HAL
open science

Le secteur minier en pleine évolution pour faire face à la demande actuelle et aux enjeux de demain

Isabelle Duhamel Achin

To cite this version:

Isabelle Duhamel Achin. Le secteur minier en pleine évolution pour faire face à la demande actuelle et aux enjeux de demain. Séminaire thématique LIED - Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain, LIED, Feb 2020, Paris, France. hal-02466467

HAL Id: hal-02466467

https://brgm.hal.science/hal-02466467

Submitted on 17 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Séminaire thématique LIED UMR 8236, Université PARIS DIDEROT, 11 Février 2020 :

« Matériaux pour l'énergie et géopolitique »

Le secteur minier en pleine évolution pour faire face à la demande actuelle et aux enjeux de demain

Isabelle DUHAMEL-ACHIN i.duhamelachin@brgm.fr

Responsable de l'Unité Exploration et Connaissance des gîtes minéraux
Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM Orléans

Géosciences pour une Terre durable
brgm

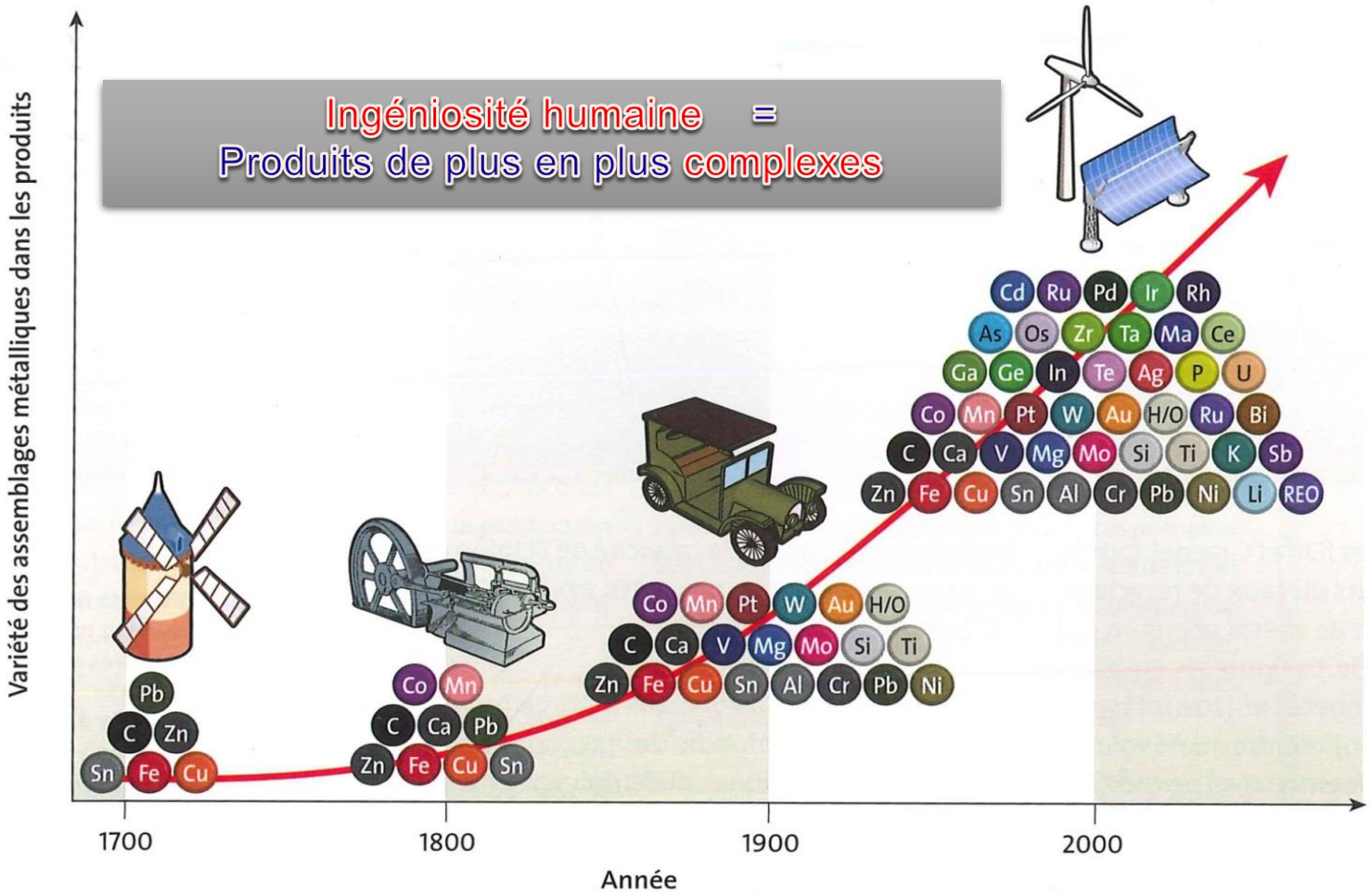
ARCHITECTURE DE L'EXPOSÉ :

- **QUELS SONT LES BESOINS EN RESSOURCES MINÉRALES D'AUJOURD'HUI ET LES TENDANCES POUR DEMAIN ? QUELS SONT LES GRANDS ENJEUX ET LES RISQUES SUR LES APPROVISIONNEMENTS, NOTAMMENT LE RÔLE DU SECTEUR INDUSTRIEL MINIER DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?**
- **QUELQUES EXEMPLES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIÉTAUX AYANT INFLUENCÉ LES CHANGEMENTS DANS LA GOUVERNANCE DES PROJETS MINIERS, À LA FOIS FREINS SOCIO-ÉCONOMIQUES AU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL, MAIS AUSSI QUI POUSSENT AU DÉPASSEMENT ET À L'INNOVATION**
- **UN SECTEUR MINIER EN PLEINE MUTATION : DERNIÈRES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES ET R&D POUR DES PROJETS MIEUX INTÉGRÉS**

BESOINS & ENJEUX
CARACTERISTIQUES DU SECTEUR MINIER ET LE RÔLE DE L'INDUSTRIE EXTRACTIVE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Une complexification et une diversification des besoins en matériaux en fonction des avancées technologiques qui évoluent au cours du temps



Van Schaik et Reuter (2012), Géosciences n°15

Consommation moyenne d'un européen pendant sa vie (70 ans) :

- 3 160 t de sables et graviers
- 1 090 t de pétrole
- 140 t de fer
- 130 t de sel
- 16 t d'Aluminium
- 12 t de phosphates
- 680 kg de Cuivre
- 600 kg de Potasse
- 360 kg de Plomb
- 343 kg de Zinc

et

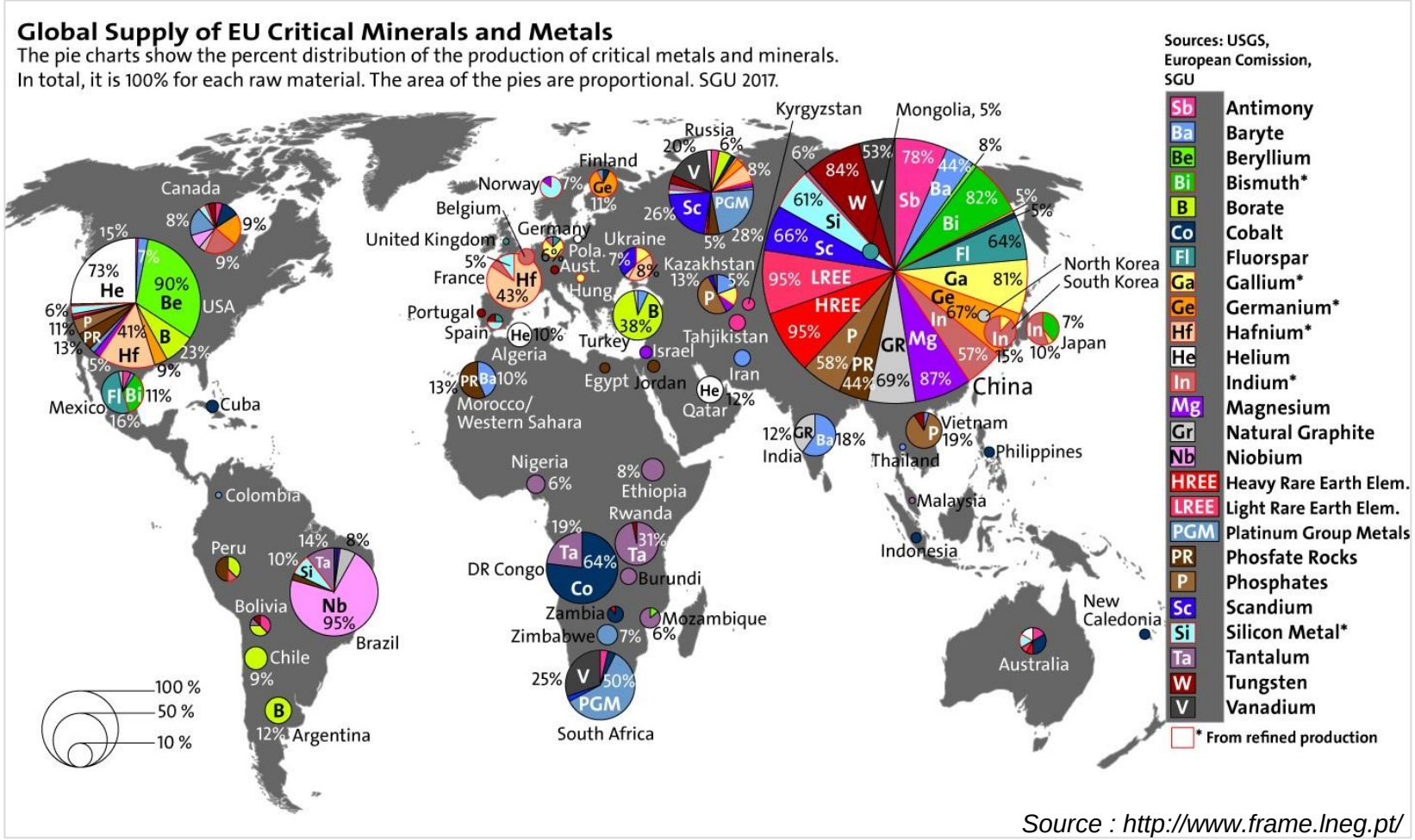
- 56 000 m³ d'eau (22 piscines olympiques !)

Les habitants des pays riches consomment en moyenne 9,8 tonnes de ressources naturelles par an (biomasse, eau, ressources minérales et énergétiques).

UNE INDUSTRIE EXTRACTIVE MAL CONNUE MAIS NÉCESSAIRE

- L'**industrie minière disparait** progressivement **en France** et **en Europe**

⇨ **importations massives et impacts déportés**



Source : http://www.frame.lneg.pt/

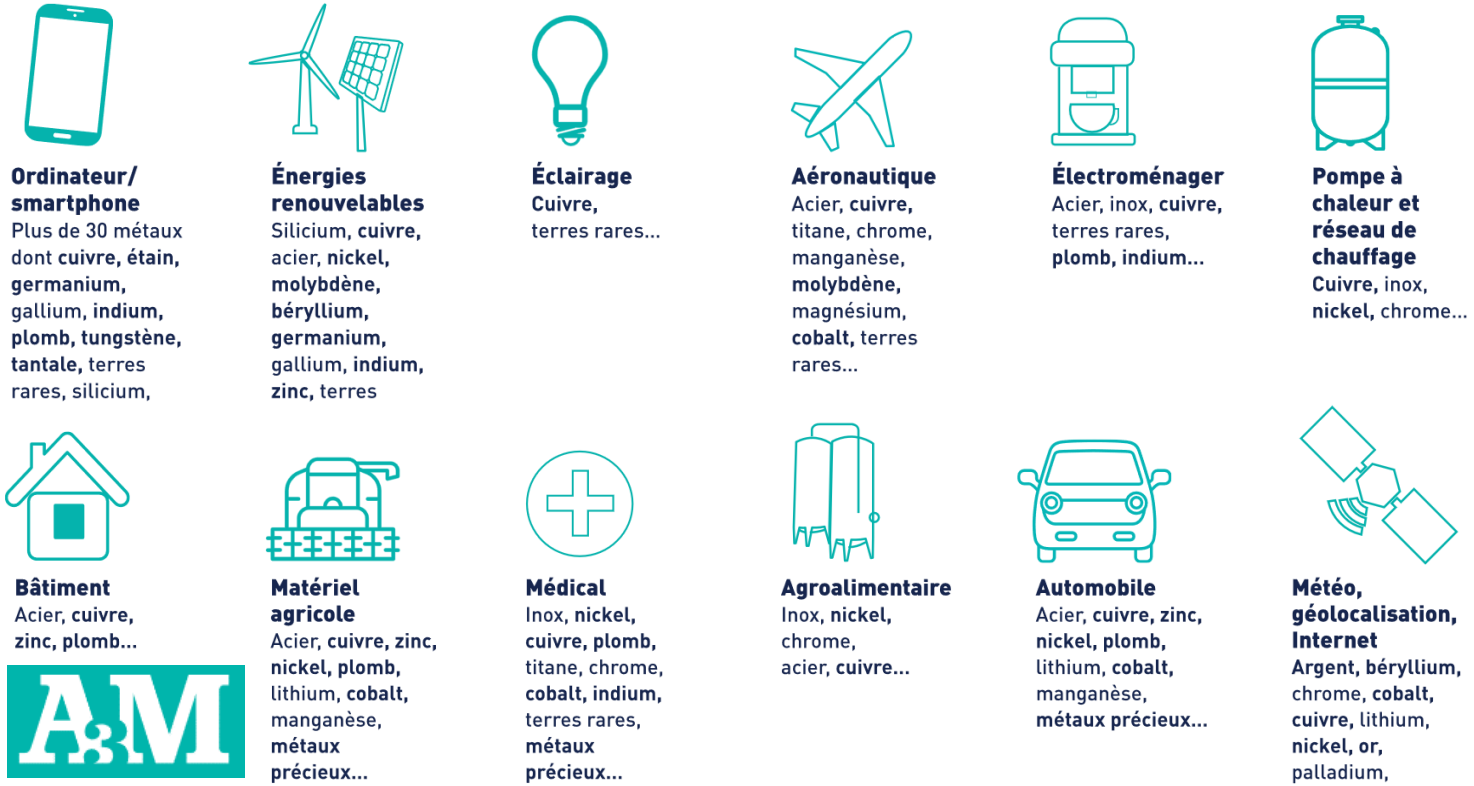
UNE INDUSTRIE EXTRACTIVE MAL CONNUE MAIS NÉCESSAIRE

- L'**industrie minière disparait** progressivement **en France** et **en Europe**

⇨ **importations massives et impacts déportés**

- L'intérêt et les **usages des ressources minérales** dans la vie quotidienne sont **peu connus du grand public**

⇨ **tous dépendants au quotidien**



Source : http://www.industrieminiere.fr/metaux-presents-au-quotidien/

Géosciences pour une Terre durable
brgm

UNE INDUSTRIE EXTRACTIVE MAL CONNUE MAIS NÉCESSAIRE

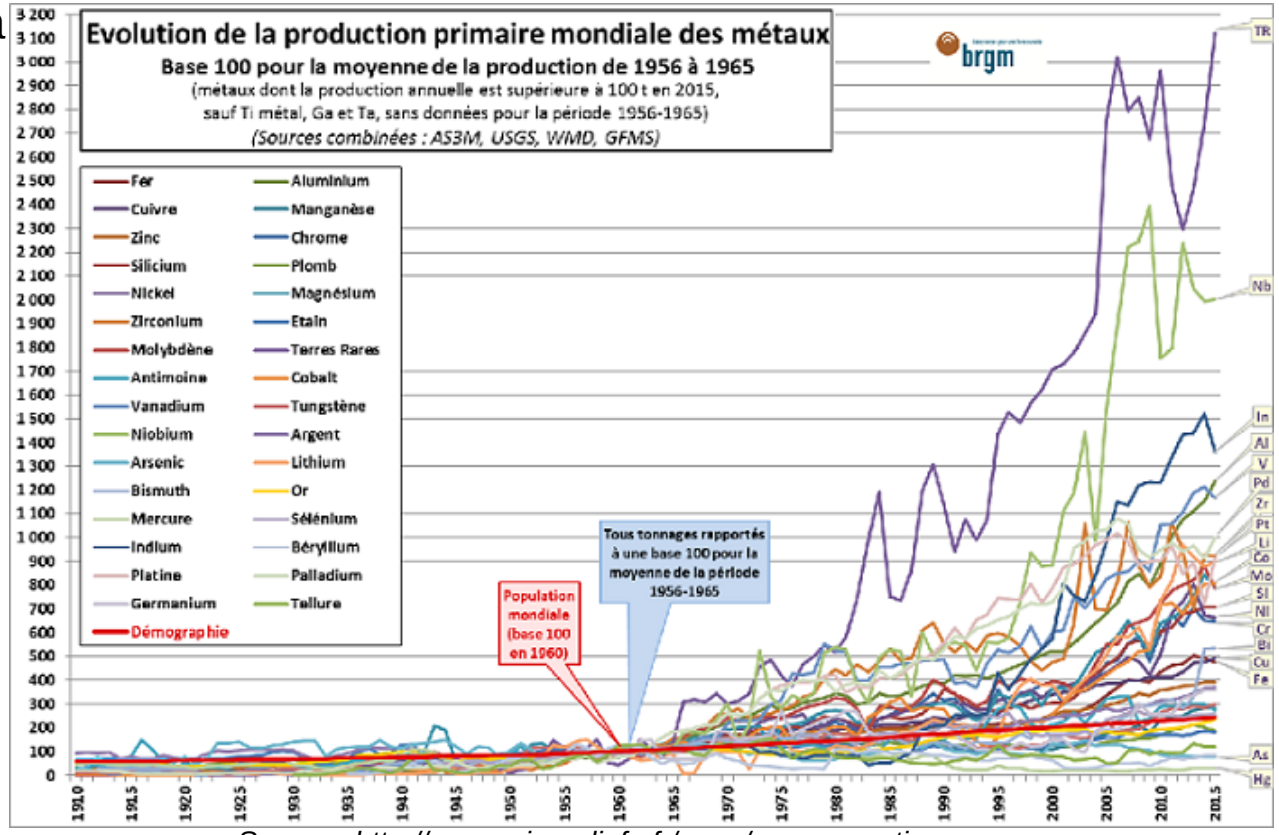
- L'**industrie minière disparait** progressivement **en France** et **en Europe**

⇨ **importations massives et impacts déportés**

- L'intérêt et les **usages des ressources minérales** dans la vie quotidienne sont **peu connus du grand public**

⇨ **tous dépendants au quotidien**

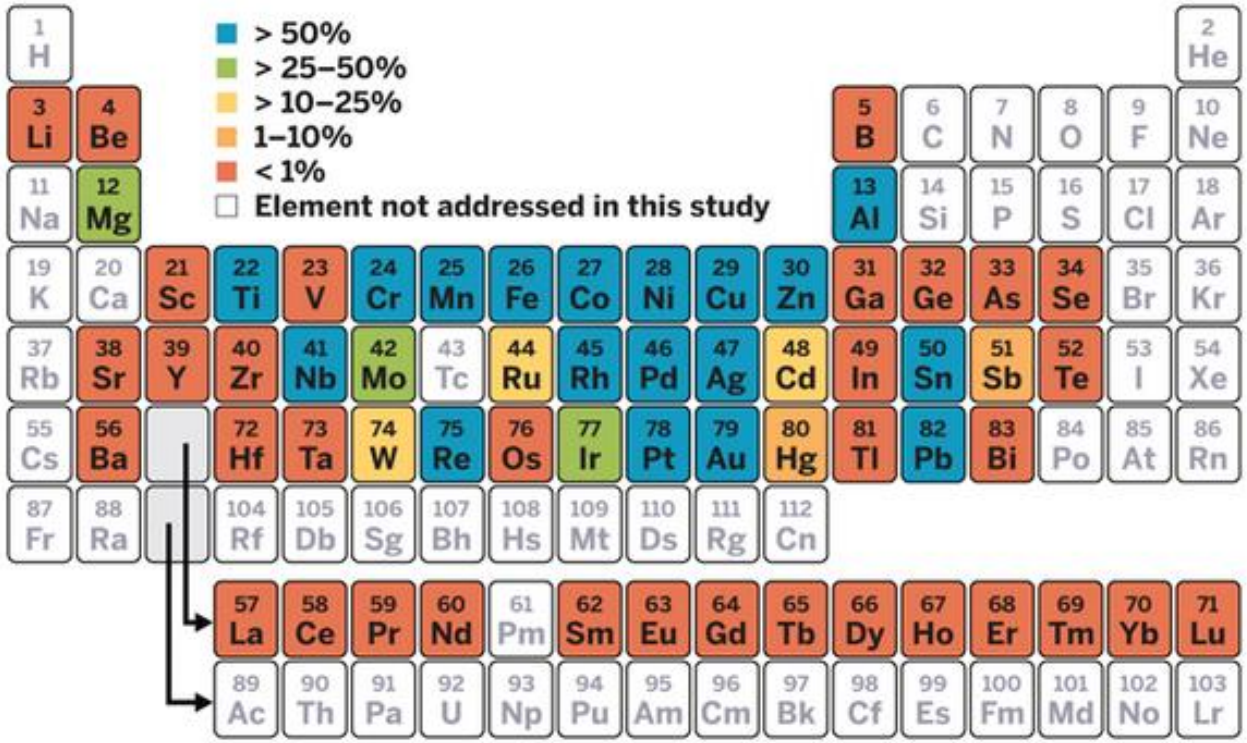
- **Démographie mondiale exponentielle** ⇨ **croissance de la consommation mondiale en matières premières et donc de la quantité de métaux et matériaux à extraire**



Source : http://www.mineralinfo.fr/page/consommation-usages

UNE INDUSTRIE EXTRACTIVE MAL CONNUE MAIS NÉCESSAIRE

- L'**industrie minière disparait** progressivement **en France** et **en Europe**
  ⇨ **importations massives et impacts déportés**
- L'intérêt et les **usages des ressources minérales** dans la vie quotidienne sont **peu connus du grand public**
  ⇨ **tous dépendants au quotidien**
- **Démographie mondiale exponentielle** ⇨ **croissance de la consommation mondiale en matières premières et donc de la quantité de métaux et matériaux à extraire**
- La **filière recyclage** est **insuffisante pour palier aux besoins actuels** ⇨ **le modèle d'économie circulaire en boucle fermée reste utopique**

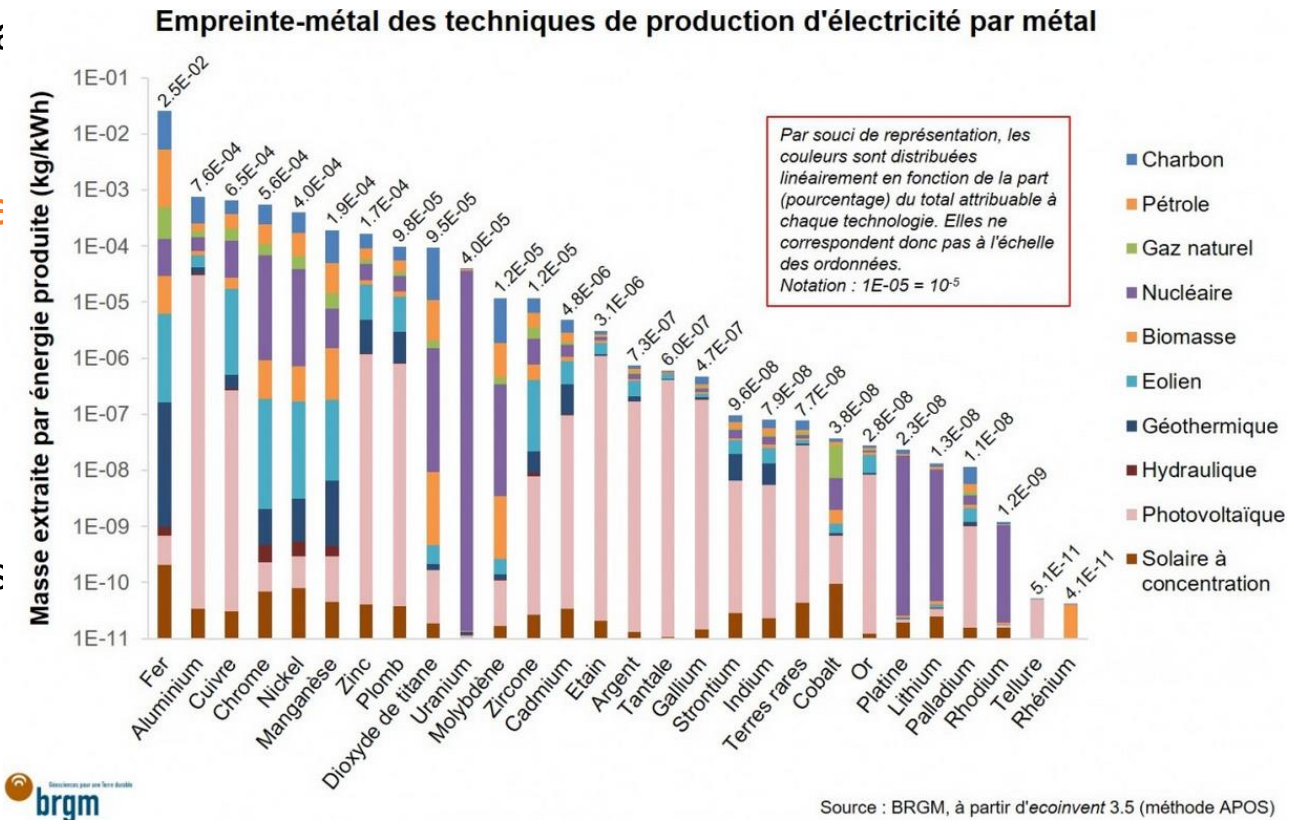


SOURCE: UN Environment Program

Taux de recyclage des métaux :
78% pour les métaux de base (Fe, Al, Cu, Ni, Pb et Zn)
18 métaux >50%
8 métaux entre 1 et 50%
<1% pour 34 métaux
Une marge de progrès encore importante !

UNE INDUSTRIE EXTRACTIVE MAL CONNUE MAIS NÉCESSAIRE

- L'**industrie minière disparait** progressivement **en France** et **en Europe**
  ⇨ **importations massives et impacts déportés**
- L'intérêt et les **usages des ressources minérales** dans la vie quotidienne sont **peu connus du grand public**
  ⇨ **tous dépendants au quotidien**
- **Démographie mondiale exponentielle** ⇨ **croissance de la consommation mondiale en matières premières et donc de la quantité de métaux et matériaux à extraire**
- La **filière recyclage** est **insuffisante pour palier aux besoins actuels** ⇨ **le modèle d'économie circulaire en boucle fermée reste utopique**
- La politique de **transition écologique et énergétique** bas carbone pour **lutter contre le réchauffement climatique**
  ⇨ **des technologies vertes qui nécessitent de nombreux métaux !**
- **Tensions géopolitiques** et risques croissants dans les pays émergeants producteurs ⇨ **course à la sécurisation des approvisionnements également source de conflits**

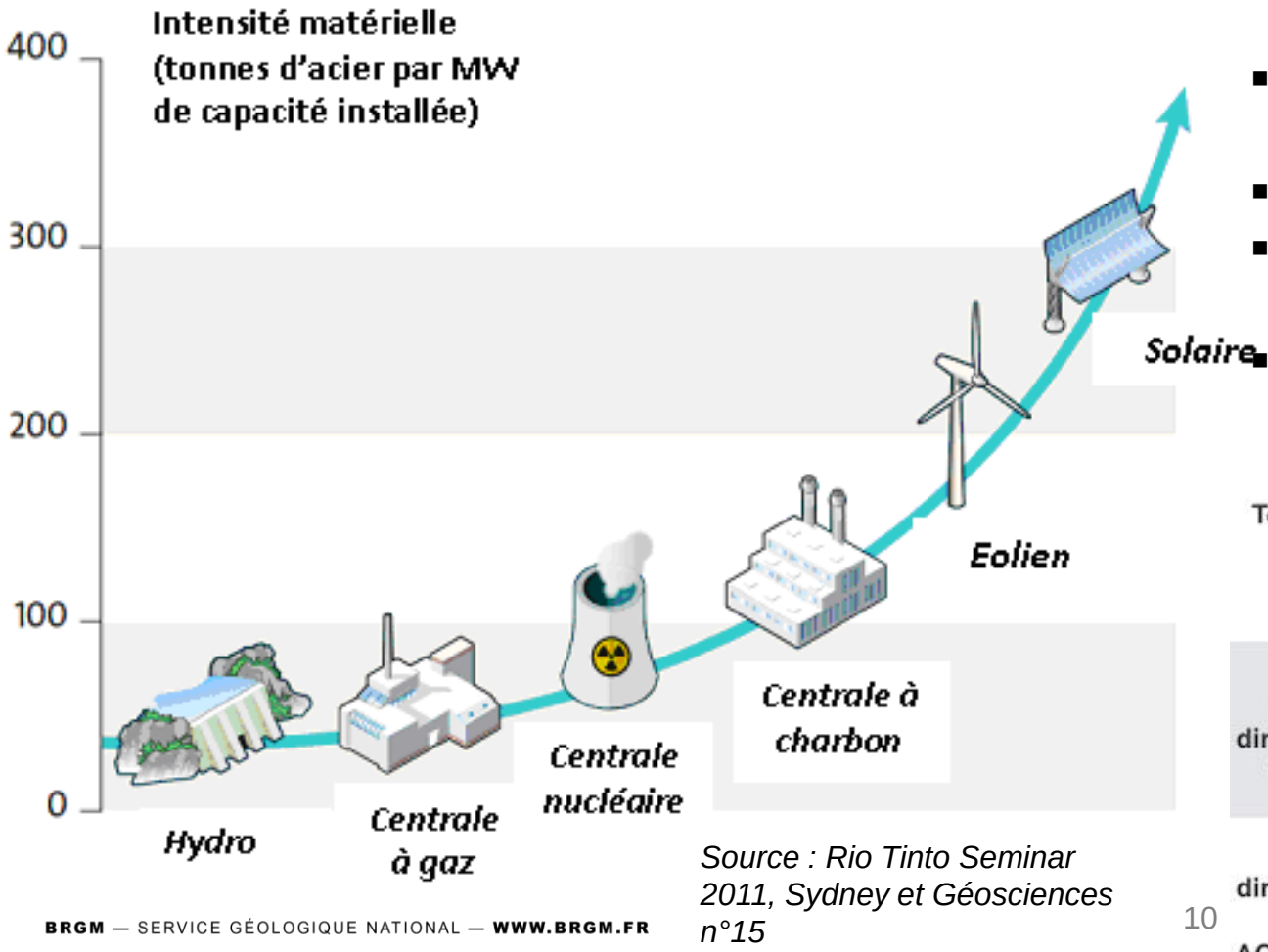


Source : BRGM, à partir d'*ecoinvent* 3.5 (méthode APOS)

http://www.mineralinfo.fr/ecomine/production-mondiale-delectricite-empreinte-matiere-en-transition

LES BESOINS EN MATÉRIAUX POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE :

- **Les technologies pour la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables nécessitent une quantité beaucoup plus importante et diversifiée de matières premières minérales pour produire une même quantité d'énergie que les technologies traditionnelles nucléaire, énergies fossiles (gaz, charbon, fioul) ou hydraulique.**



Source : Rio Tinto Seminar 2011, Sydney et Géosciences n°15

- Matériaux nécessaire pour la fabrication d'une éolienne :
  - Aimant permanent : 200-300 kg de terres rares (Nd, Pr et Dy dans 3% du parc terrestre français)
  - Nacelle et mât : acier, fonte, cuivre et aluminium
  - Pales : câbles d'acier, plastiques et matériaux composites
  - Socle : 425m^3 béton (granulats, sable, ciment) et armature d'acier (>40t)

Technologie utilisée	Éolien	Solaire	Hydraulique	Nucléaire	Charbon	Gaz naturel	Fioul
Emission directe de CO2 (gCO2-eq /kWh)	0	0	0	0	345	272	204
Emission directe de CO2 + ACV (gCO2 -eq /kWh)	12,5	55	6	6	1060	730	418

Source : ADEME, ACV 2015

LA CHAINE DE VALEUR DES RESSOURCES MINERALES :

Escondida Chili

Câble électrique

Problématique de l'acceptabilité sociétale

Ressources géologiques ⇨ Exploration ⇨ Développement ⇨ Extraction minière ⇨ Minéralurgie

1992

Prospection 1968
Découverte 1981

⇩

Métallurgie ⇦ Raffinage / purification ⇦ Usinage ⇦ Production de composants ⇦ Produit final (par ex.: voiture)

Produits en fin de vie, déchets ↓ Déchets de fabrication ↓ Déchets d'usinage (chutes, copeaux) ↓ Déchets ↓ Recyclage

Collecte → Préparation (broyage, tri)

Géosciences pour une Terre durable
brgm

OFFRE

- Ressources primaires connues actuelles et les nouvelles découvertes (exploration et avancée des projets miniers)
- Sous-produits et co-produits valorisables associés à une substance principale
- Ressources secondaires potentielles (disponibilité = durée de vie dans la technosphère, %recyclage possible et organisation de la collecte)
- Substitution possible par d'autres substances
- Conditions du marché (prix, concurrence, dépendance aux importations…)
- Complexité de la chaine d'approvisionnement responsable et éthique

DEMANDE

- Demande courante : volumes nécessaires pour chaque filière, pour palier aux besoins de la vie courante (logement, alimentation, mobilité), à la qualité nécessaire en fonction des usages…
- Demande future : accroissement de la consommation des ressources par la croissance démographique, l'évolution du mode de vie, l'évolution règlementaire, l'émergence de nouvelles technologies (veille) ou la découverte d'une propriété physico-chimique particulière (à l'utilisation par combinaison, ou d'effets sanitaires sur la toxicité)…

Adéquation entre offre et demande ⇨ Scénarios plausibles en fonction de la rapidité d'évolution du marché et des disparités temporelles (ex. volatilité des prix vs. temps pour l'exploration, la découverte puis l'ouverture de nouveaux projets et la mise en production) ainsi que suivant l'évaluation des impacts, des enjeux et des risques associés

LA CRITICITÉ DES SUBSTANCES MINÉRALES :

Une ressource minérale n'est pas critique, elle le devient en fonction du besoin et des usages d'une filière industrielle ou d'un pays (défense)

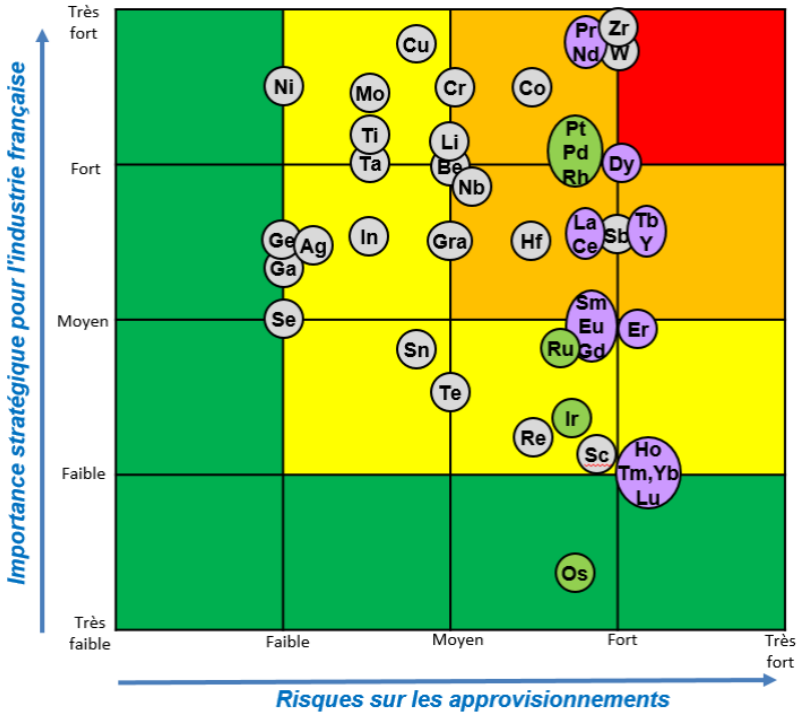
Les risques sur les approvisionnements peuvent être influencés par :

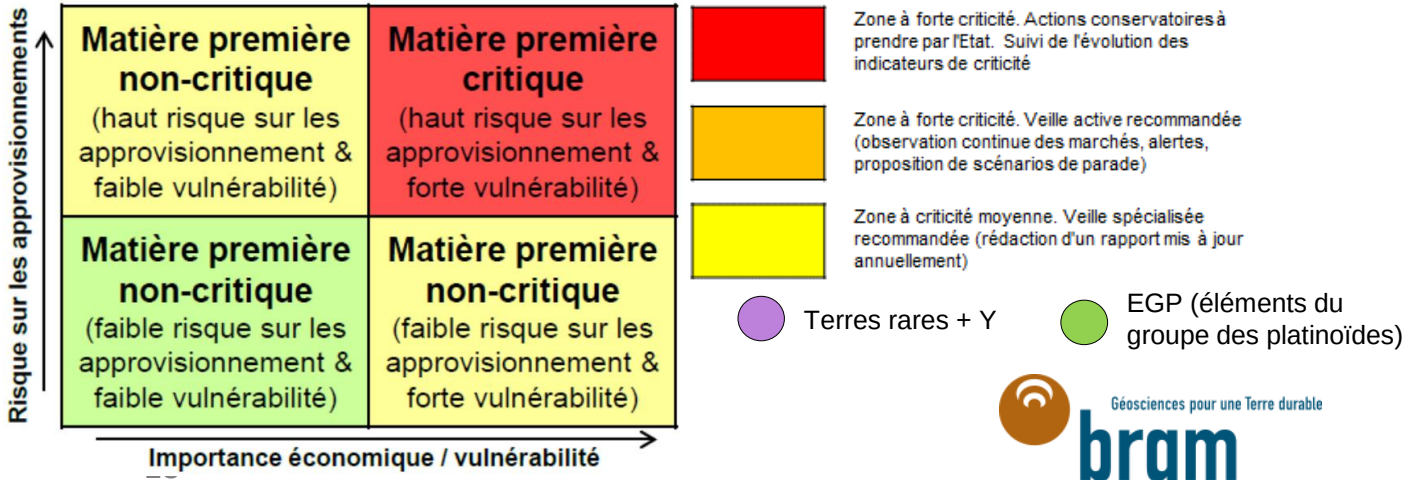
- La disponibilité géologique (rareté des ressources connues et réserves répertoriées ~ faisabilité technique et économique de l'extraction)
- Le taux de croissance de la demande (~tendance des usages et de la consommation)
- Le taux de recyclage en fin de vie des produits
- L'existence de problèmes environnementaux spécifiques à la filière (ex. risque toxicité lié aux substances associées ou aux produits utilisés dans le procédé)
- Des restrictions au libre commerce de la matière première (ex. quotas d'exportation)

- La concentration géographique des ressources
- La capacité de production minière
- La concentration géographique des filières industrielles de transformation (métallurgie et raffinage)
- La stabilité politique des pays producteurs (fiabilité et qualité de la gouvernance, risques de conflits)
- Les considérations éthiques (acceptabilité sociétale)

EVALUATION DE LA CRITICITE DES SUBSTANCES OU GROUPES DE SUBSTANCES ETUDIEES PAR LE BRGM DEPUIS 2010

Positionnements révisés en 2018 ("Fiches de criticité")



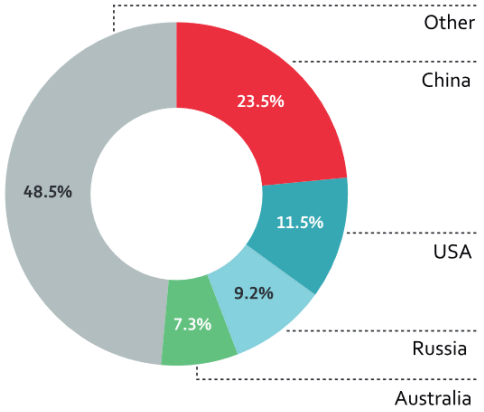


Géosciences pour une Terre durable
brgm

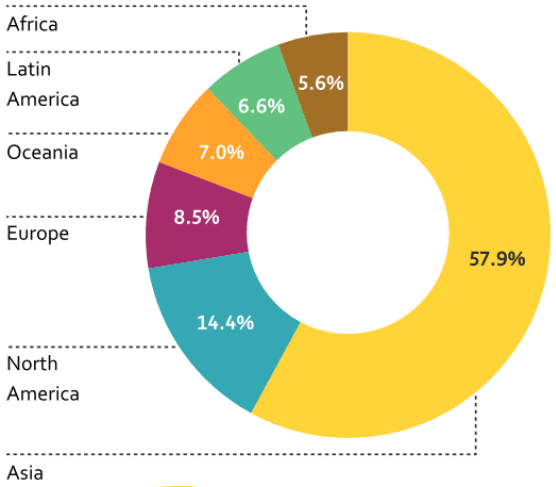
EVOLUTION DE LA PRODUCTION MINIÈRE

- **Croissance globale** de la production minière mondiale pour faire face à la consommation croissante
- **4 grands pays producteurs** : **Chine, USA, Russie et Australie** totalisant >50% de la production mondiale
- L'**Europe** est le **seul contient montrant une baisse de la production** sur les 20 dernières années

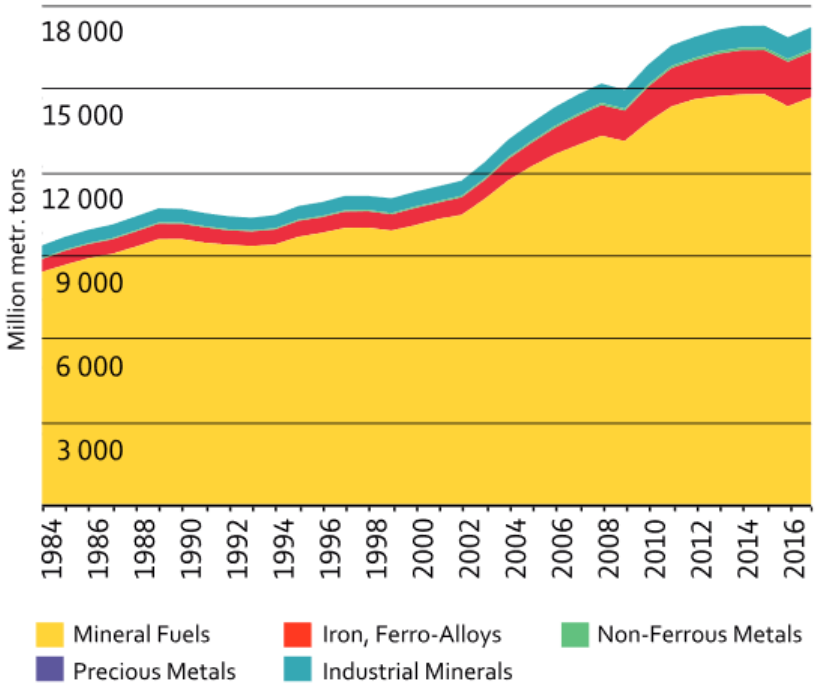
China, USA, Russia and Australia are the 4 biggest mining nations



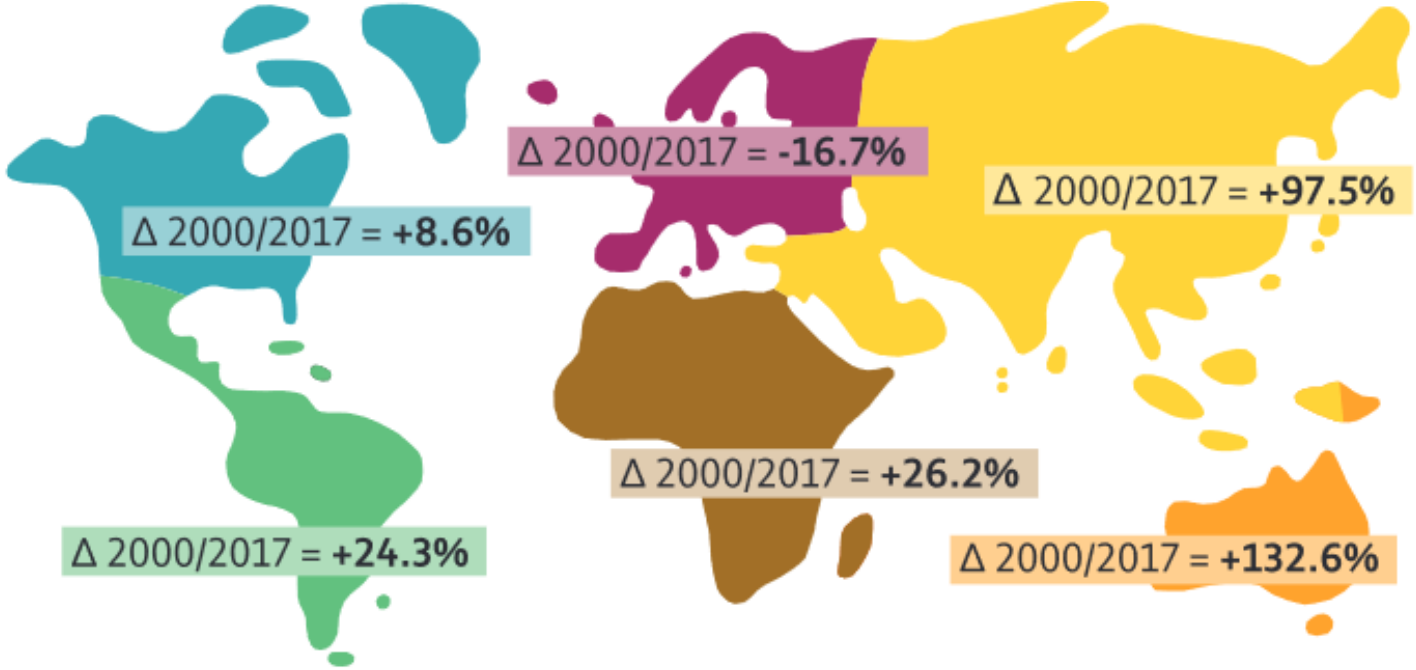
Total production 2017 by continents



Total mining production 1984–2017

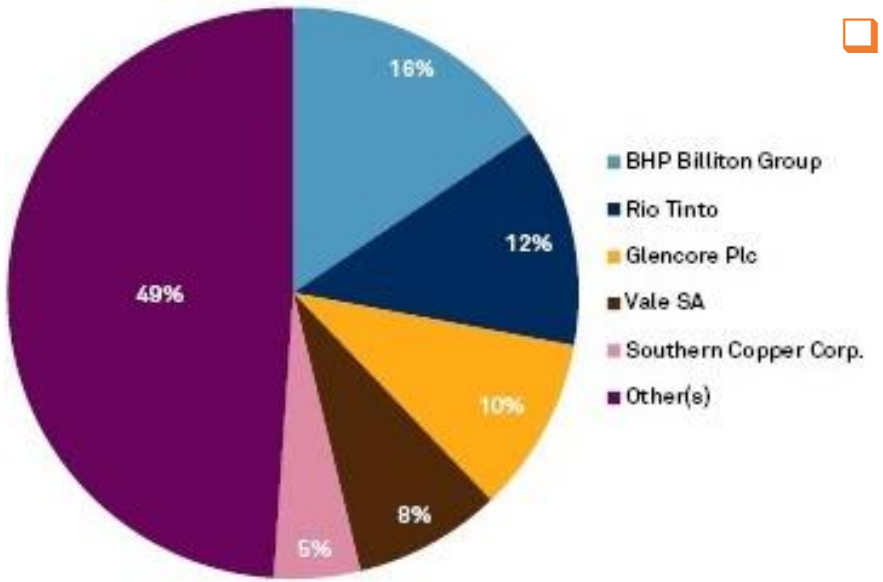


Declining production rates since 2000 only in Europe



Source : World Mining Data, Annual Report, 2019.

CARACTÉRISTIQUES DU SECTEUR MINIER

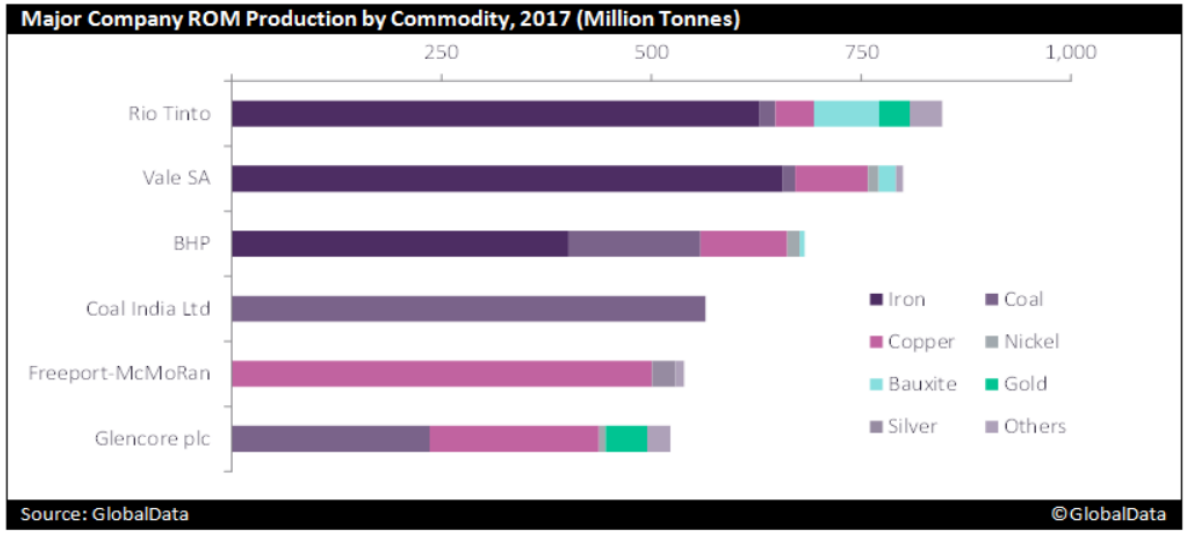


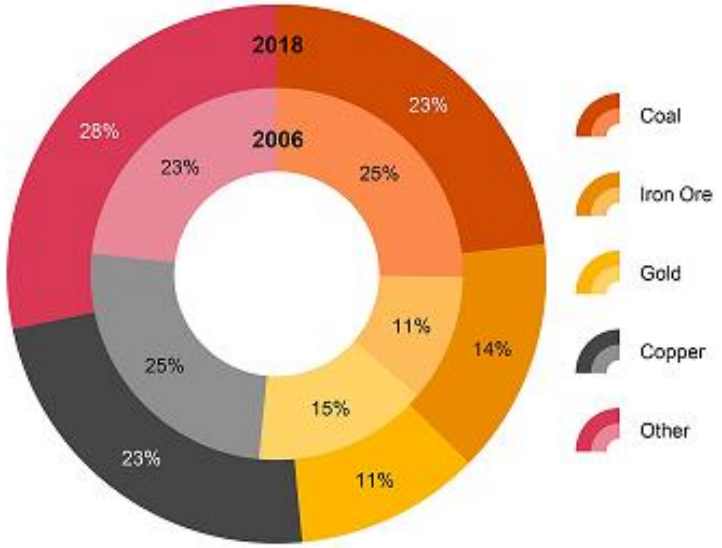
Source : S&P Global, Shahzad Khurram Ahmed, 2018

- Top 25 des compagnies minières transnationales se partageant le marché mondial de production des métaux

- Une diversification modérée du portfolio des géants

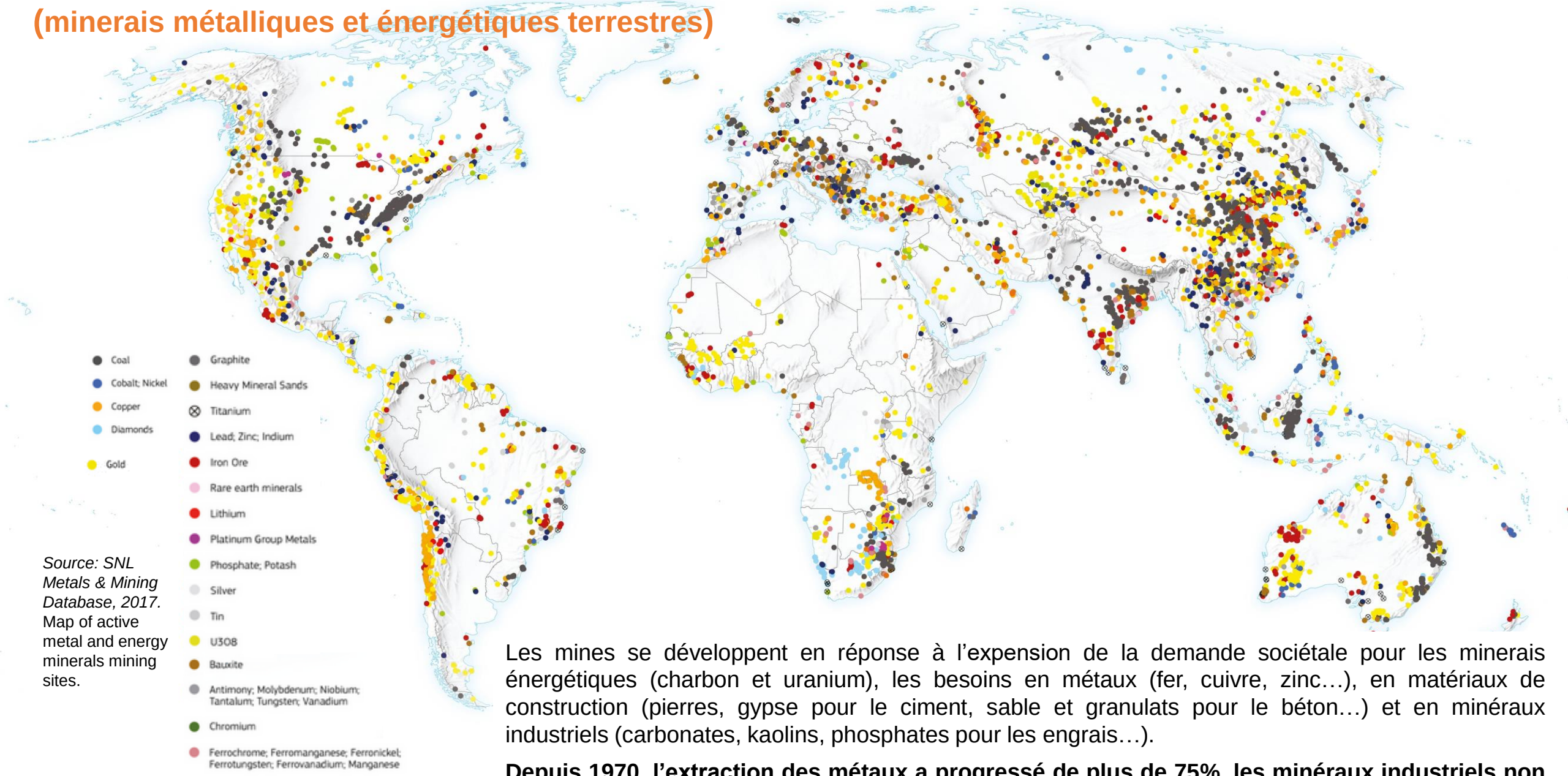
- 72% des revenues des 40 plus grandes compagnies minières proviennent de l'or, du cuivre, du fer et du charbon.





Source : PwC, Annual report, 2018.

CARTOGRAPHIE DES MINES ACTIVES ACTUELLES
(minerais métalliques et énergétiques terrestres)



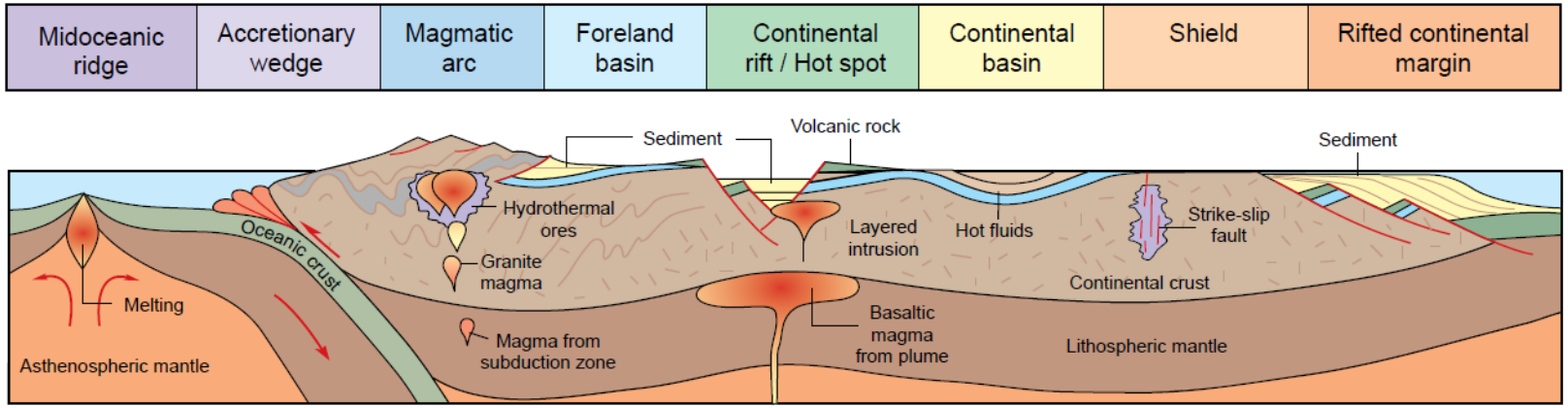
Source: SNL Metals & Mining Database, 2017. Map of active metal and energy minerals mining sites.

Les mines se développent en réponse à l'expension de la demande sociétale pour les minerais énergétiques (charbon et uranium), les besoins en métaux (fer, cuivre, zinc…), en matériaux de construction (pierres, gypse pour le ciment, sable et granulats pour le béton…) et en minéraux industriels (carbonates, kaolins, phosphates pour les engrais…).

Depuis 1970, l'extraction des métaux a progressé de plus de 75%, les minéraux industriels non métalliques de 53% et les matériaux de construction de 106%.

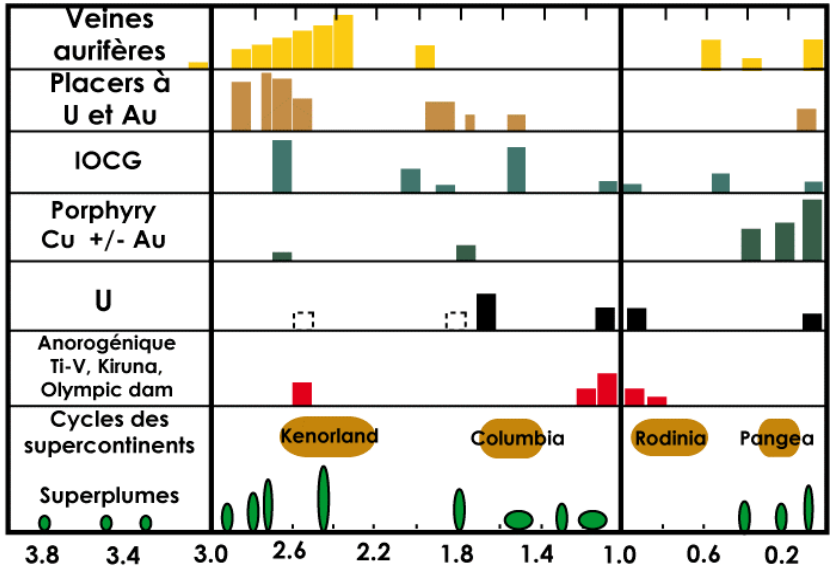
❑ Une distribution des gisements dans l'espace et dans le temps qui n'est pas aléatoire ⇨ guides de prospection

Localisation des types de gisements en fonction du contexte géodynamique (en limite de plaques tectoniques ou associés à des évènements géologiques ou des types de roches)



Midoceanic ridge	Accretionary wedge	Magmatic arc	Foreland basin	Continental rift / Hot spot	Continental basin	Shield	Rifted continental margin
Magmatic segregation chromium platinum **Hydrothermal sulfides** copper zinc	**Oceanic ridge deposits in melange** copper zinc nickel chromium	**Hydrothermal vein deposits** gold silver **Contact metamorphic** copper, lead, zinc, gold, silver, iron, tin, tungsten, molybdenum	**Sedimentary** coal oil oil shale gas	**Magmatic segregation** platinum copper, nickel **Hydrothermal** copper, lead, zinc, silver **Sedimentary** evaporites, brines sand, gravel	**Sedimentary** oil, gas, coal, salt **Hydrothermal** lead, zinc fluorite	**Metamorphic shear zone** gold tungsten	**Sedimentary** oil, gas, coal, evaporites, beach placers **Precambrian** Banded iron formations

Nombre de gisements en fonction de l'âge des roches (milliards d'années)

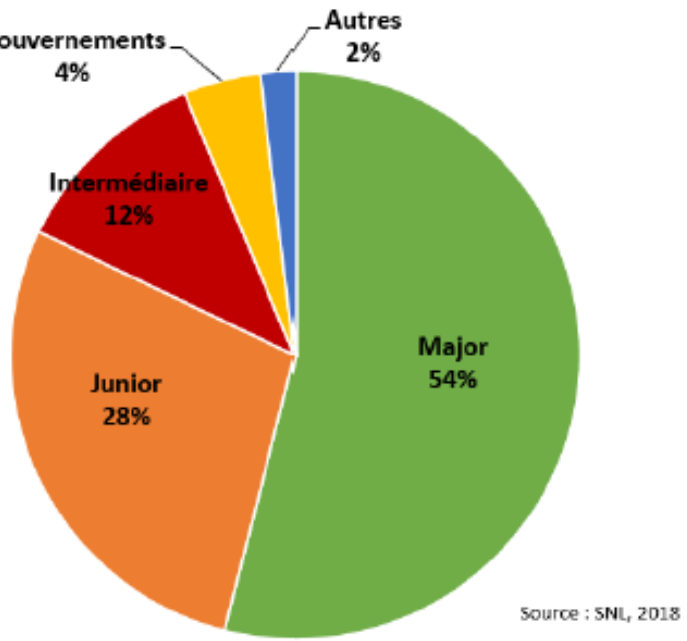


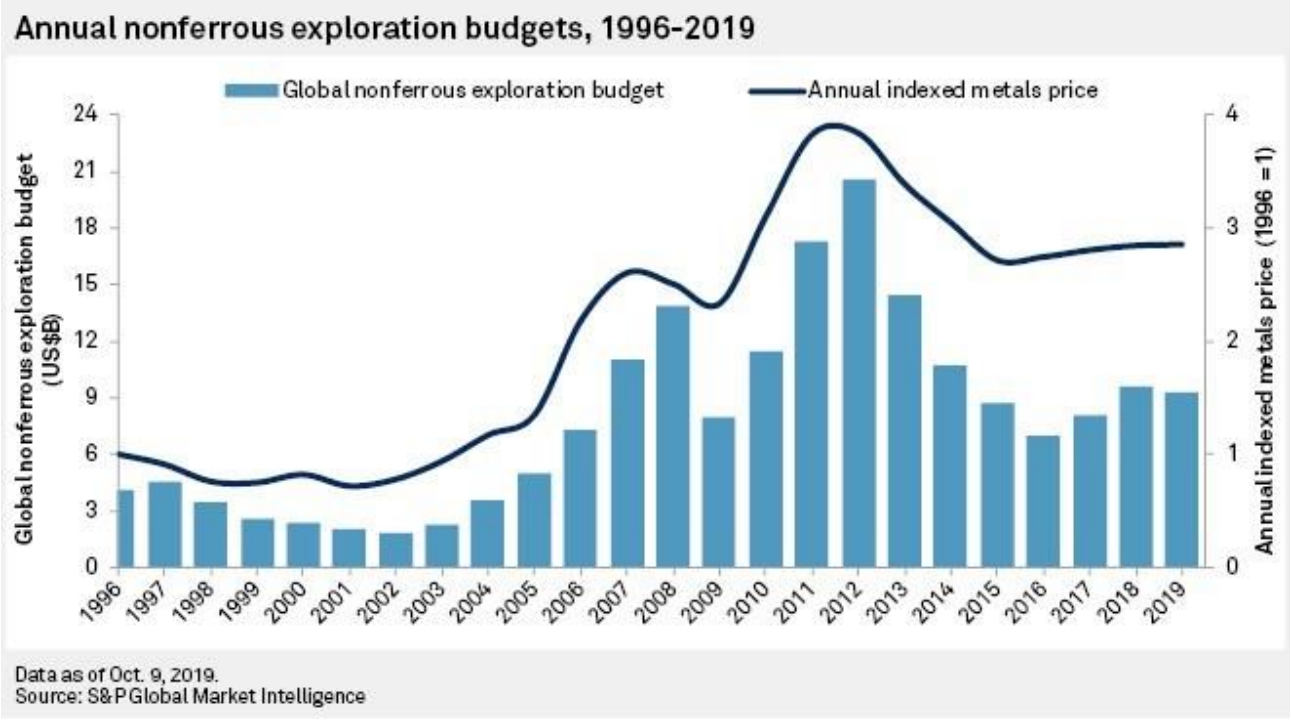
Géosciences pour une Terre durable
brgm

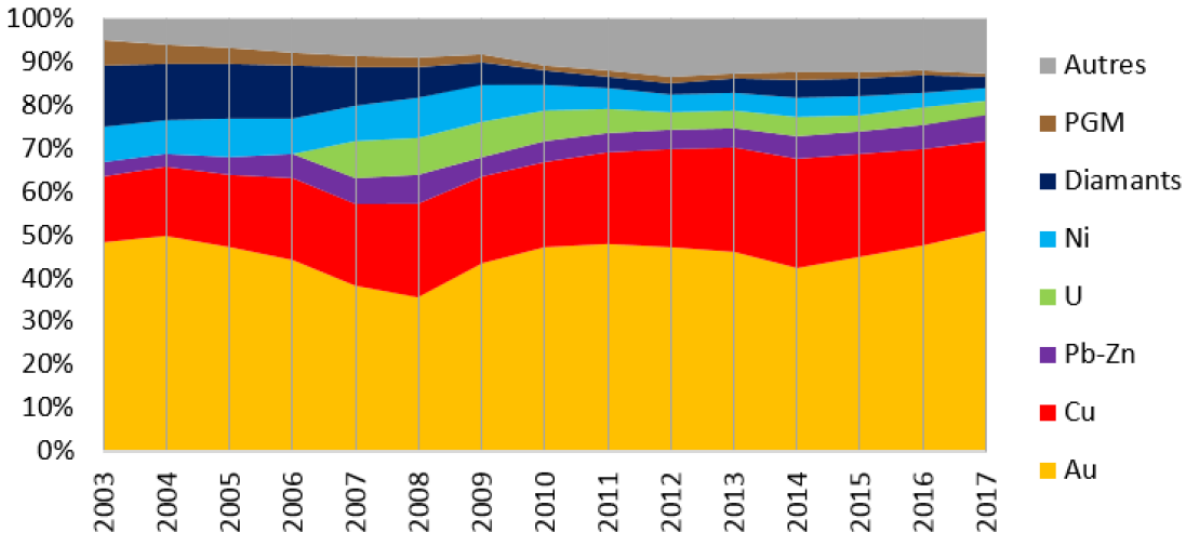
EVOLUTION DES INVESTISSEMENTS EN EXPLORATION

- Les investissements dans l'exploration pour la recherche de nouvelles ressources se font lorsque les prix des métaux sont au plus hauts ⇨ une anticipation difficile
- Une reprise lente mais progressive après les crises économiques qui ont fortement impactées le secteur : budget global d'exploration en augmentation depuis 3 ans, 10.1 US$B en 2018, dont Au et Cu représentent >70% (valeurs refuges) et plutôt portés sur des projets en stade de développement avancé

Répartition des budgets d'exploration par type de compagnies minières en 2017
(Source : SNL, 2018)







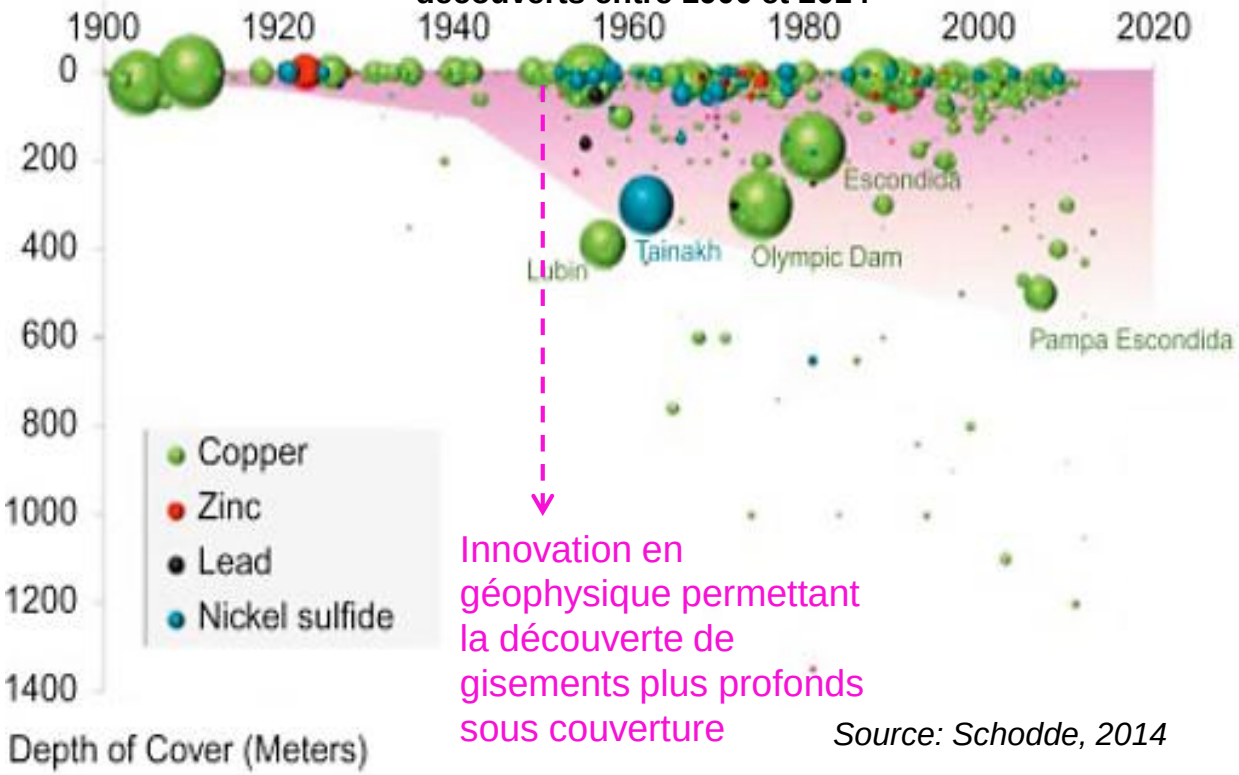
Part relative des budgets d'exploration de quelques substances entre 2003 et 2017
(Source : SNL, 2018)

Géosciences pour une Terre durable
brgm

LA FINITUDE DES RESSOURCES MINÉRALES PRIMAIRES, UNE RÉALITÉ ?

- La découverte de gisements riches en surface est de plus en plus rare
- Une capacité à découvrir des gisements plus en profondeur (cachés sous couverture) grâce aux techniques géophysiques et à extraire à de basses teneurs accrue grâce aux avancées technologiques en métallurgie (hydrométallurgie)
- Cependant, en contrepartie, des risques opérationnels et des coûts d'extraction plus importants
- Une tendance à préférer des grands volumes à teneurs moindres plutôt que des teneurs élevés mais disséminées

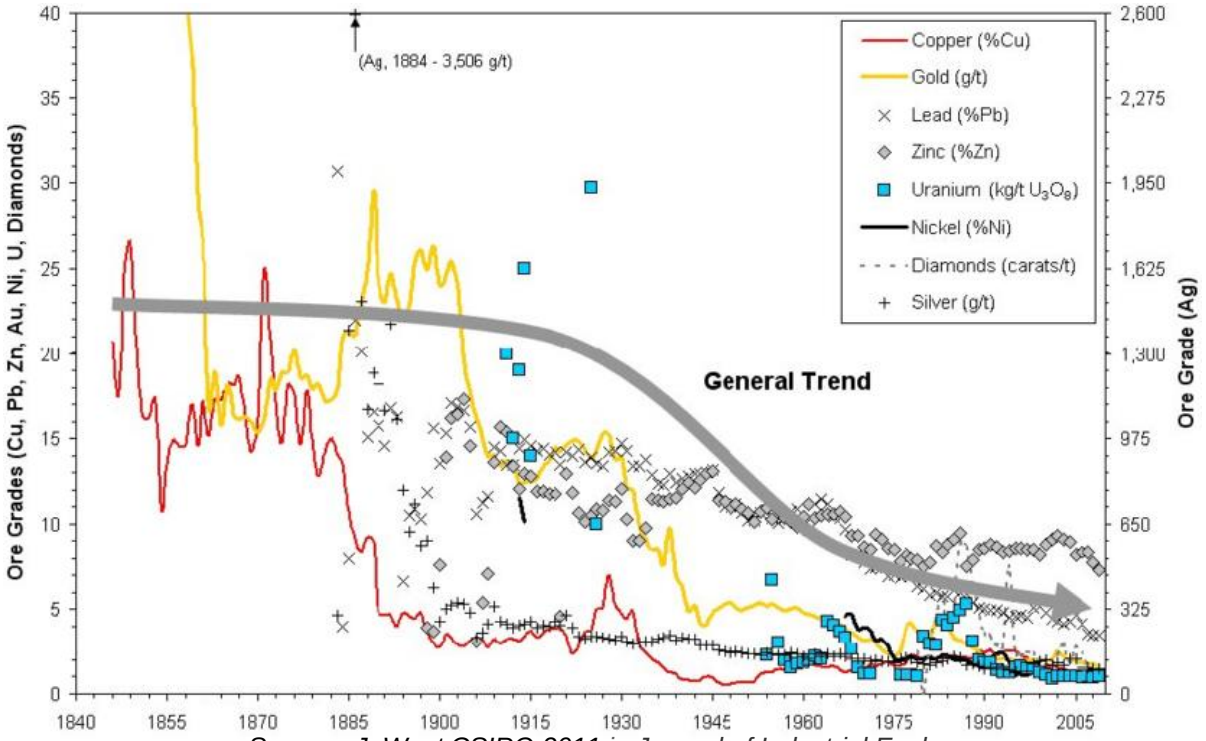
Profondeur de couverture de différents gisements métalliques découverts entre 1900 et 2014



Innovation en géophysique permettant la découverte de gisements plus profonds sous couverture

Source: Schodde, 2014

Teneur moyenne des gisements métalliques exploités



Source : J. West CSIRO 2011 in Journal of Industrial Ecology

Un constat : des gisements plus profonds, à des teneurs plus faibles

Challenge technique

Géosciences pour une Terre durable
brgm

LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX DÉPORTÉS DANS LES PAYS PRODUCTEURS : UNE PRISE DE CONSCIENCE DES EFFETS GLOBAUX

Géosciences pour une Terre durable

brgm

LE CYCLE DE VIE D'UN PROJET MINIER

Prospection & Exploration

Découverte et caractérisation du gisement pour en évaluer la faisabilité technique et économique (taille, forme, minéraux valorisables et pénalisants, ressources, réserves…)

Etude de faisabilité

Durée : 2 à 8 ans / Coût : $500,000 à $15 millions

Développement industriel

Recherche d'investisseurs et modèles économiques, planification, modélisation, ingénierie des procédés et design, CAPEX, évaluation des risques, mise en œuvre règlementaire et sécuritaire, logistique du projet, recrutements, construction des infrastructures retenues, …

Durée : 4 à 12 ans / Coût : $1 million à $1 milliard

Production

Extraction du minerai et procédé de traitement (broyage, concassage, séparation, concentration, commercialisation, convoyage et distribution aux usines de première transformation, monitoring et contrôle qualité, maintenance des installations, formation et optimisation continues …)

Durée : 5 à 30 ans, ou plus… Période de rentabilité et retour sur investissement

Fermeture & Réhabilitation du site

Suivi environnemental du site et des résidus liquides & solides, remblai, déconstruction des infrastructures, reclassification des travailleurs, remédiation des friches, restauration des sols, re-végétalisation…

Durée : >35 ans
Coût : quelques millions à plusieurs dizaines

Augmentation de la longévité opérationnelle

EXEMPLES DE CATASTROPHES ÉCOLOGIQUES ISSUES DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE

- Rupture du barrage de la mine de fer en amont de Brumadinho au Brésil le 25 janvier 2019 (3 ans après la catastrophe de Mariana) :

Rivière de boue aux abords de de Brumadinho, État de Minas Gerais au Brésil, 26 Janvier 2019

Brumadinho 1 an après, photo de Douglas Magno, AFP, Les Echos 29 Janvier 2020

- 12,7 Mm^3 de déchets déversés, >270 morts
- négligence criminelle (les contrôles d'inspection avaient révélé plusieurs anomalies non divulguées aux autorités)
- Mise en accusation du dirigeant de Vale
- 6,3 milliards de dollars dépensé depuis 1 an et risque >40 milliards de dollars de dommages et intérêts

- Rupture de la digue de retenue à Aznalcollar le 25 avril 1998 :
  - Plan d'abandon du site par Boliden et de réhabilitation de l'environnement 50M€
  - Plan de re-végétalisation gouvernemental 150 M€
  - Réouverture 16 ans après

Ruptures de digues de retenue à Aznalcóllar (25 avril 1998 en Espagne)

Rivière GUADIAMAR 26 avril 1998
Source : https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr

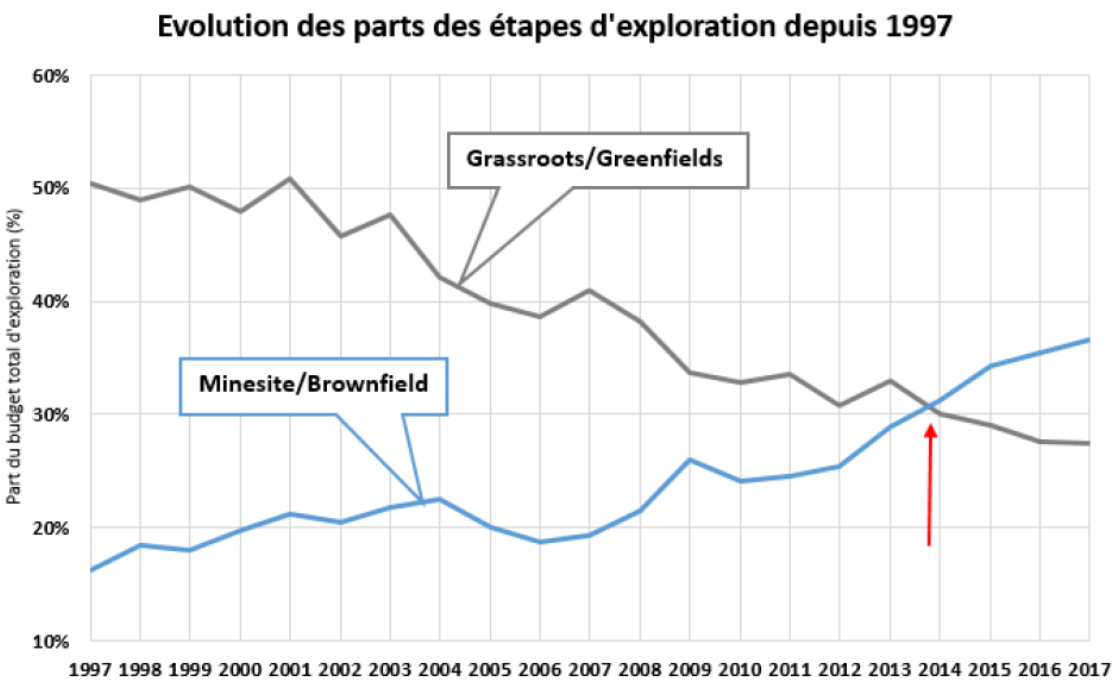
- La **gestion des résidus et des effluents** miniers ainsi que le potentiel **drainage minier acide** sont certainement les problématiques les plus importantes à gérer pour une mine en terme de **risques pour l'environnement**.
- Changement majeur : **la problématique environnementale doit être prise en compte à toutes les étapes de la vie d'une mine, dès les premiers stades du projet**

- Exploration et développement : étude d'impacts, analyse des risques, prédiction et anticipation

  ⇨ Obligations réglementaires courantes lors de la demande de permis : **solvabilité des opérateurs** et **constitution d'un fond de garantie pour la restauration** (afin d'éviter les pratiques du passé comme abandon et décharge de l'après mine à l'état et aux populations locales)
- Exploitation : prévention en continu et contrôles/monitoring réguliers pendant la durée des opérations
- Fermeture (après-mine) : contrôle à long terme, plan de réhabilitation et nouvel usage possible du site.

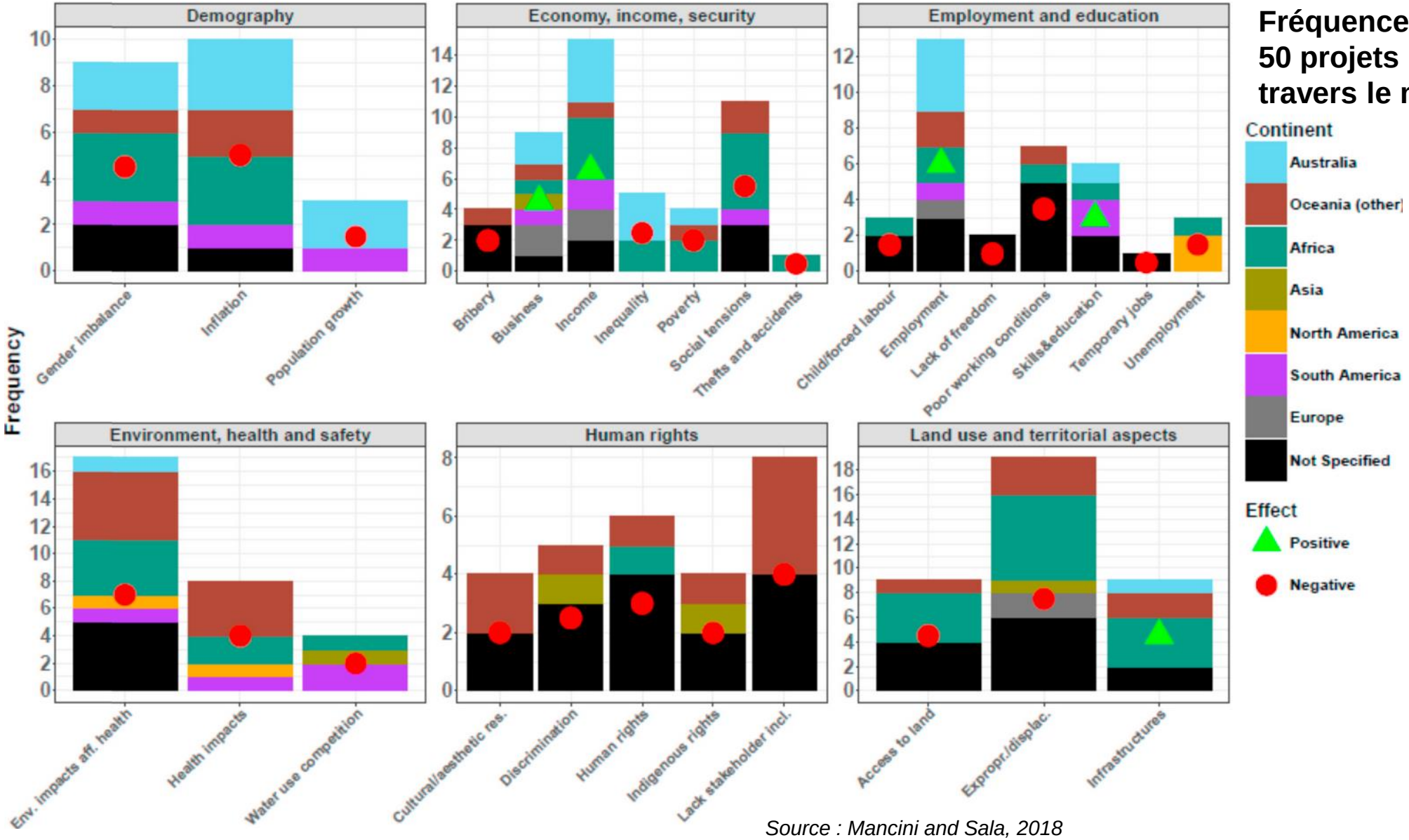
Un changement de paradigme : La **responsabilité environnementale** lors d'une exploitation minière ne s'arrête pas à la période d'extraction et de production, mais elle **demeure présente après la fermeture du site minier**.

- La réhabilitation après-mine : coûts élevés + défis techniques et pratiques (gestion du DMA, des aléas et des conditions climatiques qui peuvent évoluer, du vieillissement des installations et des matériaux, de la disponibilité des matériaux pour la restauration…)
- Une tendance à vouloir garder les mines ouvertes plus longtemps (contraintes socio-environnementales restrictives, fébrilité du marché et des investisseurs)



Source : SNL, 2018

IMPACTS SOCIAUX DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE



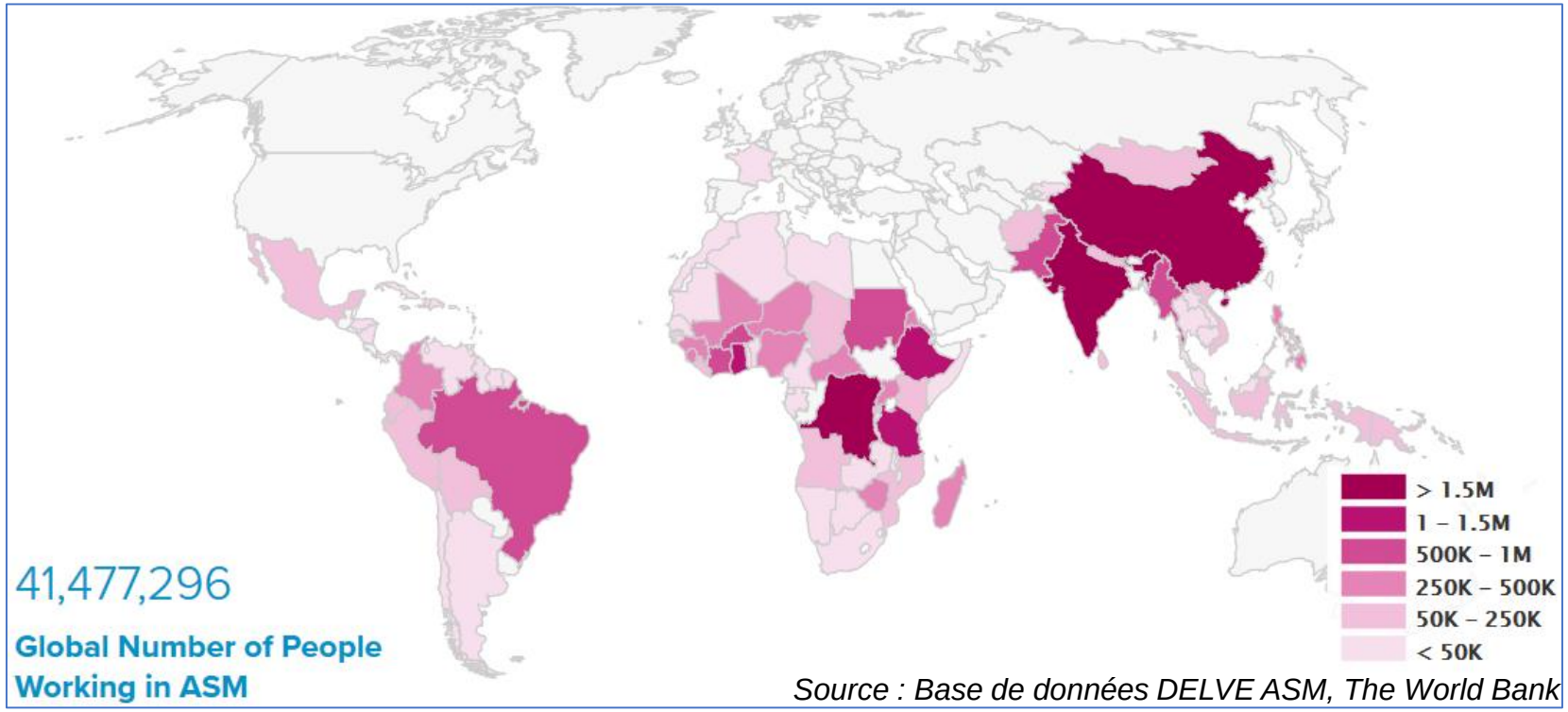
Fréquence des impacts sur 50 projets miniers étudiés à travers le monde

- Impacts positifs :
  - économie
  - emplois
  - infrastructure
  - éducation
- Impacts négatifs :
  - inégalité, discriminiation et pauvreté
  - tensions sociales
  - risque sanitaire
  - compétition aux usages des sols (agriculture, tourisme…)
  - expropriations…

Source : Mancini and Sala, 2018
https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002

L'ACTIVITÉ DES PETITES MINES ARTISANALES

- Près de 41,5 millions de personnes travailleraient dans de petites mines artisanales (30%F/70%H), dont près de 40% sont localisées en Asie.
- Exploitation manuelle ou faiblement mécanisée, ciblant les premiers mètres des gisements de sub-surface (gisements alluvionnaires notamment ⇨ écrémage)
- Type d'exploitations difficilement contrôlables, qui sont souvent développées en parallèle au pourtour de mine plus importantes dans les pays en développement
- Parfois associée à des pratiques illégales : sans monitoring, décapage et déforestation, travail des enfants, violences, utilisation de produits nocifs (mercure)



Source : Base de données DELVE ASM, The World Bank

Exploitation artisanale de grenats au Malawi © BRGM L. Bailly , 2018

Exploitation illégale d'or en Guyane française © Armée Française, AP/Gilles Gesquiere, article Le Monde 2012

LE DEVOIR DE DILIGENCE : VERS UNE ETHIQUE INTERNATIONALE

- Chaque opérateur minier qui depose une demande de permis d'exploitation ou qui souhaite motiver des investisseurs et bailleurs de fonds internationaux à participer à leur projet doit fournir une étude d'impacts environnemental et social (OCDE, codes miniers, standards CRIRCO, JORC, NI-43-101).
- Loi-cadre américaine Dodd Frank votée en 2010 : les sociétés cotées minières et pétrolières doivent publier les sommes qu'elles versent aux gouvernements des pays où elles opèrent (transparence bancaire) et préciser si leurs produits peuvent contenir des minerais issus de zones de conflits.
- Règlementation européenne obligatoire sur les chaines d'approvisionnement responsable en 3TG (W, Sn, Ta, Au) promulguée en 2017 et applicable à partir de 2021.

Les objectifs de développement durable

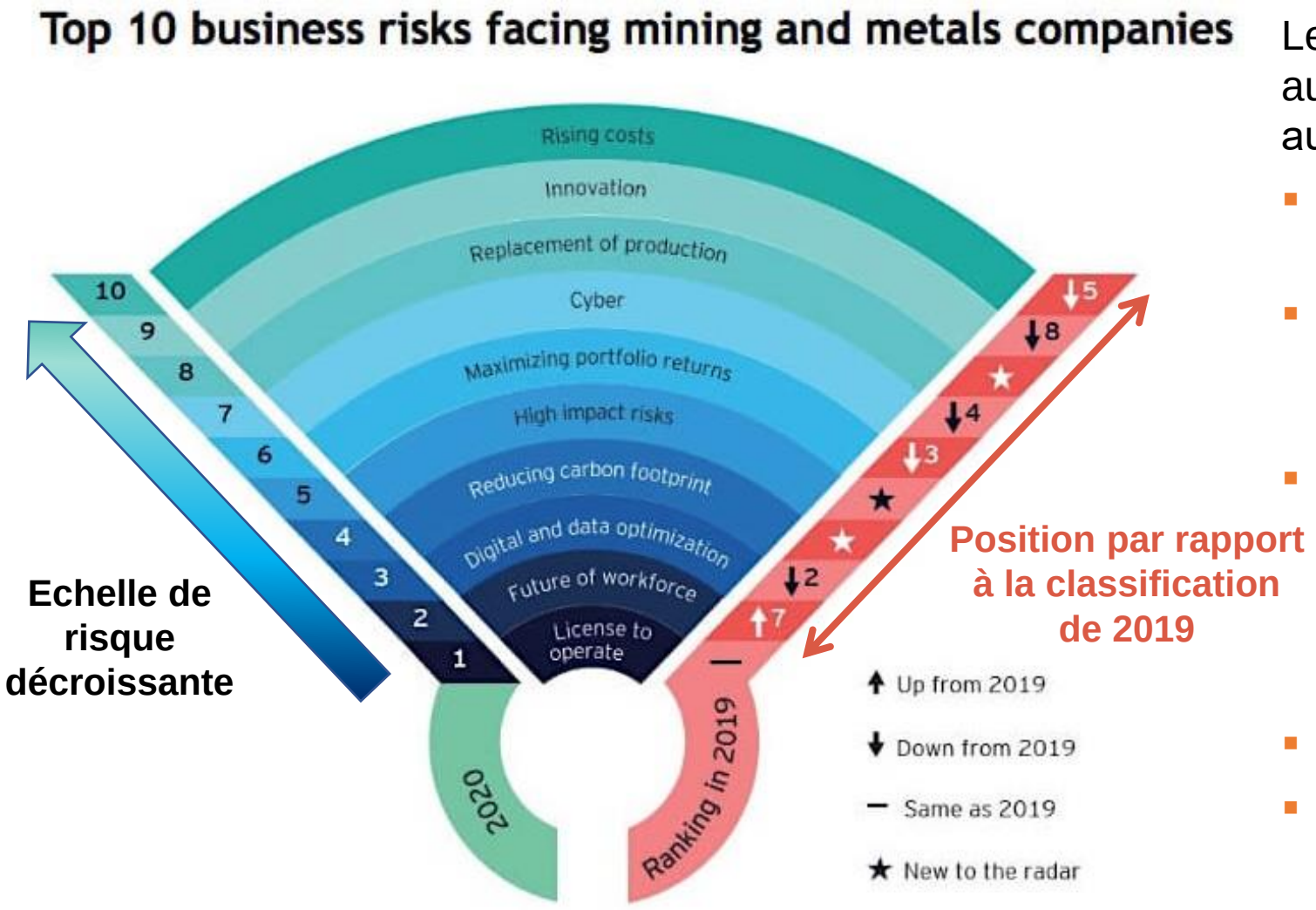
- Les activités et les comportements d'une compagnie minière envers les communautés avoisinantes, et le contexte dans lequel elle opère, jouent un rôle essentiel et déterminant vis-à-vis du soutien communautaire envers son projet (permis d'extraire sans blocage, facilitation dans les démarches) et des futures opérations à venir.

UN SECTEUR INDUSTRIEL MINIER EN MUTATION : INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES ET R&D

Géosciences pour une Terre durable

brgm

RISQUES MAJEURS IDENTIFIÉS PAR LES INDUSTRIELS MINIERS



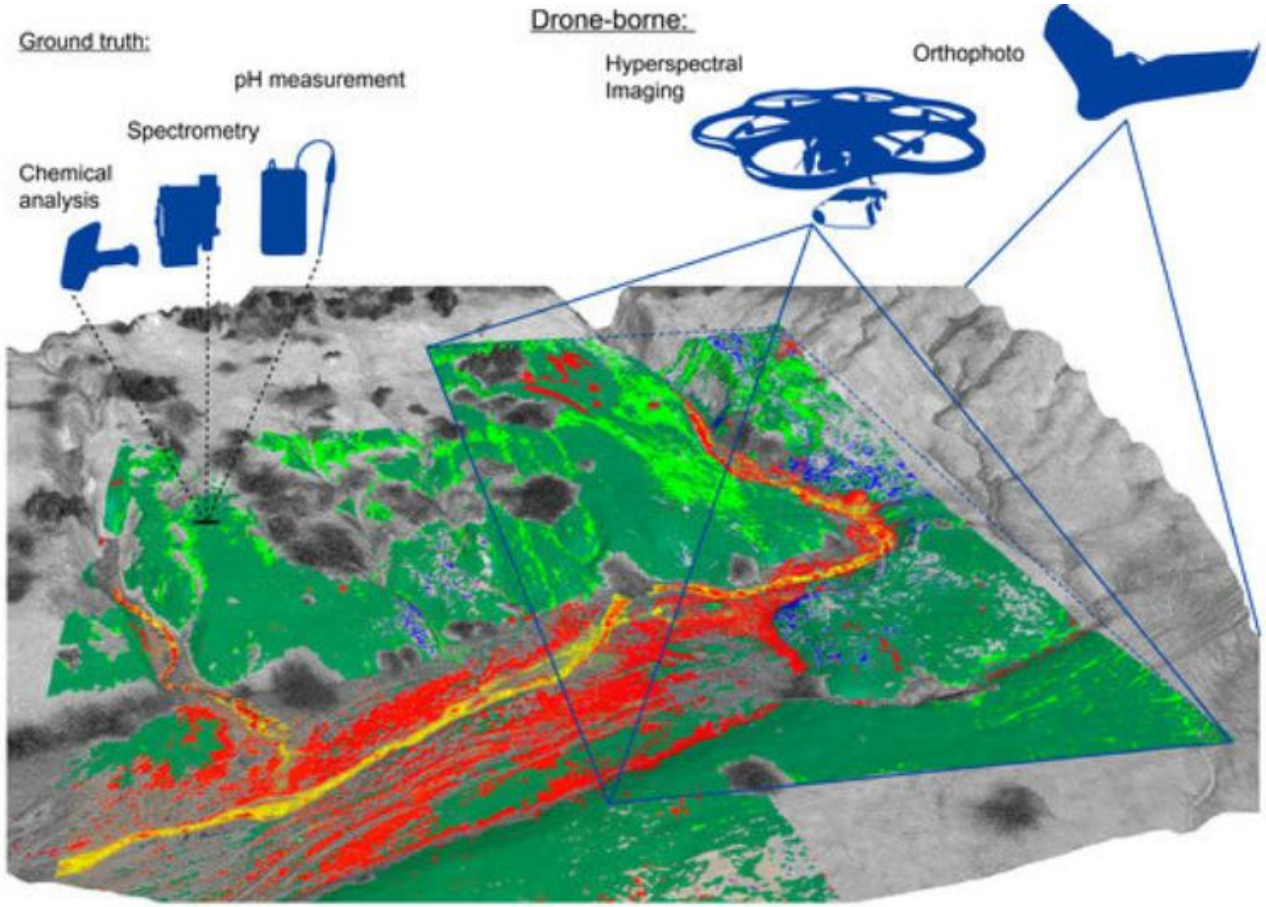
Source : E&Y, oct. 2019

Les principaux centres d'inquiétude auxquels font face les compagnies minières aujourd'hui sont :

- l'**acceptabilité sociétale** *(Social Licence to Operate ≠ Not in My Backyard)*
- la difficuleté à trouver la **main d'oeuvre qualifiée** necessaire aux meilleures pratiques
- le développement rapide de la **digitalisation** (risque de **cyber-attaques** en contre-partie) pour conduire à l'**optimisation opérationnelle de la production**
- la réduction de l'**empreinte carbone**
- les **risques à fort impact** (accident majeur, crise économique, …)

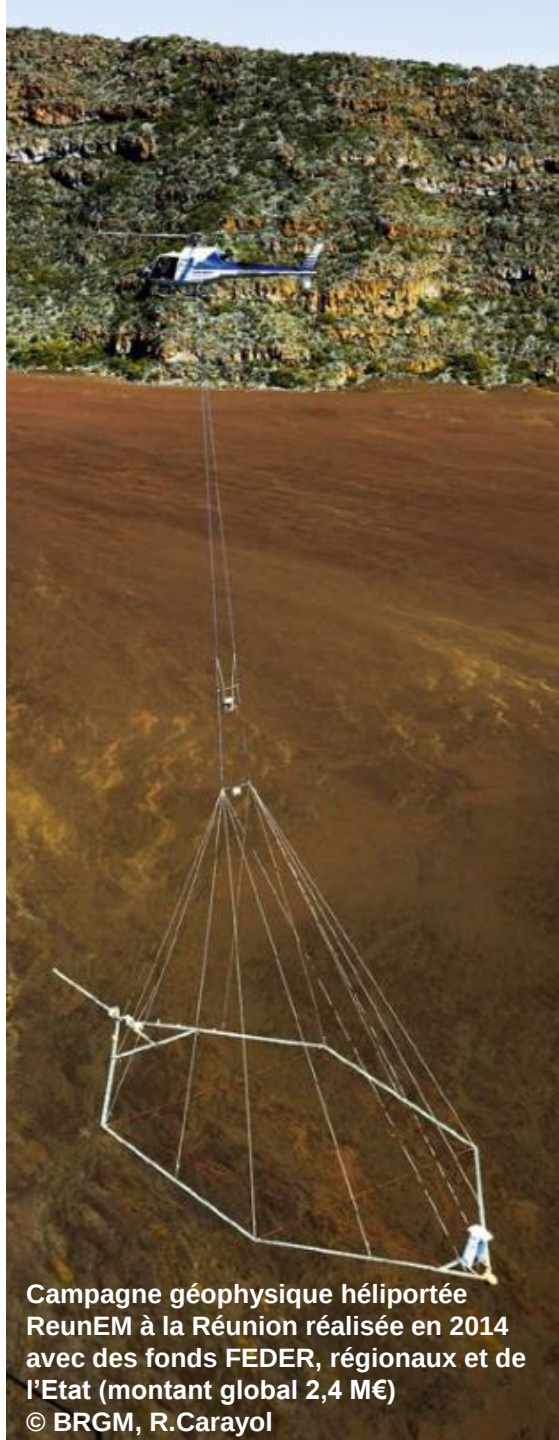
EVOLUTION DES METHODES D'EXPLORATION NON INVASIVES

Analyseur portable XRF (X-Ray Fluorescence, non destructif) pour établir la composition chimique



Source : Jackisch et al. (2018) https://doi.org/10.3390/rs10030385

Premiers essais d'un drone équipé d'un magnétomètre en Alsace © E. Pizzo Info Géo Drones



Campagne géophysique héliportée ReunEM à la Réunion réalisée en 2014 avec des fonds FEDER, régionaux et de l'Etat (montant global 2,4 M€) © BRGM, R.Carayol

LA MINE 4.0 DE DEMAIN

Passage de la digitalisation et de l'automatisation (mines 3.0) aux cyber-systèmes de contrôles : pilotage par l'IA du monitoring des installations et des équipements, pour l'optimisation de la gestion des sites et formuler des nouveaux guides d'exploration

capacité de production, variation des teneurs vs. spécificité techniques et volumes demandés par les clients, prix…

Dumper électrique autonome

Récolte Internet & inter-comparaison

Cyber-sécurité

Automatisation partielle ou complète : panneau de commandes déportées, robots…

Monitoring : capteurs embarqués ou fixes et alarmes

Système d'intégration des données, traitement et analyse : cloud computing, big data, statistiques, recoupement de l'information par IA…

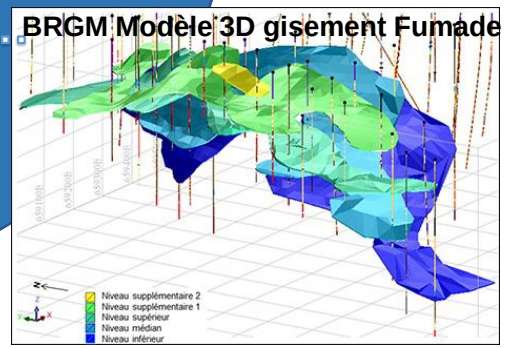
Simulation numérique, modélisation 3D et réalité augmentée

Instrumentation & équipements

Systèmes de contrôle

Systèmes d'information mobiles

Outils d'aide à la décision



BRGM Modèle 3D gisement Fumade

Géosciences pour une Terre durable
brgm

RÉALITÉS VIRTUELLES, JUMEAUX NUMERIQUES ET SIMULATEURS MINIERS

Source : simulateur TECKNOSIM http://tecknotrove.com

Source : 3D Scaling SIMULATOR™

Source : Mining Global

Source : 3D Shotcrete simulator™

- Simulation numérique d'engins mobiles ou lourds
- Différentes répliques de processus opérationnel en conditions semi-réelles
- Tester les reactions face à des évènements et favoriser l'amélioration par la formation continue des équipes
- standardiser les tests pour les nouvelles recrues sans interferer dans la production ou en monopolisant les équipements
- Minimiser les risques d'accidents ou de dommages aux équipements lourds
- Sécurité et transmission des bonnes pratiques

L'AUTOMATISATION ET LA DIGITALISATION DANS L'EXPLOITATION MINIÈRE

- L'automatisation permet aux companies minières de réduire le personnel sur les postes de travail aux conditions difficiles et dangereuses (zones difficiles d'acces, à grande profondeur, à risques d'explosion, gestion des fortes charges, chaine de routine…) et permet un fonctionnement 24h/24 7j/7

⇨ Améliorer la Sécurité et les conditions de travail, réduire la fréquence et la gravité des incidents/accidents

⇨ Moins de rotations de postes et de masse salariale

⇨ Réduction des coûts opérationnels et des risques d'arrêt de la production

⇨ Efficience sur l'usage des équipements et rendement de productivité accru

⇨ Amélioration/optimisation de la planification des opérations

- Exemples :

- Téléoperations déportées ou autonomie complète des engins mobiles (transport, chargement/déchargement)
- Chaine de contrôle des procédés automatisée (analyses et contrôle-système de commandes intelligentes, interactivité et rapidité de reaction, détection des dérives et suivi environnemental des rejets)
- Maintenance predictive grâce à des capteurs d'usure
- Réduction des dépenses en fioul par la gestion des vitesses

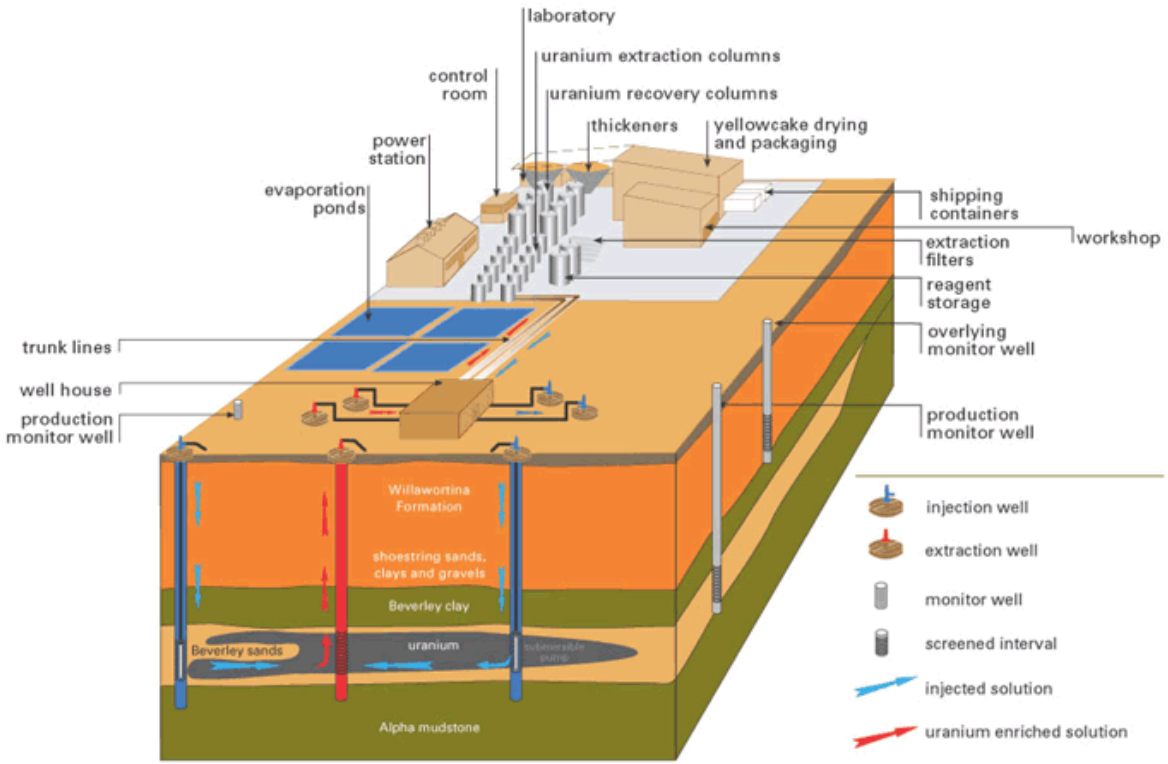
Rio Tinto lance le premier train entièrement autonome en Australie en 2018

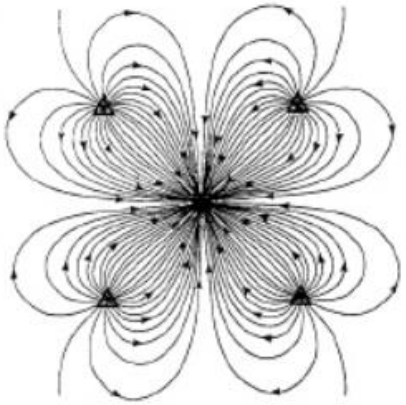
© BRGM, I. Duhamel-Achin, 2019 : salle de contrôle-commandes d'une usine de traitement de minerai sulfuré Cu-Zn en Finlande

INNOVATIONS DES TECHNIQUES D'EXPLOITATION EN MILIEU SOUTERRAIN

- Les mines devenant de plus en plus profondes, sur de plus grands volumes à plus faibles teneurs, deux innovations permettent de réduire les coûts d'exploitation :
  - l'électrification des véhicules mobiles, le développement de la connectivité (wifi) et de l'automatisation en mines souterraines permettent de réduire l'utilisation de fioul, les émissions de poussières et de CO_2, les vibrations, le bruit, et de réduire les besoins en ventilation et refroidissement (milieu confiné) ;

Première mine 100% électrique au Canada : projet minier Boden de Newmont-Goldcorp en Ontario



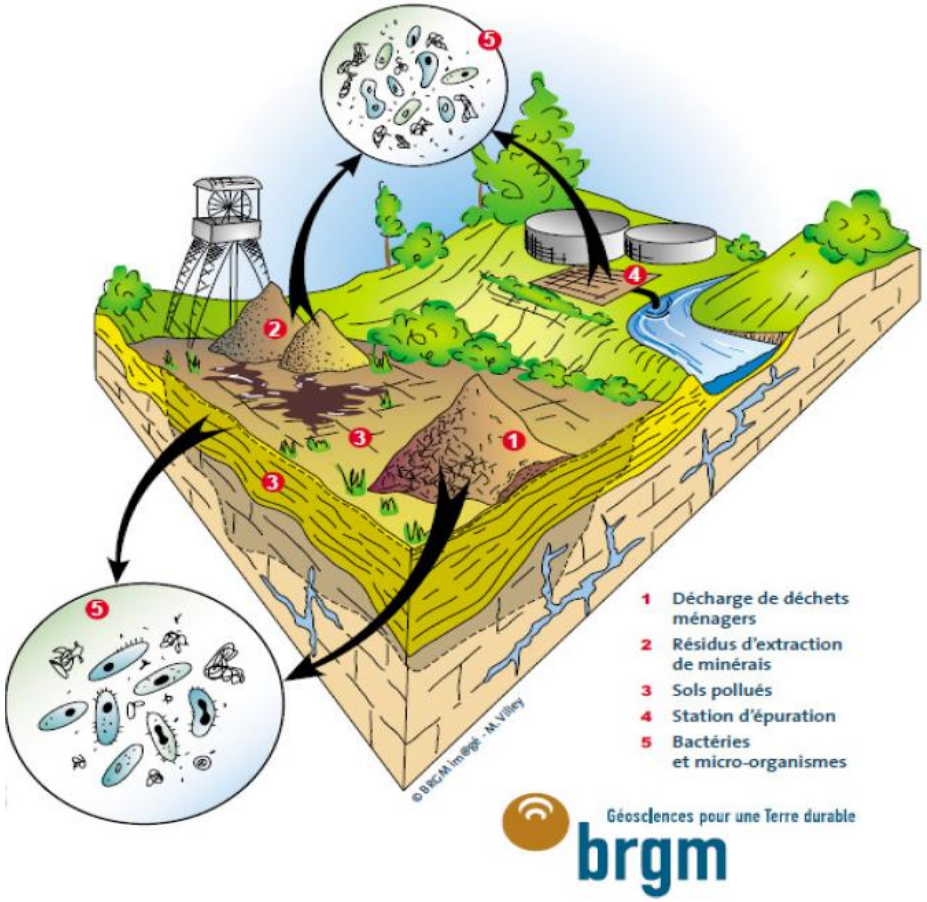


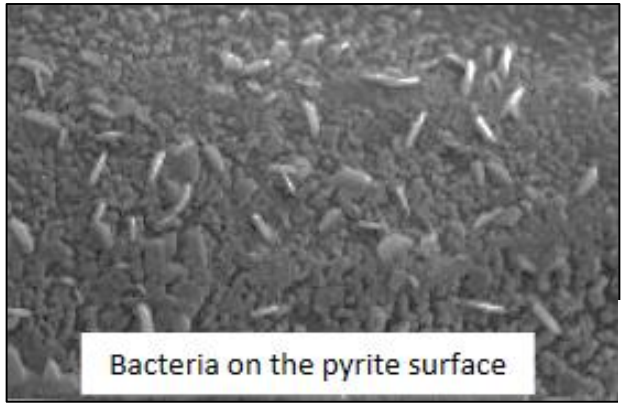
- la lixiviation in-situ (ISL) est également une nouvelle technique d'exploitation en souterrain depuis la surface permettant de dissoudre les minerais en injectant des solutions acides ou alcalines.

Source : Image de Heathgate Resources https://www.world-nuclear.org

DÉVELOPPEMENT D'ECOTECHNOLOGIES POUR LE TRAITEMENT DES MINERAIS ET LA REVALORISATION DES RÉSIDUS MINIERS : LA BIOLIXIVIATION

- L'activité microbienne joue un rôle important dans la décomposition de la matière minérale et dans les grands cycles biogéochimiques pour le carbone, le soufre et le fer.
- Les micro-organismes (bactéries thermophiles) naturellement présents dans les sols et qui peuvent être utilisés pour récupérer les métaux (mise en solution) en stimulant leur développement en réacteurs (recyclage des solutions et régénération).





Source : BRGM, bactéries à la surface de pyrite (image MEB, A.G. Guezennec, D. Morin, Y. Menard, P. d'Hugues)

Sansu plant, Ghana
BIOX technology, Gold Fields

Moderate thermophiles

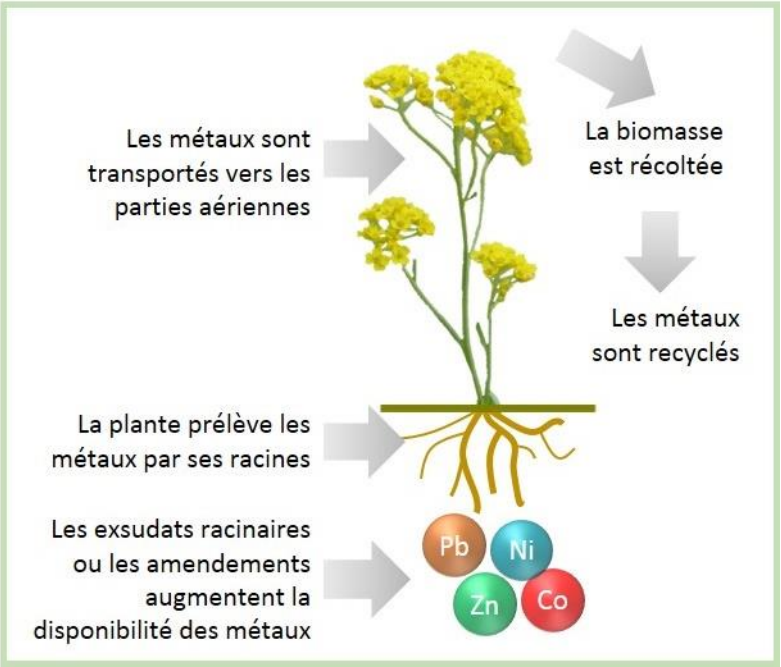
Peñoles plant, Monterrey, Mexico
Mintek-BacTech technology

Extreme thermophiles
80°C

Chuquicamata, Chile
BioCOP™ prototype plant
BHP Billiton technology

PHYTOEXTRACTION, PHYTOMINE OU AGROMINE : PLANTES HYPERACCUMULATRICES DE MÉTAUX

Source : ANR Agromine

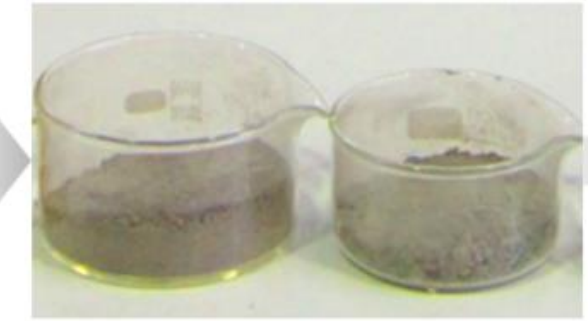


Source : http://www.agromine.org/agromine/

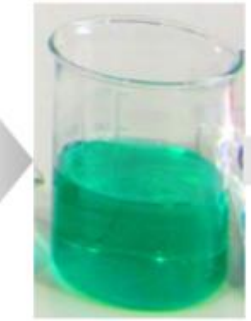
- L'objectif de l'agromine est de cultiver ces plantes pour récupérer le métal accumulé dans le sol et le valoriser
- Plantes hyperaccumulatrices : plantes naturelles capables d'accumuler de grandes quantités de métal contenu dans le sol habituellement utilisées pour la remédiation de sols pollués (souvent spécifique à un métal)
- Exploitation possible de sources non conventionnelles (friches industrielles, résidus miniers, terres peu fertiles…)
- Permet en parallèle l'augmentation de la biodiversité par la végétalisation et la détoxification des sols
- Récupération de la biomasse lors de la récolte, puis calcination et récupération du métal par voie de lixiviation acide sur les cendres

A.-murale accumulatrice de Ni

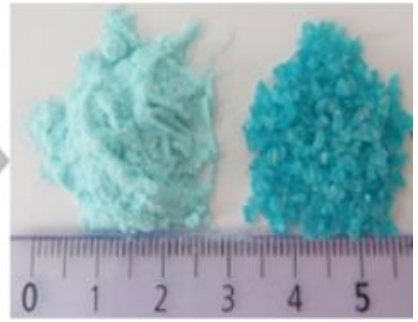
Biomasse broyée-séchée



Bio-minerai (cendres)



Lixiviat de nickel



Sels de Ni ou NiO

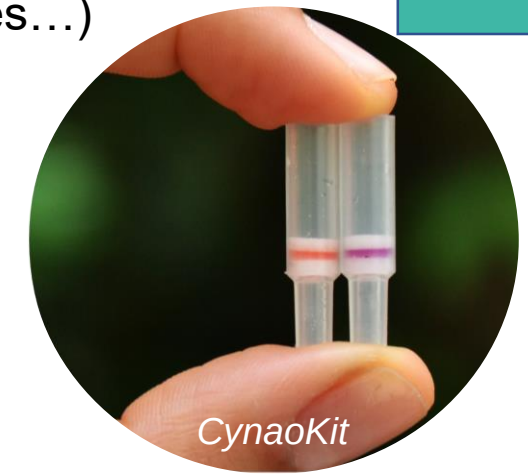
LE MONITORING ENVIRONNEMENTAL PARTICIPATIF

- Impliquer les collectivités locales, parties prenantes, dans la démarche de surveillance pour qu'elles se placent comme « sujets » et non comme « objets » en se rendant acteurs du projet minier
- Consiste à faire intervenir des groupes de citoyens organisés et éclairés dans un processus collectif d'observation et de surveillance (monitoring) de l'environnement et du suivi de la biodiversité
- Par des actions répétées d'observations et de collecte de données scientifiques pour enrichir une base de données et/ou conforter des résultats scientifiques (suivi de la chaine alimentaire, prélèvement de sol, qualité de l'eau, de l'air, mesures sonores, poussières…)

⇨ Démultiplier la capacité de suivi

⇨ Se pose en complément des organismes officiels de mesures

⇨ Gage de transparence de l'industriel



Le monitoring participatif produit de l'information pour :

Mieux documenter et approfondir les connaissances

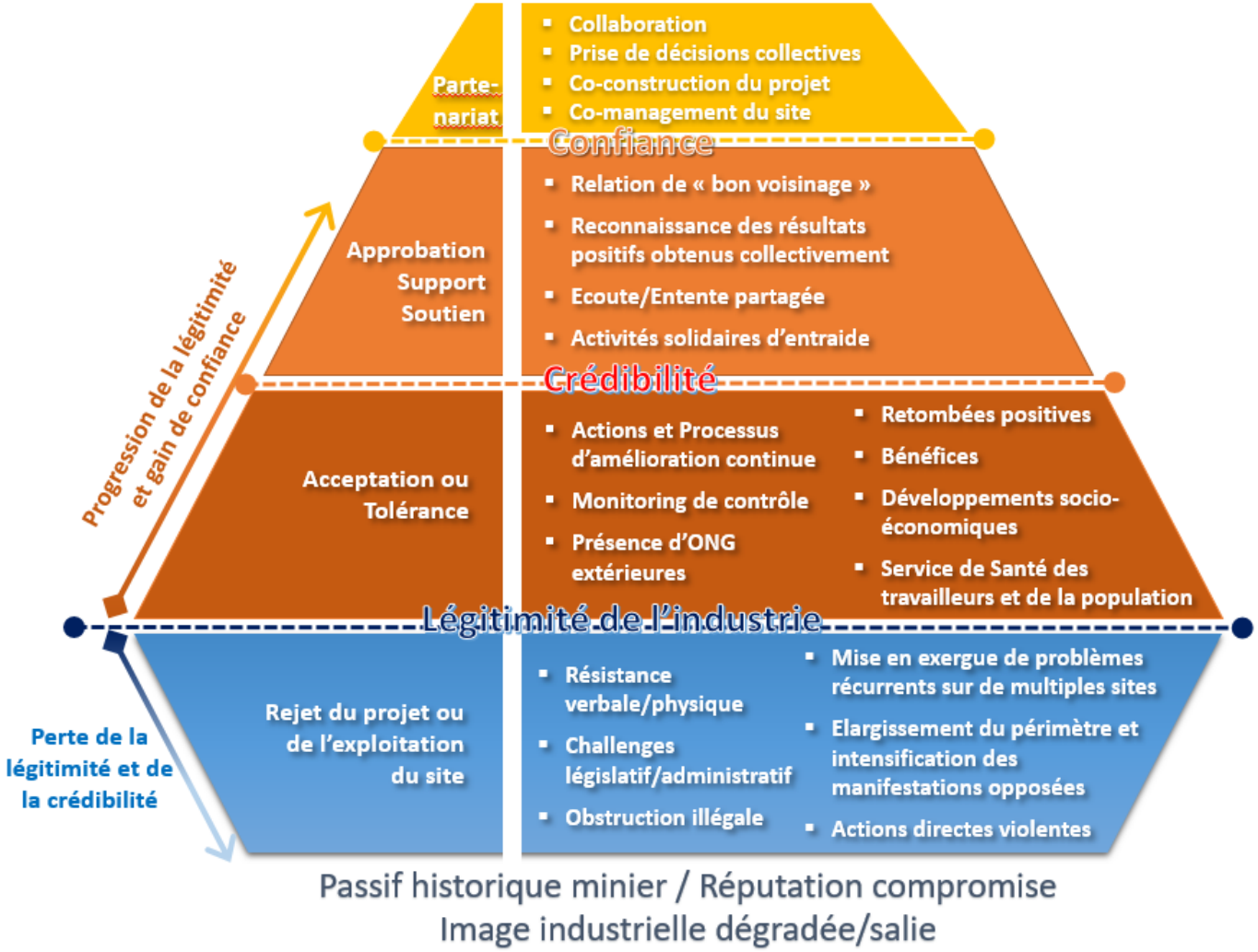
Rendre compte indirectement aux populations

Aider à la décision opérationnelle

Favoriser un climat de confiance et la communication

Géosciences pour une Terre durable
brgm

EN CONCLUSION



Modèle Social Licence to Operate modifié de Boutilier et Thompson, 2011

❑ LES DÉFIS À VENIR :

- Peut-on découpler croissance « verte » et impacts liés à l'extraction des matériaux nécessaires ?
- Tensions à venir sur les approvisionnements en certaines substances critiques, d'autant plus en Europe
- Sensibiliser le grand public à la rationalisation des ressources minérales dont les besoins ne cessent d'augmenter pour assurer le mix énergétique => réduire la consommation, favoriser la part du recyclage et organiser les filières de collecte, valorisation des sous-produits…
- Responsabilité et Transparence du secteur minier
- Maitriser les outils numériques et les nouvelles technologies ou procédés moins invasifs d'exploration et d'exploitation
- Démontrer la capacité d'une industrie minière responsable ⇨ entretenir un climat de confiance dès les phases d'exploration par la concertation, impliquer les différentes parties-prenantes, monitoring participatif et partage des bénéfices