

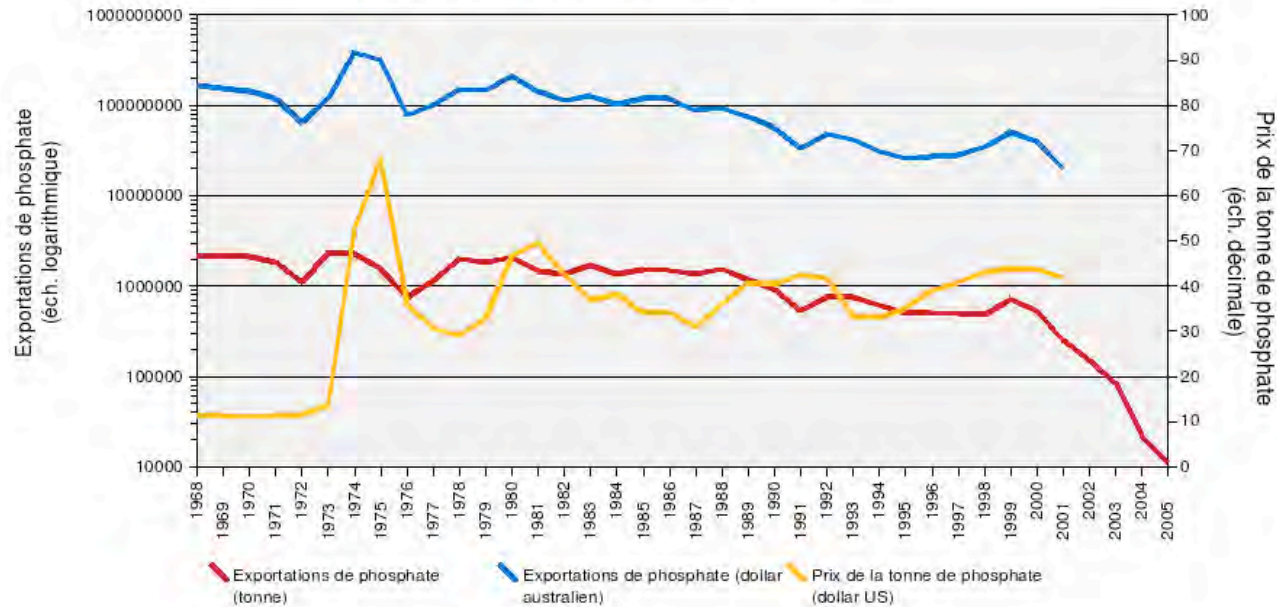
En transition...

Un exemple édifiant: Nauru (21 km²), un pays en faillite.



- 80% de la surface du territoire a été exploitée.
- Entre 1968 and 2002, Nauru exporte 43 Mt de phosphate = 3,6 Milliards \$ (50% bénéfiques)..
- 1974 : 2^{ème} PIB/hab...
- Actuellement, les actifs du pays sont inférieurs à 30 M\$.

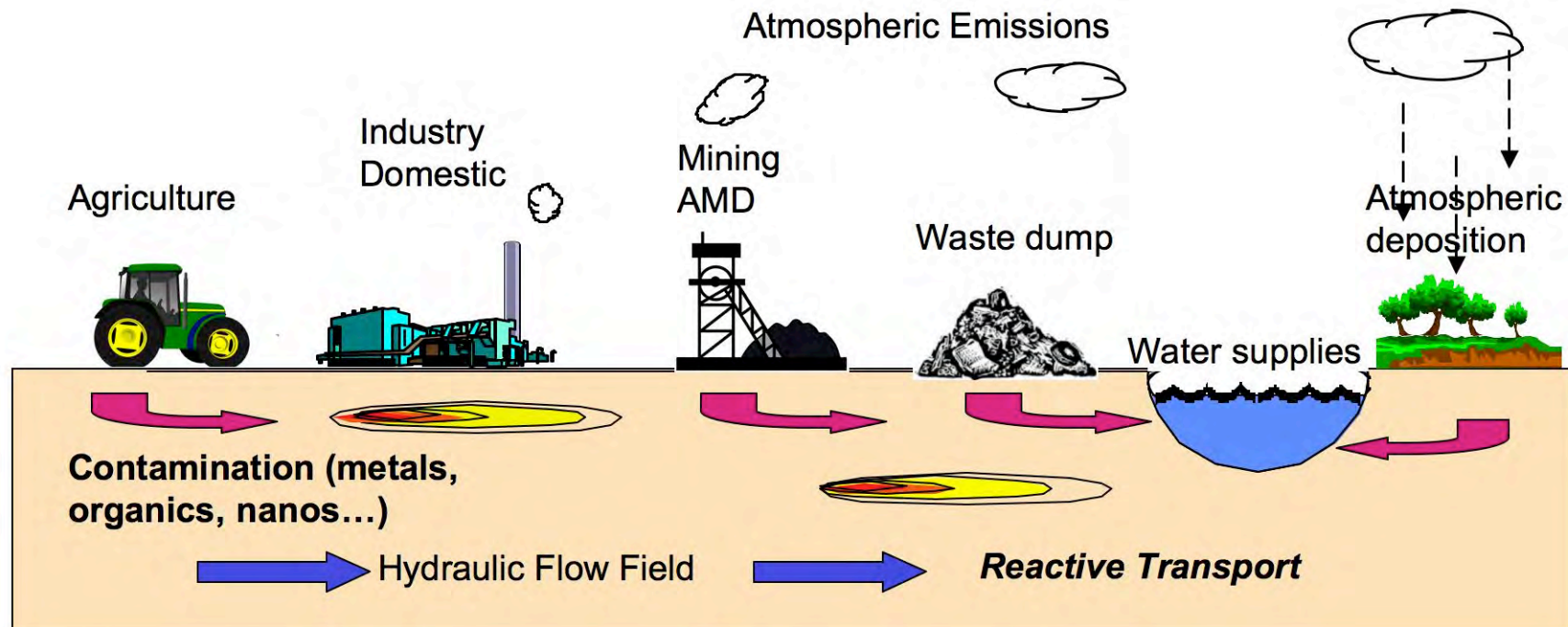
Exportations de phosphate



Réhabilitation des terrains miniers. Exploitation de gisements mineurs et de calcaires (économie?). Reconstruction d'un sol et végétalisation.

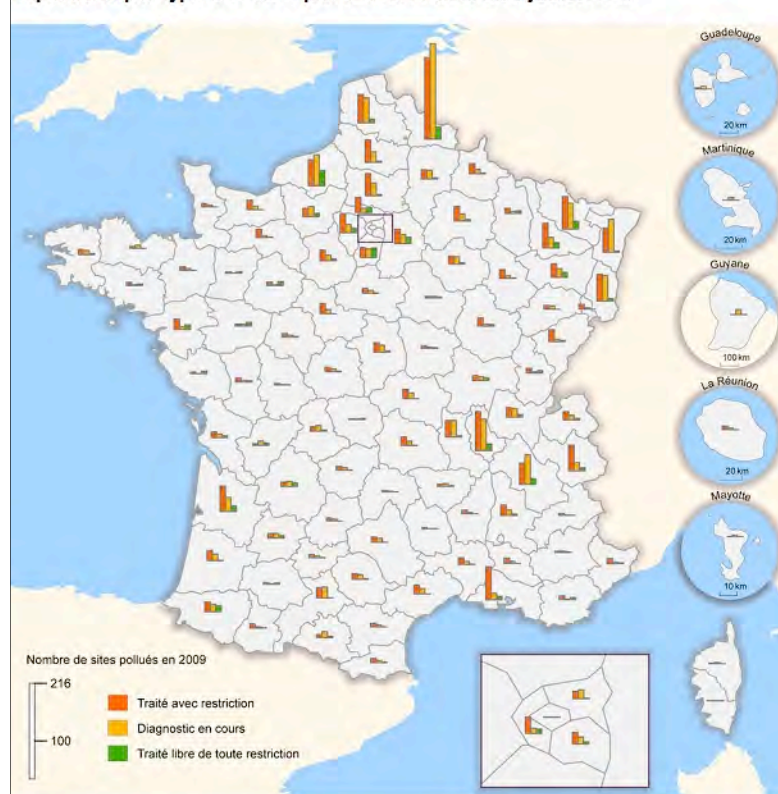
Les nouveaux horizons:
réhabilitation, recyclage,
matières premières secondaires

Les déchets miniers parmi les sources potentiellement contaminantes



(Brown et Calas, 2011)

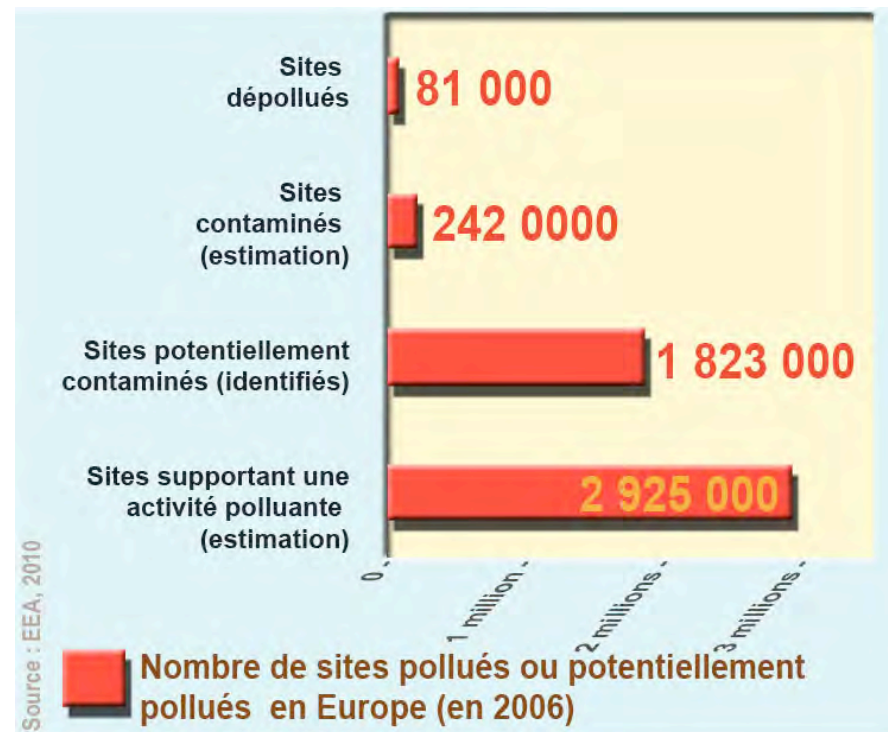
Répartition par type des sites pollués en France au 9 juillet 2009



Source : Meddtl (Basol), 2009.

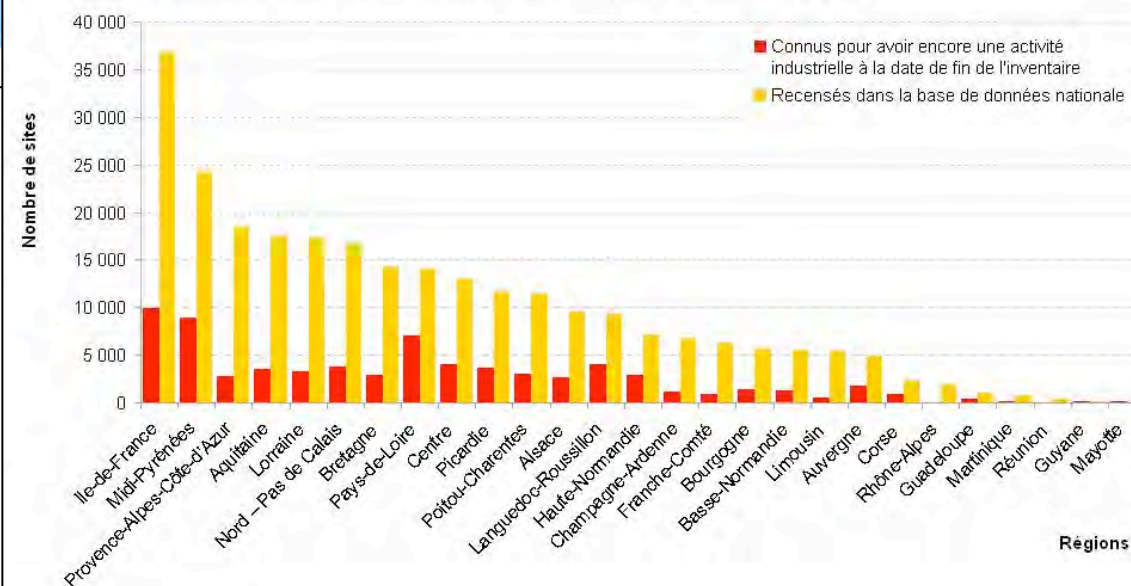
2012 : 4 142 sites et sols pollués recensés en France

Importance des anciens sites industriels susceptibles d'être pollués: 260 000 sites dont on conserve la mémoire (urbanisme, foncier...).



Source : EEA, 2010

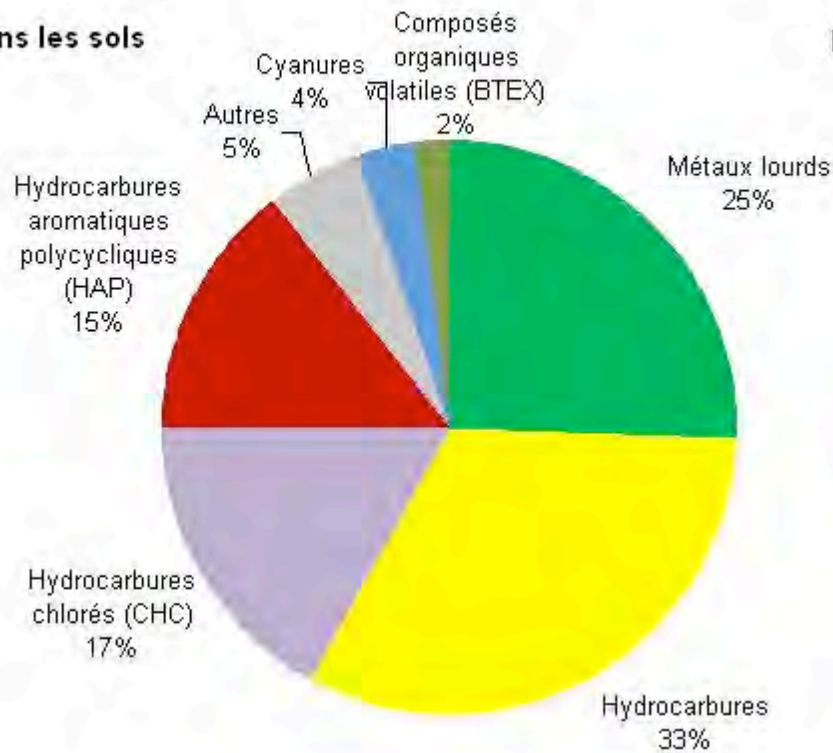
Anciens sites industriels et activités de service susceptibles d'être pollués (Basias), début 2013



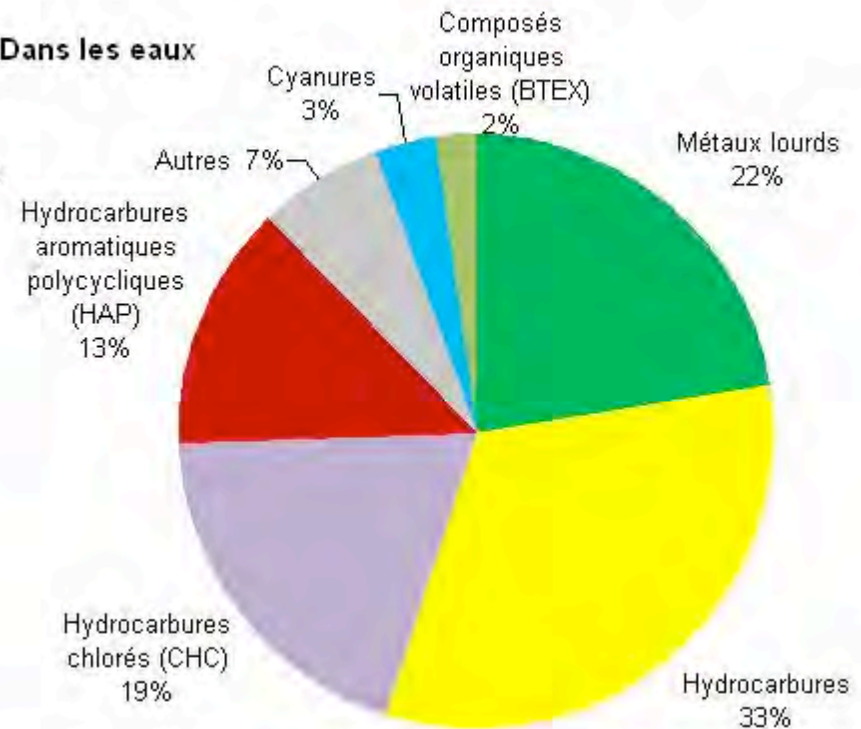
Source : BRGM, Basias 2013.

Poids global des 7 familles de polluants identifiées dans les sols ou les nappes des sites et sols pollués, début 2012

Dans les sols

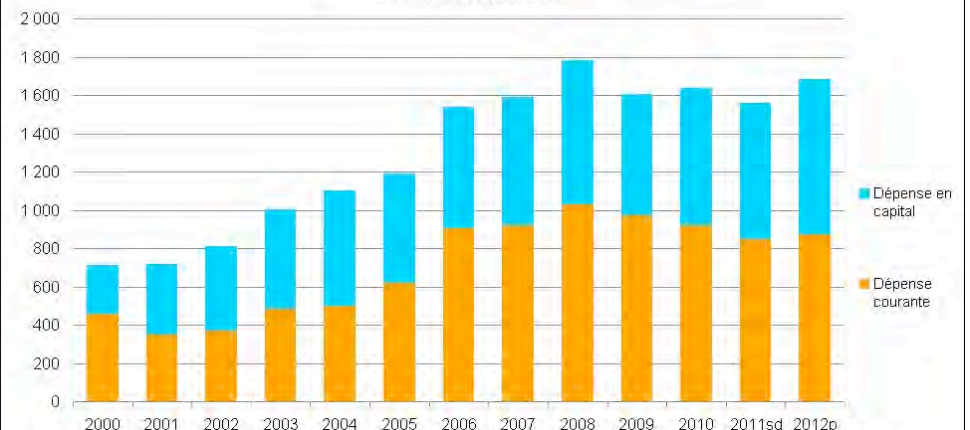


Dans les eaux



La dépense de protection et de dépollution du sol, des eaux souterraines et des eaux de surface en France

En millions d'euros courants



60% secteur privé
30% secteur public
10% Europe

1. Réhabilitation des anciens sites miniers



Kidd Creek, Ontario



Nouveau Mexique

Autrefois, l'arrêt de l'exploitation minière s'accompagnait d'un abandon en l'état des travaux, le matériel non transportable étant abandonné sur place.

Avec le temps, les minerais vont évoluer (dissolution, altération...).



Ancienne mine (Pb) de Cwmystwyth(UK)



Pierrefitte (65)

2006



2008



Mine de Plains (GB)

- Une exploitation minière correspond à une activité temporaire.
- Elle implique un impact environnemental qui doit être évalué.
- Actuellement, la préparation et la planification de la réhabilitation d'un site minier font partie du schéma industriel présenté pour obtenir un permis d'exploitation.

- Plusieurs étapes:
 - arrêt de l'activité,
 - déclassement
 - réhabilitation/restauration (décontamination, assainissement et aménagement du paysage, restauration des écosystèmes, réhabilitation avec stabilisation des écosystèmes)
 - suivi à long terme (capteurs environnementaux, traitement des eaux d'exhaure, maintenance des terrils...).
- Des problèmes posés par les sites orphelins, notamment dans les zones densément peuplées.

La gestion du volume: les carrières de matériaux (granulats...)



1996



2006

Ancienne carrière de La Péruse (16)

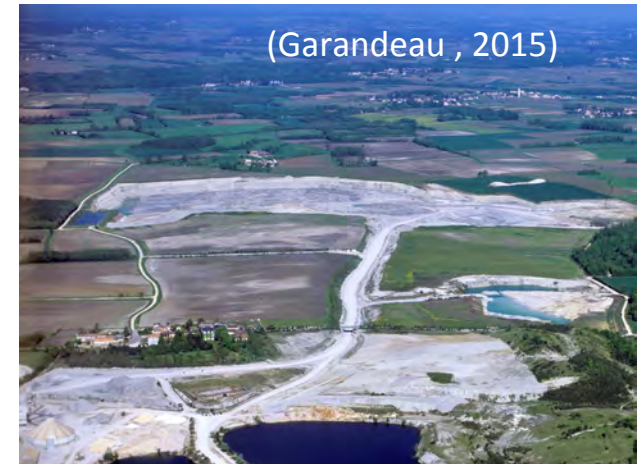
Volumes de granulats extraits (15 Gt/an) commensurables avec les taux d'érosion mondiale (21 Gt/an).



1990



1996



2006

Réaménagement progressif de la carrière de Cherves/Cognac (16)

Les matériaux extraits étant habituellement stables dans les conditions de surface (granulats, calcaires, argile, gypse...), on envisage une restauration vers des espaces libres (biodiversité) ou à vocation agricole, forestière, loisirs ou nouveaux espaces industriels/utilitaires.

Cas particulier des carrières situées en zones humides: restauration d'écosystèmes fragiles.



Différentes étapes de réhabilitation d'une carrière de kaolin

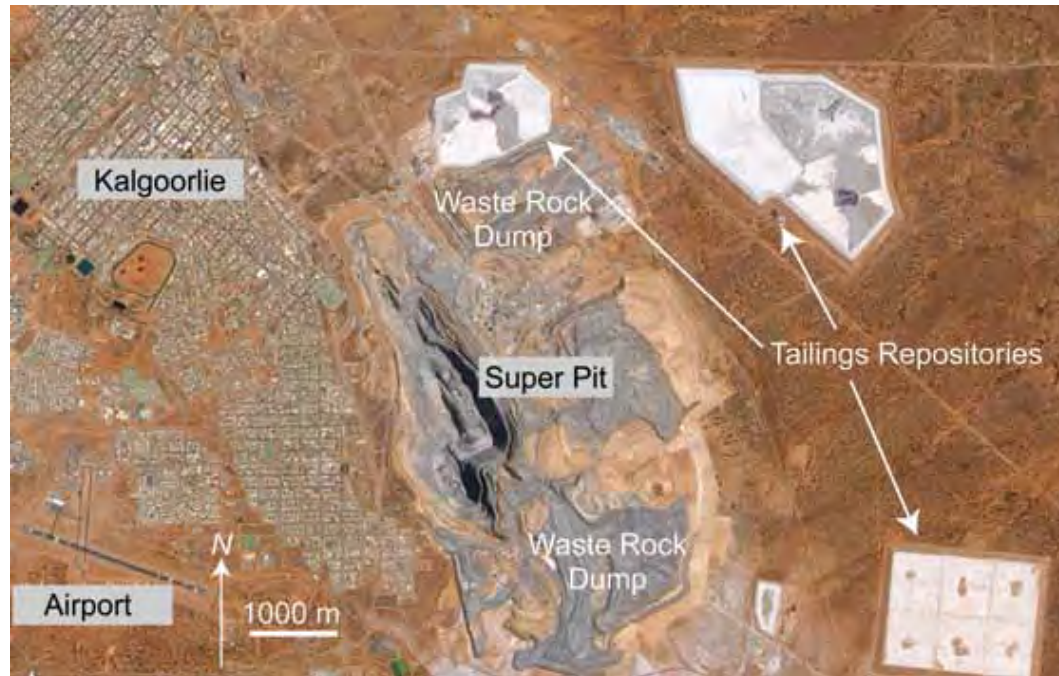
La gestion des sources de contaminants: les mines métalliques



Timmins/Kidd Creek (Canada)

Un problème qui va s'exacerber dans le futur, avec un passage progressif vers des gisements de plus grande taille et des minerais moins concentrés, générant davantage de déchets miniers.

Le point de départ

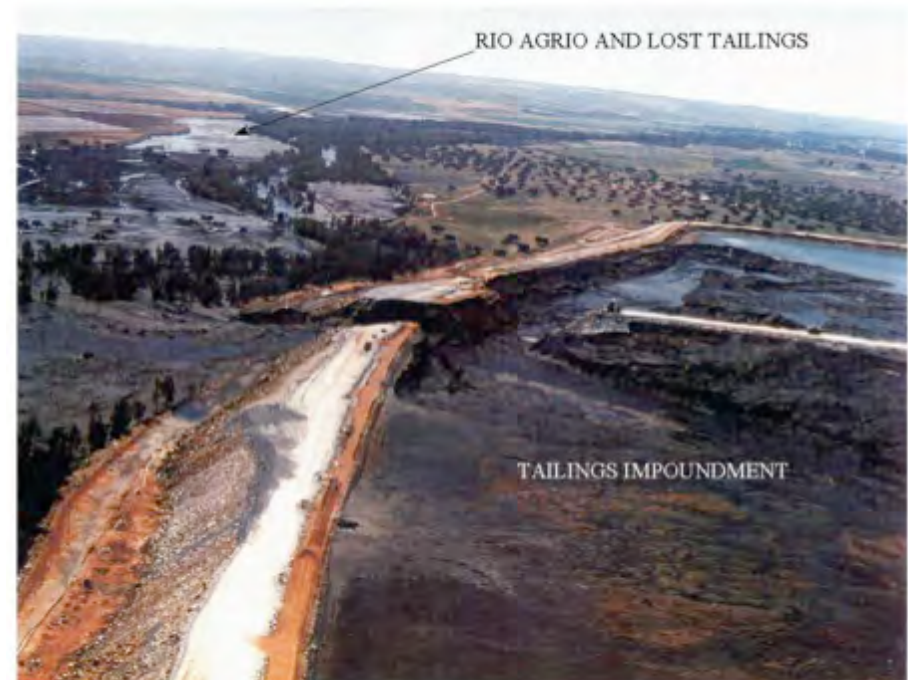
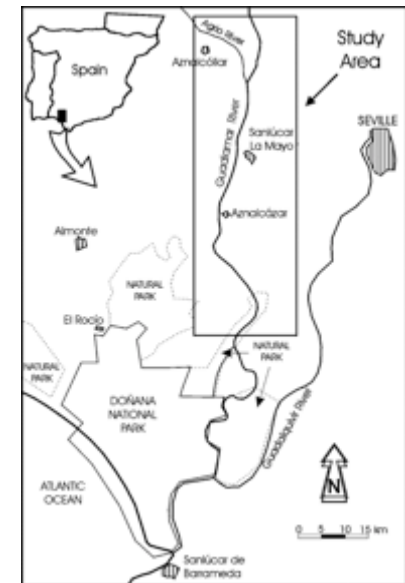


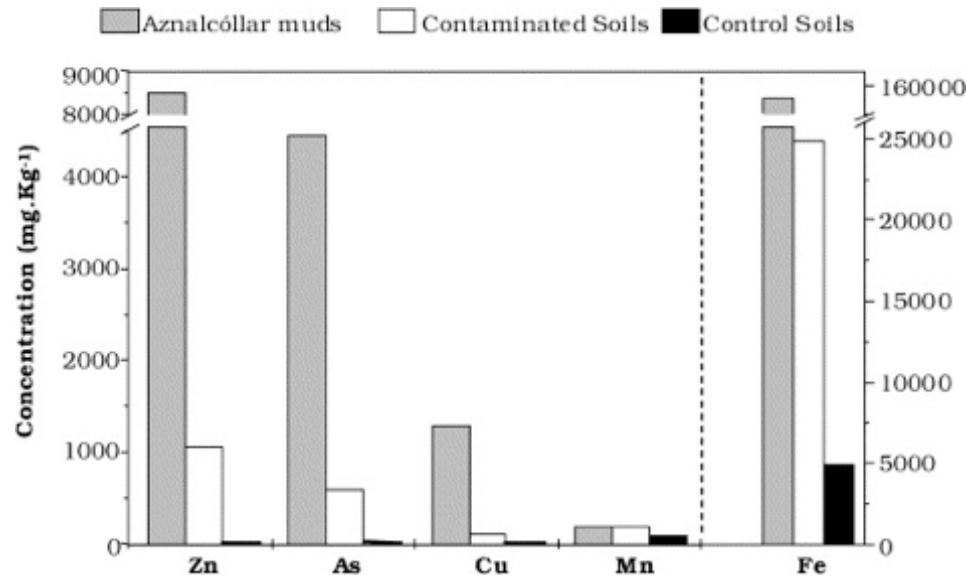
- *Exploitation minière*: résidus de découverte et infrastructure (stériles francs: semblables aux roches locales)
- Résidus d'exploitation (stériles de sélectivité)
- Résidus de traitement de minerais (laverie, flottation): granulométrie fine, surfaces activées = envolements, réactivité ...
- Résidus des traitements métallurgiques (scories, laitiers)

Gestion à court terme: catastrophes technologiques

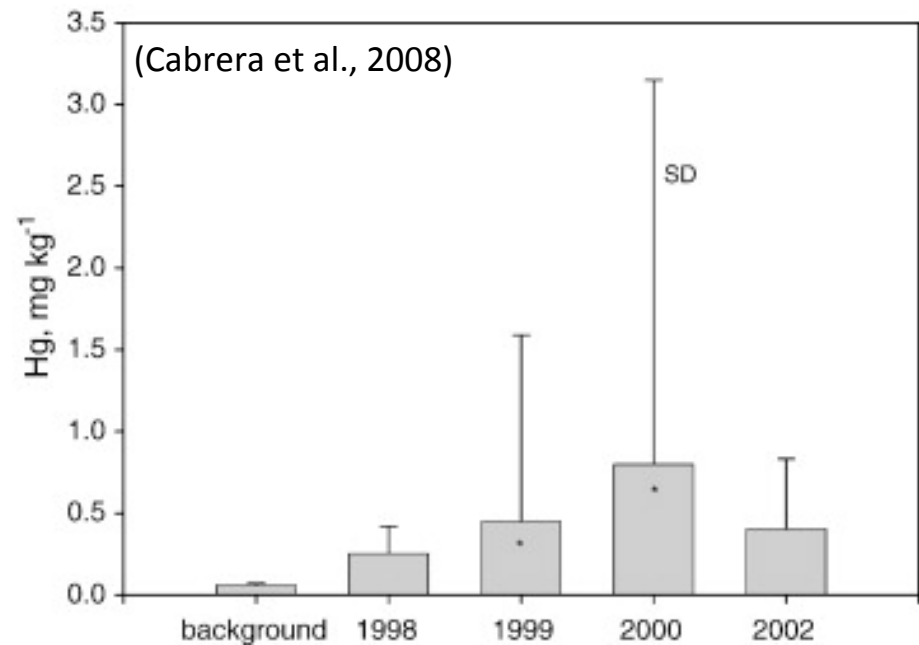
La catastrophe d'Aznalcollar (1998, Andalousie)

- Rupture de digue contenant des déchets miniers (Rio Tinto): Pb, Zn, As...
- 3 Millions m³ boues et 4 Millions m³ eaux acides
- 4m sur >4000 ha, 80 km de rivière affectés





Contamination chimique



Rémanence chimique (réactivité des sulfures)

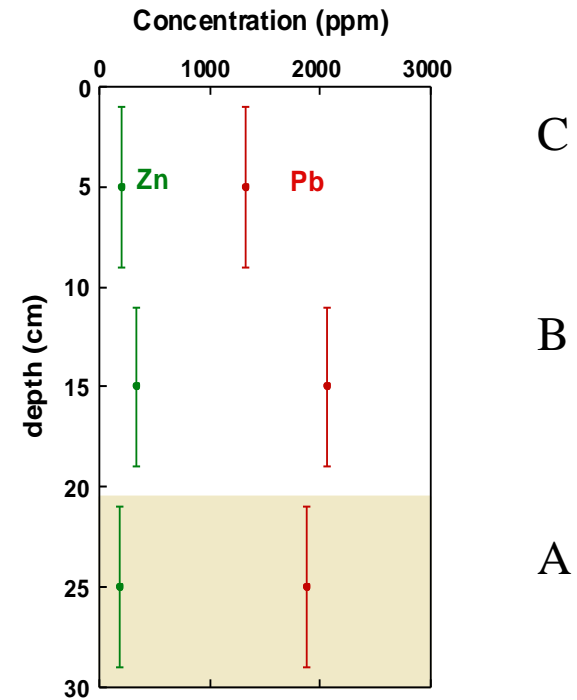
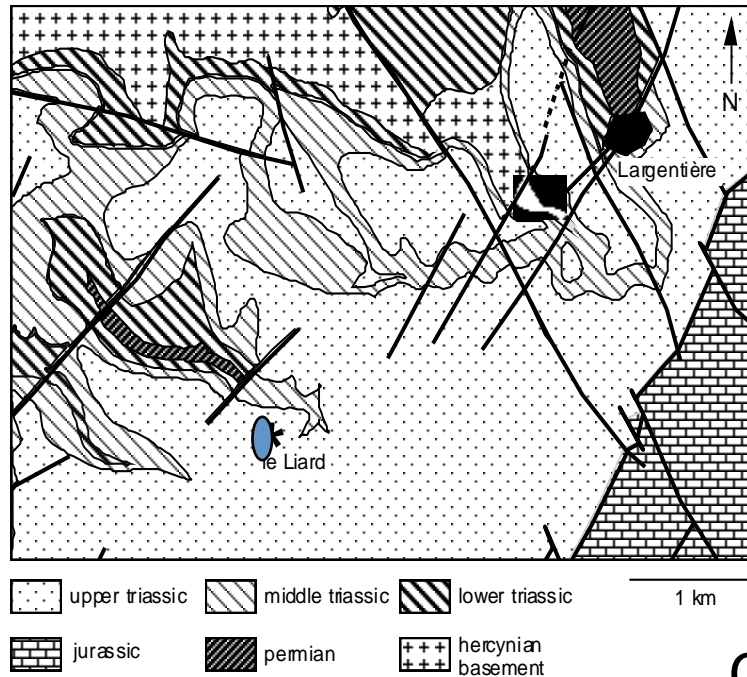
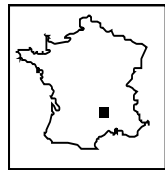
- Evacuation, dès les premiers jours, des déchets miniers rejetés dans la rivière : limitation de l'oxydation des sulfures métalliques mais problèmes hydrologiques.
- La contamination a baissé dès les premières années après la catastrophe, mais reste importante (par ex. 16 mg/L de Zn).

Limiter les impacts à long terme des exploitations historiques

- Exploitation de certaines mines depuis plusieurs siècles : impacts potentiels sur l'environnement.
- Certains résidus miniers restent riches en métaux (selon niveaux actuels) et représentent une ressource potentielle.
- Mise en sécurité des sites.
- La prise en compte de la dimension « retraitement/ recyclage » des déchets lors de la réhabilitation d'anciens sites miniers va dans le sens d'une gestion intégrée et optimisée.

A encore plus long terme : les anomalies géochimiques

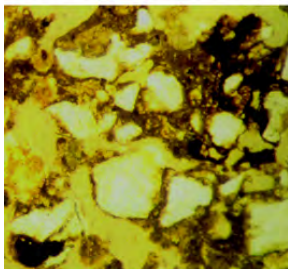
Sols développés sur des grès dans la région de Largentière (07) : concentration naturellement élevée en plomb (anomalie géochimique).



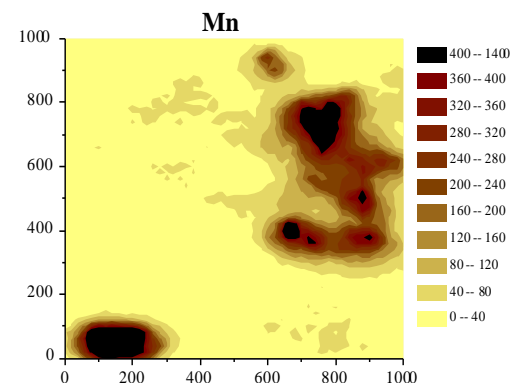
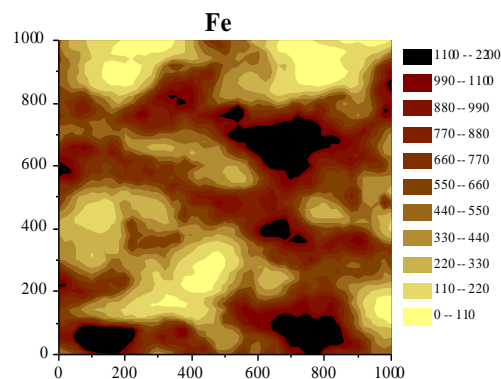
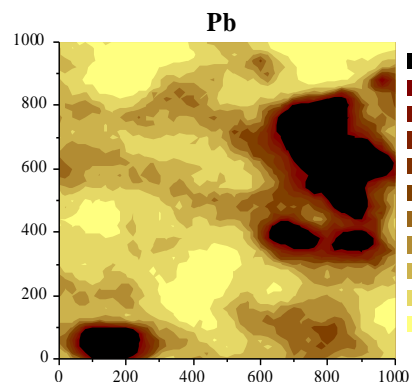
Concentrations en Pb et Zn
le long d'un profil

(Morin et al., 2000)

PHOTOGRAPHIE OPTIQUE

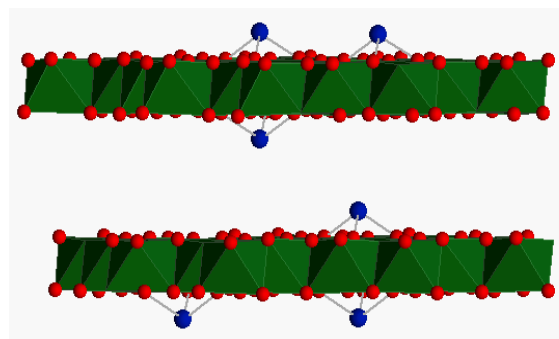
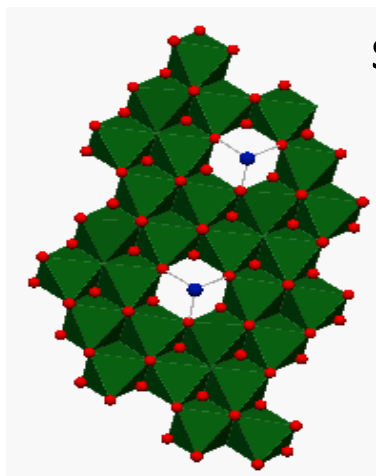


Distribution spatiale de Pb, Fe et Mn



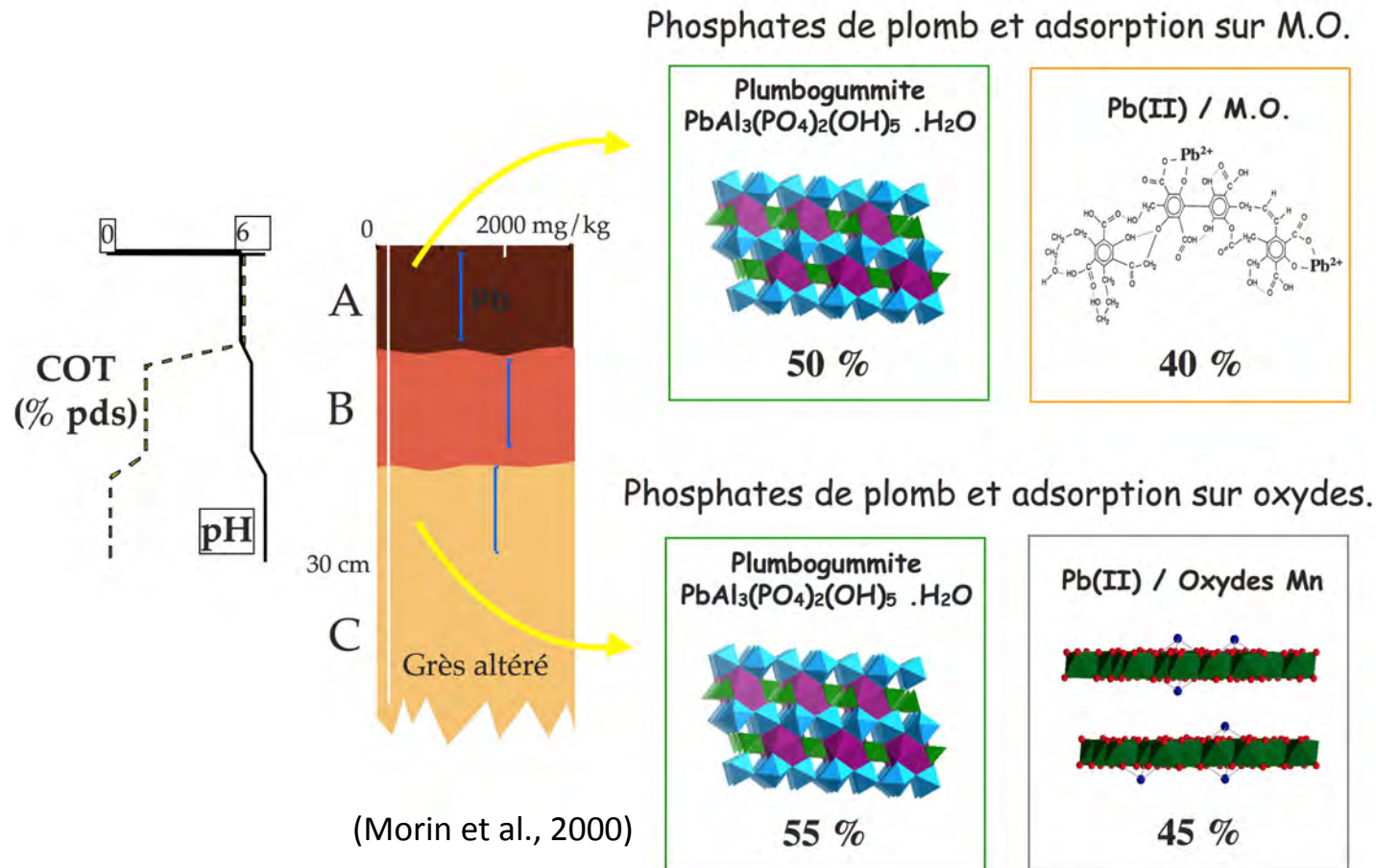
Distances en μm

Micro-fluorescence X sur rayonnement synchrotron : localisation des constituants du sol.



Piégeage sélectif de Pb sur des oxydes de Mn (structure lacunaire).

Modification de la spéciation de Pb dans le sol



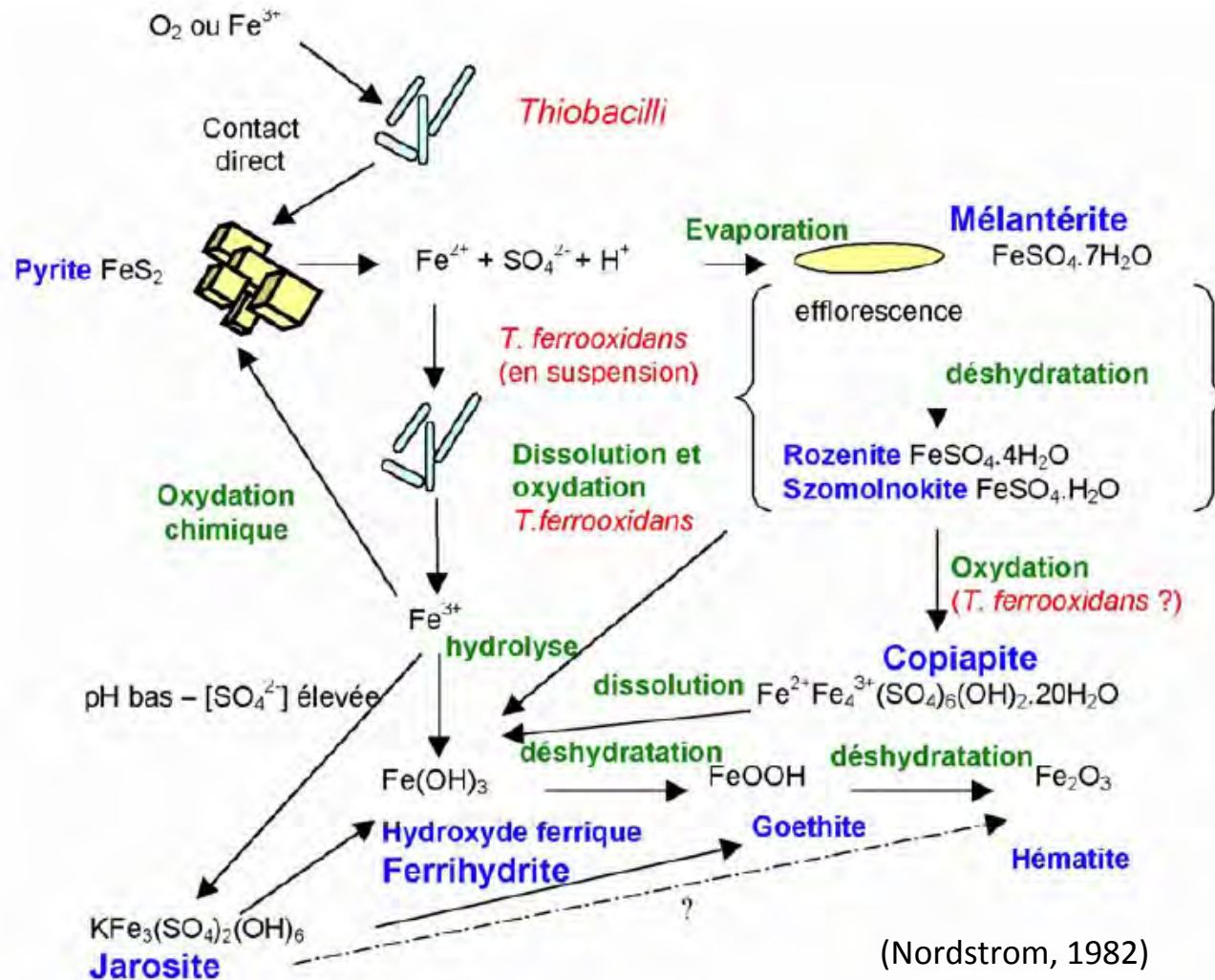
Le piégeage du plomb dans une phase peu soluble retarde sa dispersion dans l'environnement.



Rio Tinto... d'où le nom

(C. Stoker, 2015)

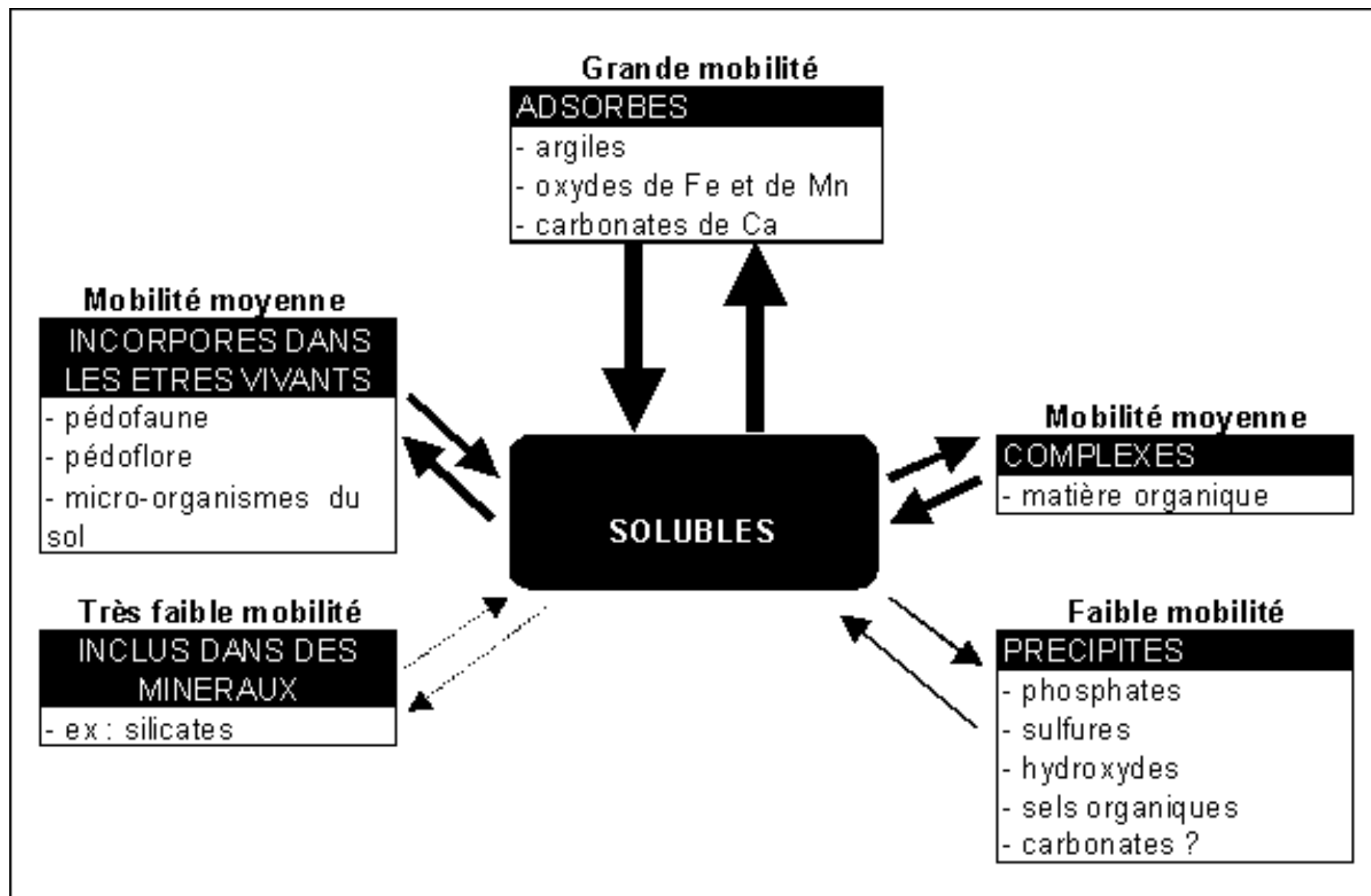
Un impact minier fréquent: les drainages miniers acides



Des actions de réhabilitation variées

- Transfert, réaffectation, démolition des bâtiments
- Fermeture des puits et des galeries
- Stabilisation des ouvrages souterrains
- Remédiation des déchets miniers et des eaux d'exhaure
- Remodelage du paysage et reconstitution d'un écosystème stable au niveau des stériles et des résidus miniers

Les métaux lourds dans les sols



Méthodes de remédiation chimique



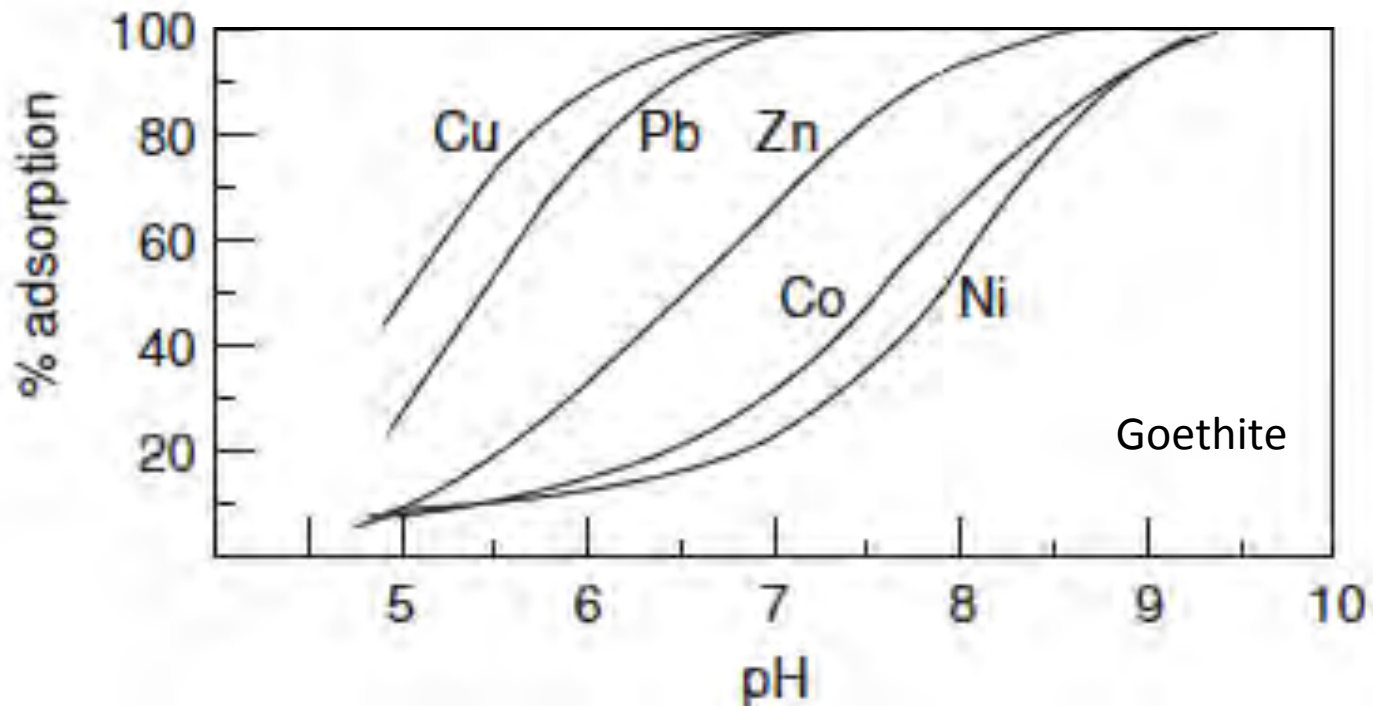
Lessivage (percolation ou agitation) in situ ou en usine, à différentes températures et sous différentes conditions redox.

Utilisation d'acides, bases, agents complexants...



ART Engineering LLC

Le piégeage des cations aux interfaces



L'adsorption des cations est très efficace en pH neutre ou basique. Variation 0-100% en fonction du pH.



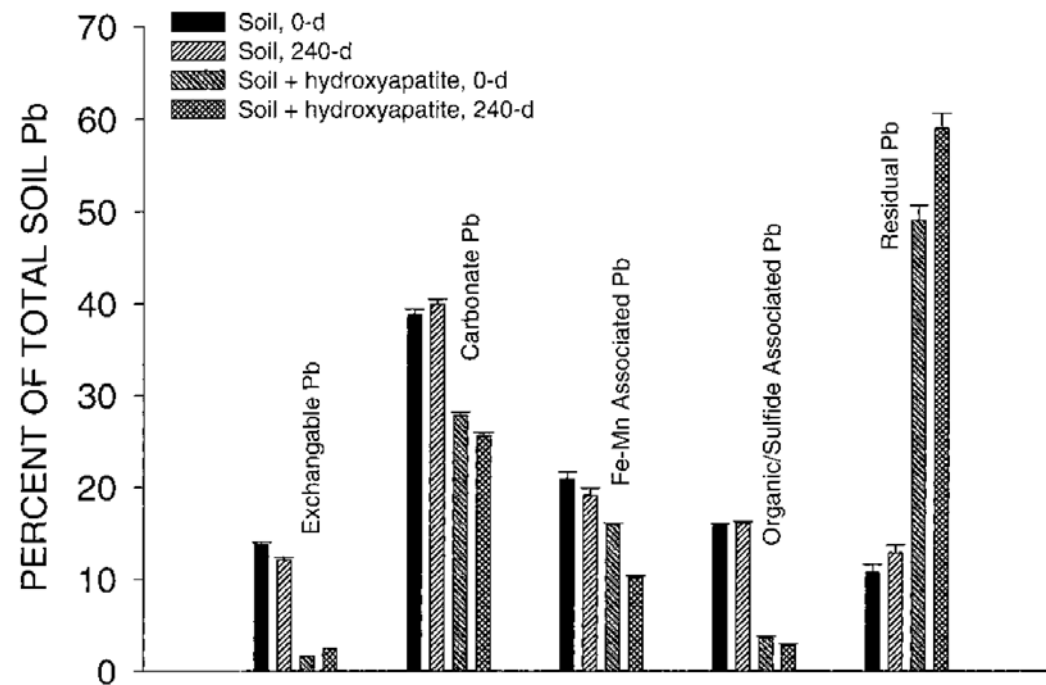
Stabilisation à la chaux

Augmentation du pH (sur la photo: de 3.5 à 8.5) par ajout de chaux ou CaCO_3 (remédiation de drainages miniers acides).

Formation d'oxydes de Fe^{3+} amorphes (insolubles) : piégeage des métaux lourds par précipitation ou adsorption.

Les boues obtenue sont des déchets à gérer.

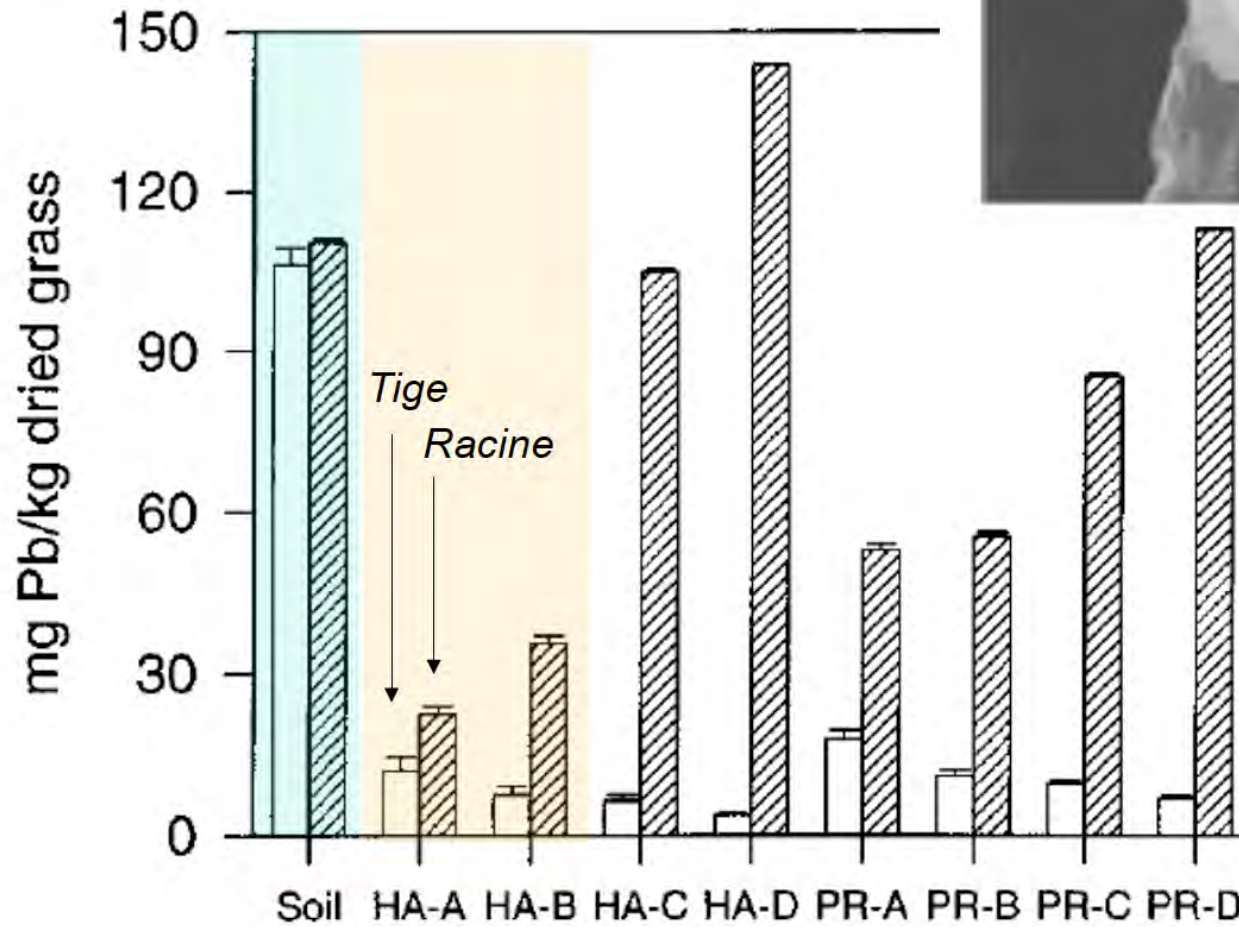
Utilisation des phosphates pour amender les déchets miniers



Ryan et al., 2001

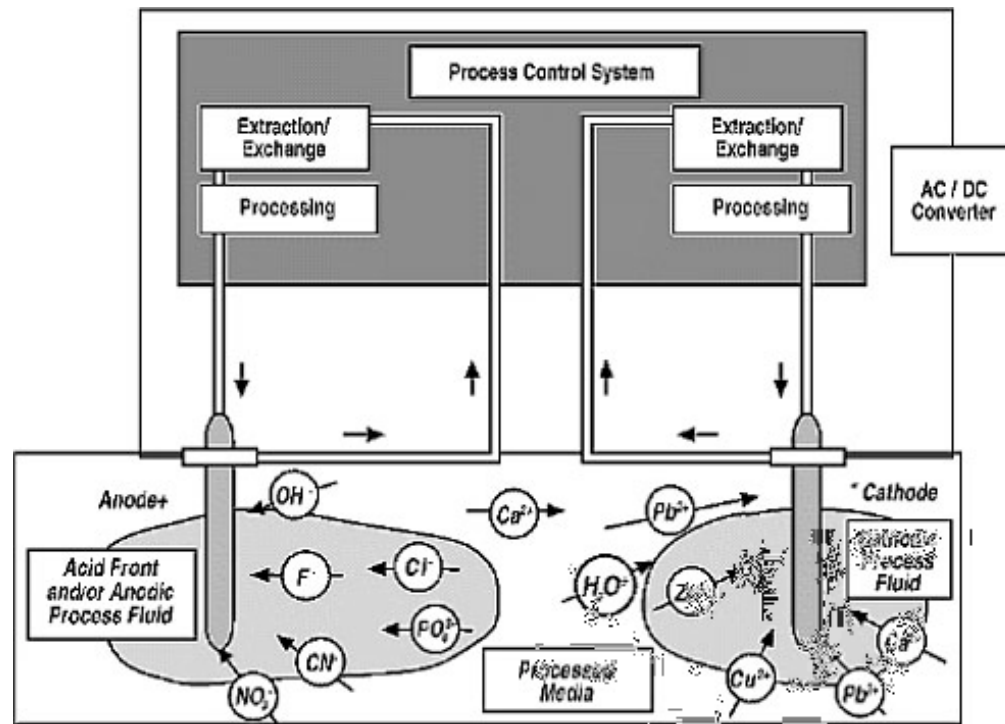
- Diminution de la solubilité des métaux lourds de 85-99% (Cd, Cu, Pb, et Zn)
- Phosphates Pb peu solubles (produit de solubilité de l'ordre de 10^{-70} - 10^{-85} pour la pyromorphite, $Pb_5(PO_4)_3Cl$)

Immobilisation *in-situ* du plomb par des amendements phosphatés (hydroxyapatite HA)



Laperche et al. ES&T 1999

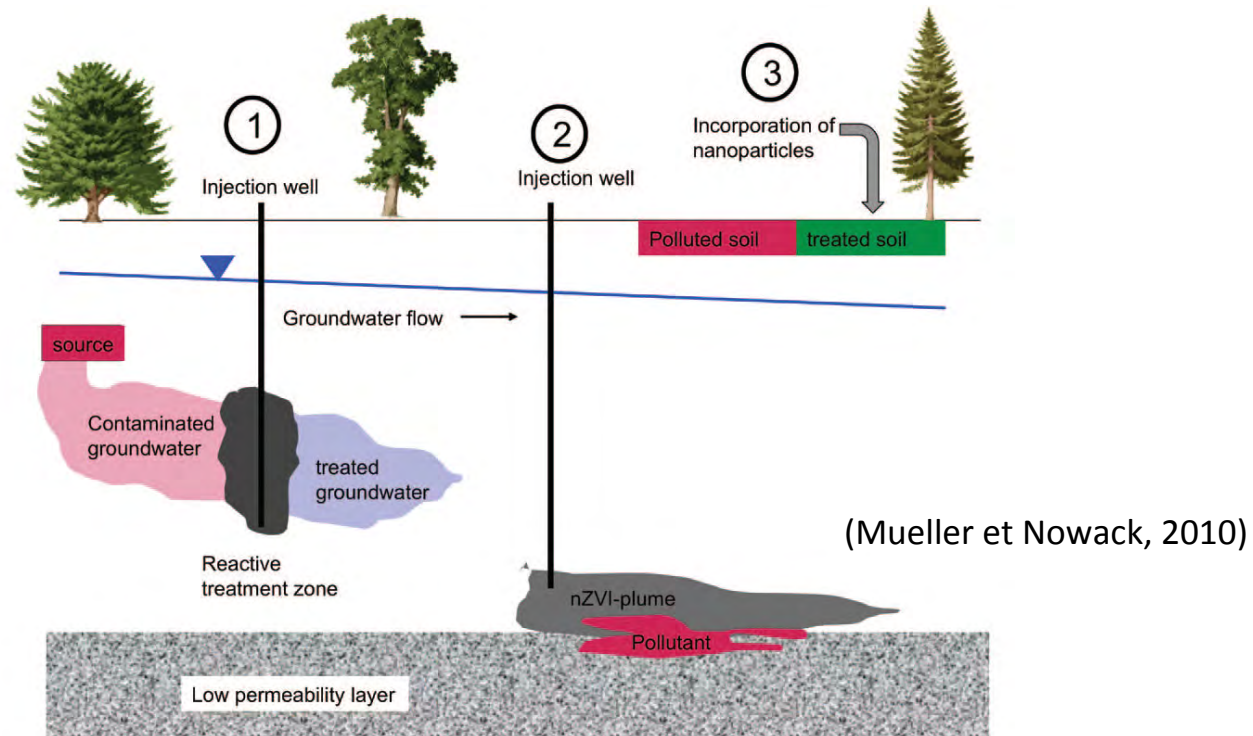
Méthodes physiques de remédiation



Méthodes électrocinétiques sur des milieux relativement humides (15-20 %).

De plus, pH acide généré à l'anode: remobilise les cations adsorbés pour les collecter à la cathode;

Les apports des nanotechnologies

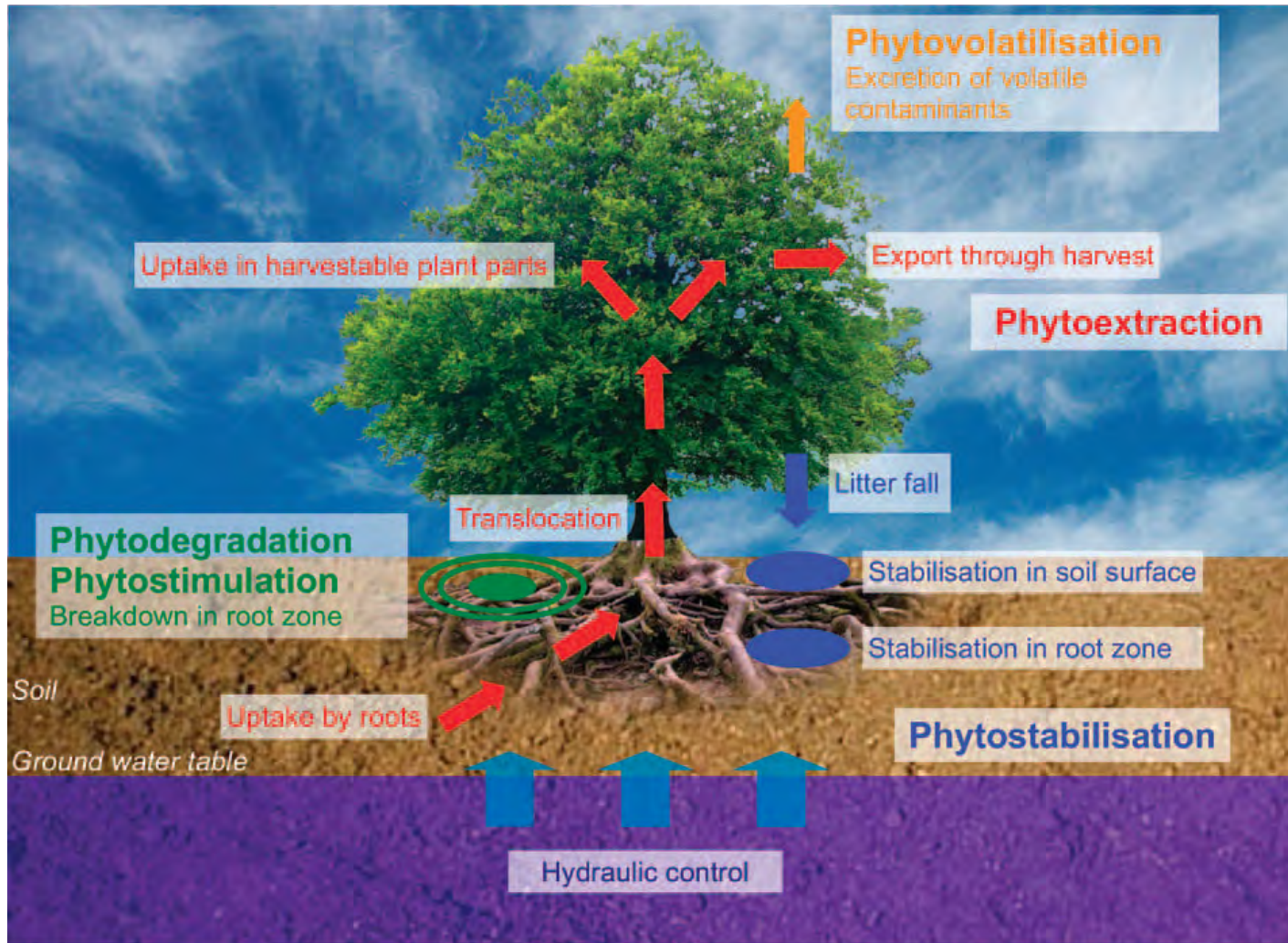


Technologie de remédiation in situ d'environnements pollués en utilisant des nano-particules de Fe (réactions redox: As...) ou d'oxydes de fer (adsorption : métaux lourds).

Bioremédiation

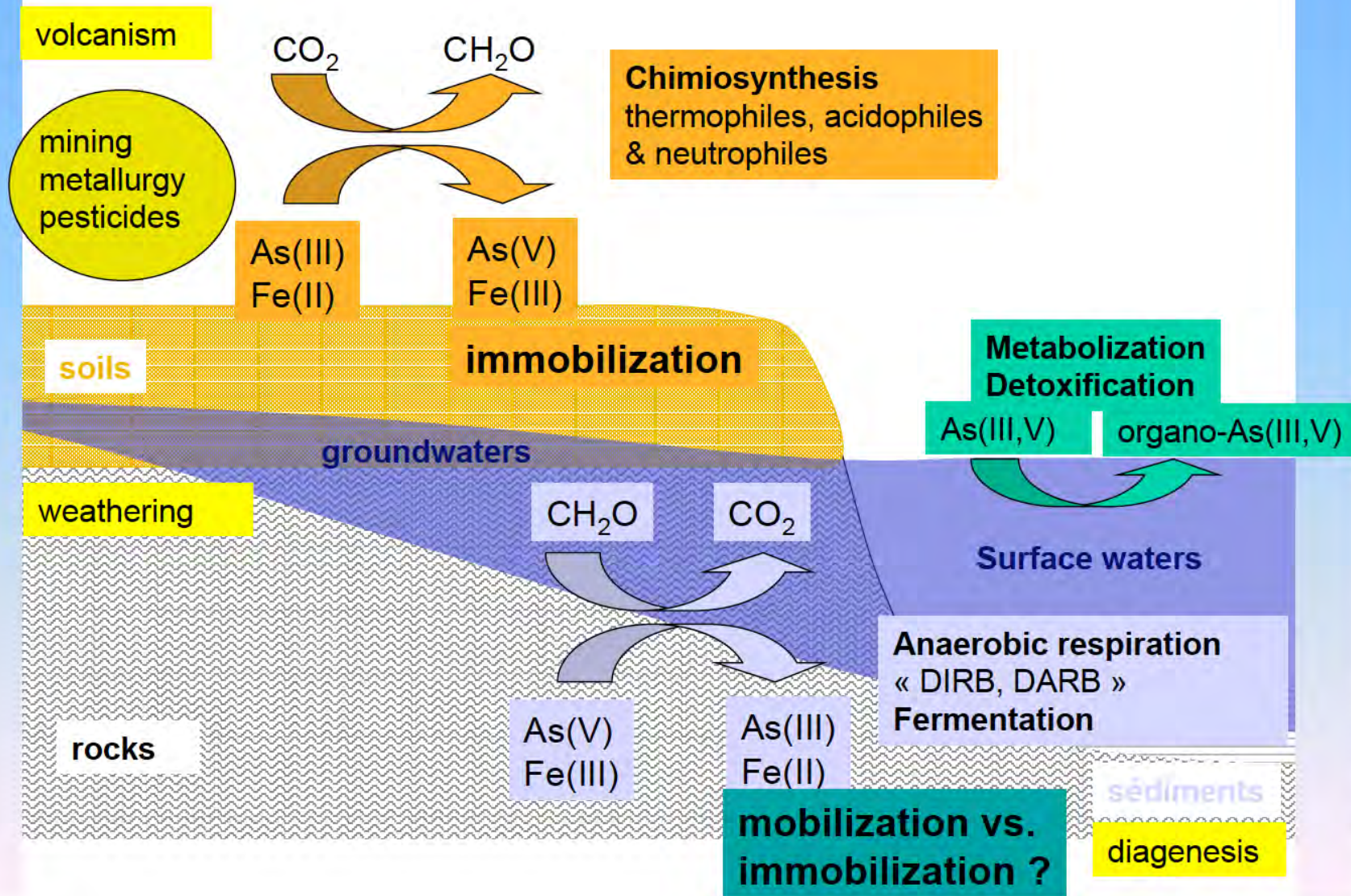
- la végétalisation des terrils et des dépôts de déchets limitent la dispersion des poussières par le vent
- bioaccumulation des métaux lourds par les plantes et les animaux : impacts possibles sur les populations ;
- cas extrême des métallobytes, adaptées (espèces facultatives) ou nécessitant (espèces obligatoires) des concentrations élevées en métaux lourds, qui vont exclure/sécréter ou incorporer ces métaux lourds dans la biomasse

Bioremédiation des sols contaminés



(Tack et Meers, 2010)

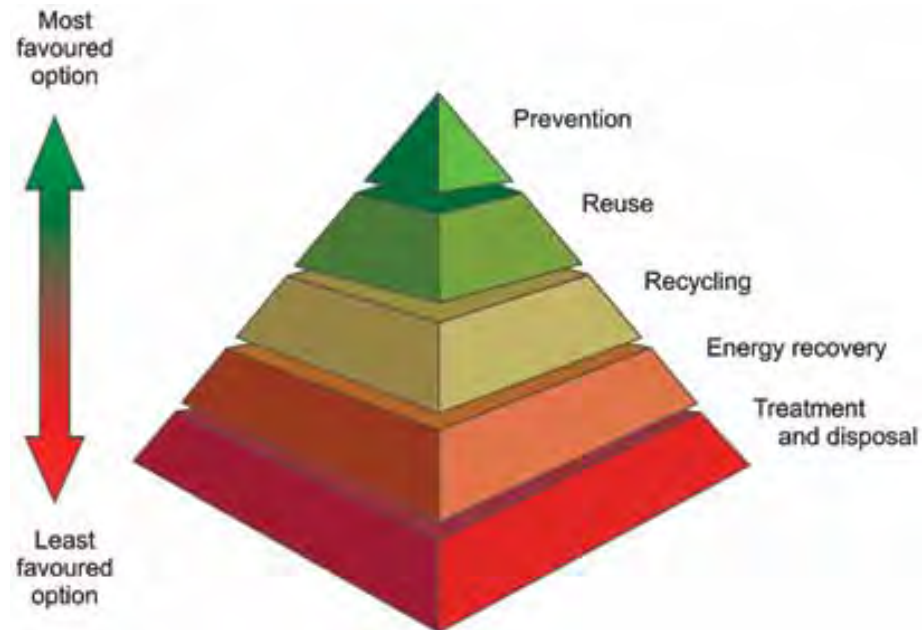
Influence of microbial metabolisms on Fe and As cycling



(Morin, 2012)

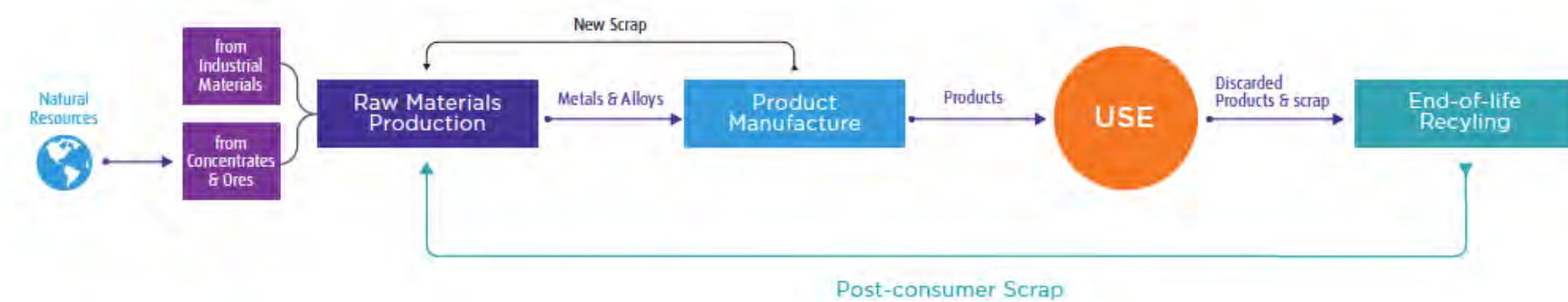
2. Recyclage

- Mode de traitement prioritaire des déchets (Directive cadre européenne de 2008)
- L'objectif 2020 : >50 % de recyclage/réemploi pour le papier, métal et verre des déchets ménagers et 70 % pour les déchets de construction (hors matériaux géologiques)
- Principe de la responsabilité élargie des producteurs/distributeurs : organisation en amont de la gestion des déchets.

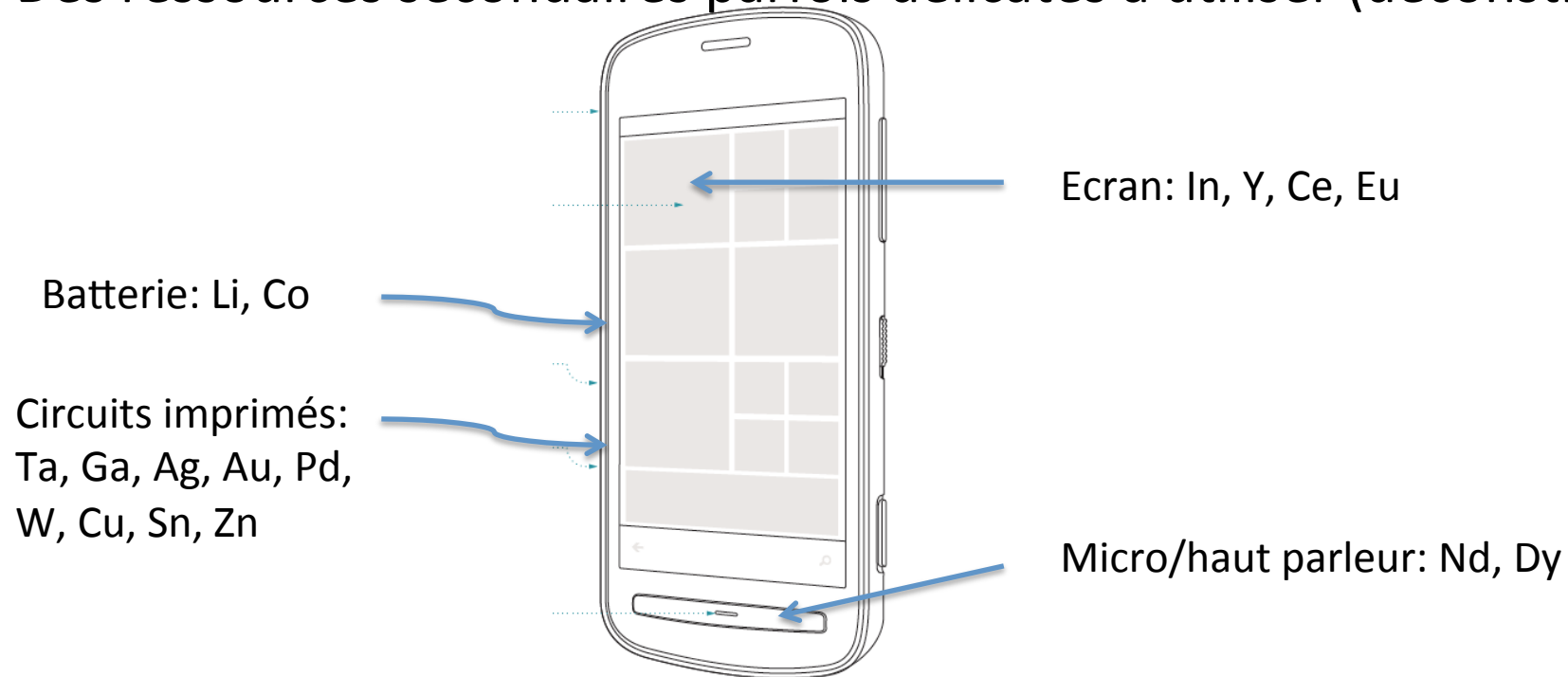


(EU, 2008)

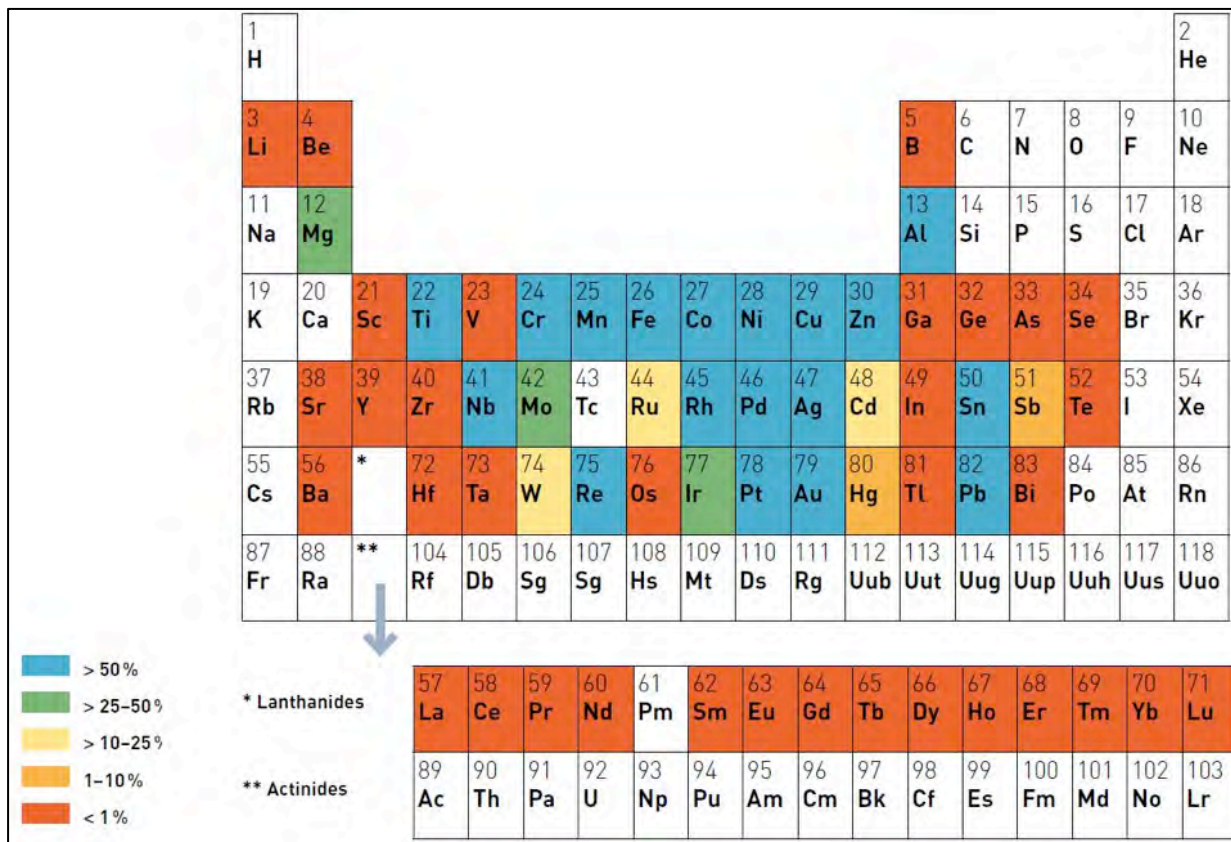
Le recyclage: un circuit complexe, une boucle souvent ouverte



Des ressources secondaires parfois délicates à utiliser (déconstruction).



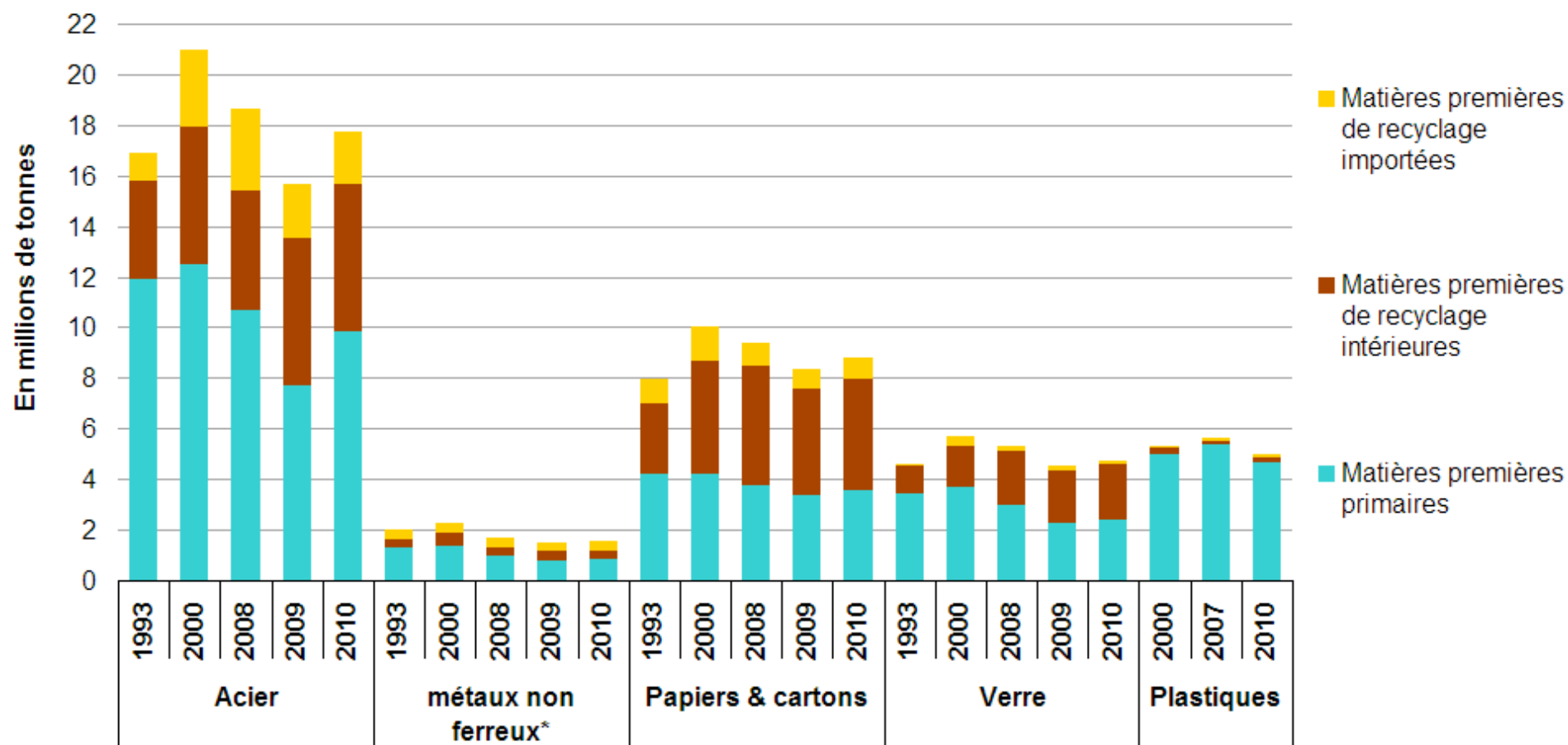
Recyclage, re-usage: les nouveaux horizons



Taux de recyclage des éléments (surtout des métaux).

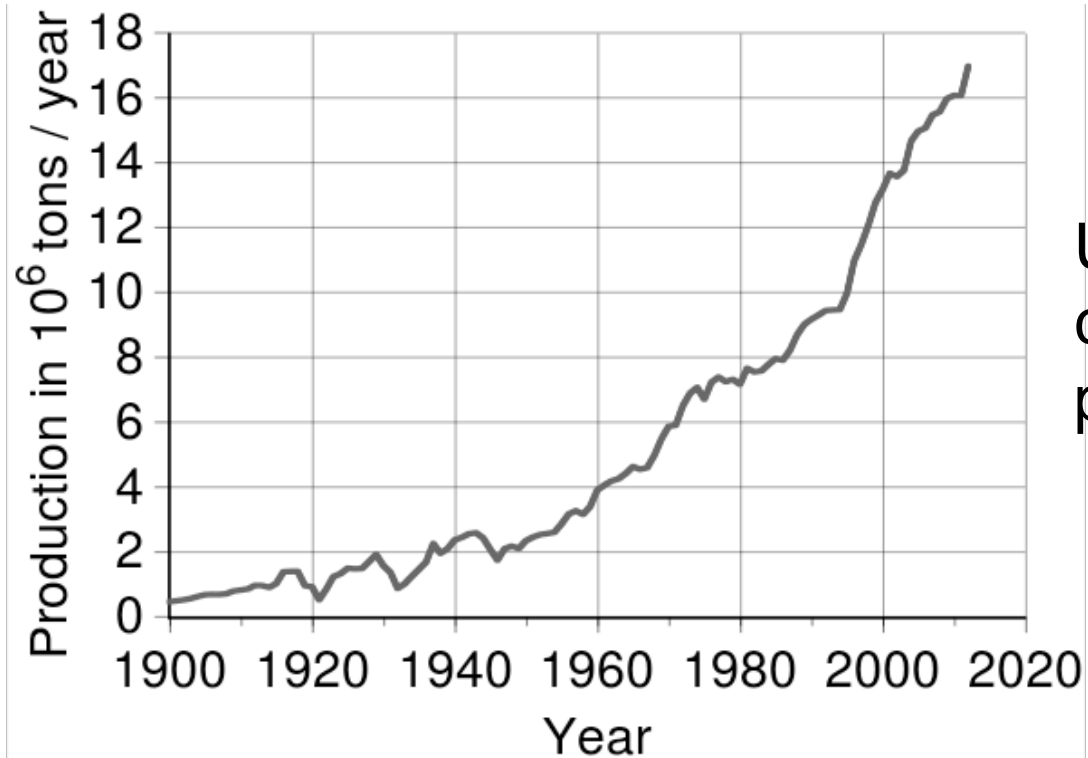
- De forts contrastes, des possibilités techniques très variées.
- Limitations à aborder dès le stade de l'élaboration du produit.
- Diversification des métiers pour traiter les gisements de "matières premières secondaires" (BTP...).

Production d'acier, de métaux non ferreux*, de papiers-cartons, de verre et de plastiques

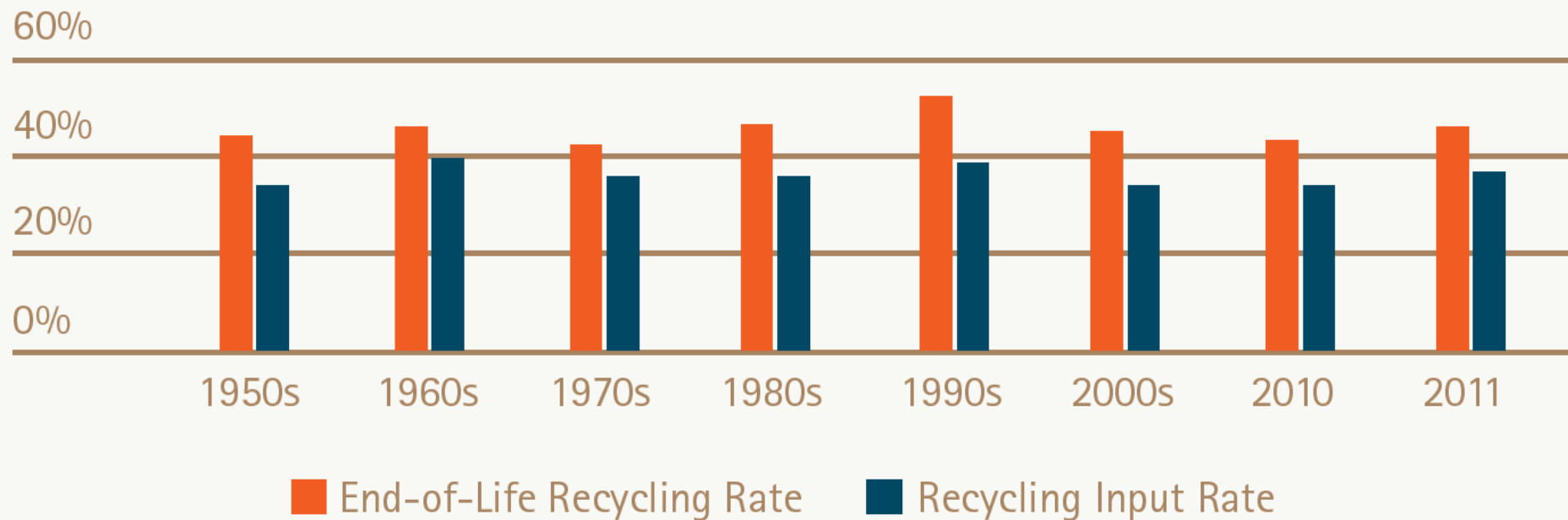


Note : * Aluminium, cuivre, plomb et zinc. La production correspond à la fabrication de demi-produits (issus de la première transformation).

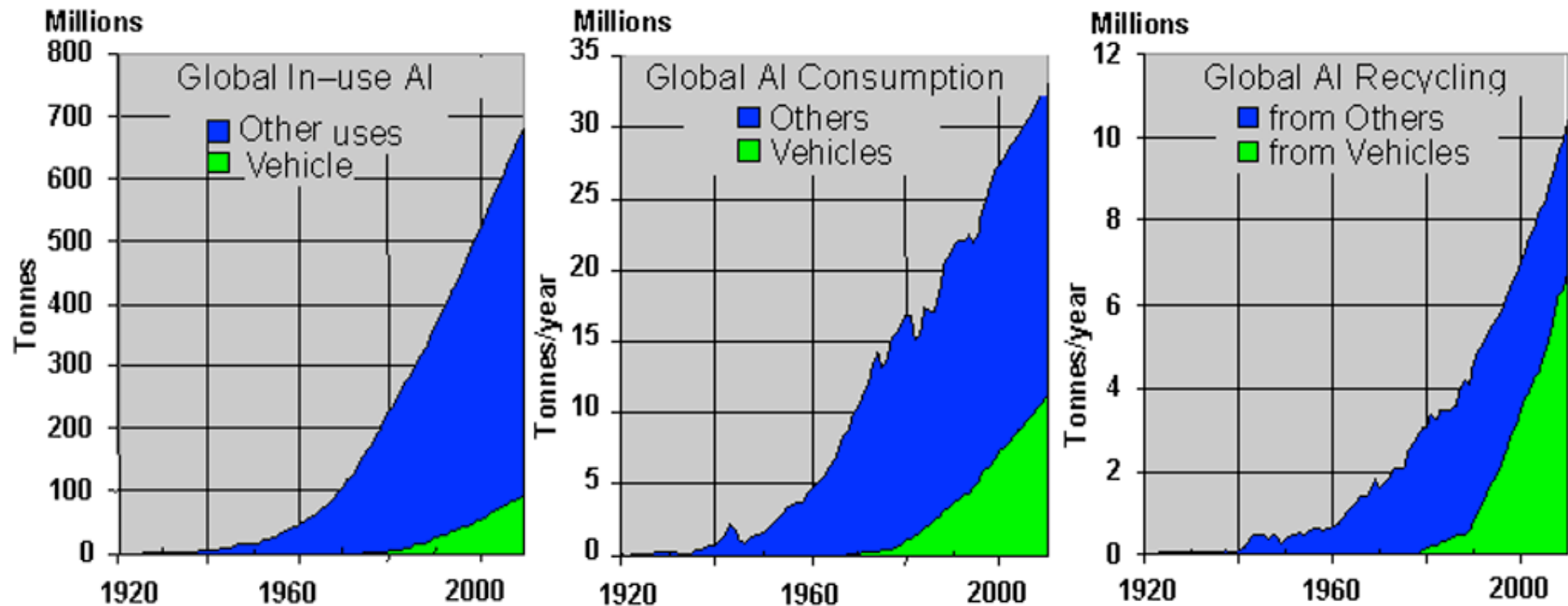
Source : Ademe (Bilan annuel du recyclage), 2012.



Un taux de recyclage du cuivre constant, malgré production en hausse



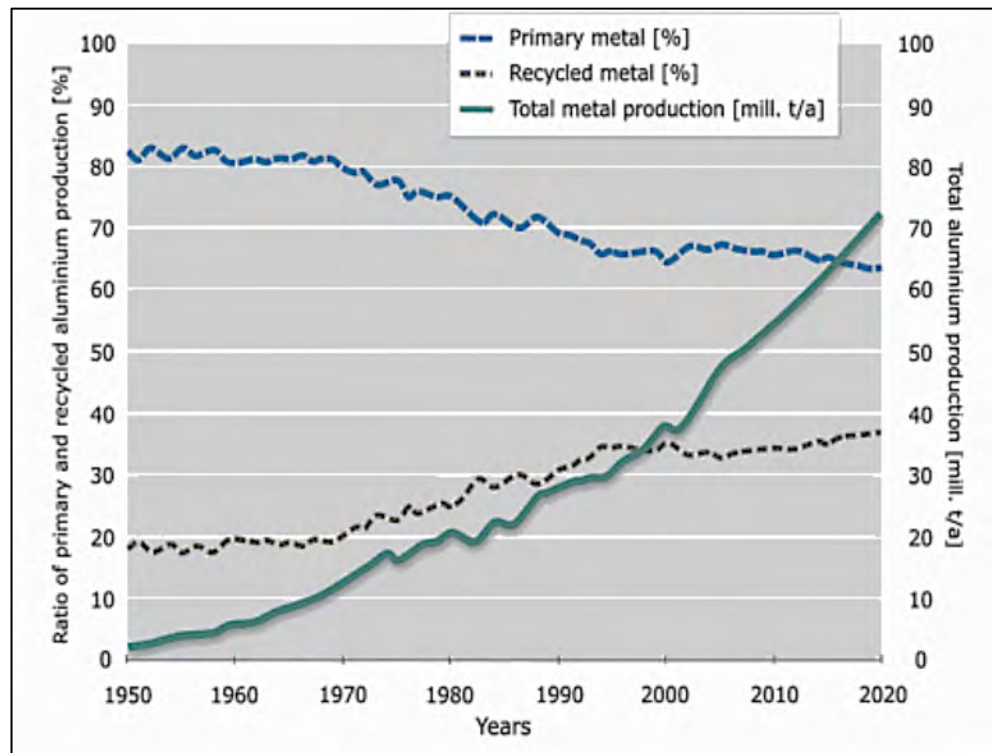
Recyclage de l'aluminium: l'importance du process



Energie nécessaire pour fabriquer Al: 260 MJ kg⁻¹

Energie nécessaire pour refondre Al: 6–10 MJ kg⁻¹

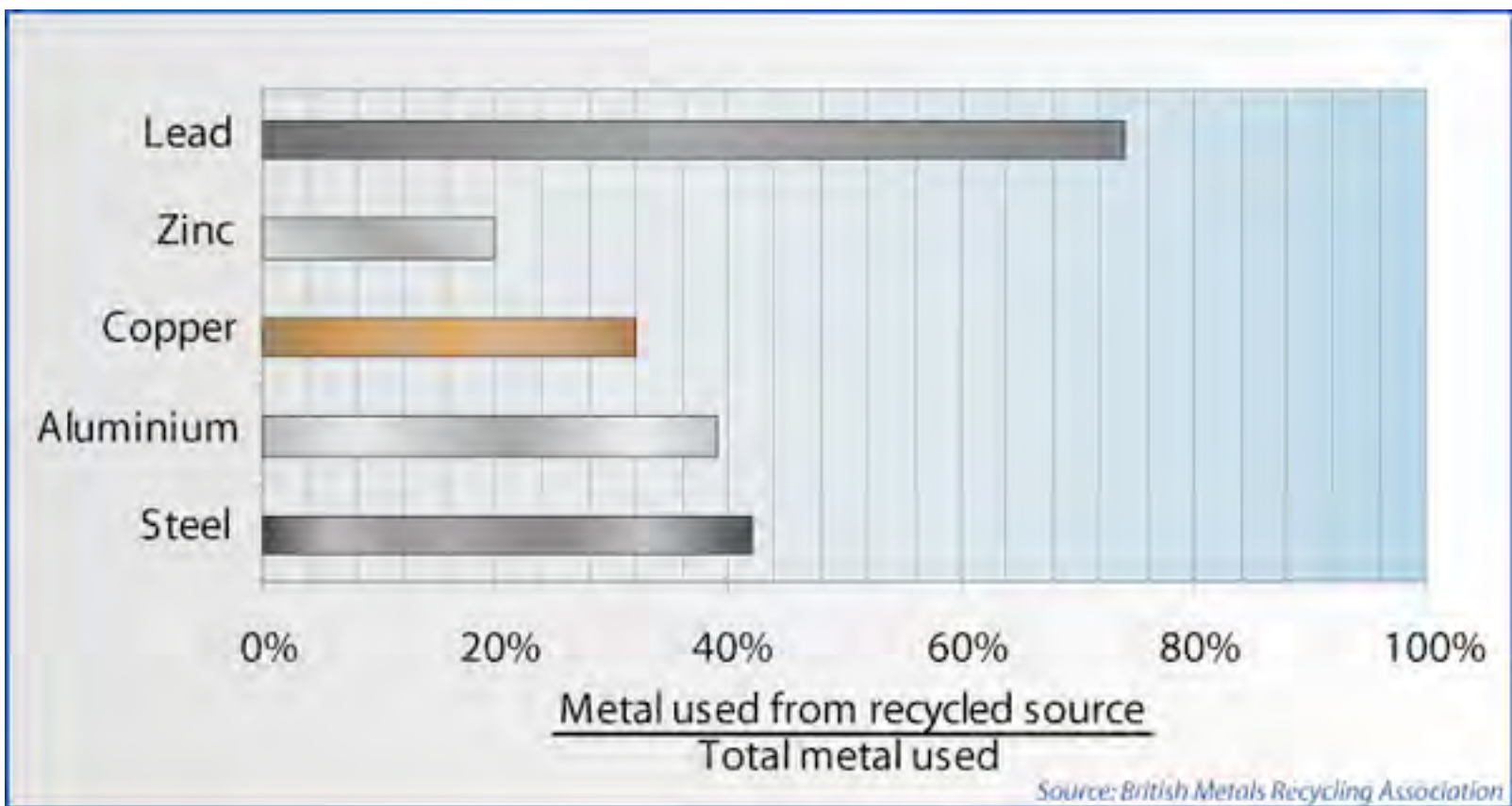
Une évolution minière non tenable sans recyclage?



Aluminium

Diminution progressive de l'activité minière directe.

“Primary metal production fills the gap between the availability of secondary material and total demand.” (ICM, 2006)



Le recyclage des métaux est d'une efficacité contrastée.

Matières premières de recyclage (MPR)

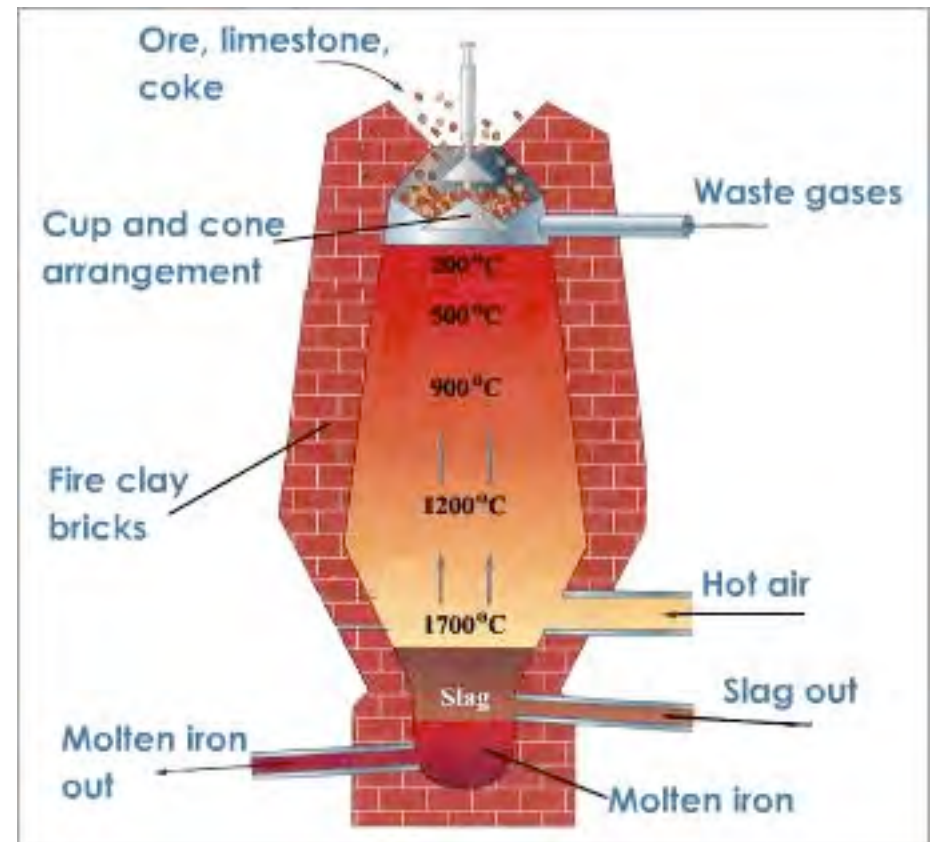
- Rebuts de production, déchets post-consommation : on passe d'un statut juridique de déchets à un statut juridique de produits.
- 1990-2010 : utilisation des MPR passe de 10 à 17 Mt (puis stabilisation).
- Reprise du traitement de minerais polymétalliques = environ 70 Mt pour une centaine de « petits » dépôts.

3. Au voisinage du recyclage: Coproduits, sous-produits

Matières premières secondaires, avec des propriétés originales.

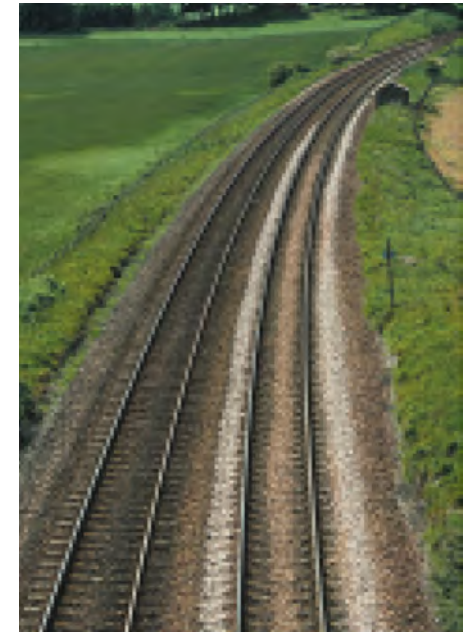
Les laitiers

180 à 350 kg de laitier pour 1 t de fonte produite: gangues du minerai de fer + cendres du coke. Autrefois un déchet, maintenant une matière première de recyclage.

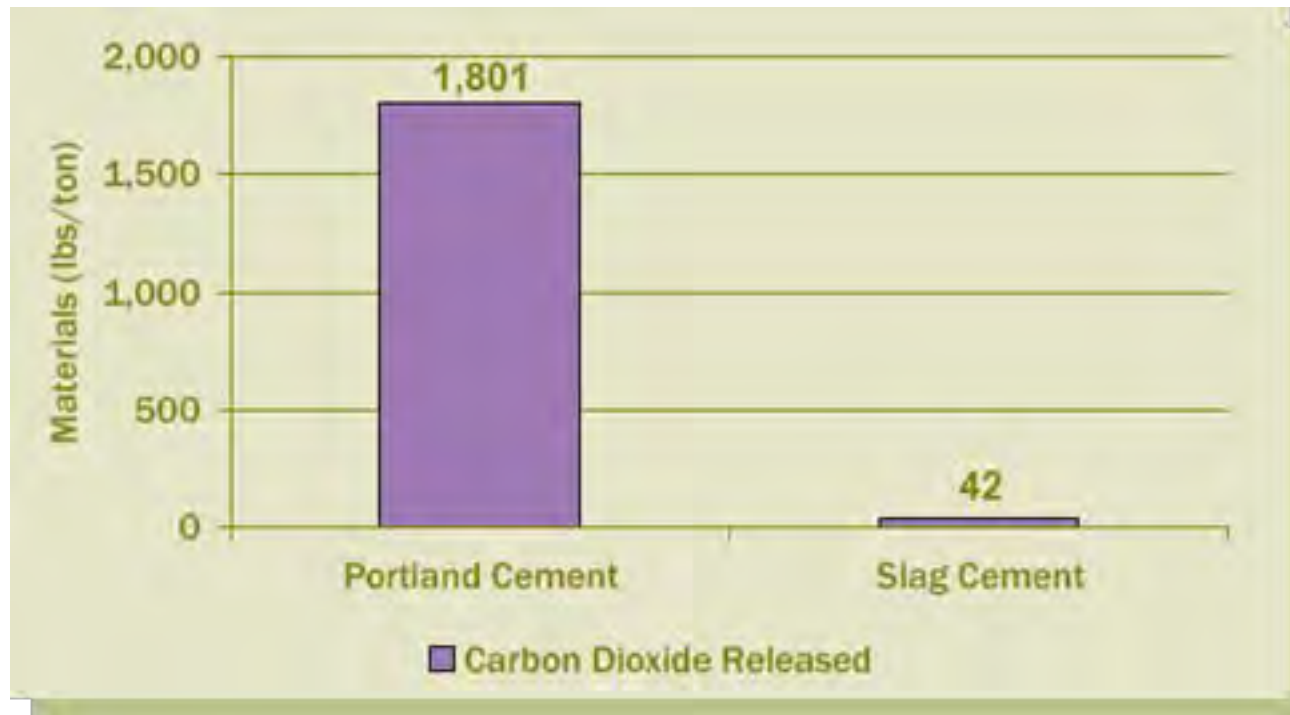




Selon la cinétique de refroidissement, on peut obtenir un laitier cristallisé (matériaux de remblais, ballast) ou vitreux (ciments: le laitier a une composition de silicate calcique; mais [Fe] et [Cr^{VI}] critiques).



Déchet ou ressource?



Emissions de CO₂ /t de ciment:
où localiser l'empreinte carbone?