises et histoire*, 6, 67-86. [Lien](#).

Sur la fabrication d'engrais phosphatés :
SystExt. (2020). Outil | Voracité de la mine industrielle · Fiche A4 Filières, pp.5-8. [Lien](#).



00:35:25



La première utilisation de la machine à vapeur était destinée à pomper l'eau dans les gisements de charbon qui étaient devenus trop profonds. La première ligne de chemin de fer d'Europe continentale Saint-Étienne - Andrézieux en 1827, se limite les premiers temps au transport du charbon.



- Les mines sont les premières à avoir utilisé le pouvoir de la vapeur. Pour éviter que les galeries soient inondées il faut pomper l'eau qui s'y infiltre en permanence. [...] La machine est largement adoptée et participe au développement des mines de charbon en Grande-Bretagne avant que la machine de James Watt (1736-1819) vienne la remplacer à partir de 1775 et donner une nouvelle accélération à l'industrie charbonnière. (Borvon, 2015)
- Les trois premières lignes de chemin de fer créées en France allaient de Saint-Étienne à Andrézieux (1827), de Saint-Étienne à Lyon (1830-1833) et d'Andrézieux à Roanne (1833). Leur vocation première était industrielle : il s'agissait de faciliter l'exportation du charbon du bassin stéphanois. (L'Aventure du train)



- Borvon, G. (2015). Le charbon et la vapeur au siècle de l'industrie. [Lien](#).
- L'Aventure du train. Aux origines du chemin de fer en France. [Lien](#).

2.1.2. Industrie minière en France et en Europe



00:40:15



À partir des années 1980, on a fermé de plus en plus de mines. 2004, fermeture de la mine d'or de Salsigne, 2004, fermeture du puits de charbon de la Houve, c'est à peu près la même période de la fermeture des bassins uranifères dans le Limousin. Ce sont les années 2000, ce n'est pas si ancien que cela. Il subsiste aujourd'hui quelques mines de sel et de bauxite (pour l'aluminium) sur le territoire métropolitain.



- La mine de Salsigne (11), fermée fin 2004, a été au cours du XX^{ème} siècle la plus importante mine européenne. ([L'Élémentarium, Fiche Or](#))
- Symboliquement, l'ultime tonne devait être extraite, vendredi 23 avril, à La Houve, en Lorraine. Les 4 265 mineurs restant sur le territoire vont se consacrer à la remise en état des sites, avant que l'entreprise publique Charbonnages de France se saborde d'ici à 2008. ([Bastuck, 2004](#))
- L'industrie du nucléaire cristallise en France de nombreux débats, de la bombe atomique à l'énergie électronucléaire, jusqu'aux risques associés au traitement de ses déchets [...]. En revanche, la question des anciennes mines d'uranium est longtemps restée une question minorée, voire occultée [...]. Ce n'est qu'au tournant des années 2000 que les enjeux environnementaux des anciennes mines et usines de traitement de l'uranium intègrent l'agenda politique, par le prisme des « restes » et des « déchets » laissés par cette industrie dans les territoires [...] Près de vingt ans après la fermeture de la dernière mine d'uranium sur le sol français, en 2001, ces espaces conservent une part d'incertitude. Si certains lieux bénéficient encore d'une mémoire vive, comme le site de Bessines, d'autres peuvent avoir totalement disparu des mémoires, à l'image de la division minière de Vendée, car, en France, le régime de gestion associé à la période de réaménagement des sites, à partir des années 1990, a eu pour effet d'effacer les traces industrielles de l'extraction d'uranium [...]. ([Le Berre & Bretesché, 2020](#))



- L'Élémentarium, Fiche Or. [Lien](#).
- Bastuck, N. (2004). La France ferme sa dernière mine de charbon. *Le Monde*. [Lien](#).
- Le Berre, S. & Bretesché, S. (2020). De la désindustrialisation au scandale de la France contaminée. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], 20 (3). [Lien](#).
- Sites en exploitation sur le territoire français : Voir catégorie « Exploitations minières » sur la base de données cartographique en ligne de SystExt *Panoramine* : www.panoramine.fr



00:41:08



Parallèlement, l'exploitation minière se poursuivait en Europe. Exemple de la mine de Rosia Poieni, la plus grande mine de cuivre d'Europe. L'exploitation a démarré dans les années 80 et se poursuivait lors d'une visite de terrain de SystExt en 2017* (et non en 2016).



Localisée dans les Monts Apuseni, à l'ouest de la Roumanie, la mine de Rosia Poieni constitue la **deuxième plus grande réserve de cuivre d'Europe**. Son potentiel métallique est énorme : ses réserves sont en effet estimées à plus d'un milliard de tonnes de minerai à 0.36 % cuivre et 0.25 g/t or. [...] L'histoire de la mine de Rosia Poieni, contrairement à ses nombreuses voisines aurifères, débute récemment. Le gisement est découvert dans le cadre de vastes programmes de prospection menés dans les années 60-70. L'exploitation en mine à ciel ouvert démarre une dizaine d'années plus tard, sous le régime communiste de Ceaușescu. Depuis 1983, la société d'Etat Cupru Min en a repris la gestion et a mis en place les installations de traitement du minerai actuelles. ([SystExt, 2016](#))



- SystExt. (2016). Les faces cachées de Rosia Poieni, deuxième réserve de cuivre d'Europe. [Lien](#).
- Scigacz, M-A. (2019). Bienvenue à Geamana, le village roumain enseveli au fond d'un lac poubelle. *Franceinfo*. [Lien](#).
- Fiche sur Rosia Poieni par l'United States Geological Survey (USGS). [Lien](#).

2.1.3. Croissance métallique hors effets associés à la transition



00:55:50



Par rapport aux usages « réguliers » (ceux du quotidien), **hors transition**, les taux de croissance sont déjà énormes et ils sont notamment portés, mais pas seulement, par le développement de certains pays émergents (pour le secteur de la construction, par exemple).

▪ Or, justement, la demande s'emballe : au niveau mondial, **nous avons plus que doublé la production des grands métaux industriels (aluminium, cuivre, nickel, zinc, etc.) au cours des vingt dernières années. Les besoins futurs, notamment en Chine et en Inde, pourraient conduire à un nouveau doublement.** La croissance a été encore plus impressionnante sur les « petits » métaux, car le développement exponentiel de l'électronique, des nouvelles technologies, de l'aéronautique a fait exploser la demande en métaux high tech : indium des écrans plats, lithium et cobalt des batteries rechargeables, germanium des applications WiFi, lanthanides dans les éclairages LED (europium, terbium), les éoliennes, les véhicules hybrides ou électriques (néodyme, dysprosium). **Compte tenu des taux de croissance passés et projetés, nous devrions ainsi produire en l'espace d'une génération, ou plutôt extraire de la croûte terrestre, une quantité plus grande de métaux que pendant toute l'histoire de l'humanité.** (Bihouix, 2013, p.98)



▪ L'émergence économique des pays se caractérise par la construction d'infrastructures industrielles et de production, de transports et de communications, de génération, transformation et utilisation d'énergie, de bâtiments, etc. Cette phase de développement consomme principalement des matières premières de base produites en quantités mondiales supérieures à un million de tonnes par an, telles que le sable et les granulats (50 000 millions de tonnes par an (Mt/an)), le béton (4 600 Mt/an), l'acier et le fer (1 600 Mt/an dont la moitié est consommée par la Chine), l'aluminium (60 Mt/an), le cuivre (20 Mt/an), le manganèse, le zinc, le chrome, le plomb, le titane et le nickel. [...] **Leur industrialisation sera inévitablement associée à une forte augmentation de la consommation de matières premières, comme cela a été le cas depuis la fin des années 90 avec l'émergence économique rapide de la Chine.** (Vidal, 2020, p.33)



- Bihouix, P. (2013). Chapitre 4. Matérialité du productivisme. Dans : Agnès Sinaï éd., Penser la décroissance, pp. 95-116. Paris: Presses de Sciences Po. [Lien](#).
- Vidal, O. (2020). La future consommation des ressources minérales dans un monde en évolution. *Géologues* (204), 33-35.

2.2. Paradoxe du lien entre mine et transition énergétique

2.2.1. Dispositifs de la transition énergétique très consommateurs de métaux



00:57:15



Le lien entre métaux et transition énergétique (hors « transition » numérique) a trouvé l'un de ses points d'ancrage dans un rapport de la Banque mondiale de 2017. Dans ce dernier, des scénarios ont été établis à partir des recommandations des Accords de Paris. Une modélisation des demandes métalliques possibles a été menée à partir de trois technologies : l'éolien, le solaire et le stockage d'énergie stationnaire. Les auteurs identifient un certain nombre de substances d'intérêt ; intéressant de constater que les seules substances « originales » sont le lithium et l'indium ; sinon ce ne sont que des métaux « connus » : aluminium, plomb, zinc, cuivre, argent, chrome (***nickel cité mais non inclus dans la liste prioritaire**)...



▪ Climate and greenhouse gas (GHG) scenarios have typically paid scant attention to the metal implications necessary to realize a low/zero carbon future. The 2015 Paris Agreement on Climate Change indicates a global resolve to embark on development patterns that would significantly be less GHG intensive. One might assume that nonrenewable resource development and use will also need to decline in a carbon-constrained future. This report tests that assumption [...]. The study focuses on wind, solar, and energy storage batteries as they are commonly recognized as key elements in delivering future energy needs at low/zero GHG emission levels. (Banque Mondiale, 2017, p.xii)

▪ Table 1.1. Metals Identified by the Literature Review for Inclusion in the Scenario Study [...] Aluminium ; Iron ; Molybdenum ; Chromium ; Lithium ; Silver ; Copper ; Lead ; Steel ; Indium ; Manganese ; Zinc. [...] Note: Other metals were investigated (see annex A), but this subset was selected as the most relevant for this study. (Banque Mondiale, 2017, p.3)



- Banque Mondiale (2017). The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. [Lien](#).
- Campagne de la Banque Mondiale "Climate Smart Mining: Minerals for Climate Action", 2017. [Lien](#).

An energy system powered by clean energy technologies differs profoundly from one fuelled by traditional hydrocarbon resources. **Building solar photovoltaic (PV) plants, wind farms and electric vehicles (EVs) generally requires more minerals than their fossil fuelbased counterparts.** A typical electric car requires six times the mineral inputs of a conventional car, and an onshore wind plant requires nine times more mineral resources than a gas-fired power plant. **Since 2010, the average amount of minerals needed for a new unit of power generation capacity has increased by 50 % as the share of renewables has risen.** The types of mineral resources used vary by technology. Lithium, nickel, cobalt, manganese and graphite are crucial to battery performance, longevity and energy density. Rare earth elements are essential for permanent magnets that are vital for wind turbines and EV motors. Electricity networks need a huge amount of copper and aluminium, with copper being a cornerstone for all electricity-related technologies. **The shift to a clean energy system is set to drive a huge increase in the requirements for these minerals,** meaning that the energy sector is emerging as a major force in mineral markets. Until the mid-2010s, the energy sector represented a small part of total demand for most minerals. However, **as energy transitions gather pace, clean energy technologies are becoming the fastest-growing segment of demand.** (Agence internationale de l'énergie (AIE), 2021, p.5)



- Agence internationale de l'énergie (AIE). (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. [Lien.](#)
- Commissariat général au développement durable. (2018). Transition énergétique et ressources minérales : les défis à relever. [Lien.](#)
- Dominish, E., Florin, N. & Teske, S., 2019, Responsible Minerals Sourcing for Renewable Energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney. [Lien.](#)
- Lepesant, G. (2018). La transition énergétique face au défi des métaux critiques. *Études de l'Ifri*. [Lien.](#)
- Philibert, C. (2017). Renewable Energy for Industry - From green energy to green materials and fuels. Agence internationale de l'énergie (AIE), *Insights Series 2017*. [Lien.](#)



2.2.2. Intégration des ressources renouvelables dans l'industrie minière



00:58:52



Parallèlement à partir des années 2010, augmentation considérable des injonctions à l'attention de tous les secteurs industriels pour diminuer drastiquement leurs émissions de gaz à effet de serre. Et le secteur minier industriel est particulièrement concerné, compte-tenu de son caractère énergivore. [...] Notamment un rapport de l'OCDE qui explique comment il faut déployer les énergies renouvelables sur les sites miniers.



Mining activities are energy-intensive and rely largely on fossil fuels to meet their energy demands. This exposes the mining sector to potential policy and regulatory risks, stemming from government efforts to shift the global economy to a low-emission development pathway, as envisaged by the Paris Agreement. At the same time, renewables have become an increasingly cost-competitive source of power generation. **This has resulted in a business case for the adoption of solar and wind energy solutions in the mining sector, to reduce costs as well as carbon footprint of operations.** (Alova, 2018, p.4)



Alova, G. (2018). Integrating Renewables in Mining - Review of Business Models and Policy Implications. *OECD Development Policy Papers* (14). [Lien.](#)



- Maennling, N. & Toledano, P. (2018). The renewable power of the mine, Accelerating renewable energy integration, *Columbia center of sustainable investment*. [Lien.](#)
- Millan Lombrana, L. & Stillings, J. (2018). These Massive Renewable Energy Projects Are Powering Chilean Mines. *Bloomberg*. [Lien.](#)
- Cormack, D., Wood, M., Swart, A. & Davidse, A. (2017). Renewables in Mining: Rethink, Reconsider, Replay - More than just a cost play, renewables offer a distinct competitive advantage. *Deloitte, Thought leadership series, 2*. [Lien.](#)

2.2.3. Secteur énergivore



00:59:11



Le secteur minier est excessivement énergivore. À lui seul, il représente 8 à 10 % de la consommation énergétique mondiale ainsi que 4 à 7 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) mondiales (hors béton).



- Aujourd'hui, 8 à 10 % de l'énergie primaire mondiale est consacrée à extraire et raffiner les ressources métalliques (dont la majeure partie pour l'acier et l'aluminium. (Bihouix & De Guilbon, 2010, p.31)
- Among metals, the global iron-steel production chain causes the largest climate change impacts. This is due to the large volumes of steel produced yearly and the energy-intensive processing of the ore into iron and steel, with the sector representing around one quarter of global industrial energy demand. (International Resource Panel (IRP), 2019, p.76)
- Mining is currently responsible for 4 to 7 percent of greenhouse-gas (GHG) emissions globally. (McKinsey, 2020)
- Une récente étude de l'OCDE relative à la consommation de ressources à l'horizon 2060 (OECD, 2019) indique que la production mondiale de béton et de sept métaux ou alliages métalliques (aluminium, cuivre, fer, manganèse, nickel, plomb et zinc) contribuait à 16 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2015. Cette contribution pourrait selon le scénario de l'OCDE, atteindre 25 % du total mondial en 2060. Les productions de l'acier, de l'aluminium et du ciment (donc le béton) sont, de loin, les principaux contributeurs à ces émissions. (Christmann, 2020, p.38)



- Bihouix, P., & De Guilbon, B. (2010). Quel futur pour les métaux ? *EDP Sciences*.
- International Resource Panel (IRP). (2019). Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want. [Lien](#).
- McKinsey (2020). Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know. [Lien](#).
- Christmann, P. (2020). Matières premières minérales stratégiques : quels enjeux ? *Géologues* (204), 36-40.



01:00:15



Plus de 80 % de la dépense énergétique d'un site minier est dédiée au broyage.



L'énergie est une ressource tout aussi indispensable que l'eau pour l'industrie minière. Comme l'eau, elle est surtout nécessaire au traitement du minerai et plus spécifiquement à la comminution (concassage et broyage), puisque celle-ci représente à elle seule plus de 80 % de la consommation énergétique d'un site minier. (Vidal, et al., 2013) (SystExt, 2021, p.21)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Vidal, O., Weihed, P., Hagelüken, C., Bol, D., Christmann, P., & Arndt, N. (2013). ERA-MIN Research Agenda - Version 1. [Lien](#).



01:01:12



Pour une mine d'or moyenne, avec une teneur égale à 3,5 g/t (*au lieu de 3 g/t) et une production annuelle de 15,9 t, la consommation **électrique** (*au lieu d'énergétique) SystExt a déterminé que cela correspondait à la consommation de 30 000 foyers français.



- Une étude de SystExt réalisée en 2020 a évalué les consommations en électricité de mines moyennes d'or, de charbon et de phosphate. Ainsi, SystExt a pu déterminer **qu'une mine moyenne d'or consommait annuellement autant d'électricité que 31 000 foyers en France pendant un an** ; une mine moyenne de charbon, autant que 20 000 ; et une mine moyenne de phosphate, autant que 52 000 [...]. (SystExt, 2021, p.21)



- Appliqués à la totalité de la production mondiale d'or, de charbon et de phosphate, les ordres de grandeur obtenu sont gigantesques : ils correspondent à la consommation annuelle de millions à dizaines de millions foyers pour chacune des filières [...]. (SystExt, 2021, p.21)
- Dans l'étude, plusieurs hypothèses ont été considérées. Pour la mine moyenne d'or : gisement riche avec une teneur de 3.5 g/t d'or et 0.6 g/t d'argent, exploité à ciel ouvert et produisant 15.9 tonnes d'or métal par an (à comparer avec la production annuelle mondiale de 3 165 tonnes en 2015). Pour la mine moyenne de charbon : gisement exploité à ciel ouvert et produisant 2.26 millions de tonnes de charbon par an (à comparer avec la production annuelle mondiale de 7.7 milliards de tonnes en 2015). Pour la mine de phosphate : gisement exploité à ciel ouvert et produisant 2.7 millions de tonnes de phosphate par an (à comparer avec la production annuelle mondiale de 270 millions de tonnes en 2018). (SystExt, 2021, p.21)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- SystExt. (2020). Outil | Voracité de la mine industrielle. [Lien](#).

2.2.4. Pratiques discursives de « verdissement » de la mine par la transition



01:02:00

01:05:06 (intérêt d'avoir associé mine et transition énergétique)



- Dans les années 2017, SystExt a ainsi identifié un premier paradoxe énergétique : la mine produit des métaux, les métaux permettent de construire des dispositifs dits « renouvelables », ces dispositifs alimentent les mines en énergie, qui produisent des métaux...
- Un second enjeu a été identifié : comment expliquer à tous qu'il s'agit d'énergies « renouvelables » alors même que celle-ci sont fortement dépendantes d'une industrie énergivore et ayant un très fort impact environnemental ? Bien que ce dernier paradoxe ait moins interpellé SystExt, compte-tenu de la matérialité de tous les dispositifs de notre société, « *du métal, il y en a partout* ».
- Intérêt : promotion d'un message par les institutions nationales et internationales du fait qu'il est nécessaire de relancer l'activité minière pour répondre à l'urgence climatique ; ce qui permet de légitimer les activités minières, en faisant fi de tous les autres usages des métaux.



01:07:00



Il y a une évolution discursive dans le discours public, associant de plus en plus l'industrie minière et la transition.



- Emphasising the centrality of discourse in resource governance, we analyse the discursive strategies employed by institutional actors seeking to promote and render acceptable lithium extraction in the region. We argue that such strategies reproduce imaginaries of prosperity and modernisation long attached to oil and mineral wealth, **while at the same time introducing a novel association of mining with high-tech industries, 'green jobs' and 'climate-friendly' extraction, seeking to obscure the social and ecological costs of lithium production. This inaugurates an era of 'green extractivism', whereby intensive resource exploitation is framed not only as compatible with climate change, but indeed as necessary to its mitigation.** Our findings contribute to ongoing conversations regarding post-fossil fuel 'transitions', by highlighting the contradictory character of mitigation strategies that rely on mineral-intensive development. (Voskoboynik, 2021, p.1)
- [...] **la relance minière est soutenue par un travail discursif qui, à travers la clôture des horizons de possibilités, limite la formulation d'énoncés publics alternatifs et anticipe sur d'éventuelles critiques.** Si les discours institutionnels donnent à voir la circulation d'énoncés qui justifient la relance minière, ils contribuent aussi à la produire dès lors qu'ils donnent lieu à la définition de programmes d'action autour desquels se regroupent des acteurs favorables à cette solution. (Buu-Sao, 2020, p.18)



- Buu-Sao, D. (2021). Faire advenir la « mine durable » en Europe ? Discours institutionnels et impératif de relance minière, de l'Union européenne à l'Andalousie. *Revue Gouvernance*, 18(2), pp. 16-41. [Lien](#).
- Kirsch, S. (2010). Sustainable Mining, *Dialectical Anthropology*, 34(1), 87-93. [Lien](#).
- Voskoboynik, D. M., & Andreucci, D. (2021). Greening extractivism: Environmental discourses and resource governance in the 'Lithium Triangle.' *Environment and Planning E: Nature and Space*, 1-23. [Lien](#).



01:07:27



Nouveau concept du "Green extractivism" (extractivisme vert) mis en place par la société civile internationale, qui dénonce justement cette association d'idée. Voir notamment un rapport de War on Want de 2021 qui traite de ces questions.



There is an urgent need to deal with the potential widespread destruction and human rights abuses that could be unleashed by the extraction of transition minerals: the materials needed at high volumes for the production of renewable energy technologies. Although it is crucial to tackle the climate crisis, and rapidly transition away from fossil fuels, **this transition cannot be achieved by expanding our reliance on other materials**. The voices arguing for 'digging our way out of the climate crisis', particularly those that make up the global mining industry, are powerful but self-serving and must be rejected. We need carefully planned, low-carbon and non-resource-intensive solutions for people and planet. **Academics, communities and organisations have labelled this new mining frontier, 'green extractivism': the idea that human rights and ecosystems can be sacrificed to mining in the name of "solving" climate change, while at the same time mining companies profit from an unjust, arbitrary and volatile transition.** (War on Want, 2021, p.6)



War on Want (2021). A Material Transition. Exploring supply and demand solutions for renewable energy minerals. [Lien](#).

2.3. Repenser l'utilisation des métaux au regard des besoins

2.3.1. Rapport Varin sur la sécurisation des approvisionnements



01:45:50



- De quels métaux avons-nous besoin pour un modèle économique « sain » ? SystExt ne se retrouve pas dans les priorités en termes d'usages des métaux, et il est probable que d'autres de nos concitoyens ne s'y retrouvent pas non plus.
- Annonce de la réalisation récente du rapport Varin sur la sécurisation de l'approvisionnement en matières premières minérales et sa non-publication.



De son côté, le rapport Varin ne sera pas rendu public, Bercy arguant de données confidentielles et du « secret des affaires » [...] (Quentel, 2022)



- Gouvernement. (2022). Communiqué de presse. Investir dans la France de 2030 : Remise au gouvernement du rapport Varin sur la sécurisation de l'approvisionnement en matières premières minérales et ouverture d'un appel à projets dédié. [Lien](#).
- Quentel, A. (2022). Le label « mine responsable » ? De la « science-fiction » pour des géologues. *Reporterre*. [Lien](#).

2.3.2. Filières minérales « polarisées » et « concurrentes »



02:35:35



Que sont les usages concurrents ? Tout d'abord, il faut connaître les filières « polarisées », c'est-à-dire celles qui sont exclusivement ou majoritairement dédiées à certains usages. Exemples :
 + Antimoine : **48 % (* au lieu de 80 %)** de l'antimoine est utilisé pour les retardateurs de flamme ;
 + Indium : **89 % (*70 ou 80 %)** de l'indium est utilisée dans les écrans à oxyde d'étain et indium ;
 + Gallium : 80 % du gallium est de l'arséniure de gallium, utilisé dans les circuits intégrés, présentant certains avantages par rapport au silicium.



Antimoine :

L'oxyde d'antimoine est un retardateur de flamme lorsqu'il est associé aux composés organiques chlorés et bromés présents ou ajoutés dans les matières plastiques et les élastomères utilisés dans le bâtiment, les automobiles, les câbles.... Par exemple, le PVC peut contenir de 3 à 20 % d'oxyde d'antimoine selon les applications alors que les caoutchoucs et élastomères peuvent en contenir jusqu'à 30 %. (L'Élémentarium, *Fiche Antimoine*) Secteurs d'utilisation de l'antimoine [...] En 2018, dans le monde (source : Roskill) [...] Retardateur de flamme : 48 % ; Batteries : 34 % ; Plastiques : 8 % ; Autres métallurgies : 6 % (L'Élémentarium, *Fiche Antimoine*)

Indium :

Électrode transparente pour écrans LCD en oxyde d'indium et d'étain (ITO) qui contient 78 % d'indium sous forme d'oxyde d'indium (In₂O₃), à 90 % avec 10 % d'oxyde d'étain SnO₂. L'ITO présente l'avantage d'être un bon conducteur, transparent sous faible épaisseur. [...] La masse d'indium par appareil est, en moyenne, de 39 mg pour un ordinateur portable, 79 mg pour un écran d'ordinateur de bureau, 254 mg pour un écran LCD de téléviseur, ce qui a représenté, en Allemagne, en 2010, plus de 2,5 t d'indium. (L'Élémentarium, [Fiche Indium](#)) Secteurs d'utilisation de l'indium [...] En 2013, dans le monde. Source : SMG Indium Resources [...] Films minces d'ITO : 89 % ; Soudages et alliages : 4 % ; Composés chimiques : 4 % (L'Élémentarium, [Fiche Indium](#))



Gallium :

En 2014, plus de 90 % des utilisations concernent les semi-conducteurs sous forme principalement, à 80 %, d'arséniure de gallium, GaAs, à 7 % de nitrure de gallium, GaN et 5 % de séléniure de cuivre, indium et gallium (CIGS). Dans les circuits intégrés, par rapport au silicium, l'arséniure de gallium présente l'avantage d'avoir une vitesse de circulation des électrons plus élevée et de résister aux radiations d'où son emploi dans des applications militaires. La moitié des utilisations concerne les smartphones 3G et 4G. (L'Élémentarium, [Fiche Gallium](#))



- L'Élémentarium. Fiche Antimoine. [Lien](#).
- L'Élémentarium. Fiche Indium. [Lien](#).
- L'Élémentarium. Fiche Gallium. [Lien](#).



02:36:56

Lorsque l'on a des filières avec des usages concurrents, le métal est alors utilisé dans de nombreux usages et une demande forte sur l'un des secteurs d'utilisation peut engendrer des tensions sur d'autres secteurs. Exemple du nickel : forte demande pour l'électrification des véhicules électriques (pour rappel, 34 kg dans une batterie de Zoé, sans compter les autres besoins en nickel dans le véhicule). Il est donc attendu une demande très forte sur ce secteur d'utilisation, alors même que le nickel a des usages concurrents qui sont très demandeurs en nickel, en particulier les aciers inoxydables. En 2020, 70 % des usages du nickel concernent les aciers inoxydables ; les batteries, représentent 8 %. Si on envisage un parc automobile à 100% véhicules électriques, se mettront nécessairement en place des dynamiques concurrentielles (en termes d'approvisionnements, politiques, ou encore géopolitiques).



Concernant les usages du nickel (Ni) :

Nickelage : les pièces appelées chromées sont en fait essentiellement nickelées. Elles sont en acier recouvert par une couche de 20 à 30 micromètres de Ni sur laquelle est déposée une mince pellicule de Cr (0,2 à 0,3 micromètres) destinée uniquement à faciliter l'entretien. Les pièces « chromées » sont concurrencées par les plastiques (dans les pare-chocs) et les peintures. Les automobiles produites aux États-Unis contiennent environ 1 kg de Ni. L'industrie automobile représente de 6 à 8 % de la consommation finale de nickel dans le monde. (L'Élémentarium, [Fiche Nickel](#)) Secteurs d'utilisation du nickel primaire [...] En 2020, dans le monde. Source : Eramet [...] Aciers inoxydables : 70 % ; alliages de nickel : 8 % ; Batteries : 8 % ; Aciers alliés et fonderies : 6 % ; Galvanoplastie : 6 % (L'Élémentarium, [Fiche Nickel](#))



Concernant les tensions possibles liées à l'électrification des véhicules :

Sur la base des hypothèses définies précédemment, la demande de nickel maximum pour le secteur automobile électrique passerait de 22 000 tonnes en 2017 à 158 000 tonnes en 2021. A cet horizon, tout million de véhicule électrique vendu en plus générerait un surcroît de demande de 34 000 tonnes de nickel, ceci en raison de la généralisation des types de batteries à haute teneur en nickel. [...] Nous pourrions donc nous retrouver avec un marché du nickel sous pression. (Louvet, 2018)



- L'Élémentarium. Fiche Nickel. [Lien](#).
- Louvet, B. (2018). Voiture électrique : quel impact sur la demande de métaux ? *OFI Asset Management (2018), Regard d'experts*. [Lien](#). Voir section « Les autres métaux concernés ».



02:39:35

La simple croissance de la consommation du cobalt due à l'électrification du parc automobile, indépendamment donc d'une potentielle croissance dans d'autres secteurs, provoquerait une fin des réserves exploitables avant 2050.





Dans le cas du scénario 30 % [ratios d'électrification du parc automobile], le besoin annuel en cobalt des batteries Li-ion viendrait à excéder avant 2030 la totalité de la production mondiale annuelle de cobalt 2018 (140 kt). Dans le cas d'un parc à 100 % de véhicules électrifiés, les réserves de cobalt connues actuellement (de l'ordre de 6,9 Mt) seraient épuisées avant 2050 du seul fait du cobalt embarqué dans les batteries des véhicules. (Lefebvre & Bloch, pp.89-90)



Lefebvre, G. & Bloch, D. (2020). Métaux des batteries Li-ion : état des lieux et risques d'approvisionnements. *Géologues* (204), 86-90.

2.4. Pour une « dénumérisation » de nos sociétés

2.4.1. Dépendance du secteur du numérique en métaux de spécialité



03:01:33



En reprenant le tableau de Mendeleïv, on peut répartir tous les métaux et métalloïdes en 4 catégories, selon l'International Resource Panel.



- **7 métaux ferreux** : Chrome (Cr) · Fer (Fe) · Manganèse (Mn) · Molybdène (Mo) · Nickel (Ni) · Niobium (Nb) · Vanadium (V)
- **8 métaux non-ferreux** : Aluminium (Al) · Cobalt (Co) · Cuivre (Cu) · Étain (Sn) · Magnésium (Mg) · Plomb (Pb) · Titane (Ti) · Zinc (Zn)
- **6 métaux précieux** : Argent (Ag) · Iridium (Ir) · Or (Au) · Osmium (Os) · Palladium (Pd) · Platine (Pt) · Rhodium (Rh) · Ruthénium (Ru)
- **37 métaux de spécialité** : Antimoine (Sb) · Arsenic (As) · Baryum (Ba) · Béryllium (Be) · Bismuth (Bi) · Bore (B) · Cadmium (Cd) · Gallium (Ga) · Germanium (Ge) · Hafnium (Hf) · Indium (In) · Lithium (Li) · Mercure (Hg) · Rhénium (Re) · Scandium (Sc) · Sélénium (Se) · Strontium (Sr) · Thallium (Tl) · Tantale (Ta) · Tellure (Te) · Tungstène (W) · Yttrium (Y) · Zirconium (Zr) · Lanthanides (hors Prométhium (Pm))



Programme des Nations unies pour l'environnement. (2011). Recycling Rates of Metals - A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. . Graedel, T.E. ; Allwood, J. ; Birat, J.-P. ; Reck, B.K. ; Sibley, D.F. ; Sonnemann, G. ; Buchert, M. ; Hagelüken, C. [Lien.](#)



03:03:35



Ce qui est intéressant, c'est que les technologies du numérique ont une spécificité par rapport aux autres secteurs industriels : elles sont très consommatrices de métaux de spécialité.



- Ainsi, voici des exemples de la situation de métaux utilisés dans les technologies du secteur des équipements de l'électricité et l'électronique :
- L'antimoine est principalement utilisé pour les retardateurs de flamme (quasiment pour moitié).
 - Le dysprosium est très majoritairement utilisé pour les aimants.
 - Le gallium est très majoritairement utilisé pour les circuits intégrés.
 - Le germanium est utilisé pour l'optique infrarouge et les fibres optiques (moitié-moitié).
 - L'indium est très majoritairement utilisé pour les écrans plats.
 - Le tantale est principalement utilisé pour les condensateurs (quasiment pour moitié).
- (Commission européenne, 2018, p.34)



Commission européenne. (2018). Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy. [Lien.](#)

2.4.2. Démystification nécessaire des terres rares



03:04:22
03:05:27



- Les terres rares sont une famille de métaux (15 lanthanides, yttrium (Y) et scandium (Sc)) qui sont des substances « comme les autres ». Les terres rares ne sont pas rares du tout, elles sont aussi voire plus abondantes que les métaux de base.
- Elles sont produites abondamment : 240 000 tonnes d'oxydes de terres rares ont été produites en 2020. Elles présentent effectivement certaines propriétés spécifiques, notamment en termes de propriétés optiques ou magnétiques mais il ne s'agit pas de substances « exceptionnelles ».



- Leur abondance naturelle dans la croûte terrestre est au moins équivalente à celle des métaux de base (Zn, Cu, Pb, Ni, Co) et elles sont bien moins rares que des métaux précieux (Ag, Au). [...] **En fait, c'est la faible quantité de minéraux naturels porteurs de REE qui justifie le terme « rare »**. Bien que près de 200 espèces minérales de REE soient aujourd'hui connues (ce qui reste faible), seules certaines d'entre elles présentent un intérêt commercial. (Tuduri, et al, 2020, p.48)
- En 2020, en milliers de tonnes d'oxydes de terres rares, sur un total mondial de 240 000 t. (L'Élémentarium, Fiche Terres rares)
- De l'ordre de 75 à 80 % du tonnage des terres rares est consommé sans séparation des terres rares contenues dans les concentrés marchands. Ces utilisations mettent, en général, en jeu les propriétés chimiques des terres rares. Ces propriétés étant très voisines, il n'est pas nécessaire de séparer les terres rares. [...] 3 secteurs d'utilisation sont associés : les pierres à briquet, la métallurgie et la catalyse. (L'Élémentarium, Fiche Terres rares)
- Pour les terres rares séparées, on fait en général appel à leurs propriétés physiques à savoir :
 - **Propriétés optiques**, c'est-à-dire la catholuminescence, radioluminescence, photostockage, fluorescence et laser. Les propriétés remarquables des terres rares dans ce domaine sont liées à leur configuration électronique. [...] Les terres rares sont utilisées comme luminophores, substances qui, sous l'effet d'une excitation extérieure, émettent de la lumière (phénomène de luminescence). On peut considérer qu'il existe toujours une terre rare qui répond à un problème de luminescence donné et, en particulier, tout le spectre visible peut être couvert. L'europium est, en particulier, utilisé dans la protection des billets de banque.
 - **Propriétés magnétiques**. Les terres rares ont des propriétés magnétiques exceptionnelles, malheureusement, en dessous de la température ambiante. Le point de Curie le plus élevé est celui du gadolinium, à 20°C. A la température ambiante, les terres rares sont paramagnétiques ou diamagnétiques. (L'Élémentarium, Fiche Terres rares)



- Tuduri, J., Lefebvre, G., Charles, N., Naby, Z., Gaillard, F. & Pourret, O. (2020). Lumière sur la géologie des terres rares, pourquoi tant d'attraits ? *Géologues* (204), 48-54.
- L'Élémentarium. Fiche Terres rares. [Lien](#).

2.4.3. Diversification métallique et conception défavorable au recyclage



03:05:55



À la croissance métallique que l'on connaît, c'est-à-dire que l'on consomme en quantité de plus en plus de métaux, s'ajoute une autre tendance, qui est la diversification, avec de plus en plus de métaux différents à l'intérieur d'un même dispositif. D'après SystExt, il y en a 52 en moyenne dans un smartphone, et 71 dans un véhicule électrique.



- Le profil de consommation des métaux a également évolué rapidement ces dernières années [...]. **En l'espace de 20 à 30 ans, nous avons plus que triplé le nombre de métaux différents que nous utilisons pour nos applications industrielles**. Le développement exponentiel des produits électroniques, des technologies de l'information et de la communication (TIC), de l'aéronautique, allié à l'innovation technologique dans la recherche de performances et de rendements, **a fait exploser la demande en nouveaux métaux « high tech »**. [...] Voir Figure 5 « Sollicitation » de la table de Mendeleïev : moins de 20 métaux sollicités dans les années 70, environ 60 métaux dans les années 2000. (Bihouix & De Guilbon, 2010 ; pp.24-25)
- Étude conduite par SystExt sur le contenu moyen d'un smartphone : **52 substances différentes identifiées et décrites**. (SystExt, 2016)



- Bihouix, P., & De Guilbon, B. (2010). Quel futur pour les métaux ? *EDP Sciences*.
- SystExt (2016). Animation en ligne | Des métaux dans mon smartphone ? [Lien](#).



03:06:35



Cette diversification métallique est très importante car elle influence considérablement les possibilités de recyclage des appareils en fin de vie. En effet, le fait que l'on associe un grand nombre de métaux différents à des échelles fines engendrera nécessairement des difficultés de recyclage. Cela concerne en particulier les encres métalliques, les dopages (on intègre des atomes dans une matrice pour lui conférer des propriétés spécifiques) et les alliages complexes.



- De l'étude qu'a réalisée SystExt, il ressort que le panel de substances composant un smartphone est considérable, représentant près de 50 % de la totalité des éléments chimiques connus ! Les métaux sont quasi-exclusivement utilisés **sous forme d'alliages, parfois très complexes**. A titre d'exemple, l'alliage plomb-étain utilisé pour la brasure (soudure) fait désormais intervenir l'antimoine, le cuivre et l'argent, en quantités variables. **De façon plus fine encore, ils peuvent être utilisés sous forme d'encre métallique** (comme le nickel sur le boîtier) **ou en dopage** (comme le phosphore dans les transistors au silicium). (SystExt, 2016)
- **La complexité de la composition des smartphones et des alliages qu'ils contiennent rend impossible le recyclage des appareils en fin de vie.** Et la tendance est à la complexification. Il est absolument nécessaire d'améliorer la conception des smartphones pour limiter l'utilisation de métaux issus de l'exploitation minière et augmenter leur recyclabilité ; car, comme le rappelle le rapport de Marie-Christine BLANDIN : « *l'extraction des ressources et la fabrication représenteraient jusqu'à 80 % de l'impact environnemental total pour certains modèles de smartphone* ». (SystExt, 2016)



- SystExt (2016). Animation en ligne | Des métaux dans mon smartphone ? [Lien](#).
- Rapport d'information n°850 (2015-2016) de Mme Marie-Christine BLANDIN, fait au nom de la mission d'information, déposé le 27 septembre 2016. [Lien](#).

3. Véhicule électrique

3.1. Bilan actuel en demi-teinte par rapport aux émissions et rejets

3.1.1. Davantage d'émission de gaz à effet de serre au moment de la fabrication



01:12:55



Un véhicule électrique émet deux fois plus de CO₂ au moment de (*au lieu de "si l'on prend en compte") sa fabrication.



- D'après Interview de Guillaume Devauchelle, directeur de l'innovation de Valeo, Challenge, 17/03/2020 : « Un point fait consensus : produire un véhicule électrique demande beaucoup plus d'énergie, et **émet deux fois plus de gaz à effet de serre que de produire un véhicule thermique, du fait de la production de sa batterie et de sa motorisation** ». (Izoard, 2021)
- Le process de production d'un modèle de type Renault Zoé zéro émission entraînera le rejet de 6 tonnes de CO₂ environ, contre 3 tonnes pour une voiture comparable de type Clio.



- Izoard, C. (2021). Non, la voiture électrique n'est pas écologique. *Reporterre*. [Lien](#).
- Verdevoye A-G. (2020). Oui, la petite voiture électrique est plus écologique du puits à la roue. *Challenges*. [Lien](#).



Précision : Ceci ne remet pas en cause le fait que la voiture électrique émet beaucoup moins de CO₂ au moment de son utilisation. SystExt s'interroge cependant sur la **prise en compte de l'intégralité des émissions associées aux métaux constitutifs des véhicules électriques (depuis leur extraction jusqu'à la gestion des déchets métalliques en fin de vie) et pas seulement au regard de la seule batterie**. D'après plusieurs experts consultés par SystExt, il est difficile d'obtenir des données sectorielles du fait de nombreuses hypothèses à considérer : type de véhicule, utilisation réelle (notamment kilométrage parcouru) et mix énergétique (source de l'électricité utilisée).



- In short, EV-induced pollution can be considerably less severe, depending on the charging source, the energy intensity and structure of EV manufacturing. (Huang, et al., 2020, p.8)
- Achieving ambitious reductions in greenhouse gases (GHG) is particularly challenging for transportation due to the technical limitations of replacing oil-based fuels. We apply the integrated assessment model MEDEAS-World to study four global transportation decarbonization strategies for 2050. **The results show that a massive replacement of oil-fueled individual vehicles to electric ones alone cannot deliver GHG reductions consistent with climate stabilization** and could result in the scarcity of some key minerals, such as lithium and magnesium. In addition, energy-economy feedbacks within an economic growth system create a rebound effect that counters the benefits of substitution. The only strategy that can achieve the objectives globally follows **the Degrowth paradigm, combining a quick and radical shift to lighter electric vehicles and non-motorized modes with a drastic reduction in total transportation demand**. (de Blas, et al., 2020, p.1)



- Huang, C.-L., Xu, M., Cui, S., Li, Z., Fang, H., & Wang, P. (2020). Copper-induced ripple effects by the expanding electric vehicle fleet : A crisis or an opportunity. *Resources, Conservation and Recycling*, 161. [Lien](#).
- de Blas, I., Mediavilla, M., Capellán-Pérez, I., & Duce, C. (2020). The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm. *Energy Strategy Reviews*, 32. [Lien](#).
- Custers, R. (2011). La bagnole électrique, business as usual. *Groupe de recherche pour une stratégie économie alternative (GRESEA)*. [Lien](#).



Exemple de la prise en compte du cuivre nécessaire à l'électrification du véhicule mais aussi du réseau de recharge des véhicules.



- In short, even if we consider only copper refining emissions, **6.4% of on-road CO₂eq reduction by replacing FV with EV will be offset by CO₂ emission from the refining of the replacement-induced additional copper demand. This offset will rise up to 21.1% (14.7%+6.4%) in 2050 and 61.6% (55.2%+6.4%) in 2018, if we include copper-induced CO₂ emission from charging facilities**, although copper use in facilities for each EV will fall down, to 821 kg in 2050 from 3077 kg in 2018 in BS [base scenario], with the improvement of the facility network. (Huang, et al., 2020, p.8)



- Huang, C.-L., Xu, M., Cui, S., Li, Z., Fang, H., & Wang, P. (2020). Copper-induced ripple effects by the expanding electric vehicle fleet : A crisis or an opportunity. *Resources, Conservation and Recycling*, 161. [Lien](#).

Concernant les analyses qui soutiennent le fait que l'électrification des voitures permet de ne pas questionner nos modèles de société en matière de mobilité, retour d'expérience sur les évolutions de la mobilité et de la place de l'automobile à Québec et Montréal :



- En somme, nous argumentons que dans sa forme actuelle, la stratégie d'électrification des transports encourage plutôt la poursuite d'un modèle de développement du système de mobilité basé sur la possession et l'utilisation de l'automobile, contribuant à entretenir la dépendance sociétale à l'automobile. (Lavolette, et al, p.165)

- De plus, les promesses d'inclusion de voies réservées au transport collectif dans les deux projets afin de les qualifier de projets de « mobilité durable » peuvent être associées à une stratégie visant à leur conférer une acceptabilité sociale et environnementale plutôt qu'à un réel désir de planifier autrement la mobilité. De façon générale, ces arguments environnementaux s'ajoutent aux arguments de développement économique qui sont typiques d'une résistance politique et des institutions à un changement de paradigme de mobilité. (Lavolette, et al, pp.165-166)



Lavolette, J., Morency, C. & Waygood, E. (2020). Persistance de l'automobilité ? Analyse en trois perspectives. *Flux*, (119-120), 142-172. [Lien](#).

Concernant le développement du véhicule électrique pour répondre en priorité à la pollution locale des zones urbaines :



- Des groupes de pression reprochent au véhicule thermique ses dommages importants sur l'environnement : [1] la pollution locale, tenue pour responsable de problèmes de santé publique, puisque les moteurs thermiques conventionnels relâchent des particules fines et des gaz toxiques qui peuvent atteindre une concentration dangereuse en ville. La diminution de la pollution en zone urbaine est un critère qui doit être pris en compte et qui milite en faveur de la voiture électrique ; [2] les gaz à effet de serre (GES), responsables du changement climatique, puisque le secteur des transports routiers représente 10 % des émissions mondiales de GES et 17 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone. (CAS & CGIET, 2011, p.29)

- **Il s'agit en priorité de diminuer la dépendance au pétrole et la pollution locale due au transport, mais aussi de réorienter l'industrie.** (CAS & CGIET, 2011, p.31)



Centre d'analyse stratégique (CAS) & Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGIET). (2011). La voiture de demain : carburants et électricité. [Lien](#).



01:13:36



Un véhicule électrique émet une 1.5 à 2.5 fois (*au lieu de 1.5 fois à 2 fois) plus de NOx et de SO₂ qu'un véhicule thermique compte-tenu de la fabrication.



- It is more common for LCAs [life cycle assessment = analyse du cycle de vie] to include the impact of air pollutant emissions within wider impact categories [...] than to report emissions of individual pollutants. However, the evidence available suggests that, **over the whole production process** (including raw material supply), **emissions of NOx, SO₂ and PM** [Particulate matter = particules fines] **from BEV** [Battery electric vehicles] **production are 1.5-2.5 times higher than those of ICEV** [internal combustion engine vehicles = véhicules à combustion interne] **production** (Rangaraju et al., 2015). (Agence européenne pour l'environnement, 2018, p.26)

- [...] Figure 3.4 Comparison of the impacts of production of ICEVs and BEVs across six different impact Categories [...] Terrestrial acidification ; Particulate matter formation ; Human toxicity ; Freshwater ecotoxicity ; Terrestrial ecotoxicity, Freshwater eutrophication. (Agence européenne pour l'environnement, 2018, p.26)



- Agence européenne pour l'environnement (2018). Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives - TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report. [Lien](#).

- Rangaraju, S., De Vroey, L., Messagie, M., Mertens, J., & Van Mierlo, J. (2015). Impacts of electricity mix, charging profile, and driving behavior on the emissions performance of battery electric vehicles : A Belgian case study. *Applied Energy*, 148, 496-505. [Lien](#).

3.1.2. Prise en compte très insuffisante de l'amont et de l'aval filière



01:12:56



Selon des chercheurs allemands en 2020 (*au lieu de 2017), les études ne quantifient pas l'impact de l'électronique des véhicules électriques.



- [...] récente étude allemande analyse le cycle de vie d'une Caddy Volkswagen électrifiée en laboratoire [...] Si elle est produite en Europe, elle ne rivalise avec la voiture à essence qu'à partir de 137.000 à 207.000 km [...] Ces chercheurs constatent que "**l'omission des conséquences liées à la production de l'électronique est quasi-systématique**" dans la plupart des études publiées à ce jour et que très peu d'entre elles prennent en compte les autres formes de pollution, en dehors des émissions de gaz à effet de serre. (Izoard, 2021)

- In this context, it appears essential to cover not only the climate change impact, but many more impact categories in LCA of electric vehicles. However, **this information is largely missing**. [...] The material cakes were developed from the ground up which starts at material composition data provided by manufacturers. **Such data are usually restricted or rudimentary** and need to be supplemented by own measurements and literature information. (Helmerts, et al., p2 et p.6)



- Izoard, C. (2021). Non, la voiture électrique n'est pas écologique. *Reporterre*. [Lien](#).
- Helmerts, E., Dietz, J. & Weiss, M. (2020). Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. *Sustainability*, 12(3). [Lien](#).

3.1.3. Augmentation exponentielle de la quantité de métaux



01:14:10



- 4 grands types dans l'électrification d'un véhicule : thermique (non électrifié), hybride léger, hybride rechargeable, électrique. À chaque fois que l'on passe d'une technologie à une autre, la quantité de métaux augmente.

- Exemple de l'augmentation de la quantité de cuivre entre les différentes technologies de véhicules : 20 kg pour un véhicule thermique, 40 kg pour un véhicule hybride léger, 60 kg un véhicule hybride rechargeable, 80 kg pour un véhicule électrique.

- Une borne de recharge de véhicules électrique de niveau 3, permettant d'alimenter 120 véhicules électriques, contient 100 kg de cuivre.



- [...] si un véhicule hybride (HEV) contient pratiquement 2 fois plus de cuivre qu'un véhicule thermique classique, un véhicule 100 % électrique (BEV) en contient, lui, près de 4 fois plus ! [...] Pour le cuivre, s'ajoute à cette demande celle nécessaire pour le développement des installations de recharge (1 kg par prise individuelle de niveau 1, 4 kg par prise publique de niveau 1 ou 2, 100 kg par prise publique de niveau 3). (Louvet, 2018)



- Louvet, B. (2018). Voiture électrique : quel impact sur la demande de métaux ? *OFI Asset Management (2018), Regard d'experts*. [Lien](#). Voir section « Les autres métaux concernés ».



01:16:23



Il y a une tendance à l'allègement des véhicules et à l'augmentation de la consommation en aluminium. Selon l'Association européenne de l'aluminium, alors qu'une augmentation d'un facteur trois avait déjà été observée jusqu'à 2012-2013 (de 50 kg à 140 kg), les prévisions annoncent une multiplication par **1.3 (*au lieu de 1.5)** dans les années à venir.

- Aluminium Association shows that the amount of aluminium used per car produced in Europe almost tripled between 1990 and 2012, increasing from 50 kg to 140 kg. This amount is predicted to rise to 160kg by 2020, and even reach as much as 180 kg if small and medium cars follow the evolution recorded in the upper segments of the automobile industry. ([Association européenne de l'aluminium, 2013, p.10](#))

- **Aluminium reduces the cost of electric vehicles since lighter cars need fewer batteries and less electricity to travel the same distance.** [...] Electric vehicles are today rather expensive, mainly because of the cost of batteries. It is therefore important to make electric cars as energy efficient as possible. **Lightweighting is one of the most obvious ways of improving the energy efficiency of any vehicle, including electric ones.** ([Association européenne de l'aluminium, 2013, p.15](#))



- European aluminium association. (2013). Aluminium in cars - Unlocking the light-weighting potential. [Lien](#).



01:17:50



Pour le graphite de l'anode (dans la batterie), on multiplie par 7 (*au lieu de par 7 ou par 10) la quantité de cette substance en passant d'une technologie à une autre.



Une voiture hybride (HEV) nécessite 10 kg de graphite en moyenne contre 70 kg dans un véhicule électrique (EV) [...]. [...] Dans l'industrie automobile, outre les batteries, le graphite entre dans la fabrication de garnitures de freins, d'embrayages et de chemises de pistons, de certaines pièces de moteurs, de génératrices électriques et de joints. (Marcoux, 2020, p.72)



Marcoux, E. (2020). Le graphite. *Géologues* (204), 67-76.

3.2. Cas particulier de la batterie

3.2.1. Polarisation des attentions sur la cathode



01:18:15



La batterie polarise les attentions. La cathode est particulièrement importante car elle représente environ 14 % du coût de la batterie.



Dans un accumulateur lithium-ion, c'est l'électrode positive (cathode) qui contient les matériaux les plus sensibles et représente une part importante (environ 14 %) du coût de l'accumulateur. (Lefebvre & Bloch, 2020, p.87)



Lefebvre, G. & Bloch, D. (2020). Métaux des batteries Li-ion : état des lieux et risques d'approvisionnements. *Géologues* (204), 86-90.

3.2.2. Technologies NMC répandues mais d'autres à l'étude



01:18:25



Les technologies les plus connues pour la batterie sont les NMC (nickel-manganèse-cobalt) avec du lithium. D'autres technologies étudiées, par exemple pour les modèles S de Tesla à partir d'une « recette » à lithium-fer-phosphore.



- L'affaire des batteries qui équiperont les **modèles S de Tesla produits en Chine** à partir d'une recette Lithium-Fer-Phosphore au lieu des batteries Lithium-Nickel-Manganèse-Cobalt est un coup de semonce. [...] **une substitution en grand des batteries NMC vers les batteries LFP serait révélatrice et un coup très sévère pour les petits producteurs de cobalt.** [...] (Julienne, 2020)
- **Au total, c'est bien un pan entier de la demande du cobalt et du nickel qui pourraient être menacés par cette substitution NMC-LFP.** Le choix qui se présente aux ingénieurs de la propulsion électrique est d'une part celui de voitures électriques citadines à faibles coûts, et le LFP est au moins 30 % moins cher que le NMC. Ils doivent d'autre part encore optimiser le couple coût-technologie pour les voitures plus puissantes et durables qui circuleront en dehors des villes. L'éventail des futures solutions pour les unes comme pour les autres est encore large et provoque d'autres indécisions liées aux souhaits de l'Investissement Social et Responsable entre les batteries NMC, Sodium, Lithium métal... (Julienne, 2020)



Julienne, D. (2020) Batterie de voitures électriques, ce n'est pas encore la mort du nickel. *La Tribune*. [Lien](#).



01:18:55



▪ Concernant les technologies NMC : Dans une batterie d'une voiture Zoé, il y a en moyenne 7 kg de lithium, 11 kg de cobalt, 11 kg de manganèse, 34 kg de nickel.
 ▪ Afin de se rendre compte de ce que cela représente par rapport à nos objets du quotidien, on rappelle qu'un téléphone portable contient 5 à 10 g de cobalt.



▪ Cette conversion pied au plancher de la marque de voitures française vers le tout-électrique contribue à la mise sous tension du marché du cobalt, sachant qu'un cœur de Renault Zoe bat au rythme de 7 kg de lithium, 11 kg de cobalt, 11 kg de manganèse et 34 kg de nickel. [...] A comparer aux 6 grammes glissés dans la batterie d'un smartphone, la quantité de ce métal contenue dans les batteries électriques pèse de tout son poids dans la spéculation ([Girard, 2022](#))
 ▪ Le cobalt est ainsi devenu la clé de l'après-pétrole. Notre téléphone portable en contient cinq à dix grammes, notre ordinateur, une trentaine de grammes, et le moteur d'un véhicule électrique, entre cinq et dix kilos. Résultat, le prix de ce métal bleuté a quadruplé entre 2016 et 2018. Et ce n'est pas fini. Actuellement, la production mondiale tourne autour de 120 000 tonnes. D'ici deux ou trois ans, les constructeurs automobiles en réclameront deux ou trois fois plus. ([Hamel, 2018](#))



▪ Girard, L. (2022). Matières premières : "Le cobalt jette une ombre sur la voiture verte". *Le Monde*. [Lien](#).
 ▪ Hamel, I. (2018). Le cobalt de nos téléphones portables est-il extrait par des enfants en Afrique ? *Le Point Afrique*. [Lien](#).



01:19:38



Origine du cobalt : La République démocratique du Congo concentre à la fois la plus forte production (en produisant plus de la moitié du cobalt mondial) et les plus fortes réserves (il dispose également de 50% de ce que l'on espère pouvoir exploiter). Concernant la production actuelle de cobalt en RDC, on estime que **20 à 40 % (* au lieu de 40 %)** du minerai de cobalt est extrait à petite échelle.



▪ **En 2020, la production mondiale de cobalt provient à 68 % de République Démocratique du Congo** (95 000 t par rapport à une production mondiale de 140 000 t). **Le pays détient également 51 % des réserves mondiales** (3 600 000 t par rapport à 7 100 000 t). ([USGS, 2021](#))
 ▪ Étant donné que plus de la moitié du cobalt commercialisé dans le monde provient de la RDC, que 20 % est extrait par des mineurs artisanaux (ou non officiels), et que près de 40 000 enfants travaillent dans des mines de cobalt dans le sud de la RDC, il est fort probable que nos portables aient été fabriqués en recourant à la main d'œuvre infantile. ([Amnesty International](#))
 ▪ Même s'il est difficile de proposer des statistiques quant au travail clandestin, on estime que ces « creuseurs » fournissent jusqu'à 40 % de la production mondiale de cobalt. ([Hamel, 2018](#))



▪ Amnesty International. Mon smartphone est-il lié au travail des enfants ? [Lien](#).
 ▪ Hamel, I. (2018). Le cobalt de nos téléphones portables est-il extrait par des enfants en Afrique ? *Le Point Afrique*. [Lien](#).
 ▪ United States Geological Survey (USGS). (2021) Mineral commodity summaries, Cobalt. [Lien](#).

4. Violation des droits humains et impacts sociaux

4.1. Conflits socio-environnementaux et criminalisation des populations

4.1.1. Criminalisation des mouvements de protestation



01:23:38



Exemple des personnes emprisonnées de façon arbitraire en Grèce, dans le cadre des mobilisations pacifistes contre le projet des Skouries. Retour sur l'enquête de terrain réalisée par SystExt en 2018.

- Des citoyen-ne-s ont exprimé leur opposition et dénoncé de manière non-violente le manque de transparence, l'absence de consultation et les risques sanitaires et environnementaux associés au projet. Pour cela, ils ont reçu des pressions, d'autres ont été arrêté-e-s, et certain-e-s sont désormais jugé-e-s pour troubles à l'ordre public, diffamation, participation à une organisation criminelle ou encore actes terroristes. Nous [...] soutenons SOS Halkidiki et les populations grecques mobilisées contre Hellas Gold. Nous dénonçons les pressions exercées sur leurs militant-e-s ainsi que les arrestations arbitraires. Nous espérons que les citoyen-ne-s comparaisant devant la justice seront relaxé-e-s et laissé-e-s libres de défendre leurs droits fondamentaux. (SystExt, 2018)



- Iorghos a 38 ans. Il habite Ierissos, est chauffeur-routier et a trois enfants. En 2013, il a passé 6 mois en prison suite à son engagement contre le projet de Skouries. Il s'agissait de son premier engagement militant, né de l'inquiétude des impacts potentiels sur les ressources en eau. Il fait partie des 450 personnes inculpées pour différents motifs, trop souvent infondés (obstruction du droit de passage lors d'une manifestation, offense à agent, diffamation...). D'après les militants, la surveillance et la répression dont ils sont victimes sont disproportionnées : mise sur écoute téléphonique, surveillance policière, etc. Plusieurs arrestations auraient même eu lieu de nuit, en présence des familles. Ainsi, pour protéger autant que possible ses membres, l'association SOS Chalcidique n'a pas de leader officiel. Malgré toutes les précautions prises, les arrestations arbitraires se sont multipliées. Le fromager du village a ainsi été arrêté au motif de débordements dans une manifestation, alors que plusieurs témoins certifient qu'il ne s'y trouvait pas ce jour-là ! Iorghos ne regrette pas son engagement, mais estime qu'aujourd'hui il serait plus prudent. Quand on lui demande quels sont ses liens avec la justice, il répond : « *il n'y a pas de justice* ». (SystExt, 2020)



- SystExt. (2018). CP | Le nord-est de la Grèce toujours menacé par la relance minière. [Lien](#).
- SystExt. (2020). La Chalcidique, entre mines antiques et résistance contemporaine. [Lien](#).



01:24:55



Le secteur industriel qui est à l'origine du plus de conflits socio-environnementaux est le secteur minier. C'est 20 % des conflits socio-environnementaux référencés dans la base de données EJ Atlas (573 cas sur environ 2 700 référencés dans la base de données).



En 2019, 2 743 cas de conflits socio-environnementaux étaient recensés dans la base de données internationale EJAtlas (Scheidel, et al., 2020). Parmi tous les secteurs industriels pris en compte (agroalimentaire, bois, eau, déchets, nucléaire, etc.), le secteur minier est responsable du plus grand nombre de conflits, avec 573 cas, devant le secteur des ressources énergétiques fossiles (Scheidel, et al., 2020). (SystExt, 2021, p.35)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Scheidel, A., Del Bene, D., Liu, J., Nava, G., Mingorría, S., Demaria, F., ... Martínez-Alier, J. (2020). Environmental conflicts and defenders: A global overview. *Global Environmental Change*, 63, 1-12. [Lien](#).

Concernant la base de données EJ Atlas :



Créée en 2011 dans le cadre d'un processus collaboratif entre des chercheurs et des représentants de la société civile, l'EJAtlas est la plus grande base de données au monde sur les conflits socio-environnementaux. Elle s'appuie sur une cartographie en ligne et des fiches détaillées par site, et se donne pour objectif de décrire et d'analyser les conflits impliquant des acteurs de la société civile et des populations affectées.



EJAtlas - Global Atlas of Environmental Justice : www.ejatl.org

4.1.2. Impacts associés pour les entreprises en termes réputationnels et financiers



01:32:45



Lorsque l'on est investisseur, on a une responsabilité dans son investissement. Projet de mine et de raffinerie de bauxite (aluminium) à Lanjigarh, Inde. Lutte des Dongria Kondh pour protéger une montagne sacrée. Analogie fait avec le récit du film *Avatar*, soutien international et discréditation majeure de l'entreprise minière concernée. Influence forte sur les investissements, avec le retrait de plusieurs investisseurs, représentant **4 milliards d'encours** (*après vérification, les chiffres sont très divers selon les sources, du milliard de dollars à plusieurs dizaines de milliards de dollars).



- La chaîne de collines de Niyamgiri, foyer de la tribu Dongria Kondh, se situe dans l'état d'Odisha, à l'est de l'Inde. Depuis le début des années 2000, cette tribu a vécu sous la pression de l'entreprise anglo-indienne Vedanta Resources. L'entreprise espérait extraire l'équivalent de 2 milliards de dollars de bauxite (minerai d'aluminium) en implantant une raffinerie d'alumine ainsi qu'en exploitant une mine à ciel ouvert au niveau de la montagne sacrée Niyam Dongar. (SystExt, 2021, p.40)
- En août 2010, le gouvernement gèle le projet qui représente 2,7 milliards de dollars d'investissement. Vedanta perd 30 % de sa valeur boursière le jour même. Mais le groupe anglo-minier ne renonce pas et saisit les tribunaux indiens pour obtenir l'annulation de la décision gouvernementale. (Husson-Traore, 2014)



- Bouissou, J. (2010). En Inde, la tribu des Dongria Kondh vit le scénario du film "Avatar". *Le Monde*. [Lien](#).
- Husson-Traore, A.C. (2014). Peuples autochtones : En Inde, les Dongria Kondh font plier le géant Vedanta. *Novethic*. [Lien](#).
- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).



- Amnesty International. (2010). Ne détruisez pas nos vies pour produire du minerai. En Inde, des vies dévastées par une mine de bauxite et une raffinerie d'aluminium. [Lien](#).
- Amnesty International. (2012). Vedanta's perspective uncovered: Policies cannot mask practices in Orissa. [Lien](#).
- Ministry of Environment & Forests - Govt of India. (2010). Report of the four-member committee for investigation into the proposal submitted by the Orissa mining company for bauxite mining in Niyamgiri. [Lien](#).
- SystExt. (2020). Outil | La mine, prédatrice et dangereuse. [Lien](#).



01:34:39



Influence financière et économique importante lorsque des accidents ou des problèmes graves se produisent sur des sites miniers, d'autant que ce secteur est régulièrement concerné par des dommages humains, sociaux ou environnementaux particulièrement graves. Autre exemple : en 2019, suite à la catastrophe de Brumadinho, les cours de la société minière chutent.



Le cours de l'action du géant minier Vale a plongé de plus de 24 % lundi en mi-journée à la Bourse de Sao Paulo, où le groupe a perdu plus de 18 milliards de dollars de capitalisation, trois jours après la rupture d'un barrage de la compagnie brésilienne. (Agence France Presse, 2019)



Agence France Presse (AFP) (2019). Brésil : Vale plonge en Bourse après la catastrophe minière. *Lapresse.ca*. [Lien](#).

4.2. Graves violations des droits humains

4.2.1. Secteur responsable du plus grand nombre d'abus et des pires violations



01:37:30



En 2006, John Ruggie est représentant spécial du Secrétariat général des Nations Unies. Il éditte un rapport sur le lien entre droits de l'homme, et sociétés transnationales et entreprises. Son constat est (en se rapprochant au plus de la citation) : « *les industries extractives - pétrole, gaz, mine - sont de loin à l'origine du plus d'abus en matière de droits humains* ». Il ajoute : « *ces industries sont également à l'origine des pires abus, certains étant équivalents à de la complicité de crime contre l'humanité* ». Il explique ensuite qu'il y a 4 moteurs : les forces privées ou publiques qui sécurisent les sites miniers, les violations des droits des travailleurs, la situation des populations affectées (et en particulier celle des peuples autochtones) et la **corruption** (*non cité).



Les atteintes aux droits humains perpétrées par l'industrie minière sont dénoncées par l'ONU depuis des dizaines d'années. John Ruggie, alors Représentant spécial du Secrétaire général des Nations Unies (Représentant spécial pour la question des droits de l'homme, des sociétés transnationales et autres entreprises), décrit ce secteur comme l'un des plus problématiques à l'échelle mondiale (ONU, 2006, p. 8) : « [...] ce sont les industries extractives - pétrole, gaz, mines - qui viennent largement en tête des abus [...] ». Il ajoute (ONU, 2006, p. 8) : « Les industries extractives sont également accusées de la plupart des pires abus, qui peuvent aller jusqu'à la complicité de crime contre l'humanité. Parmi ces abus, on citera notamment les actes commis par les forces de sécurité publiques et privées chargées de protéger les biens des entreprises, la corruption sur une grande échelle, la violation des droits des travailleurs ainsi qu'un large éventail d'abus touchant les communautés locales, en particulier les autochtones. » (SystExt, 2021, p.31)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Organisation des Nations unies (ONU). (2006). Promotion et Protection des Droits de l'Homme. Rapport intérimaire du Représentant spécial du Secrétaire général chargé de la question des droits de l'homme et des sociétés transnationales et autres entreprises. Rapport E/CN.4/2006/97. *Commission des droits de l'Homme, Organisation des Nations unies (ONU)*. [Lien](#).

4.2.2. Sécurisation des sites miniers par des forces privées ou publiques



01:39:45



Le secteur minier est un secteur, assez unique en son genre, en termes de sécurisation, avec souvent des forces de sécurité privées autour des sites miniers. Il y a une tendance à la "sur-sécurisation", soit par des services privés, soit par des services publics. C'est à dire que c'est l'État qui met à disposition sa police ou son armée pour sécuriser des zones. Ce phénomène a pris suffisamment d'ampleur pour que John Ruggie l'identifie comme un des moteurs majeurs, constat partagé par de nombreux sociologues.



- Afin de sécuriser le site minier et son environnement, un grand nombre de compagnies minières fait appel à des services de sécurité privés ou obtient le soutien des États par la mise à disposition de personnels de la police voire de l'armée (Curtis, 2007). Ceci conduit le plus souvent à une exacerbation des tensions et à une augmentation des cas de violations de droits humains envers les citoyens (Raftopoulos, 2017, p. 388) : « These social-environmental conflicts are not isolated but are occurring throughout the continent, engaging communities in a continual battle against natural resource exploitation and the forces of global capital, resulting in **repeated and widespread clashes, violence, repression and human rights abuses perpetuated by the state or security forces**. » (SystExt, 2021, p.36)
- Despite the adoption of the UN resolution requiring states to ensure the rights and safety of human rights defenders, **it has become increasingly clear that states are not doing enough to protect those lives at risk from harassment and violence and to bring those responsible to justice. In many cases the state or security forces are perpetuating violence against those groups opposed to natural resource extraction.** (Raftopoulos, 2017, p.398)
- Human rights violations have occurred where security forces paid to protect mining assets have attacked local communities and anti-mining activists. (Curtis, 2007, p.2)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Raftopoulos, M. (2017). Contemporary debates on social-environmental conflicts, extractivism and human rights in Latin America. *The International Journal of Human Rights*, 21(4), 387-404. [Lien](#).
- Curtis, M. (2007). Fanning the Flames - The role of British mining companies in conflict and the violation of human rights. *War on Want*. [Lien](#).



- Mining was the deadliest sector, with 43 defenders killed protesting against the destructive effects of mineral extraction on people's land, livelihoods and the environment. ([Global Witness, 2019, p.9](#)).
- **EL Estor, Guatemala** : If it were not for a journalist taking pictures that day, some might claim that it is unclear how Carlos Maaz's last moments unfolded. There was a cloud of tear gas, the chaos of an improvised protest, the echo of bullets and rocks flying through the crowd. In one photograph though, he is seen standing in the middle of the road among protesters, his hands at his side, holding no weapon. A minute later, the body of the fisherman is lying on the pavement and a policeman, recoiled in the back of a pickup truck, gun drawn, is aiming toward the camera. ([Guégan & Schilis-Gallego, 2019](#))
- **Yanacocha, Pérou** : En Août 2011, environ 200 ouvriers débarquent avec leurs machines, accompagnés de nombreux policiers. Policiers embauchés par la compagnie minière pour garantir "l'ordre" (pour arrondir leurs fins de mois, les policiers péruviens peuvent être engagés dans des missions comme celles-ci en toute légalité). ([Valdés Andino, 2015](#))
- **Marikana, Afrique du Sud** : Le conflit qui a opposé les mineurs de platine à la compagnie Lonmin a connu un épisode sanglant, rappelant les pires heures de l'apartheid. Le 16 août 2012, 34 grévistes sont morts sous les balles de la police. Réunis en haut de la colline de Wonderkop, faute de pouvoir accéder au stade où ils se réunissaient précédemment, les mineurs ont été pris en souricière par les forces de l'ordre, décidées à disperser leur rassemblement. Les policiers ont déployé des fils barbelés afin de les encercler, avant d'ouvrir le feu sur eux à l'arme automatique, sans sommation ni usage des canons à eau, alors que les grévistes cherchaient à s'extirper du piège pour fuir vers le campement informel voisin. Pourquoi une telle violence ? Pourquoi cette intervention de l'État dans un conflit du travail, par le biais de la force armée, avec l'aval de la compagnie minière ainsi que l'assentiment de l'appareil syndical traditionnel, dans un pays pourtant désormais doté d'une Constitution extrêmement progressiste ? ([Hayem, 2014, pp.112-113](#))



- Global Witness. (2019). Enemies of the state ? How governments and business silence land and environmental defenders. [Lien](#).
- Guégan, M. & Schilis-Gallego, C. (2019). A damning photo holds a swiss-russian mine accountable in Guatemala. *Forbidden stories*. [Lien](#).
- Hayem, J. (2014). Marikana : répression étatique d'une mobilisation ouvrière indépendante. *Politique africaine*, 133, 111-130. [Lien](#).
- Valdés Andino, F. (2015). Máxima Acuña de Chaupe, paysanne péruvienne à l'assaut des géants miniers. *TV5 Monde*. [Lien](#).

4.2.3. Expropriations et déplacements forcés



01:41:27



Selon les sociologues, il s'agit d'une industrie qui est unique au monde en ce qui concerne l'expropriation. Il n'y a pas équivalent dans les autres secteurs industriels. On ne dispose pas de statistique internationale sur les déplacements forcés de population associés à l'industrie minière. Cependant, sur les sites miniers importants, les données sont de l'ordre de 10 000 à 30 000 personnes.



- Concernant les déplacements, (« déplacements et réinstallations induits par l'industrie minière » ou « mining-induced displacement and resettlement (MIDR) » en anglais) **de nombreux auteurs considèrent que l'industrie minière est « unique » par rapport aux autres secteurs industriels du fait notamment : de l'afflux massif au démarrage de la mine, et du fait que les déplacements peuvent intervenir à n'importe quel moment dans le projet minier** (Owen & Kemp, 2015 ; Bainton, et al., 2017 ; Mandishekwa & Mutenheri, 2020). ([SystExt, 2021, p.43](#))



▪ Malgré le manque de données, les nombreuses études réalisées à l'international suggèrent cependant que le problème est étendu, et source de perturbations sociales majeures (Downing, 2002 ; Kemp, et al., 2017). **Ainsi, la mine d'or-cuivre de Grasberg (Indonésie) aurait déplacé par la force plus de 15 000 personnes, la mine d'or de Tarkwa (Ghana), 20 000 à 30 000 personnes, et le complexe hydroélectrique de Tucuri (Brésil) destiné à alimenter une fonderie d'aluminium, 25 000 à 35 000 personnes** (Downing, 2002). Les cas de déplacements forcés sont connus et documentés dans de nombreux pays tels que : la Papouasie-Nouvelle-Guinée, l'Indonésie, les Philippines, le Pérou, le Venezuela, le Suriname, le Guyana, l'Argentine, le Chili, le Honduras, la Tanzanie, le Botswana ou encore la Namibie (Downing, 2002). Il est d'ailleurs redouté que cette pratique se développe et que les impacts associés augmentent, du fait de la libéralisation des politiques minières nationales, du développement des techniques d'exploitation à ciel ouvert et de la densification de la population rurale (Downing, 2002). ([SystExt, 2021, p.44](#))



▪ Bainton, N., Vivoda, V., Kemp, D., Owen, J., & Keenan, J. (2017). Project-Induced In-Migration and Large-Scale Mining - A Scoping Study. Centre for Social Responsibility in Mining (CSR), The University of Queensland. [Lien](#).

▪ Downing, T. (2002). Avoiding New Poverty: Mining-Induced Displacement and Resettlement. *Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD)*. [Lien](#).

▪ Mandishekwa, R., & Mutenheri, E. (2020). Mining-Induced Displacement and Resettlement: An analytical Review. *Ghana Journal of Development Studies*, 17(1), 114-140. [Lien](#).

▪ Owen, J., & Kemp, D. (2015). Mining-induced displacement and resettlement: a critical appraisal. *Journal of Cleaner Production*, 87, 478-488. [Lien](#).

▪ SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).



01:42:13



Autre exemple de déplacements de population : Mine de charbon de Hambach, en Allemagne. La mine d'Hambach est connue car elle est collée à une forêt (*au lieu de mine) primaire, faisant partie des dernières forêts primaires du pays.



La mine de Lignite de Hambach prévoit de s'étendre sur 85 km². En septembre 2018, la cours de justice allemande s'est prononcé favorablement par rapport au souhait de la compagnie minière d'étendre la mine à ciel ouvert jusqu'à la limite de la forêt, bien que celle-ci ait déjà détruit 90% des forêts existantes de la zone. D'ici 2030, la mine de Hambach aura provoqué le déplacement de 5200 personnes, et les villages de Mannheim et Morschenich seront réinstallés ailleurs sous peu.



▪ BankTrack. (2020). Hambach open-cast mine | Germany. [Lien](#).

▪ Environmental Justice Atlas. (2015). Hambach forest occupation against brown coal mining, Germany. [Lien](#).

5. Limites et aberrations de la mine industrielle d'or

5.1. Intérêt minier pour cette substance



01:47:45



L'or pourrait être la substance qui représente les dépenses et les investissements les plus importants, en termes d'exploration et d'exploitation. Selon la base de données cartographique en ligne de SystExt *Panoramine*, on peut constater que beaucoup de titres miniers en cours d'étude portent sur l'or.



Au 31/01/2022, la base de données Panoramine comportait un total de :

- 42 Permis Exclusifs de Recherche Minière (PERM), dont 28 concernaient l'or ou l'or et des substances connexes, soit 67 %
- 37 demandes de PERM, dont 28 concernaient l'or ou l'or et des substances connexes ; soit 76 %.



- SystExt. Panoramine - Panorama de l'activité minière en France : www.panoramine.fr
Panoramine est un outil cartographique créé par SystExt en novembre 2015 qui recense et compile les informations administratives de l'activité minière en France, en localisant et en décrivant les permis miniers connus.
- SystExt. (2015). Panoramine : la carte de l'activité minière en France. [Lien](#).



01:48:17



Autres exemples connus pour des projets miniers portant sur l'or en Europe : Rosia Montana, Roumanie (* au lieu de Grèce) ou Skouries, Grèce.



▪ **Rosia Montana, Roumanie** : Aujourd'hui, les Monts Apuseni attirent toujours autant la convoitise des exploitants miniers. Depuis 1999, 150 permis ont été attribués pour des gisements d'or et d'argent. Dans les environs de Certej, 6 permis ont été attribués en zone naturelle protégée Natura 2000 [...]. La superficie totale des six permis représente 4 865 hectares ! Les demandeurs ont sciemment fragmenté le territoire en plusieurs demandes : un projet de taille restreinte est mieux accepté, bien que les impacts potentiels se cumulent à l'échelle du bassin. [...] Sur une période de 16 ans, l'entreprise envisage une production de 314 tonnes d'or et de 1 480 tonnes d'argent. Le procédé de traitement choisi est la cyanuration. Pour exploiter ce vaste gisement à faible teneur, il est prévu le creusement de 4 mines à ciel ouvert d'une profondeur de 150 m à 300 m. [...] L'actuel village de Roşia Montană disparaîtrait sous les énormes dépôts de déblais provenant des fosses. Les résidus miniers cyanurés seraient stockés dans un immense bassin (de 4 km de long, 2 km de large et 180 m de haut), remplissant entièrement une vallée voisine où se trouve le village de Corna. Le site minier couvrirait une surface de 4 284 ha, nécessitant la démolition de plusieurs villages. (SystExt, 2016)

▪ **Skouries, Grèce** : Les principaux actifs miniers d'Hellas Gold sont : le site de Stratoni, le projet de redéveloppement d'Olympiada et le nouveau projet de Skouries. Ce dernier concerne un gisement d'or et de cuivre (avec des teneurs respectives de 0,8 g/t et de 0,5 %), destiné à être exploité à ciel ouvert et en souterrain. Au terme des 20 ans d'exploitation, la fosse devrait présenter un diamètre de 700 m et une profondeur de 220 m. (SystExt, 2020)



- SystExt. (2016). Une lutte sans fin, les nouveaux conquérants du quadrilatère d'or. [Lien](#).
- SystExt. (2020). La Chalcidique, entre mines antiques et résistance contemporaine. [Lien](#).



Promotion de l'exploration et de l'exploitation de l'or en Europe par le lobby minier en Europe : Recent projects mapping mineral resources – such as the ProMine Project cofinanced by the EU – have demonstrated that Europe is resource-rich, including economically viable gold mining deposits. **Despite its gold mining potential, Europe is still lagging behind the rest of the world.** In 2012, EU's gold mine production accounted for less than 1% of world's gold production and nearly 2% when including the Turkish gold mine production [...]. As a result, Europe is still heavily dependent on gold imports (>90%) from other countries of a metal whose price has increased by around 375% between 2000 and the third quarter of 2013. (euromines, 2013, p.17)



European Association of Mining Industries, Metal Ores & Industrial Minerals (euromines). (2013). Sustainable Gold Mining in Europe. [Lien](#).

5.2. Usages de l'or

5.2.1. Principaux usages de l'or : joaillerie, produits financiers et bancarisation



01:49:35



Les usages de l'or sont très intéressant (statistiques changeantes en fonction des années) :

- Environ 50 à 60 % de l'or sert à la bijouterie et à la joaillerie. Forte thésaurisation de la part des indiens (1/3 de cette dernière consommation), avec un pic au moment des mariages indiens vers le mois de mai.
- Environ **20 à 30 % (*au lien de 10 à 20 %)** dans les fonds de pensions, dans les produits financiers, etc.
- Environ 10 à 15 % dans la bancarisation (stockage en banques centrales).
- Environ 5 à 10 % pour les usages industriels.

▪ **Dernières données du World Gold Council sur la consommation d'or (2021) :**

- la joaillerie représentait 2 221 tonnes, soit **55,24 %** de la demande totale. L'Inde consommant 611 tonnes, soit 28,77%, et la Chine consommant 675 tonnes, soit 31,77 % de la demande en joaillerie.
 - les investissements représentaient 1 007 tonnes, soit **25,04 %** de la demande totale,
 - les réserves des banques centrales représentaient 463 tonnes, soit **11,51 %** de la demande totale,
 - les usages dits technologiques (dentaires, médical, ornements, électroniques, ce dernier constituant la part la plus importante de cette liste) représentaient 330 tonnes, soit **8,21 %** de la demande.
- En complément, les autres produits financiers sont estimés à 1066 tonnes, bien que les données ne soient pas encore disponibles. ([World Gold Council, 2022, pp.6-7](#))

▪ **Synthèse réalisée par SystExt en 2017 :**

Historiquement, la joaillerie est la part la plus importante de la demande totale en or. Cette part a néanmoins baissé, représentant 57 % en 2015, contre 80 % en 2000 ; au profit des produits d'investissements à base d'or, qui ont vu leurs parts de marché croître depuis 15 ans. Seulement 8 % de l'or produit chaque année servent à l'industrie, tandis que 35 % sont destinés aux secteurs bancaires et des investissements.

La majeure partie de l'or exploité durant toute l'histoire est stockée sous forme de lingots ou de bijoux. A titre d'exemple, l'Inde seule concentrerait près de 10 % du stock d'or total en surface, qui se retrouve à la fois dans les nombreux temples du pays et détenu par les ménages indiens. En 2016, on estime par exemple que 30 000 tonnes sont stockées dans les banques centrales à travers le monde, soit environ 20% de tout l'or que l'Homme a produit. Cela représente environ 10 fois la production minière annuelle ou encore la quantité totale d'or qu'il reste à extraire du sous-sol mondial. ([SystExt, 2017, p.5](#))

▪ **Concernant la forte consommation des indiens :**

En Inde, l'or est un symbole de richesse mais aussi un fondement de nombreux rituels. Il est considéré comme de bon augure et est au centre de plusieurs événements de la vie personnelle. Les mariages génèrent ainsi près de 50 % de la demande annuelle d'or du pays et l'on observe toujours un pic de la demande au deuxième trimestre, correspondant aux périodes des mariages et festivals. ([Lefebvre, 2016](#))



- World Gold Council (2022). Gold Demand Trends - Full Year and Q4 2021. [Lien](#).
- SystExt (2017). Non à la méga-mine d'or industrielle en Guyane ! · Dossier de presse. [Lien](#).
- Lefebvre, G. (2016). Structure du marché de l'or et situation à mi-2016. *minérallInfo*. [Lien](#).



01:51:20



Avis très défavorable de Warren Buffett sur les investissements dans l'or. SystExt s'est basée sur l'analyse de Warren Buffett, compte-tenu des difficultés de comprendre - pour des non-initiés - de l'intérêt ou non d'investir dans cette substance.



Warren Buffett does not invest in gold. He has invested almost \$1 billion in silver, so the reason for his aversion is not simply a dislike for precious metals. [...] One of Buffett's basic principles of investing is that one should only invest in things that are useful and that serve some purpose and that supply some practical need that people have. ([Investopedia, 2019](#))



- Investopedia. (2019). Why Warren Buffett Doesn't Invest in Gold. [Lien](#).
- Investor Center (2021). [Vidéo sur Youtube](#). *This video explains why Warren Buffett does NOT recommend investing in gold, even during high inflationary environments.*

5.2.2. Recyclage de l'or performant et suffisant



01:56:33



L'or est connu pour avoir un très bon taux de recyclabilité. De plus, l'or recyclé représente trois fois la quantité d'or nécessaire aux usages industriels.

▪ Dernières données du World Gold Council sur la consommation d'or (2021) :

- Quantité d'or produite d'origine minière : 3 516 tonnes.
- Quantité d'or recyclé : 1 150 tonnes
- Quantité d'or utilisée pour les usages industriels : 330 tonnes



Ration quantité or recyclé / quantité d'or pour usages industriels = **3.48**. (World Gold Council, 2022, p.6)

▪ Synthèse réalisée par SystExt en 2017 :

En 2015, le recyclage a fourni 3 fois plus d'or que ce dont les industriels avaient besoin, alors même que la filière du recyclage est sous-développée et que l'on constate une diminution de la production d'or recyclé (1176 tonnes soit 26% de la production annuelle d'or en 2014 contre 1728 tonnes soit 40% de la production annuelle d'or en 2009). (SystExt, 2017, p.5)



- World Gold Council (2022). Gold Demand Trends - Full Year and Q4 2021. [Lien](#).
- SystExt (2017). Non à la méga-mine d'or industrielle en Guyane ! - Dossier de presse. [Lien](#).

5.3. Cyanuration

5.3.1. Premier procédé utilisé par l'industrie aurifère



01:52:42



Long procédé de traitement de l'or. 80 % de la production mondiale d'or est traitée par cyanuration.



La cyanuration est le premier procédé de traitement du minerai employé par l'industrie aurifère et concerne 80 % de la production mondiale d'or. (SystExt, 2021, p.6)



SystExt (2021). Rapport d'étude | Cyanuration dans l'industrie aurifère - Enjeux techniques et principaux risques. [Lien](#).



01:56:50



L'or est la première matière première minérale traitée chimiquement, avec un milliard de tonnes par an qui est cyanuré.



Tenant compte de la teneur en or particulièrement faible des gisements aurifères - avec une moyenne en 2015 de 1.18 g/t pour toutes les mines d'or en exploitation et de 5.3 g/t pour les 50 premières (Croharé, 2016) - les quantités de minerai à traiter sont nécessairement considérables. Ainsi, **un milliard de tonnes de minerai est traité chaque année dans le monde à l'aide d'une solution cyanurée pour récupérer l'or, ce qui représente le plus grand tonnage de matières premières minérales traitées chimiquement** (Habashi, 2016). (SystExt, 2021, p.6)



- SystExt (2021). Rapport d'étude | Cyanuration dans l'industrie aurifère - Enjeux techniques et principaux risques. [Lien](#).
- Habashi, F. (2016). Gold - An Historical Introduction. Dans M. D. Adams, *Gold Ore Processing - Project Development and Operations. Second Edition* (pp. 647-661). Elsevier

5.3.2. Maintien de cette technique de traitement pour des raisons économiques



01:57:02



Lors d'une session de l'Assemblée générale, l'ancien ministre François de Rugy avait pris la parole pour expliquer que si on avait développé la cyanuration c'est pour résoudre les problèmes liés à l'amalgamation.



Dans ce cadre, il est régulièrement affirmé que la cyanuration a été développée afin de se substituer à l'amalgamation, compte-tenu des conséquences sanitaires et environnementales graves de ce procédé, tel que déclaré par M. François de Rugy en février 2019, alors Ministre de la transition écologique et solidaire : *"J'entends bien ce qui est dit sur le cyanure, et je sais que certains députés ont la volonté d'interdire son usage dans l'exploitation de l'or. Mais ils ne disent rien du mercure, pourtant plus toxique. [...] C'est d'ailleurs à cause des problèmes posés par le mercure que le cyanure lui a été substitué. Si cela n'est pas dit, soyons clairs, c'est parce qu'aujourd'hui le mercure est utilisé à grande échelle, par plusieurs centaines d'exploitants, sous une autre forme."* (SystExt, 2021, p.8)



- SystExt (2021). Rapport d'étude | Cyanuration dans l'industrie aurifère - Enjeux techniques et principaux risques. [Lien](#).
- Déclaration de M. François de Rugy, ministre de la transition écologique et solidaire, sur un projet d'exploitation de l'or en Guyane, à l'Assemblée nationale le 7 février 2019. [Lien](#).



01:57:53



La cyanuration a été développée dans le bassin minier du Witwatersrand en Afrique du Sud, dans les années 1890. Ce dernier pays était d'ailleurs le premier producteur mondial d'or avant d'être dépassé par la Chine il y a quelques années. Si la cyanuration a été développée, ce n'est pas pour répondre à des enjeux environnementaux ou sanitaires mais parce que les techniques utilisées jusqu'alors (amalgamation, chloration) ne permettaient plus de récupérer l'or dans les gisements exploités.



- L'avènement du cyanure pour l'exploitation aurifère s'est fait dans les années 1890 lors du développement du complexe minier aurifère du Witwatersrand en Afrique du Sud. En effet, les anciennes méthodes de traitement (amalgamation ou chloration) ne permettaient plus de récupérer suffisamment d'or dans les nouvelles zones exploitées, seulement 55 à 65 % [...]. SystExt souhaite rappeler que le développement de la cyanuration n'est pas associé à une substitution de l'amalgamation, mais à la volonté des industriels miniers de valoriser des gisements dans lesquels l'or présente des formes spécifiques. (SystExt, 2021, p.8)
- En 2007, la Chine est devenue premier producteur mondial [d'or], devançant l'Afrique du Sud qui a été n°1 mondial pendant 102 années consécutives. (L'Élémentarium, Fiche Or)



- SystExt (2021). Rapport d'étude | Cyanuration dans l'industrie aurifère - Enjeux techniques et principaux risques. [Lien](#).
- L'Élémentarium, Fiche Or. [Lien](#).



En effet, l'or se trouvait alors dans un état « lié » ; soit associé à d'autres éléments (comme le tellure), soit sous forme d'atome à l'intérieur du réseau cristallin d'autres minéraux tels que des sulfures. C'est l'or qui est très exploité aujourd'hui, c'est l'or de Montagne d'Or.



Dans le cas de Montagne d'Or, la minéralisation, c'est-à-dire l'endroit du gisement qui contient l'or, est constituée principalement de sulfures de fer tels que la pyrite et la pyrrhotite, potentiellement générateurs d'acidité. De plus, des petites quantités de sulfures associées à des métaux lourds (arsenic, plomb, ...) sont présentes dans le gisement, et pourraient libérer des concentrations de métaux néfastes pour l'environnement et la santé humaine. (SystExt, 2018, p.1)



SystExt (2018). CP | Gisement d'or de la Montagne d'Or en Guyane - Risques inhérents à la géologie du gisement. [Lien](#).

5.4. Opposition stricte au projet Montagne d'Or

5.4.1. Importante mobilisation de SystExt durant plus de 4 ans



02:01:17



Montagne d'or est le seul projet minier contre lequel SystExt s'est positionnée, tellement c'était aberrant.



- En toute discrétion, l'Etat français encourage des multinationales étrangères à lancer de gigantesques exploitations minières en plein cœur de la forêt guyanaise. Parmi eux, le projet Montagne d'Or porté par le consortium russo-canadien Nordgold/Columbus Gold pourrait démarrer prochainement. Il s'agirait de la plus grande mine d'or jamais exploitée sur le territoire français. SystExt s'associe aujourd'hui au collectif guyanais Or de Question, composé de 15 organisations, ainsi qu'aux associations France Libertés - Fondation Danielle Mitterrand, Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme, Sauvons la forêt et les Amis de la Terre, pour dénoncer ce projet, et plus largement toute activité de méga-mine industrielle aurifère en Guyane. (SystExt, 2017a)

- [...] le 06 mars, SystExt lançait un appel à soutiens à la société civile internationale. C'est donc un mouvement composé de 105 organisations originaires de 25 pays qui interpelle aujourd'hui les candidats aux élections présidentielles françaises dans un nouveau communiqué de presse. (SystExt, 2017b)



- SystExt (2017a). Non à la méga-mine d'or industrielle en Guyane ! · Communiqué de presse, dossier de presse et infographie téléchargeables en bas de page. [Lien](#).

- SystExt (2017b). Plus de 100 organisations du monde entier disent non à la méga-mine d'or industrielle en Guyane ! [Lien](#).

- Izoard, C. & de la Chapelle, A. (2018). « L'industrie minière crée des phénomènes qu'elle ne sait pas maîtriser » : Entretien avec ISF SystExt, collectif d'ingénieur-es de la mine en révolte. *Z : Revue itinérante d'enquête et de critique sociale*, 12, 50-53. [Lien](#).

Concernant les travaux réalisés par SystExt dans le cadre de la mobilisation contre le projet Montagne d'Or entre 2016 et 2020 :



Depuis août 2016, en partenariat avec le collectif Or de Question et de nombreuses ONG françaises ; Construction du réseau de soutien à l'international de 124 organisations ; Rédaction ou contribution à 15 publications ; Collaboration avec Fabien GAY, proposition de loi visant à interdire l'utilisation de cyanure du 11/03/2019. (SystExt, 2020)



SystExt. (2020). Exposition | 2009-2019 : 10 ans de lutte [Lien](#). Panneau d'exposition dédié au projet. [Lien](#).

5.4.2. Risques environnementaux et sanitaires majeurs



02:01:43



Risques associés à la gestion des déchets miniers compte-tenu de : la mise en œuvre du procédé de cyanuration ; la construction d'une digue prévue d'environ **400 millions de mètres cubes (*au lieu de 300 millions)** ; d'une pluviométrie moyenne de **3 000 mm par an (*au lieu de 6 000 mm)**.



- Parce que les quantités d'or présentes dans la roche sont infimes (1 à 2 grammes d'or par tonne de roche), le projet Montagne d'Or nécessitera le creusement d'une fosse de 2,5 km de long, 500 m de large (soit une surface équivalente à 150 stades de football) et 400 m de profondeur. Ceci générera un **volume de déchets miniers, extrêmement nocifs, estimé à 400 millions de m³**. (SystExt, 2017, p.1 du communiqué de presse)

- Ces barrages sont particulièrement sensibles à l'accumulation d'eau qui augmente le risque de rupture. Même les discours les plus optimistes sur la gestion du projet industriel Montagne d'Or, insistent sur ce point : « Le seul risque réside donc dans le dimensionnement des digues, qui devront tenir compte du climat tropical de la Guyane, avec de fortes pluies ». **Il n'est pas concevable de prendre un tel risque dans une région où la pluviométrie cumulée avoisine 3000 mm par an.** (SystExt, 2017, p.3 du dossier de presse)



SystExt (2017). Non à la méga-mine d'or industrielle en Guyane ! · Communiqué de presse, dossier de presse et infographie téléchargeables en bas de page. [Lien](#).



02:02:28



Risques de drainage minier acide. Montagne d'or représente l'une des premières fois en Guyane, (nonobstant certains projets qui existent aujourd'hui et qui commencent à rentrer dans cette zone), où on commence à rentrer en profondeur. « Eau + sulfures + oxygène, ça fait de l'acide ».



La question du drainage minier acide se pose de façon cruciale dans le cas de la méga-mine industrielle, et en particulier dans le cas du projet minier Montagne d'Or. En effet, jusqu'alors, les fosses creusées sur les sites miniers en Guyane présentaient des profondeurs bien inférieures à celle envisagées désormais (pour rappel, dans le cadre du projet Montagne d'Or, la fosse devrait atteindre une profondeur de 400m). **Or, le BRGM signalait dans un rapport d'avril 2012 la problématique posée par la présence de sulfures dans les horizons profonds** et rappelait à cette occasion : « [...] en raison de l'approfondissement des fosses d'exploitation dans la roche mère peu ou pas altérée, le type de minerai va radicalement changer en composition et passer d'une altérite à un minerai sulfuré ». Pour rappel, les déchets miniers contenant des sulfures sont considérés comme des « déchets dangereux » dans la réglementation européenne. (SystExt, 2017, p.3 du dossier de presse)



SystExt (2017). Non à la méga-mine d'or industrielle en Guyane ! · Communiqué de presse, dossier de presse et infographie téléchargeables en bas de page. [Lien](#).



02:02:57



En plus de l'exploitation légale, il y a environ 10 000 garimpeiros qui produisent environ 10 tonnes d'or par an. Cela représente la très grande majorité de la production guyanaise.



Toutefois, la grande majorité des exploitations d'or en Guyane est aujourd'hui illégale : on estime que l'orpaillage illégal représente une production de 10 à 12 tonnes par an menée par 6 000 à 10 000 orpailleurs illégaux, tandis que la production annuelle déclarée oscille entre 1 et 2 tonnes. (Sénat, 2020, p.33)



Sénat. (2020). Rapport d'information n° 337 (2019-2020) de MM. Philippe BAS, Mathieu DARNAUD, Jean-Luc FICHET, Mme Sophie JOISSAINS et M. Thani MOHAMED SOILHI, fait au nom de la commission des lois, déposé le 19 février 2020. [Lien](#).

Concernant les impacts de l'orpaillage illégal :

On peut néanmoins estimer que de l'ordre de 10 tonnes d'or sont produites illégalement sur le territoire guyanais par 6 000 à 10 000 orpailleurs illégaux. Ces activités génèrent leur cortège d'impacts :

- Déforestation d'importantes surfaces de forêt. Lors d'une étude publiée en 2017, il a été évalué qu'en Guyane jusqu'en 2015, près de 12 000 ha de forêt amazonienne avaient disparu en lien avec l'orpaillage illégal.
- Pollution mercurielle chronique lors de l'amalgamation de l'or. Sur la base d'une production illégale estimée à 10 tonnes d'or, de l'ordre de 13 tonnes de mercure seraient annuellement déversées dans les cours d'eau guyanais. Cette contamination a de graves conséquences sanitaires pour les populations de l'intérieur du fait de la bioaccumulation du méthylmercure le long des chaînes alimentaires. En 2015, 90 % des populations du Haut Maroni avaient un taux de mercure supérieur à la norme admise, le phénomène touchant une part non négligeable de femmes enceintes et d'enfants.
- Destruction des cours d'eau et lessivage des sols. En Guyane, jusqu'en 2015, près de 1 800 km de linéaire de cours d'eau ont été détruits. Les matières en suspension libérées par l'activité aurifère non contrôlée entraînent par ailleurs une forte turbidité ainsi que la dissémination de mercure, affecte les écosystèmes aquatiques et les activités humaines associées : consommation d'eau, pêche, baignade, activité touristique, sont fortement perturbés.
- Maintien d'une population en forte précarité sanitaire, sans suivi médical adapté, et potentiellement vectrice de maladies auprès des communautés de l'intérieur. (WWF, 2018, p.5)



WWF. (2018). Lutte contre l'orpaillage illégal en Guyane : orientations pour une efficacité renforcée. [Lien](#).

6. Ampoules

6.1. Performance énergétique versus dopage métallique

6.1.1. Promotion des ampoules « basses consommation »



02:07:01



Considérant que l'ampoule à incandescence était trop « consommatrice », on a déployé deux nouvelles technologies d'ampoule : les ampoules fluocompactes et les LED. La fluocompacte est désormais considérée comme l'ampoule « verte » ou l'ampoule « écolo ».

▪ **Exemple de communication sur le caractère "écologique" des ampoules fluocompactes :**

Les lampes fluocompactes sont des éclairages basse consommation destinés à remplacer les ampoules à incandescence classiques. Plus propres et moins énergivores, elles permettent de réduire l'impact de l'effet de serre, ainsi que la facture domestique d'énergie (GEO, 2017)

▪ **Exemple d'incitation à l'utilisation des LED : l'éclairage public de la ville de Paris :**

Initié en 2011, le programme de rénovation de l'éclairage public a pour objectif de réduire de 30 % la consommation énergétique de ce secteur sans dégrader la qualité du service fourni. [...] Ce programme a d'ores et déjà permis de réduire de 33 % les émissions de gaz à effet de serre de l'éclairage public. (Ville de Paris, 2020, p.6)

70 000 lumières à technologie LED doivent également être mises à la place des sources lumineuses actuelles - « soit l'équivalent de la totalité du parc lumineux de la ville de Marseille ». [explique la Mairie de Paris] (Thévenin, 2017)

▪ GEO. (2017). Lampe fluocompacte : l'éclairage basse conso et écolo. [Lien](#).

▪ Ville de Paris (2020). Plan climat de Paris. [Lien](#).

▪ Thévenin, L. (2021). EDF et Eiffage remportent le marché de l'éclairage public de Paris. *Les Échos*. [Lien](#).

6.1.2. Économie d'énergie et augmentation de la durée de vie



02:09:20



Gain substantiel sur la durée de vie. Une lampe à incandescence a une durée de 1 000 heures alors qu'une lampe fluocompacte a une durée de vie de 8 000 heures et une LED a une durée de vie de 40 000 ou 50 000 heures

▪ **Ampoules à incandescence :**

- 95 % de l'énergie utilisée par une ampoule à incandescence disparaît en chaleur, 5 % seulement étant transformé en lumière.

- Leur efficacité est ainsi de seulement 14 à 25 lumens par watt.

- Leur durée de vie moyenne est de seulement 1 000 heures. Celle-ci est donc d'un an pour un éclairage de 4 heures par jour.

▪ **Ampoules fluocompactes :**

- Les ampoules basse conso ont une efficacité de l'ordre de 60 à 70 lumens par watt : ainsi une lampe fluocompacte de 11 W produira le même éclairage qu'une lampe à incandescence de 40 à 60 W

- La durée de vie moyenne de ces ampoules écolo est de 8000 à 10 000 heures environ, soit une durée de vie de 6 ans pour un éclairage de 4 heures par jour.

▪ **Les LED, les autres ampoules vertes :**

- Les diodes électroluminescentes (LED) ont une durée de vie « imbattable », allant de 50 000 à 100 000 heures, une consommation électrique dérisoire et un allumage instantané, sont une autre alternative aux ampoules classiques, avec un retour sur investissement très rapide. (Consoglobe, 2008)



Consoglobe. (2008). Ampoules à incandescence vs Ampoules fluocompactes. [Lien](#).

6.1.3. Métaux contenus dans les ampoules fluocompactes



02:08:38



À l'intérieur d'une ampoule fluocompacte, le verre est recouvert d'une poudre, qui contient des matières luminescentes, souvent des terres rares type gadolinium, cérium ou autres, elles-mêmes à l'intérieur de matrices à base de magnésium, de baryum, ou d'oxyde d'yttrium... De plus, se trouve une vapeur de mercure et d'argon qui est excitée.



- 25 métaux identifiés en fonction des auteurs consultés et des technologies considérées.
- Métaux qui composent classiquement une ampoule fluocompacte : cuivre (Cu), aluminium (Al), tungstène (W), plomb (Pb), mercure (Hg) ainsi que non-métaux : phosphore (P), argon (Ar), krypton (Kr)
- Autres métaux et éléments identifiés, selon les auteurs : calcium (Ca), strontium (Sr), manganèse (Mn), antimoine (Sb), phosphore (P), fluor (F), chlore (Cl), terres rares communément utilisées : yttrium (Y), cérium (Ce), lanthane (La), terbium (Tb), europium (Eu) ; mais aussi baryum (Ba), magnésium (Mg), gadolinium (Gd), bore (B), nickel (Ni), arsenic (As), chrome (Cr), gallium (Ga), fer (Fe), argent (Ag), zinc (Zn). (Lim, et al., 2013 ; Taghipour, et al., 2014 ; Esbrí, et al., 2021 ; Anand & Singh, 2021)



- Esbrí, J.M., Rivera, S., Tejero. J. & Higuera, P.L. (2021). Feasibility study of fluorescent lamp waste recycling by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61860-61868. [Lien.](#)
- Anand, A. & Singh, R. (2021). Synthesis of Rare Earth Compounds from Phosphor Coating of Spent Fluorescent Lamps. *Separation & Purification Reviews*, 50(1), 96-112. [Lien.](#)
- Taghipour, H., Amjad, Z., Jafarabadi, M. A., Gholampour, A., & Nowrouz, P. (2014). Determining heavy metals in spent compact fluorescent lamps (CFLs) and their waste management challenges: Some strategies for improving current conditions. *Waste Management*, 34(7), 1251-1256. [Lien.](#)
- Lim, S.R., Kang, D., Ogunseitan, O.A., Schoenung, J.M. (2013). Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environmental Science & Technology*, 47(2), 1040-1047. [Lien.](#)



- A CFL [Compact fluorescent lamp] consists of a copper (Cu) electrode, an aluminium (Al) cap, a tungsten (W) sub-electrode sealed in lead (Pb) glass, a glass tube, fluorescent coating material, Hg, small amounts of argon (Ar) or krypton (Kr) and conductive Cu material [...]. The fluorescent powder is basically composed of phosphorous compounds, most commonly derived from the following phosphates: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}_0.9\text{Cl}_0.1)$, $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}_0.9\text{Cl}_0.1)$, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl})$: Sb^{3+} , Mn^{2+} and $(\text{Ca}, \text{Sr})_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{Cl})_2$: Sb^{3+} , Mn^{2+} [...]. A wide variety of phosphorous compounds are used depending on the colour of light required. [...] In addition, rare earth elements (REEs), such as yttrium (Y), cerium (Ce), lanthanum (La), terbium (Tb) and europium (Eu), are commonly used [...]. Therefore, the recycling of this complex fluorescent light waste, containing large amounts of potentially toxic elements (PTEs) and REEs, can be economically viable but difficult to carry out (Esbrí, et al., 2021, p.61861)
- A FL is made from a thin, transparent glass tube. After filling the glass tube with inert gas and mercury in vaporized state, it is sealed with aluminum caps. Additionally, a glass stem to hold two copper–nickel-connecting wires and a tungsten filament is provided on either end of the glass tube. A coating of fluorescent material known as phosphor is applied on the inner surface of the glass tube. When high potential difference appears across the end of filaments, they discharge electrons which move under the action of electric field. While moving these electrons collide with mercury atoms, and ultraviolet (UV) rays are generated. Fluorescent coating converts these UV rays to visible light. (Anand & Singh, 2021, p.1)



- Esbrí, J.M., Rivera, S., Tejero. J. & Higuera, P.L. (2021). Feasibility study of fluorescent lamp waste recycling by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61860-61868. [Lien.](#)
- Anand, A. & Singh, R. (2021). Synthesis of Rare Earth Compounds from Phosphor Coating of Spent Fluorescent Lamps. *Separation & Purification Reviews*, 50(1), 96-112. [Lien.](#)

6.1.4. Métaux contenus dans les ampoules LED



02:10:03



Les LED reposent principalement sur des matériaux à base de gallium, tels que du nitrure de gallium et d'indium (*au lieu d'arsenic), du phosphure de gallium. Il y a 4 grandes technologies à base de gallium.



Les principaux matériaux semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des LED sont :

- Nitrure de gallium d'indium (InGaN) : LED à haute luminosité bleue, verte et ultraviolette.
- Phosphure d'aluminium, de gallium et d'indium (AlGaInP) : LED à haute luminosité jaune, orange et rouge.
- Arséniure d'aluminium et de gallium (AlGaAs) : LEDs rouges et infrarouges.
- Phosphure de gallium (GaP) : LEDs jaunes et vertes ([LEDs Magazine, 2004](#))



LEDs Magazine (2004). What is an LED? [Lien](#).



02:11:38



Pour pouvoir augmenter la durée d'éclairage et pour diminuer la consommation énergétique, on a fait du dopage métallique, ni plus, ni moins.

6.2. Difficultés de recyclage

6.2.1. Vers des déchets dangereux



02:11:50



Les ampoules à incandescence, on pouvait les jeter dans la poubelle, car elles n'étaient pas considérées comme des déchets dangereux. Contrairement aux nouvelles ampoules qui le sont.



- Depuis juillet 2005, le décret n° 2005-829 transpose en droit français deux directives européennes relatives au recyclage des DEEE et à la réduction de certaines substances dangereuses. [...] Le décret DEEE couvre toutes les lampes à **l'exclusion des ampoules à filament** (ampoules classiques, halogènes, linolites ...). **Les ampoules à filament, pour lesquelles le recyclage ne se justifie pas, doivent donc être éliminées avec les déchets ménagers banals.** [...] Les lampes à recycler sont donc toutes les autres sources lumineuses, principalement les lampes à décharge (tubes fluorescents, lampes fluo compactes, lampes sodium et autres halogénures métalliques, ...), et accessoirement les lampes à diodes électroluminescentes (LED ou Del).[...] **Elles sont considérées comme des déchets dangereux et elles ne doivent pas être brisées avant leur traitement.** ([Seghier, 2006](#))

- The CFL and LED bulbs that we investigated would be classified as hazardous waste under U.S. EPA federal and California regulations while the incandescent bulb would not. ([Lim, et al.,2013, p.1043](#))



- Seghier, C. (2006). "La collecte des lampes doit être associée à une information objective des consommateurs". *Actu Environnement*. [Lien](#).

- Lim, S.R., Kang, D., Ogunseitán, O.A., Schoenung, J.M. (2013). Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environmental Science & Technology*, 47(2), 1040-1047. [Lien](#).



02:12:10



Risques liés aux émissions de vapeur de mercure suite au bris de lampes fluocompactes. On peut se reporter à la bibliographie des services de santé canadiens qui alertent sur les risques sanitaires pour les habitants et pour les personnes qui travaillent dans les points de collecte, les points de récupération et les centres de recyclage. On met en plus en danger des personnes qui travaillent dans ces usines.



- En février 2008, le *Maine Environmental Department* publiait un rapport sur les fluocompactes en milieu résidentiel. Suite à la publication de ce rapport, de nombreuses questions concernant les risques pour la santé de l'exposition au mercure lors du bris de ces ampoules ont été soulevées. [...] l'utilisation en milieu résidentiel de ces ampoules soulève des inquiétudes quant aux risques pour la santé résultant d'une exposition potentielle aux vapeurs de mercure lors du bris de ces ampoules. (Lefèbvre & Saint-Laurent, 2009, p.8)
- Les lampes, lorsqu'elles sont brisées, peuvent entraîner des risques pour la santé à cause des substances chimiques qu'elles contiennent, notamment le mercure et les poudres fluorescentes [...] (INRS, 2008, p.8)



- Lefèbvre, L. & Saint-Laurent, L. (2009). Avis scientifique sur les risques pour la santé de l'exposition au mercure lors du bris d'ampoules fluo-compactes. *Institut national de santé publique du Québec (INSPQ)*, 25(1). [Lien](#).
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2008). La filière des lampes usagées - Aide au repérage des risques dans les points de collecte, les entreprises de collecte et de recyclage. [Lien](#).

6.2.2. Recyclage très partiel et mise en décharge



02:10:43



Le recyclage des ampoules, tant des fluocompactes que des LED est difficile. Bien que l'on ne dispose pas de statistiques sur les quantités d'ampoules recyclées. Tout n'est pas recyclé, et une partie tout simplement pilée et stockée en décharge.



- Among various electrical and electronic equipment, FLs are the most common ones as they are used in most of the houses, offices and industries. In 2009 environment protection agency passed a resolution to increase the efficiency of FLs which boosted the application of energy efficient RE phosphors. **Annually, millions of such FLs are produced worldwide, used and discarded** after they stop functioning. [...] **Although the exact number of SFLs generated by the world annually is not known**, we can take a hint from the numbers of India which is around 0.7 billion alone. **We can conclude that a large number of SFLs are getting piled up around the globe. These large numbers of spent FLs are generally dumped in open or landfill sites.** (Anand & Singh, 2021, p.4)
- The consequent reduction in the use of mercury in fluorescent lighting is expected to generate large amounts of discarded products. **Most of this waste will be deposited in landfills, along with other household waste, with only a small proportion being recycled:** around 4—% in Canada, 23% in the USA, 6% in Brazil, 80% in Austria and 95% in Switzerland [...]. In Europe, waste electrical and electronic equipment (WEEE) directive 202/96/CE recommends a minimum recovery rate of 70%, as well as a reuse and recycling rate of over 50%, which will be technologically challenging to achieve. (Esbrí, et al., 2021, p.61861)
- Fluorescent lamps (FL) have received much attention in the last decade because of the potential risk to the environment of their disposal. The main concern has always been related to mercury, a known toxic metal, in their composition [...]. The estimated annual consumption of FL in Brazil is around 206 million units [...], which can be a concern since **only 6% of spent FL is estimated to be recycled** [...]. The most common disposal of FL in Brazil is **in landfills and municipal landfills** [...]. The incorrect disposal of spent FL occurs not only in Brazil but **also in Beijing (China), where almost 70% of spent FL are discarded together with household waste in landfills** [...]. FL disposed of in landfills can be damaged, releasing mercury into the air and leach into the soil, contaminating groundwater, streams, and lakes [...]. (de Farias, et al., 2020)



- Anand, A. & Singh, R. (2021). Synthesis of Rare Earth Compounds from Phosphor Coating of Spent Fluorescent Lamps. *Separation & Purification Reviews*, 50(1), 96-112. [Lien](#).
- Esbrí, J.M., Rivera, S., Tejero. J. & Higuera, P.L. (2021). Feasibility study of fluorescent lamp waste recycling by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61860-61868. [Lien](#).
- de Farias, C. V., Paulino, J. F., Barcelos, D. A., Rodrigues, A. P. de C., & Pontes, F. V. M. (2020). Is mercury in fluorescent lamps the only risk to human health? A study of environmental mobility of toxic metals and human health risk assessment. *Chemosphere*, 261, 1-10. [Lien](#).

6.2.3. Recyclage jugé non intéressant économiquement



02:10:52



Il y avait eu des projets de récupération de terres rares dans la région de La Rochelle par Solvay qui ont été abandonnés.



- Solvay-Rhodia a annoncé mi-janvier la cessation prochaine de son activité de recyclage de terres rares. Les ateliers de Saint-Fons (Rhône) et de La Rochelle (Charente maritime), qui comptent au total une quarantaine de salariés, devraient fermer d'ici fin 2016. [...] Recycler n'est plus rentable [...] Lorsque Solvay avait décidé de passer à la phase industrielle de son procédé innovant de recyclage des terres rares contenues dans les ampoules basse consommation (projet Coléop'terre), le resserrement des exportations chinoises laissait craindre des difficultés d'approvisionnement. La hausse des prix qui avait suivi justifiait le coût, plus élevé, du recyclage et les 15 millions d'euros investis dans le projet. (Delamarque, 2016)

- Despite the vast literature dealing with lab-scale research efforts of recycling REMs from phosphor, less than 1% of REEs were commercially recycled in 2011. [...] Existing literatures have so far failed in suggesting a commercially acceptable process for recycling REMs from phosphor. **Probable reason behind the failure: "The recycled lamp phosphor has a very complex chemical composition, with large compositional variations between countries and between lamp recycling companies"**. (Anand & Singh, 2021, p.15)



- Delamarque, M. (2016). Solvay renonce au recyclage des terres rares. *Usine Nouvelle*. [Lien](#).
- Anand, A. & Singh, R. (2021). Synthesis of Rare Earth Compounds from Phosphor Coating of Spent Fluorescent Lamps. *Separation & Purification Reviews*, 50(1), 96-112. [Lien](#).

6.3. Prise en compte insuffisante des impacts environnementaux

6.3.1. Impacts environnementaux beaucoup plus élevés



02:11:16



Les ampoules fluocompactes auraient jusqu'à 26 fois plus d'impacts qu'une lampe à incandescence. Ce chiffre s'élève à entre 2 à 3 fois plus (* au lieu de 2 à 5 fois plus) pour les LED.



- Although CFLs and LEDs are more energy-efficient than incandescent bulbs, they require more metal-containing components. There is uncertainty about the potential environmental impacts of these components and whether special provisions must be made for their disposal at the end of useful life. **We discovered that both CFL and LED bulbs are categorized as hazardous**, due to excessive levels of lead (Pb) leachability (132 and 44 mg/L, respectively; regulatory limit: 5) and the high contents of copper (111 000 and 31 600 mg/kg, respectively; limit: 2500), lead (3860 mg/kg for the CFL bulb; limit: 1000), and zinc (34 500 mg/kg for the CFL bulb; limit: 5000), **while the incandescent bulb is not hazardous** (note that the results for CFL bulbs excluded mercury vapor not captured during sample preparation). The CFLs and LEDs have higher resource depletion and toxicity potentials than the incandescent bulb due primarily to their high aluminium, copper, gold, lead, silver, and zinc. **Comparing the bulbs on an equivalent quantity basis with respect to the expected lifetimes of the bulbs, the CFLs and LEDs have 3-26 and 2-3 times higher potential impacts than the incandescent bulb, respectively.** (Lim, et al., 2013, p.1040)

- Previous studies found in the literature have already addressed Hg toxicity in spent FL [...]; however, **there is little information regarding the PTM present in FL waste**. If disposed together with common waste and broken, **FL waste may contaminate the soil, and also plants and animals** [...]. Thus, the potential availability of these metals in FL waste needs to be evaluated. (de Farias, 2020, p.2)



- Lim, S.R., Kang, D., Ogunseitan, O.A., Schoenung, J.M. (2013). Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environmental Science & Technology*, 47(2), 1040-1047. [Lien](#).
- de Farias, C. V., Paulino, J. F., Barcelos, D. A., Rodrigues, A. P. de C., & Pontes, F. V. M. (2020). Is mercury in fluorescent lamps the only risk to human health? A study of environmental mobility of toxic metals and human health risk assessment. *Chemosphere*, 261, 1-10. [Lien](#).

6.3.2. Substitution progressive de l'ampoule fluocompacte par la LED



02:12:54



En réponse aux critiques des fluocompactes, il est annoncé que de plus en plus, c'est la LED qui représentera la plus grande part des technologies d'éclairage.



- The proposed Minamata Convention **ban on the use of fluorescent lamps at the end of 2020, with a consequent reduction in mercury (Hg) light products**, is expected to produce large amounts of discarded fluorescent bulbs. (Esbrí, 2021, p.61860)

- Si elles sont encore minoritaires sur le marché de l'éclairage, **les lampes à LED** sont de plus en plus performantes et **pourraient représenter une grande partie de l'éclairage en 2020**. Il existe également une offre de tubes LED sur le marché, en concurrence des tubes fluorescents. (ADEME, 2017 p.2)



- Esbrí, J.M., Rivera, S., Tejero. J. & Higuera, P.L. (2021). Feasibility study of fluorescent lamp waste recycling by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61860-61868. [Lien](#).

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2017). L'éclairage à diodes électroluminescentes (LED). [Lien](#).



02:14:00



Interdiction fin 2012-début 2013 des lampes à incandescence mise en vigueur en Europe. Pas de mobilisation pour interroger les implications de ces nouvelles technologies.



Depuis le début du mois, les lampes transparentes à incandescence de 100 Watt ou plus sont interdites à la vente dans l'Union européenne (UE). Seuls les détaillants auront le droit d'écouler leurs stocks. D'ici 2012, les lampes à incandescence dépolies et les halogènes à faible rendement énergétique disparaîtront aussi. (Parlement européen, 2009)



Parlement européen. (2009). Les députés européens nous éclairent sur l'interdiction des lampes à incandescence. [Lien](#).

6.3.3. Nécessité de changer d'approche



02:13:25



L'ampoule verte, écolo... qu'on vous vend, mais c'est une blague ! Le véhicule électrique du véhicule thermique, c'est la fluocompacte de la lampe à incandescence.



02:14:38



Notre société a une vision de l'économie d'énergie extrêmement court-termiste, en général sur leur usage, en fonction de nombre de kilomètres parcourus ou en fonction du nombre de fois où l'ampoule est utilisée. Si on veut comprendre l'impact écologique d'un dispositif il faut tout prendre.

SystExt dénonce le fait que les impacts environnementaux sont uniquement déterminés au regard des émissions de gaz à effet de serre. Vous êtes écologiquement responsable parce que vous émettez peu de gaz à effet de serre et vous êtes écologiquement irresponsables parce que vous en émettez beaucoup. Il y a bien d'autres considérations à prendre en compte, la question de la destruction des zones protégées, la pollution massive des masses d'eaux souterraines et de surface, la stérilisation des sols qui ne sont mêmes plus aptes à être utilisés pour des usages agricoles... Ce sont des questions à ABSOLUMENT prendre en compte. On ne la quantifie pas ou extrêmement mal.



Illustration avec les analyses de cycle de vie des LED et la non prise en compte de l'amont (métaux constitutifs et impacts associés) et de l'aval (gestion des déchets dangereux)

- [...] while LEDs are largely composed of metals; both LEDs and CFLs contain electronic components. **The presence of these components might substantially impede the evaluation of environmental impacts due to the limited availability of data in Life Cycle Inventory Analysis** for specific geographical locations. Contrary to halogens, LEDs have a more complex structure and **not all the materials used are easily recycled**. (IIIEE, 2016, pp.6-7)



- RAW MATERIALS This stage has low data availability and is only included in few LCA reports. (IIIEE, 2016, p.10)
- END-OF-LIFE Total environmental impact results are minor yet remain highly under-investigated (lack of recycling statistics, recycling process data) [...] The standard waste recycling is not able to recover LEDs' materials due to complex structures and diverse material use. [...] It is recommended to conduct assessments for toxicity and resource depletion potentials in the earliest stages of LEDs' development. The relevant policies, which have the capacity to influence the development of technologies, such as REACH Directive, RoHS Directive or WEEE Directive, should become stricter. (IIIEE, 2016, p.10)
- Nonetheless, it is necessary to conduct a more detailed LCA of LEDs that would cover the entire lighting system, **including under investigated EoL phase and raw material phase.** (IIIEE, 2016, p.11)



International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE). (2016). Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle. [Lien](#).

7. Exploitation minière en eaux profondes

7.1. Conditions d'exploitation extrêmes



02:20:54



Comment accorder du crédit à l'initiative d'un secteur qui n'est pas parvenu à « résoudre ses problèmes » sur terre et qui souhaite se rendre en mer ? et surtout à de telles profondeurs. Les profondeurs d'exploitations atteignent plusieurs milliers de mètres de profondeur.



Gisements concernés et profondeurs moyennes associées :

- nodules polymétallique = 4000-6000 mètres (***au lieu de 800 mètres**) ;
- encroûtements cobaltifères = 800-2400 mètres ;
- dépôts de sulfures hydrothermaux = 1400-3700 mètres (Drezet, 2014)



Drezet, E. (2014). Les mines de minerais métallifères. *EcolInfo*, CNRS. [Lien](#).

7.2. Impacts environnementaux graves prévisibles



02:21:40



Il y a des dizaines et des dizaines de chercheurs qui expliquent que cette technique est complètement aberrante.



Voir le document de positionnement : « Marine Expert Statement Calling for a Pause to Deep-Sea Mining » **signé par 622 experts en sciences et politiques marines de plus de 44 pays** :

- Deep-sea mining would add to these stressors, resulting in the loss of biodiversity and ecosystem functioning that would be irreversible on multi-generational timescales.
- For the reasons outlined above, we strongly recommend that the transition to the exploitation of mineral resources be paused until sufficient and robust scientific information has been obtained to make informed decisions as to whether deep-sea mining can be authorized without significant damage to the marine environment and, if so, under what conditions. (Deep-Sea Mining Science Statement, 2022)



Deep-Sea Mining Science Statement. (2022). Marine Expert Statement Calling for a Pause to Deep-Sea Mining. [Lien](#).



02:21:59



Véhicules sous-marins téléguidés utilisés pour l'exploitation minière en eaux profondes (Remotely Operated Vehicles - ROV en anglais). Deux appareils, un pour préparer la zone et un pour réaliser l'extraction en tant que tel, l'un des deux pèse **250 tonnes (* au lieu de 205 tonnes)**.



- The excavation and collection of mineralised material has been split into three individual tasks, which will each be carried out by a different Seafloor Production Tool (SPT) which comprise an Auxiliary Cutter (AC), a Bulk Cutter (BC) and a Collecting Machine (CM). The AC is designed as the pioneering tool which prepares the rugged sea bed for the more powerful BC. These two tools gather the excavated material; the third, the CM, will collect the cut material by drawing it in as seawater slurry with internal pumps, pushing it through a flexible pipe to the subsea pump and on to the Production Support Vessel (PSV) via A Riser and Lifting System (RALS). The assembly of the **Auxiliary Cutter** makes it the first of the three Seafloor Production Tools to have been completed. **It weighs approximately 250 tonnes.** (Autorité Internationale des fonds marins (AIFM))
- Pour se rendre compte de la taille réelle des ROV : Voir figure « Underwater mining vehicles used off the PNG coast for taking rock samples. Photograph: Nautilus minerals » (Doherty, 2019)



- Autorité Internationale des fonds marins (AIFM). ISA Secretary-General gets first look at Nautilus Minerals Polymetallic Sulphides Mining Technology. [Lien](#).
- Doherty, B. (2019). Collapse of PNG deep-sea mining venture sparks calls for moratorium. *The Guardian*. [Lien](#).



02:27:18



Concernant les fonds marins, y compris ceux qui sont extrêmement profonds, on dispose déjà d'un retour d'expérience sur les impacts possibles, au regard des effets des déversements de résidus miniers à grande profondeur, tant pour la faune benthique que pour la faune pélagique. Similarités entre les impacts des rejets de résidus en fonds marins (deep-sea tailing disposal) et exploitation minière en eau profonde (deep-sea mining) : même profondeur, même turbidité, même toxicité des métaux.



- On développe de plus en plus les déversements profonds : "Ceux réalisés dans des eaux profondes et dans les grands fonds océaniques (en anglais deep-sea tailings disposal - DSTD), au-delà de 1 000 m de profondeur. (SystExt, 2021, p.93) Par exemple, pour la mine d'or-cuivre de Batu Hijau, en Indonésie, le point de décharge se situe à une profondeur de 108 m dans un canyon sous-marin, et les résidus miniers migrent ensuite vers 3 000 m de profondeur, voire 4 000 m de profondeur (Ramirez-Llodra, et al., 2015 ; Morello, et al., 2016). (SystExt, 2021, p.94)
- Both the extraction of minerals from the seabed and disposal of mining waste products into the deep sea from either land-based or seabed mining are of growing concern due to the disturbances that can be caused to both littoral and deep-sea benthic ecosystems. (Vare, et al., 2018, p.4)
- **The emerging regulations and science of deep-seabed mining have much to gain by utilizing the scientific studies carried out on DSTD**, and by learning from the past regulatory successes and failures of DSTD. (Vare, et al., 2018, p.11)
- Thus, understanding ecosystem functions is extremely important and should be included in baseline studies for STD permits [...], similarly to recommendations made for seabed mining [...]. (Ramirez-Llodra, 2015, p.15)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#).
- Vare, L. A., Baker, M. C., Howe, J. A., Levin, L. A., Neira, C., Ramirez-Llodra, E. Z., . . . Soto, E. H. (2018). Scientific Considerations for the Assessment and Management of Mine Tailings Disposal in the Deep Sea. *Frontiers in Marine Science*, 5, 1-14. [Lien](#).
- Ramirez-Llodra, E., Trannum, H. C., Andersen, G. S., Baeten, N. J., Brooks, S. J., Escudero-Oñate, C., . . . Høgaas, P. H. (2022). New insights into submarine tailing disposal for a reduced environmental footprint : Lessons learnt from Norwegian fjords. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113150. [Lien](#).



Montserrat, F., Guilhon, M., Corrêa, P. V. F., Bergo, N. M., Signori, C. N., Tura, P. M., . . . Turra, A. (2019). Deep-sea mining on the Rio Grande Rise (Southwestern Atlantic) : A review on environmental baseline, ecosystem services and potential impacts. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 145, 31-58. [Lien](#).



02:32:36



Des études ont démontré que des crevettes vivant dans les grands fonds marins ont subi des lésions rétinienne permanentes suite à l'utilisation de projecteurs par des sous-marins surveillant des fumeurs noirs sur la dorsale médio-atlantique (* et non Clipperton).



Herring et al. (1999) found that ventinhabiting deep-sea shrimps [*Rimicaris exoculata* and *Mirocaris (Chorocaris) fortunata*] suffered permanent retinal damage by the use of floodlights on manned submersibles surveying vent chimneys on the Mid-Atlantic Ridge. (Miller, et al., 2018, p.16)



Miller, K. A., Thompson, K. F., Johnston, P., & Santillo, D. (2018). An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, 1-24. [Lien](#).

7.3. Seule solution viable : l'interdiction



02:29:00



Les métaux extraits des nodules polymétalliques sont majoritairement, ni plus ni moins, les plus connus.



Nodules polymétalliques = nickel (Ni), cuivre (Cu), cobalt (Co) et manganèse (Mn)
 Encroûtements cobaltifères = Essentiellement cobalt (Co), un peu de vanadium (V), molybdène (Mo) et platine (Pt)
 Dépôts de sulfures hydrothermaux = cuivre (Cu), plomb (Pb), zinc (Zn) ±(Au) et argent (Ag)
 (Drezet, 2014)



Drezet, E. (2014). Les mines de minerais métallifères. *EcolInfo*, CNRS. [Lien](#).



02:30:53



Personne ne peut considérer qu'il y a un bien-fondé quelconque à vouloir envisager une exploration et une exploitation des fonds marins. Personne. Il a beaucoup de gens qui sont défavorables que favorables.



02:21:59



C'est une catastrophe environnementale prévisible, quoiqu'en dise les discours récents faits par le gouvernement dans le cadre du Plan de relance.



Dixième objectif [...], c'est l'investissement dans le champ des grands fonds marins. La France, je le disais, est la deuxième puissance maritime du monde. Et il y en a aujourd'hui pour comprendre, connaître les grands fonds marins, des innovations de rupture à conduire pour mener ses explorations et pour permettre le travail scientifique. J'entends déjà le débat venir, je ne parle pas d'exploitation à ce moment-là, je parle d'exploration. Mais qui peut accepter que nous laissions en quelque sorte dans l'inconnu la plus complète une part si importante du globe ? **Et nous avons dans nos zones économiques exclusives, la possibilité d'avoir accès à ces explorations, qui est un levier extraordinaire de compréhension du vivant, peut-être d'accès à certains métaux rares, de compréhension du fonctionnement de nouveaux écosystèmes, d'innovation en termes de santé, en termes de biomimétisme, etc.** Il y a des familles d'innovations derrière, justement l'exploration des grands fonds marins qui est inouï. (Élysée, 2021)



Élysée. (2021, Octobre 12). Discours du Président de la République à l'occasion de la présentation du Plan France 2030. [Lien](#).



02:22:27



Mention du projet Nautilus au large de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, actuellement le plus abouti, et qui a été abandonné suite à un moratoire pris par le gouvernement papouasien.



Projet Solwara 1 d'exploitation minière sous-marine en Papouasie-Nouvelle-Guinée (PNG) courant 2019. Le pays a déclaré un moratoire de dix ans sur l'exploitation minière des fonds marins. La compagnie derrière le projet Nautilus a été placée sous administration judiciaire, les principaux créanciers cherchant à obtenir une restructuration pour récupérer les centaines de millions engloutis dans ce projet controversé.



The “total failure” of PNG’s controversial deep sea mining project Solwara 1 has spurred calls for a Pacific-wide moratorium on seabed mining for a decade. [...] “Until that deep sea mining technology is environmentally sound and takes care of our environment at the same time we mine it, that, at this point in time, I support the call made by the Fijian prime minister,” he told the Post Courier. “If there is an opportunity for deep-sea mining, so long as environmentally it is friendly and the harvest of resources is done in a sustainable manner then we can give considerations to this, but right now it is a show. “The technology is not proven anywhere and PNG, **we burnt almost 300 million Kina in that Nautilus [Solwara 1] project on a concept that someone told us can work, but is... a total failure.**” [...] Sir Arnold Amet, former chief justice of PNG, was Governor of Madang province and an MP when Solwara 1 was approved. He said he regrets that the then government didn’t adequately scrutinise the proposal. “Let’s recognise this failed investment in the upcoming budget and ensure we don’t enter into seabed mining joint ventures in the future or issue any more seabed exploration or mining licences. **We now know how deep sea mining companies attempt to manipulate governments according to their own narrow profit motives without any conscience.** We look to PM Marape to stand up for Papua New Guineans against the pressure exerted by these corporations.”



Doherty, B. (2019). Collapse of PNG deep-sea mining venture sparks calls for moratorium. *The Guardian*. [Lien](#).

8. Questions complémentaires

8.1. Que penser de l'exploitation minière spatiale ?



02:16:15



Le secteur de l'aérospatial est un secteur extrêmement demandeur en matières premières minérales, particulièrement en métaux. Il est nécessaire d'être vigilant à ne pas utiliser plus de métaux pour les travaux d'exploration et d'exploitation spatiale que ce que l'on serait en mesure de récupérer.



- Oduntan, G. (2015) Who owns space? US asteroid-mining act is dangerous and potentially illegal. *The Conversation*. [Lien](#).
- Usine nouvelle. (2018). L'espace, une mine d'innovations. [Lien](#).
- Calla, P., Fries, D., & Welch, C. (2018). Asteroid mining with small spacecraft and its economic feasibility. *Acta Astronautica*. [Lien](#).

8.2. Quel métal pour remplacer le cuivre dans ses usages électriques ?



02:35:05



Un tel remplacement va être très compliqué. C'est la raison pour laquelle que certains s'inquiètent davantage pour le cuivre que pour le cobalt. D'une part, la substitution du cuivre (principal métal de l'électrification) est limitée ; d'autre part, il s'agit d'une filière caractérisée par de nombreux usages concurrents (voir § 2.3.2 p.23).



Many copper applications have limited exposure to substitution as copper and alloys still provide the best cost-performance combinations, especially where conductivity, heat, corrosion or friction resistance is required. (Kalman-Schueler, 2021, p.6)



Kalman-Schueler, K. (2021). Copper Substitution Survey 2021 - World Copper Conference. *DMM Advisory Ltd*. [Lien](#).



- Visual Capitalist. (2020). Copper: Critical Today, Tomorrow, and Forever. *Visual Capitalist*. [Lien](#).
- Venditti, B. (2021). Visualizing Copper's Role in a Low-Carbon Economy. *Visual Capitalist*. [Lien](#).

8.3. Quelles perspectives pour le lithium en France ?



02:41:03



SystExt n'a pas encore approfondi spécifiquement la filière du lithium, encore moins sur le territoire métropolitain. Cependant, l'association s'inquiète des croissances exponentielles annoncées sur cette matière première minérale. L'évolution est déjà remarquable : aujourd'hui le marché du lithium se polarise autour de la batterie. Il y a quelques années, la demande majeure portait sur les vitrocéramiques (35 % des usages mondiaux). Aujourd'hui, la tendance est inversée, c'est le marché des batteries qui est devenue majoritaire.



- Usages mondiaux du lithium en 2008 : 37% = verres et céramiques ; 20% = batteries
 - Usages mondiaux du lithium en 2018 : 20% = verres et céramiques ; 58% = batteries
- Voir figure 2 : Évolution des usages du lithium entre 2008 et 2018. (Lefebvre & Bloch, 2020, p.89)



Lefebvre, G. & Bloch, D. (2020). Métaux des batteries Li-ion : état des lieux et risques d'approvisionnements. *Géologues* (204), 86-90.

8.4. Comment réintégrer le coût des externalités dans le prix ?

8.4.1. Premier levier : Définir des teneurs en-dessous desquelles un gisement ne peut pas être exploité



02:44:00



Définir des teneurs au-dessous desquelles on n'exploite pas un gisement si l'on sait que les impacts associés sont trop grands. Il faudrait quantifier ou modéliser les impacts potentiels à partir du retour d'expérience international. En déterminant un seuil d'impacts à ne pas dépasser, il pourrait être calculé une teneur en dessous de laquelle on n'exploite pas.

Exemples d'intégration de questions environnementales dans le calcul des teneurs d'exploitation :



- In this study, a developed model for optimum cut-off grades is presented that not only relies on economical aspects but also minimizes adverse environmental impact in the form of acid mine drainage elimination or mitigation against the approach of postponing the restoration/reclamation activities at the end of the project's life. (Rashidinejad, et al., 2008, p.183)

- This study aims to develop and implement an integrated cut-off grade optimization framework that takes into account the rehabilitation cost of the waste rock and geological uncertainty of the orebody [...] (Kalitenge, 2021, p.ii)



- Rashidinejad, F., Osanloo, M., Rezai, B. (2008). An environmental oriented model for optimum cut-off grades in open pit mining projects to minimize acid mine drainage. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 5(2), 183-194. [Lien](#).

- Kalitenge, D. (2021). Cut-off Grade Optimization in Open-pit Mines Considering Two Processing Streams and Rehabilitation Cost. [Lien](#).



02:45:05



Prendre en compte également la diminution progressive des teneurs des gisements et la diminution du nombre de gisements facilement exploitables, ce qui conduira à l'augmentation exponentielle des quantités d'eau et d'énergie utilisées, ainsi que des quantités de déchets.



L'accroissement des besoins en énergie et en eau du secteur minier est le résultat de deux tendances :
 - L'augmentation de la production totale de métal produite, qui conduit à une augmentation proportionnelle des quantités d'énergie et d'eau nécessaires ;
 - La diminution de teneurs et la complexification des minerais exploités et traités [...], qui conduit à une augmentation exponentielle des quantités d'énergie et d'eau utilisées pour produire la même quantité de métal.

Dans les années à venir, **même si l'optimisation des quantités d'énergie et d'eau utilisées pour le traitement du minerai se poursuit** (Vidal, et al., 2013), **elle ne devrait pas compenser l'effet lié à la baisse des teneurs** (PNUE, 2013 ; Geldron, 2017). (SystExt, 2021, p.49)



- SystExt. (2021). Rapport d'étude | Controverses minières - Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales. [Lien](#). Voir section dédiée "2.5. Tous les impacts augmenteront nécessairement" pages 46 à 54.

- PNUE. (2013). Metal Recycling - Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A. ; Hudson, C. ; van Schaik, A. ; Heiskanen, K. ; Meskers, C. ; Hagelüken, C. [Lien](#).

- Geldron, A. (2017). *L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?* ADEME. [Lien](#).

8.4.2. Deuxième levier : Interdire l'exploitation dans les zones trop fragiles



02:46:50
02:47:14



- Se dire également qu'il y a des externalités que l'on n'assumera pas. Interdire l'exploitation des zones trop fragiles (ou dans lesquelles les impacts seront nécessairement graves). Dans les zones de bassins versants ou dans les zones naturelles protégées, aucune activité minière ne devrait être acceptée, selon par exemple les travaux de Goodland de 2012.
- Le premier niveau de la prise en compte des externalités c'est définir ce que l'on accepte et ce que l'on n'accepte pas. Tout ce qui n'est pas accepté ne sera pas exploité, et cela aura nécessairement une influence sur les teneurs.



Five types of socially or environmentally sensitive areas [...] need special consideration in mining regulations. These areas are extremely valuable when intact, and their value would be jeopardized by extractive industries. If the potentially affected communities reject a project on one of these categories of lands, the area would be off-limits to mining. With the community meaningfully informed, and with free prior consent as a precondition for licensing, mining operations should ensure these categories are excluded. The default position is clear: No Go Zones to mining are nonnegotiable. **The five main types of areas off limits to mining are: Indigenous Peoples reserves, conflict zones, fragile watersheds, special biodiversity habitats, and cultural properties.** (Goodland, 2012, pp.2112-2113)



Goodland, R. (2012). Responsible Mining: The Key to Profitable Resource. *Sustainability*, 2099-2126. [Lien.](#)

8.4.3. Troisième levier : Vendre à un prix « juste » les produits issus de l'exploitation minière



02:47:27
02:50:48



- Vendre à un prix "juste" pour les produits issus de l'exploitation minière. Se pose en particulier la question de l'intégration des dispositifs permettant de limiter les pollutions et les impacts environnementaux et sanitaires mais qui s'avèrent très coûteux. Exemples des sites miniers aurifères : unités de destruction des cyanures (correspondant en réalité à une dégradation des cyanures libres en cyanates et en thiocyanates) et de recyclage des cyanures. Ces méthodes ne sont pas mises en œuvre au seul motif économique.
- On peut comprendre en théorie les difficultés économiques associées à la mise en place des installations et des méthodes permettant de limiter les impacts (environnementaux et sanitaires notamment) des sites miniers. Cependant, certains consommateurs pourraient être prêts à payer à un prix juste, comme ils l'ont fait pour d'autres secteurs de production. Aujourd'hui il n'est pas normal qu'un téléphone coûte 100 EUR, 200 EUR même 1 000 EUR. Ce n'est rien compte tenu des externalités que la mine fait peser, du point de vue humain, du point de vue social, du point de vue environnemental. **L'apologie du coût de production le plus faible possible dans une industrie qui est intrinsèquement aussi problématique est dangereuse.**



Destruction du cyanure :

- La destruction du cyanure ne consiste pas en une « suppression » des composés cyanurés, mais en leur dégradation en des formes moins toxiques, généralement en cyanate. [...] La destruction du cyanure a pour objectif principal de dégrader les cyanures libres. Aussi, il est cohérent que des quantités importantes de produits de dégradation, tels que le thiocyanate, le cyanate ou l'ammoniaque, persistent dans les boues et effluents traités. Bien que ces substances soient bien moins toxiques que les cyanures libres, elles le restent pour la faune aquatique [...]. (SystExt, 2021, p.23 et p.25)
- While this represents a significant improvement on the historical practice of releasing cyanide directly into tailings dams and allowing air and sunlight to slowly decompose the cyanide, **cyanide detoxification cannot be considered a "clean" technology.** For example, salts such as sodium cyanate and thiocyanate accumulate in aqueous solutions (and ultimately transfer at least partially to the ground water) while heavy metals remain in the tailings. (Fleming, 2016, p.659)



- SystExt (2021). Rapport d'étude | Cyanuration dans l'industrie aurifère - Enjeux techniques et principaux risques. [Lien.](#)
- Fleming, C. A. (2016). Cyanide recovery. Dans M. D. Adams, Gold Ore Processing - Project Development and Operations. Second Edition (pp. 647-661). Elsevier.

Recyclage du cyanure :



- Le recyclage du cyanure consiste à récupérer le cyanure présent dans les effluents et déchets miniers puis à le réutiliser dans le traitement du minerai. [...] Bien que le recyclage du cyanure ait démontré son efficacité, seuls quelques sites miniers dans le monde emploient cette méthode [...] [seulement 8 sites étaient concernés en 2016], exception faite de la récupération directe. Cette situation s'explique principalement par des motifs économiques, l'approvisionnement en cyanure « neuf » étant le plus souvent moins cher que la mise en oeuvre de ces procédés. (SystExt, 2021, p.26)
- [...] few cyanide recovery plants have been built at operating gold mines. (Fleming, 2016, p. 647). **The cost of recovering and recycling this cyanide from the tailings will often be lower than the cost of purchasing new cyanide.** When this cost benefit is added to the reduced cost of tailings detoxification, a strong economic case can frequently be made for cyanide recovery. (Fleming, 2016, p. 648)



- SystExt (2021). Rapport d'étude | Cyanuration dans l'industrie aurifère - Enjeux techniques et principaux risques. [Lien](#).
- Fleming, C. A. (2016). Cyanide recovery. Dans M. D. Adams, Gold Ore Processing - Project Development and Operations. Second Edition (pp. 647-661). Elsevier.



02:52:17



Le secteur minier est l'un des seuls secteurs du primaire auquel on applique des taux de rendement aussi élevés que ceux du tertiaire. Montagne d'Or était à 18% de retour sur investissement. On ne peut pas humainement concevoir que l'on soit prêt pour des raisons économiques à faire des choix qui soient aussi désastreux. Car il faut vraiment avoir en tête que les impacts sont extrêmement différents et bien plus graves que les autres secteurs.



Avec la financiarisation de l'économie, les pratiques courantes de spéculation se sont amplifiées et on demande des niveaux de retour sur investissement équivalents à ceux des industries de service. Les promoteurs de Montagne d'or annoncent un retour sur investissement de 18 %, c'est devenu la norme à respecter dans l'industrie minière. Atteindre ces performances demande logiquement de rogner sur certaines dépenses jugées « non prioritaires ». (Izoard & de la Chapelle, 2018)



Izoard, C. & de la Chapelle, A. (2018). « L'industrie minière crée des phénomènes qu'elle ne sait pas maîtriser » : Entretien avec ISF SystExt, collectif d'ingénieur-es de la mine en révolte. *Z : Revue itinérante d'enquête et de critique sociale*, 12, 50-53. [Lien](#).



02:53:35



Cette industrie posera nécessairement problème de par la nature de ses activités . Le seul moyen de s'en tirer "pas trop mal" c'est de minimiser au maximum les impacts. Pour ce faire :

- + Il va falloir changer les techniques, cela va coûter cher, en particulier sur l'un des "points noirs" de l'industrie, à savoir la gestion des déchets. Quel que soit le prix, il faut investir dans ces techniques.
- + Il y a des techniques qui doivent absolument être bannies.
- + Si, en corollaire, le coût de production augmente, charge aux exploitants de modifier les prix de vente. En parallèle, il faut informer les consommateurs pour qu'ils soient prêts à payer plus chers les produits qui contiennent des métaux et des minéraux.