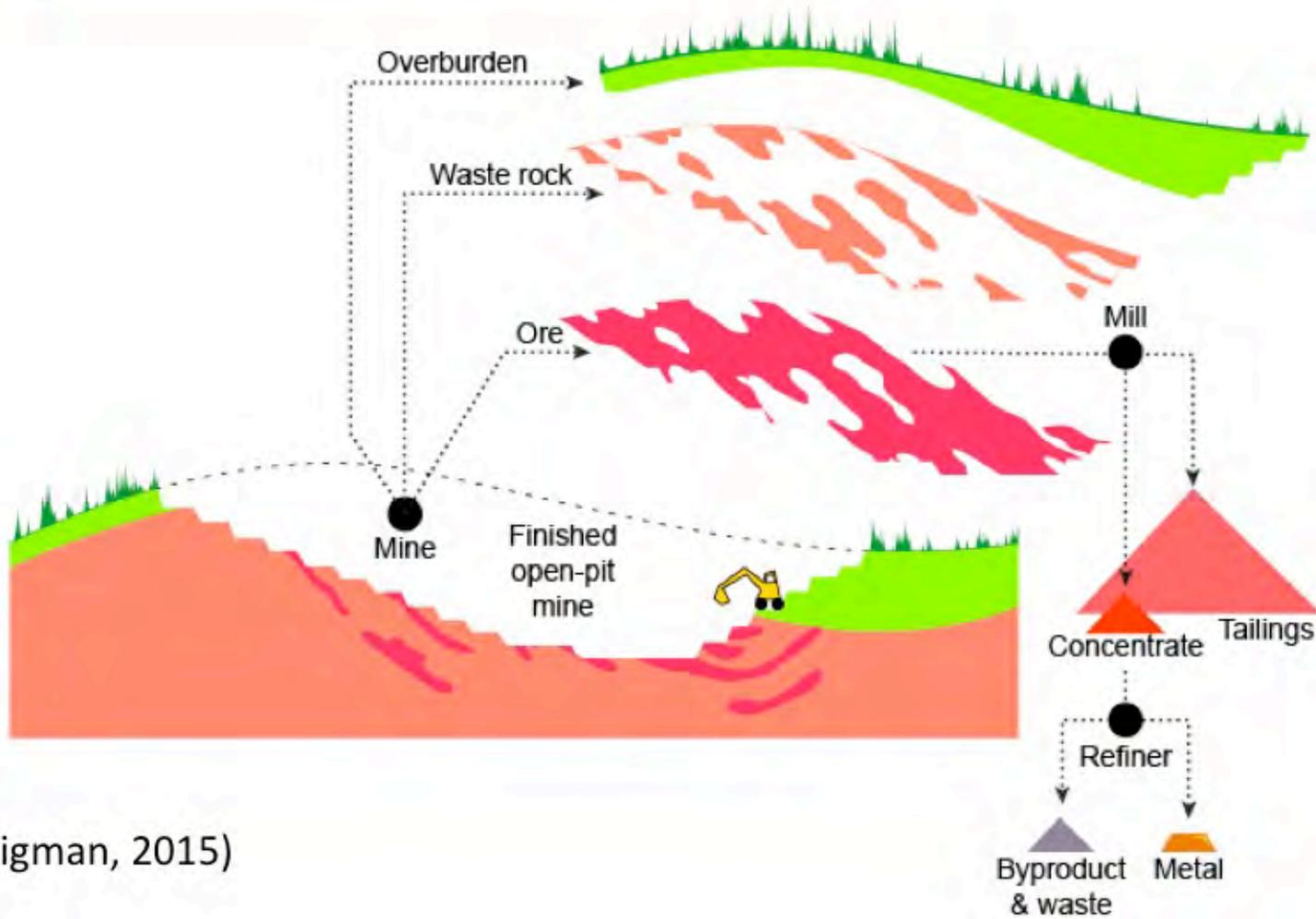
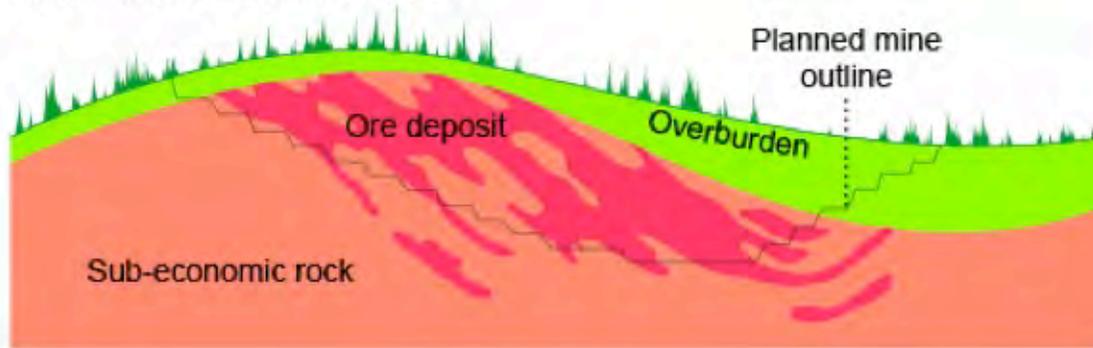


Les impacts de l'activité extractive



BASIC MINING TERMINOLOGY



(B. Higman, 2015)

Des environnements artificialisés que l'on doit comprendre et maîtriser



Bassin de résidus miniers, Tilden mine, WI (B.I.F.): silice à hématite



Tilden et Empire mines: la mine, les bassins à résidus. Minerais différents, résidus différents.

Un héritage à maîtriser

Nauru: exploitation de guano abandonnée



L'après-mine: réhabilitation de la mine de Restigouche, Québec



L'après-mine non réhabilité: les drainages miniers acides (Portugal)



Les impacts directs

1. Impacts visuels
2. Sécurité sur mines et carrières
3. Impacts des poussières
4. Emissions de fumées: impacts de l'activité pyrométallurgique
5. Stabilité des sites: mines souterraines, résidus miniers
6. Implications sur les circuits économiques et les activités humaines (Nauru, "*Conflict minerals*" ...) discutées avec la durabilité

1. Impacts visuels



Udachnaya pipe (Sibérie):
600 m de profondeur



Terrils: mine d'or de Norseman
(WA, Australie)

2. Sécurité industrielle spécifique

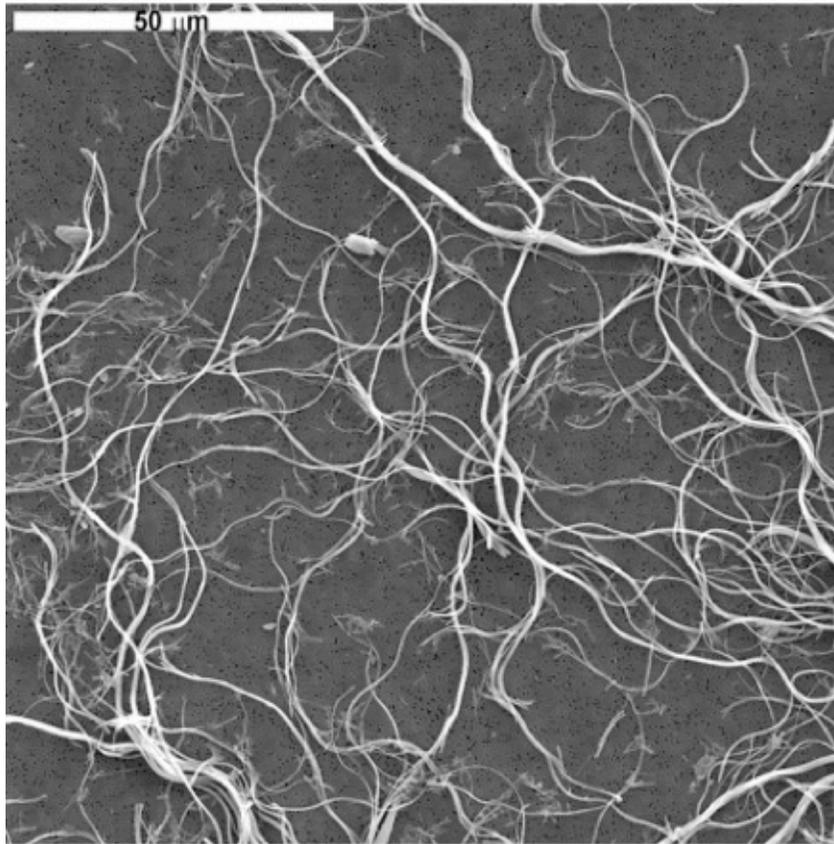
(Hors substances énergétiques: charbon, U)

- Impacts sur la santé: poussières (dont fibres), produits chimiques, bruit, stress thermique (Afrique du Sud: mines d'or vers 3900 m: environnement rocheux $\approx 50-60^{\circ}\text{C}$)
- Régulations internationales. Exemple: limite d'exposition à la silice cristalline ($0.1\text{mg}/\text{m}^3$)

3. Les empoussièvements

- Poussières: impact majeur de l'activité extractive (mines, carrières)
- Concentration gravimétrique "respirable" et teneur en quartz
- Pneumoconioses: silicose, asbestose

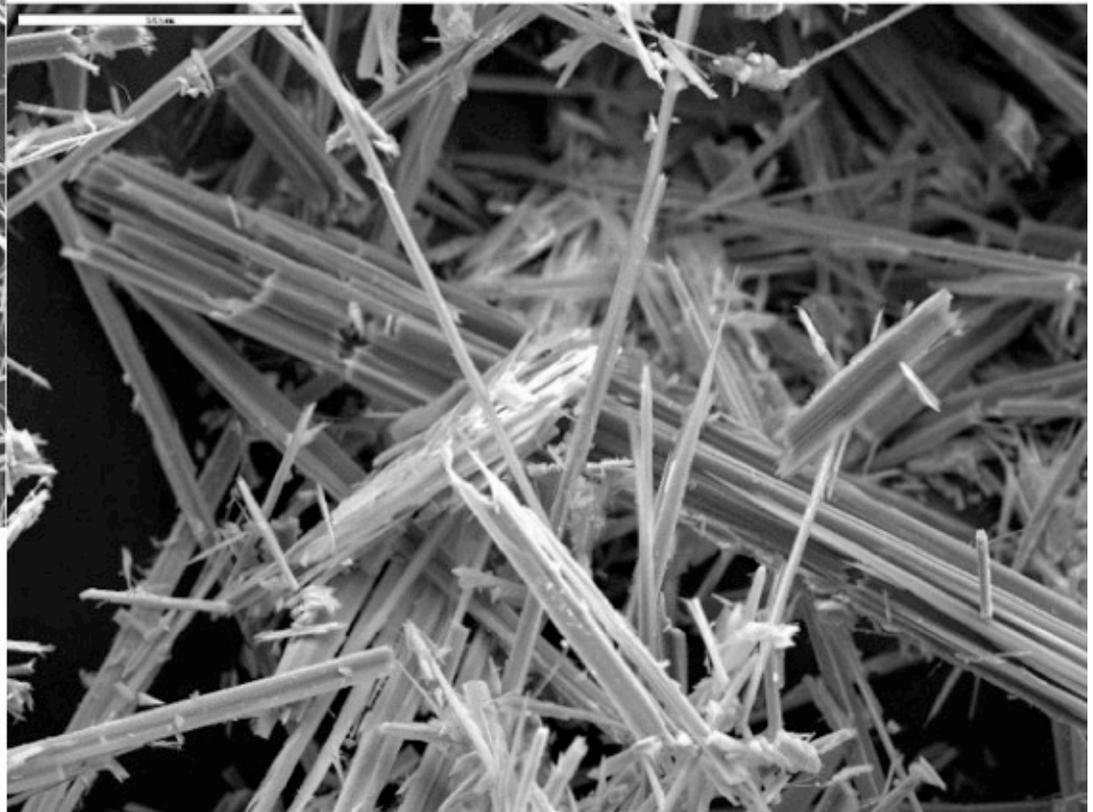
Quand la morphologie pose problème: les amiantes



Serpentine (chrysotile)

Amphibole (anthophyllite)

(USGS, 2011)

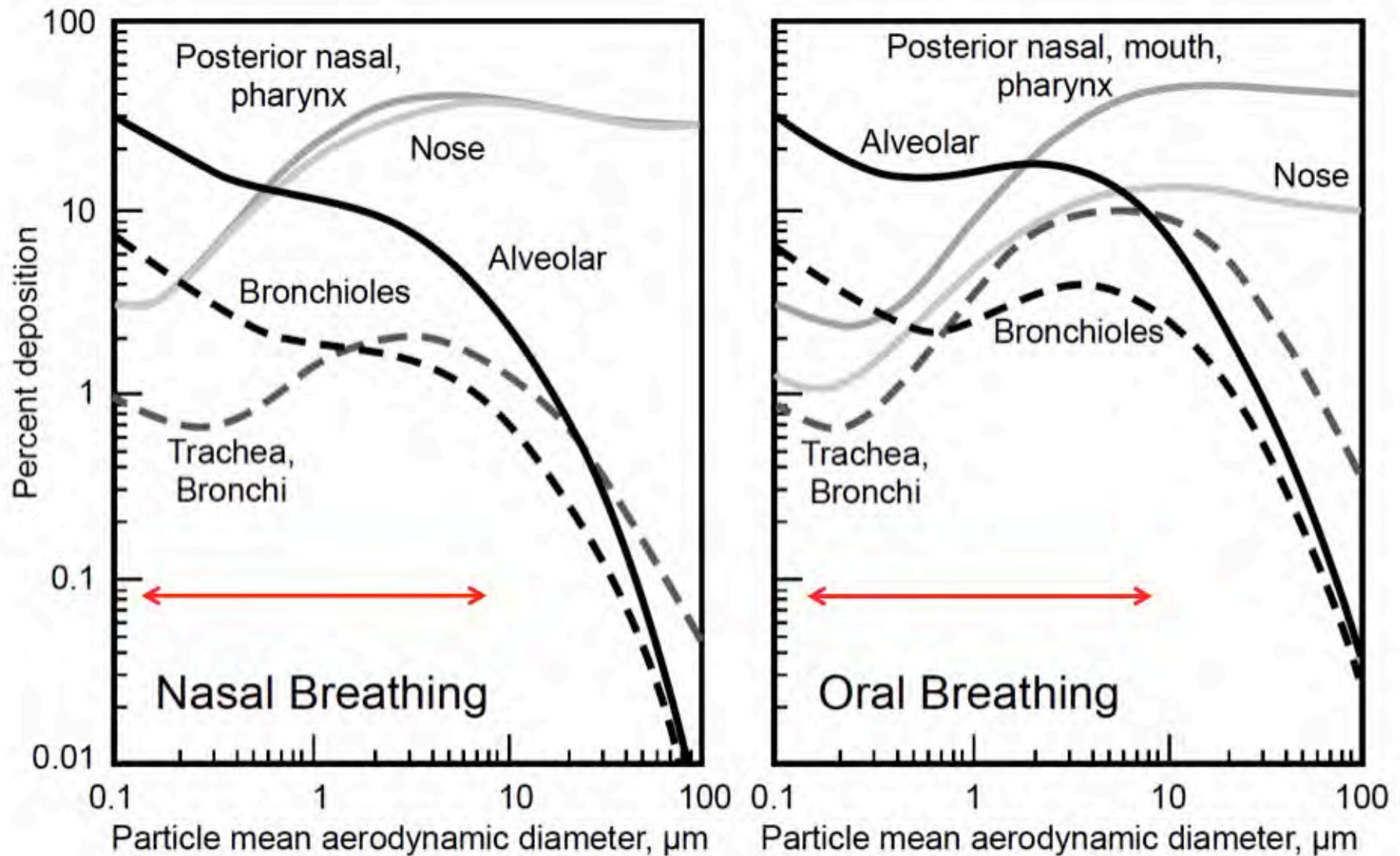




Groupe de fibres de chrysotile: la difficulté du comptage.

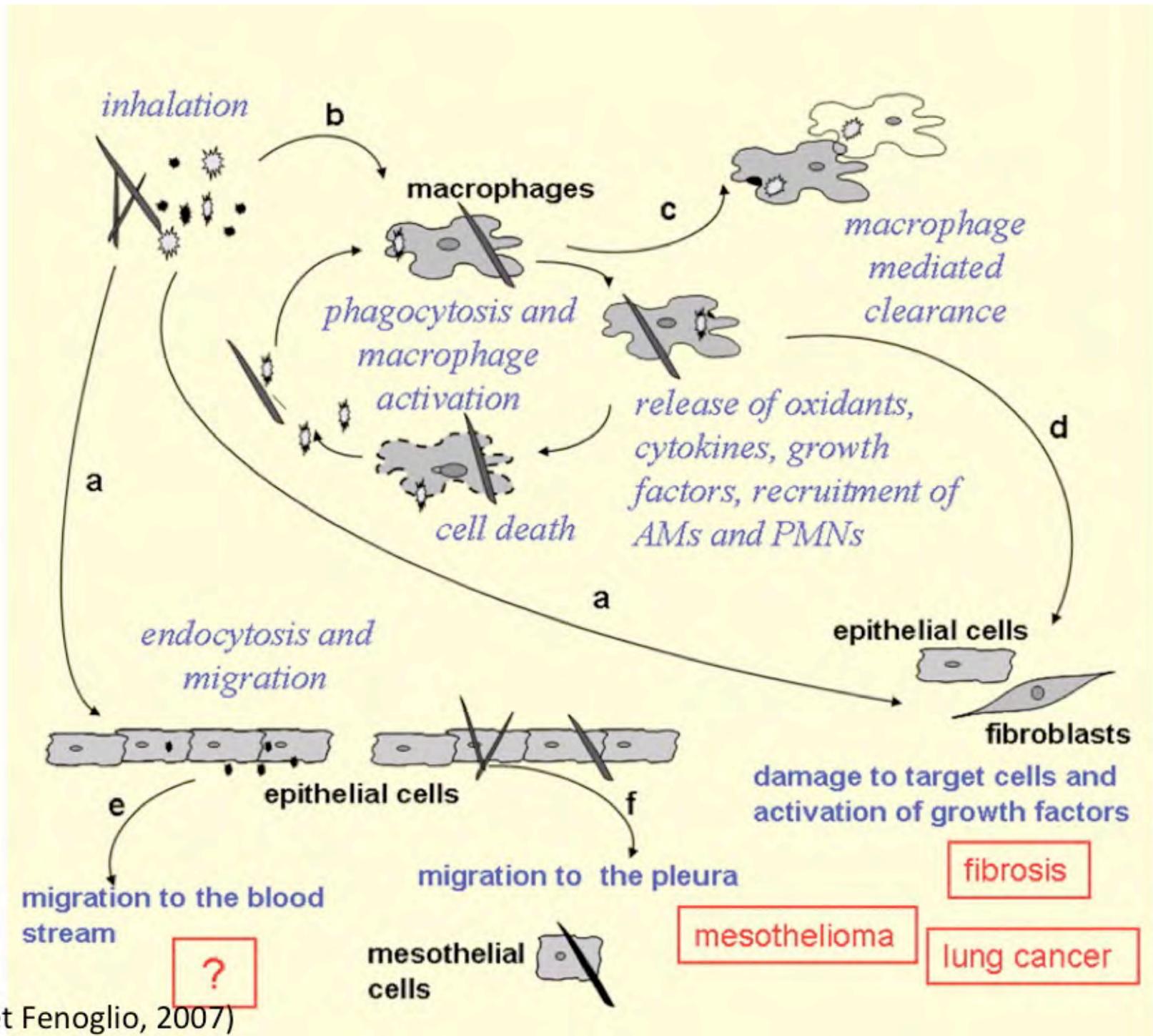
Ancienne mine de Nonza (arrêtée en 1965)





Appareil pulmonaire: localisation des poussières selon leur taille

(Gunter et al., 2007)



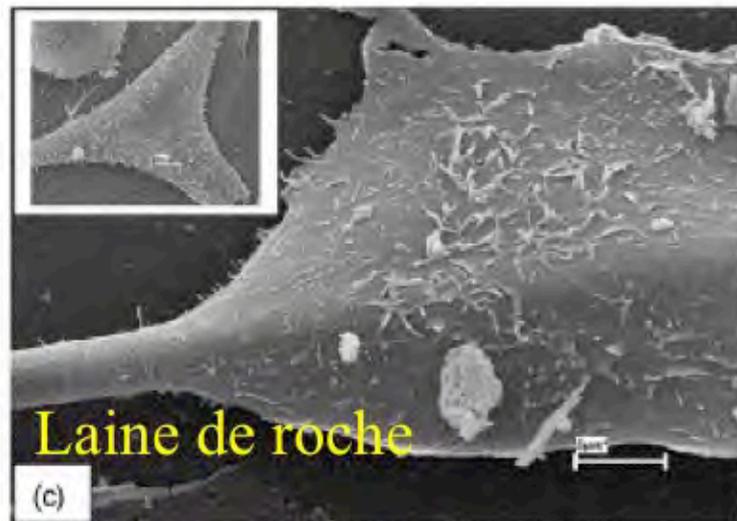
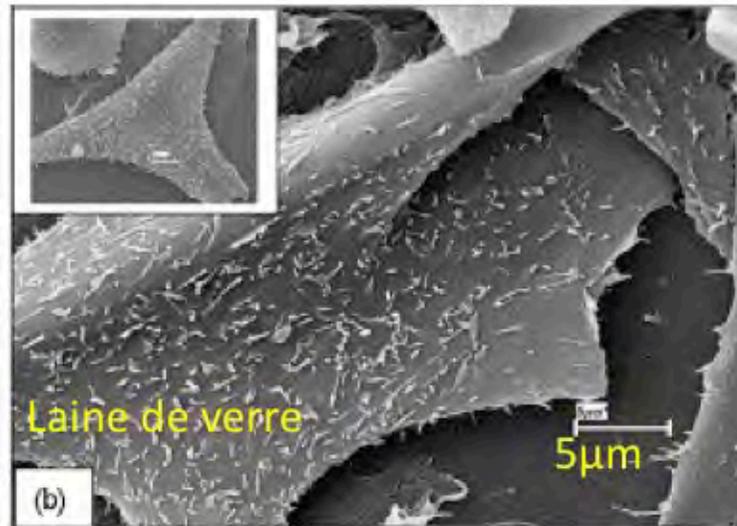
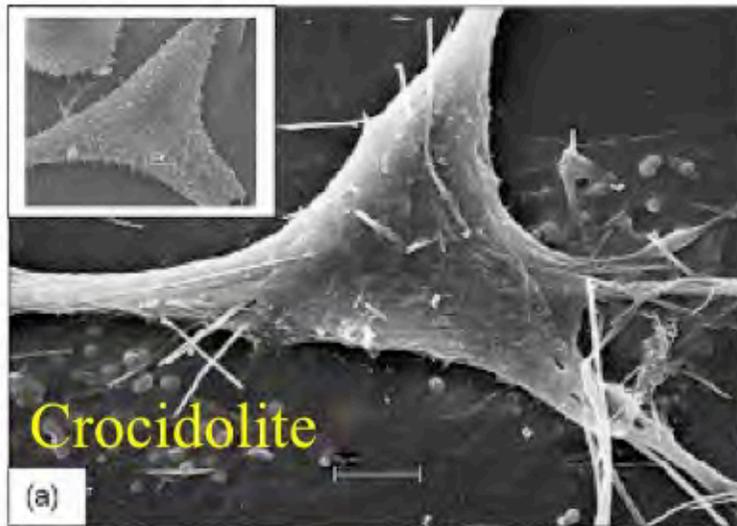
(Fubini et Fenoglio, 2007)

Silicose

- Silicose: particules de silice cristalline captées par des macrophages, provoquent une inflammation due à la libération de facteurs de nécrose: prolifération des fibroblastes et de collagène autour de la particule de silice, donnant pour résultat une fibrose et des lésions.
- Activités extractives avec impacts carcinogènes reconnues: diatomées, granite, sables.

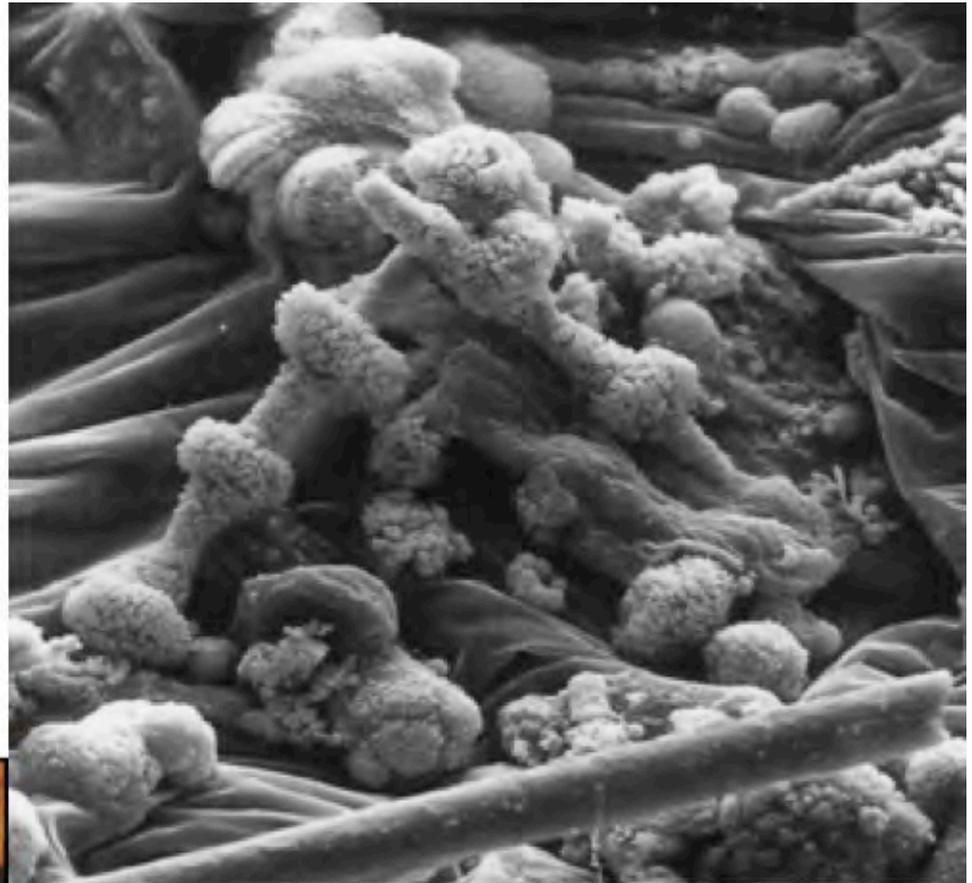
Effets biologiques (1)

Interaction avec macrophages (24h)



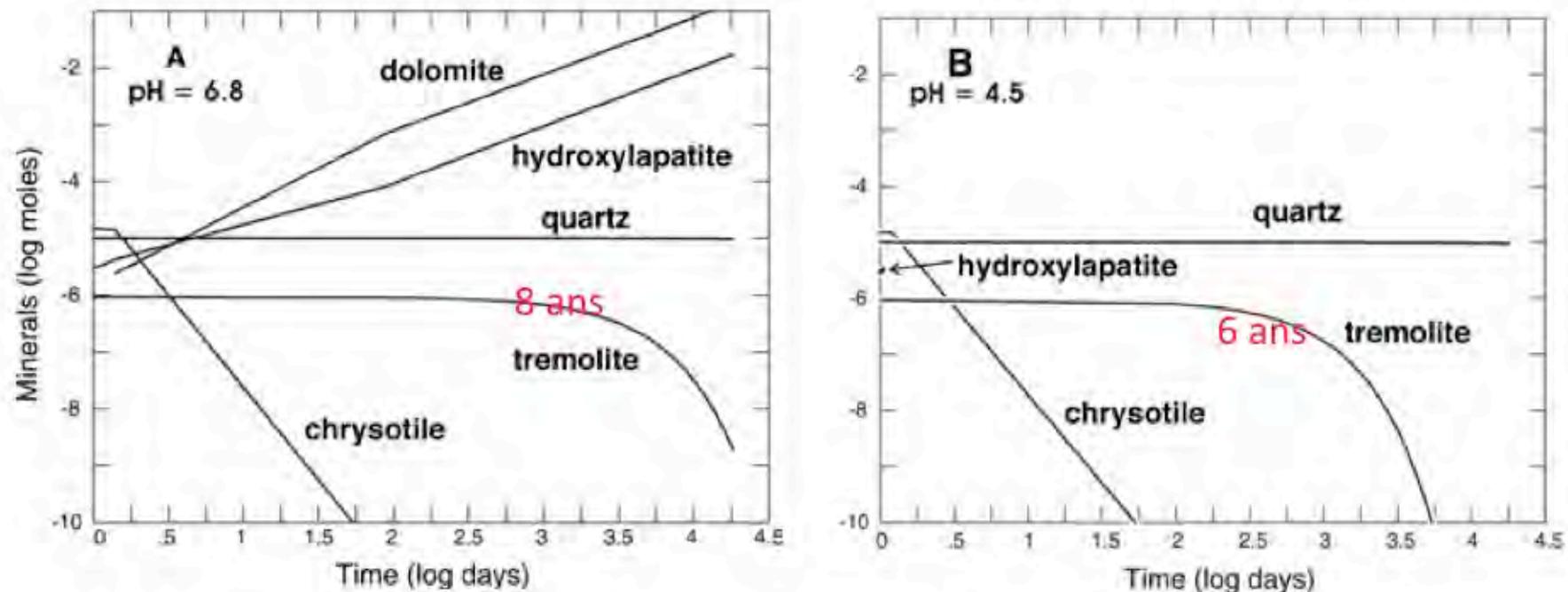
Effets biologiques (2)

Action des macrophages
sur les fibres d'amiante amphibole



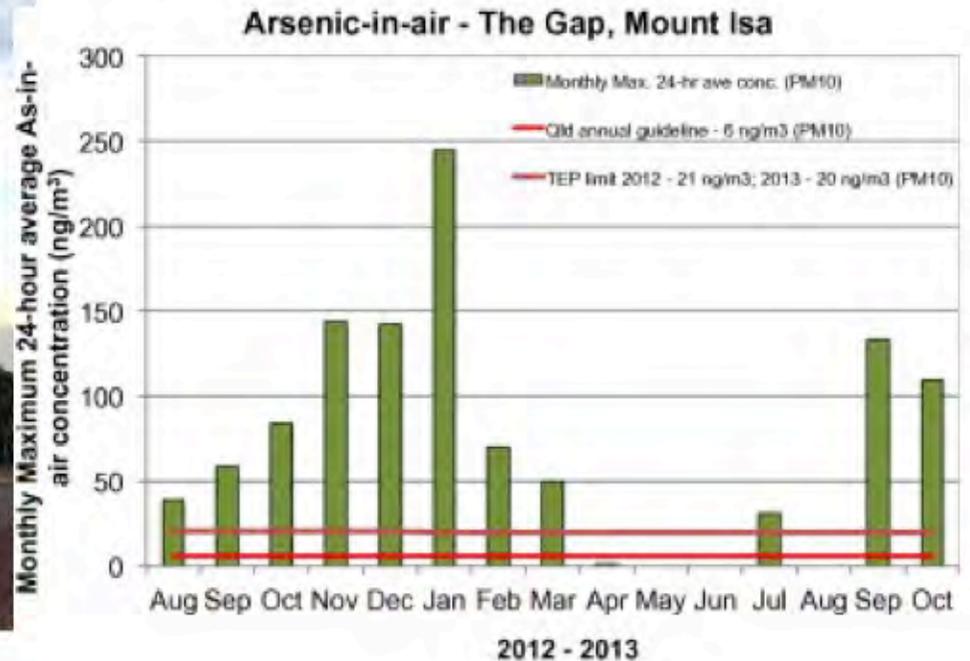
"asbestos bodies" (USGS, 2011)

Stabilité chimique des amiantes



Dissolution d'un mélange chrysotile, trémolite et quartz dans des liquides biologiques simulés: la couche octaédrique du chrysotile est rapidement dissoute.

4. Les émissions



Cheminées de traitement des minerais de la mine Mount Isa (Queensland; Glencore-Xstrata)

(Taylor et al., 2014)

De la mesure à la réglementation: le cas du Queensland

Sudbury/Impacts: SO₂



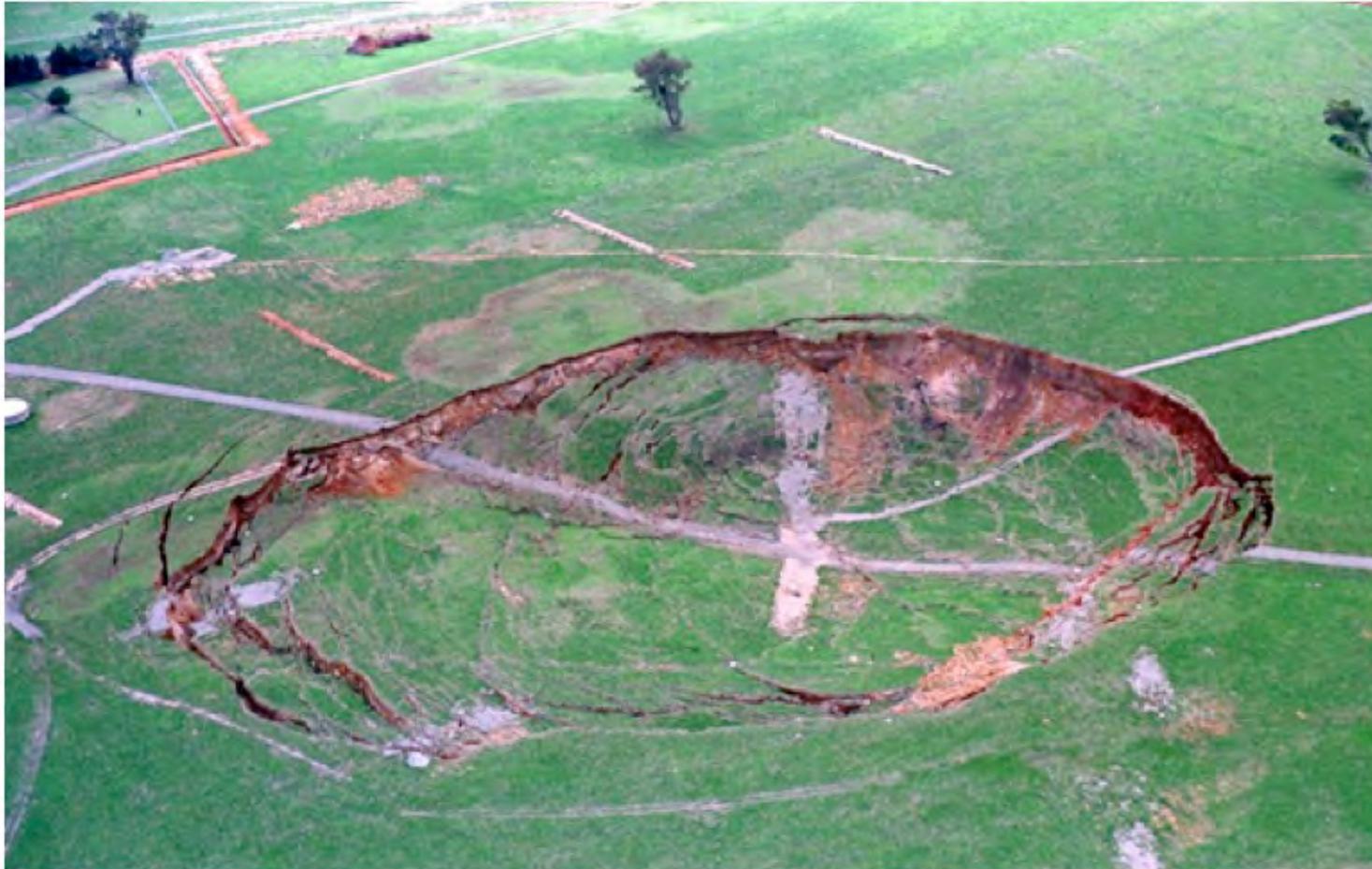
- la plus grande cheminée du monde (380 m)
- le principal émetteur de SO₂ d'Amérique du Nord (mais réduction de 2 Mt à 150 kt/an)

5. Stabilité des sites

- Modification majeure de certains sites (mines à ciel ouvert: Bingham= 1,2 Gm³ déplacés (sur 43 Gm³ pour USA)
- Glissements de terrain (Mai 2013: mine de Bigham, Utah) : 70 millions m³ (mais prévu par interférométrie radar sur site)
- Le plus important transfert de terrain observé aux USA après Saint Helens



Effondrements d'anciennes mines



Mine d'Elura (NSW, Australie)

Rupture des digues de bassins à résidus



Effondrement du bassin à résidus de Cananea, Sonora, Aout 2014 (40 000 m³)



24 Juillet 2014

5 Aout 2014

(NASA, 2014)

Brèche de la digue du bassin à résidus, Mount Polley, BC

Mount Polley, BC



Des volumes importants (10 million m³ d'effluents + 7.3 millions m³ de haldes et 6.5 million m³ d'eau "interstitielle), des effets à long terme mal connus.

Les impacts à long terme

- **Contamination** : accroissement notable de la concentration d'éléments minéraux, organiques ou pathogènes dans un sol au-delà des valeurs normales, sans préjuger de la modification de sa qualité.
- **Pollution** : présence de polluants dans un milieu, suite à l'activité humaine, susceptibles de danger pour l'homme, les écosystèmes ou l'environnement. La pollution peut être historique, nouvelle ou résiduelle (après réhabilitation).

Dépollution: empêcher la diffusion d'un polluant dans l'environnement



INERIS



La nocivité chimique: parfois une question de dose ...

hydrogène 1 H 1.00794																	hélium 2 He 4.00260						
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122																	boron 5 B 10.811	carbone 6 C 12.011	azote 7 N 14.007	oxygène 8 O 15.999	fluorure 9 F 18.998	néon 10 Ne 20.180
sodium 11 Na 22.990	magnésium 12 Mg 24.305																	aluminium 13 Al 26.982	silicium 14 Si 28.086	phosphore 15 P 30.974	soufre 16 S 32.065	chlore 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 52.004	manganèse 25 Mn 54.938	fer 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	cuivre 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.38	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.907	sélénium 34 Se 78.96	bromure 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80						
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdène 42 Mo 95.94	technétium 43 Tc [98]	ruthénium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	paladium 46 Pd 106.42	argent 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	étain 50 Sn 118.71	antimoine 51 Sb 121.76	tellure 52 Te 127.60	iode 53 I 126.90	xénon 54 Xe 131.29						
césium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	* 57-70																thallium 81 Tl 204.38	plomb 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatoine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]																						

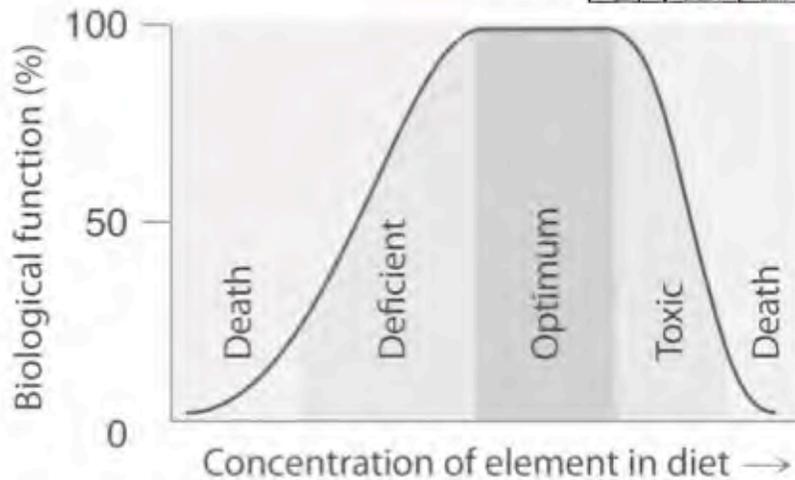
 Dangereux/Toxique Essentiel

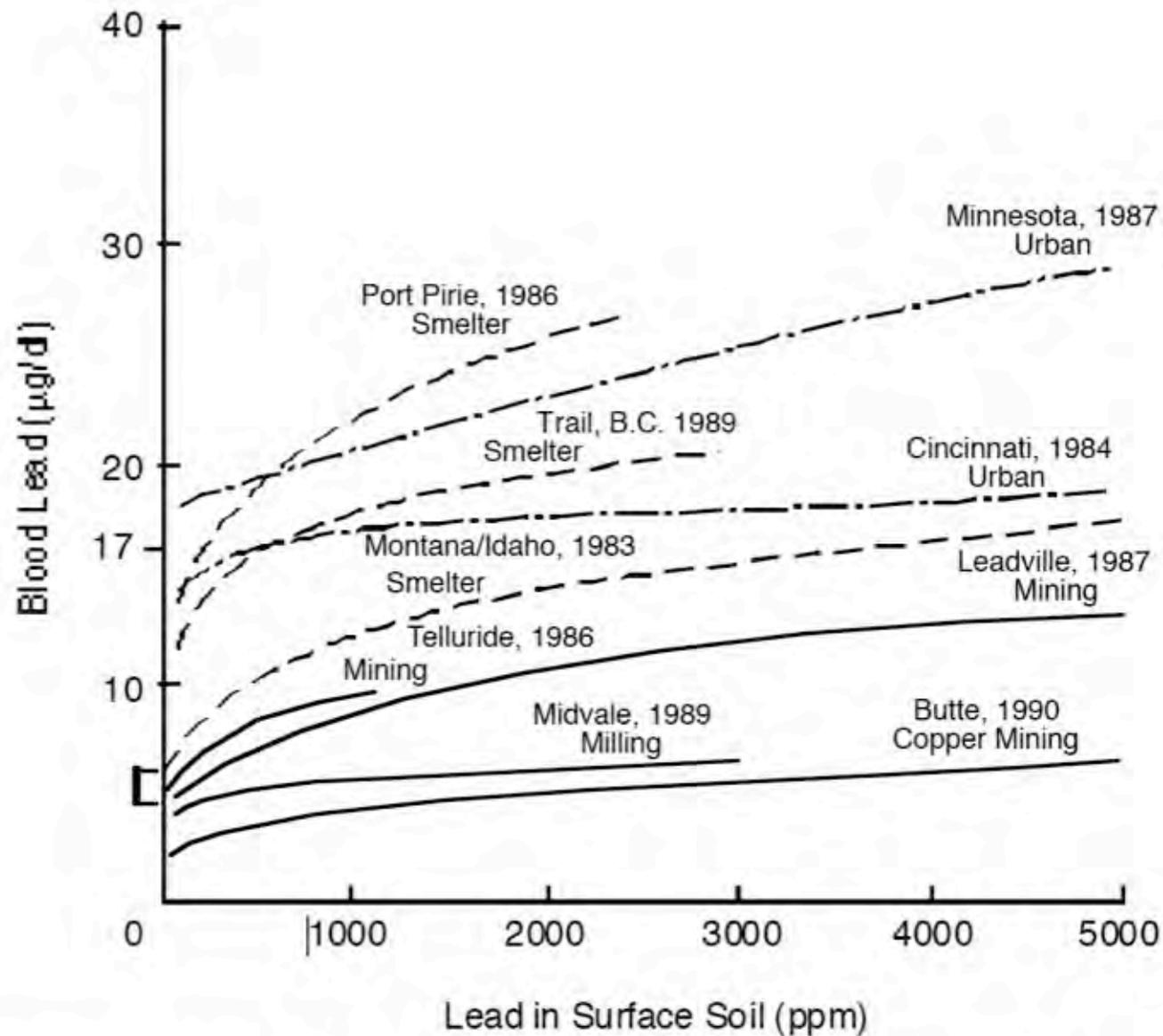
* Lanthanide series

lanthane 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodyme 59 Pr 140.91	néodyme 60 Nd 144.24	prométhium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
---------------------------------------	-------------------------------------	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	---	--------------------------------------	---	--------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--

** Actinide series

actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03
--------------------------------------	--------------------------------------	---	-------------------------------------





La contamination dépend de la spéciation de l'élément.
 Les structures cristallines/cristallochimiques sont prépondérantes.

(Smith&Huyck, 1999)

Les impacts contaminants

Action "instantanée"

Catastrophes environnementales
(par ex. Aznalcollar, 1998).

Impacts à court et long terme.

Aspect régional.

Temps géologiques

Concentrations naturellement
élevées: **anomalies géochimiques.**

Minéraux stables, peu solubles.

As, Cd, Pb, Hg, Sb, Cr...

Transferts dans les fleuves (Garonne...),
à partir d'anciens sites miniers.

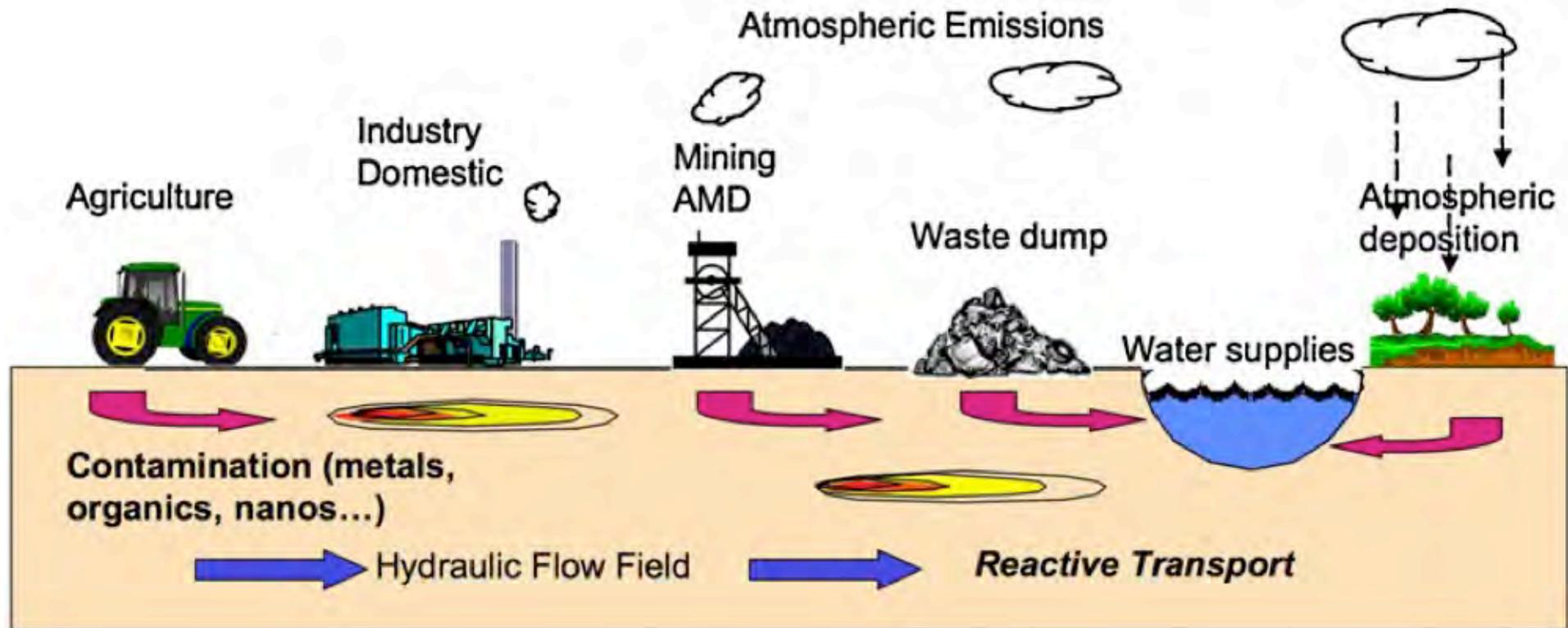
Impacts retardés, aspect régional.

Evolution d'anciens résidus miniers.

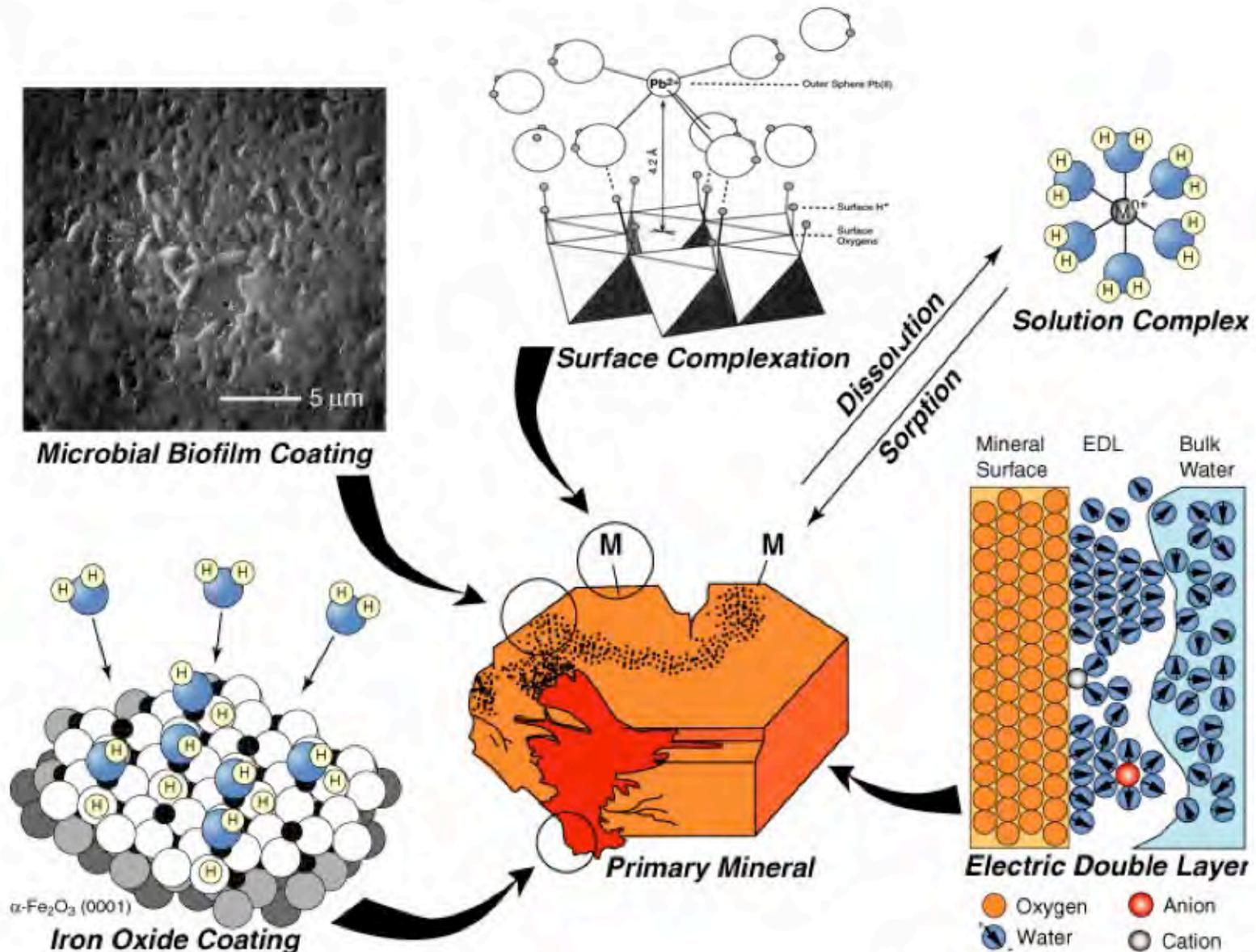
Impacts retardés.

"Bombes à retardement"

Sources et transport des contaminants

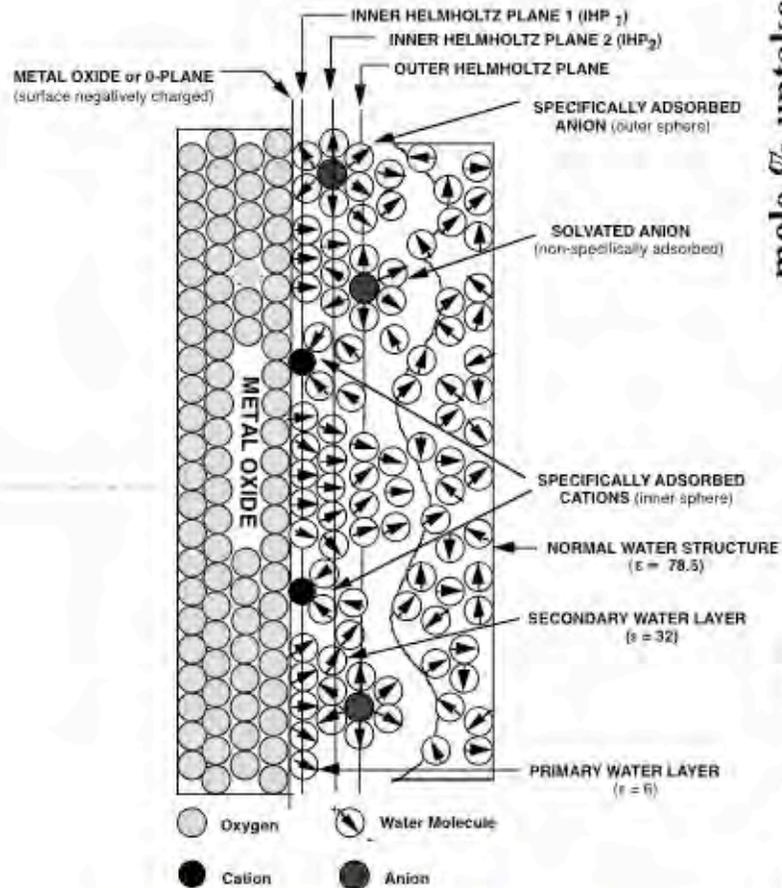


Rôle des interfaces



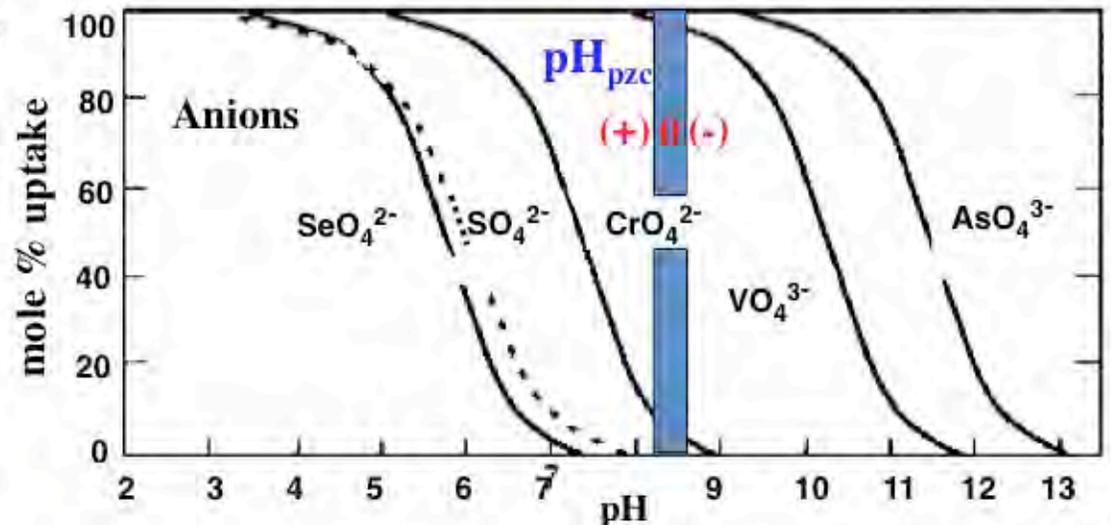
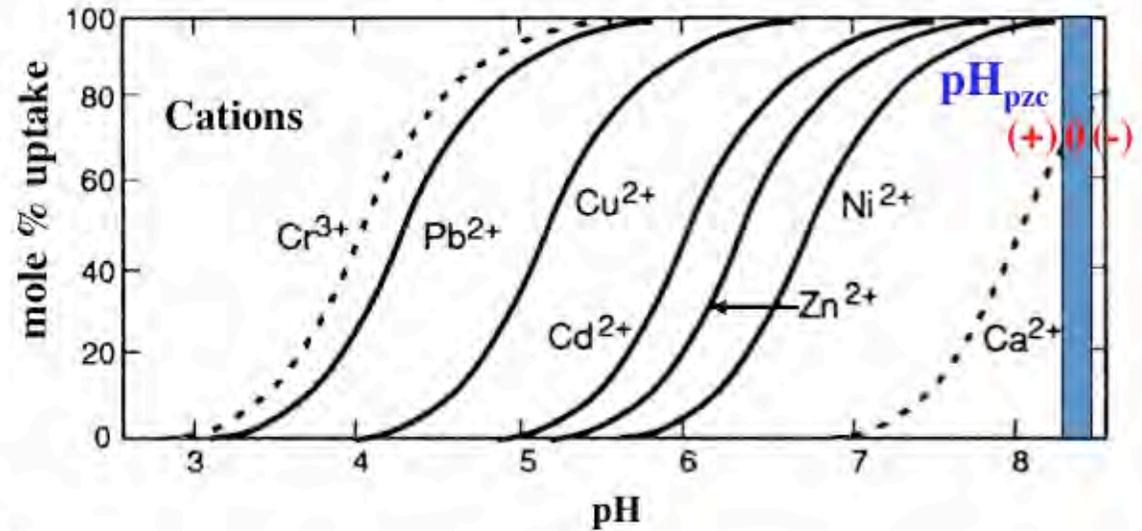
(Brown et al., 2008)

L'importance de l'adsorption



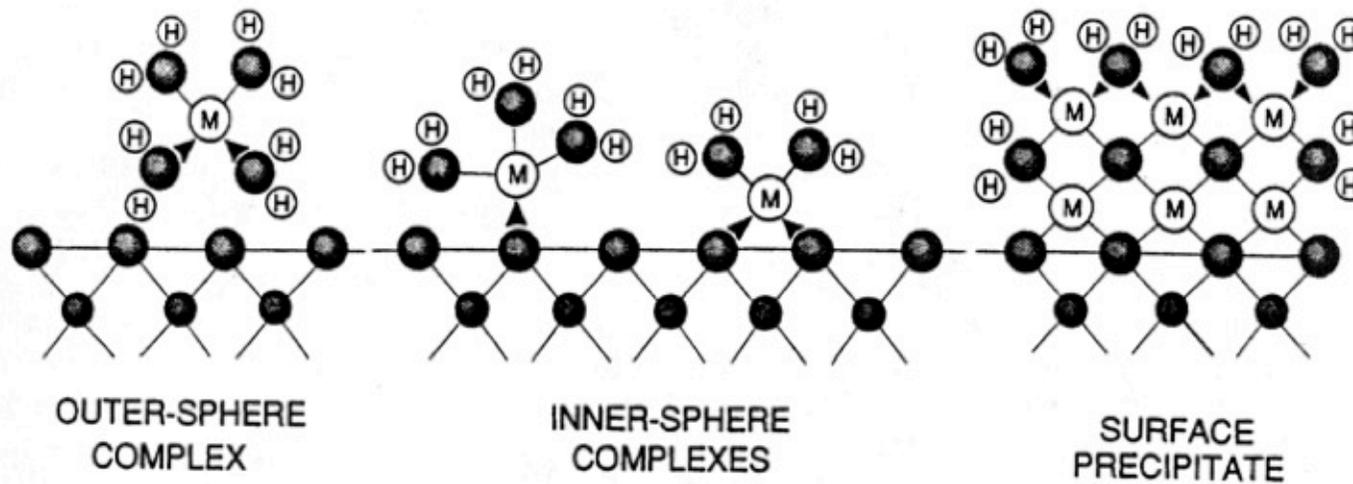
Point of Zero Charge = pH at which the surface charge is neutral

(Brown and Parks, 1990)



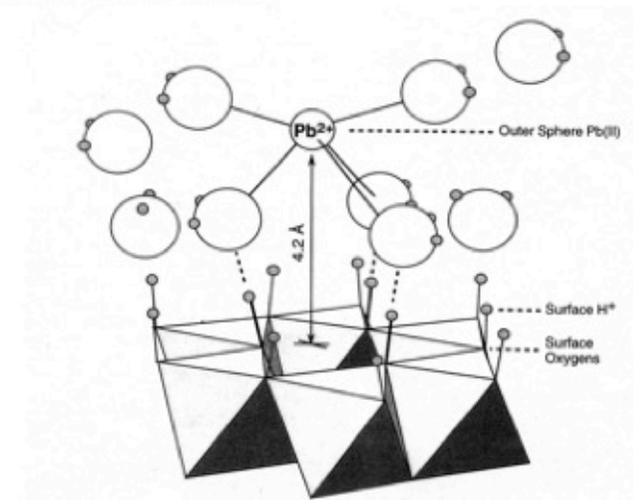
(Stumm, 1992)

Géométrie des processus de piégeage de cations sur une surface



Différents types de processus d'adsorption avec des stabilités différentes

Adsorption d'un complexe sphère externe de Pb(II) sur une surface (0001) de α - Al_2O_3 .



Identification de la spéciation des métaux/ métalloïdes

- Caractérisation physique

Diffraction des RX

Microscopie électronique,

Microsonde électronique

Spectroscopie d'absorption des RX (XANES, EXAFS)

Imagerie des éléments mineurs/traces

- Caractérisation chimique

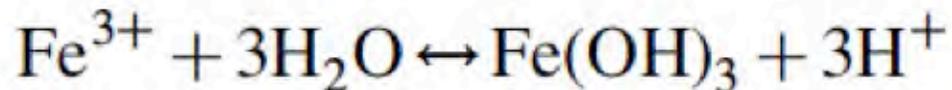
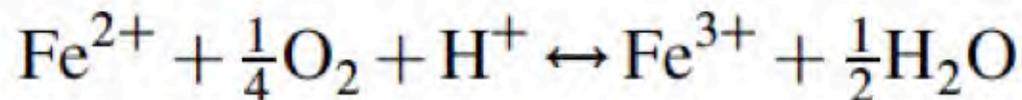
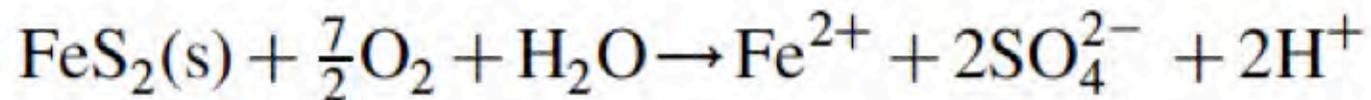
Extractions sélectives

Anciens sites miniers

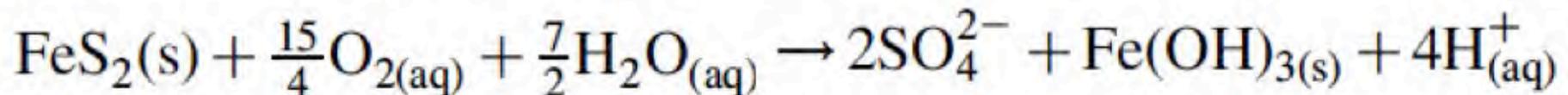
- Importance en France: 130 Mt de résidus générés par les mines métalliques
- Origine: minerais de métaux lourds, impuretés non exploitables (As dans pyrite: qq 10^3 ppm), éléments non récupérés dans le process de traitement des minerais
- Importance :
 - du piégeage dans les phases solides
 - du relargage différé
- Stabilité des phases secondaires
- Influence de pH et Eh: les drainages miniers acides

Une cause majeure de pollution: l'oxydation des sulfures/arséniures

Réaction en deux étapes: S et cations



Soit la réaction globale:

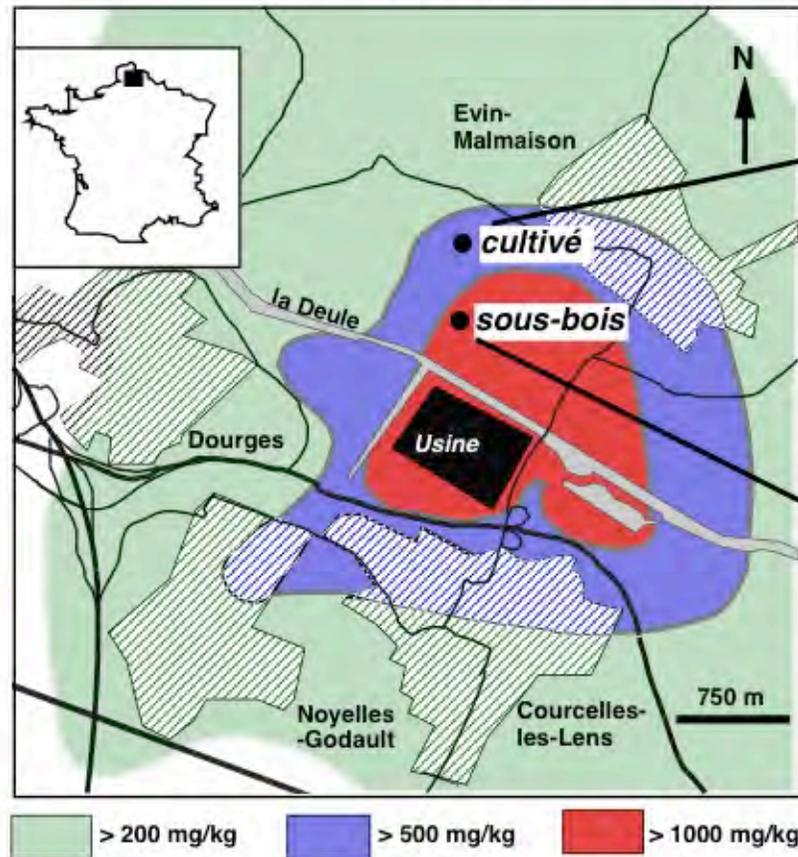


Pérennité du piégeage : stabilité intrinsèque des phases secondaires :

- réduction des oxyhydroxydes de fer : relargage de l'arsenic en milieu réducteur;
- changement de conditions de pH : désorption de As ou dissolution de phases secondaires porteuses de As
- relargage de As sorbé sur des phases amorphes (oxyhydroxydes de fer) lors de l'évolution de ces phases vers des structures mieux cristallisées

Ancienne usine Metaleurop Nord, Noyelles-Godault (62)

Distribution spatiale du zinc et du plomb

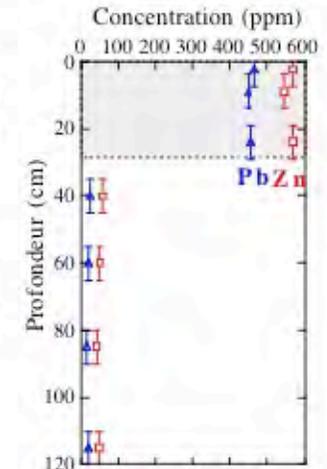


Distribution verticale du zinc et du plomb

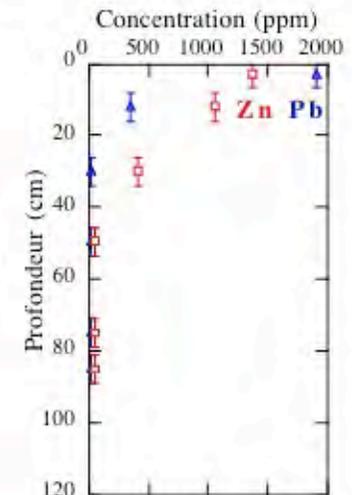
pH 7.5, COT 1.5 %



Horizon labouré

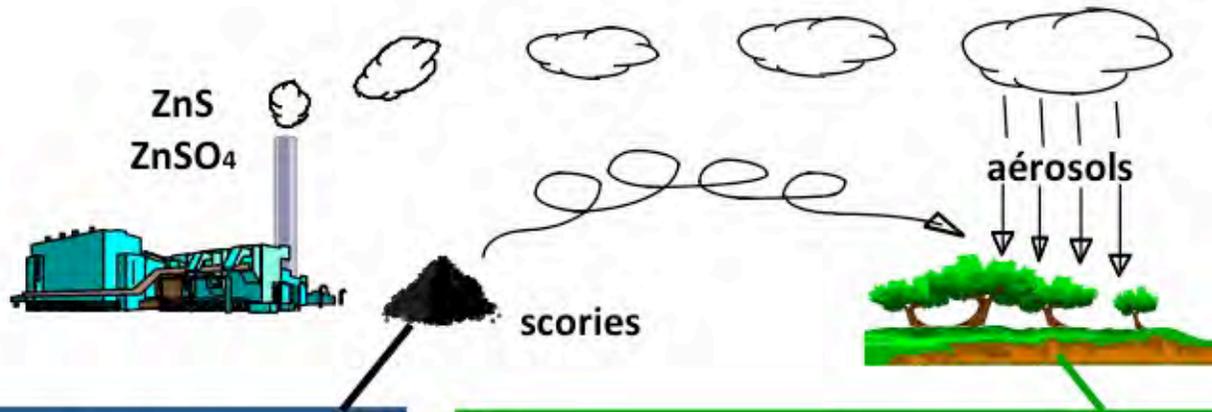


pH 5.5, COT 6.5 %



(Morin et al., 1999)

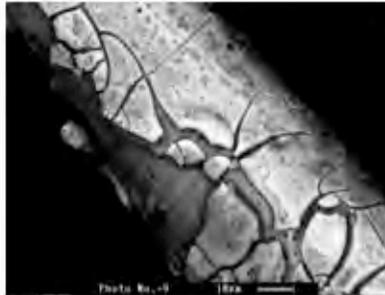
Spéciation différente pour le zinc...



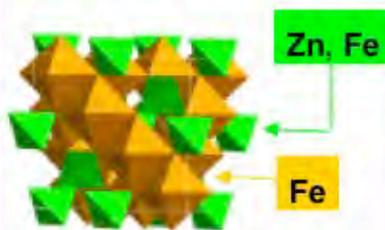
Emissions Pb/Zn
40 t/an
(DRIRE 1991)

(Juillot et al., 2003)

Scories

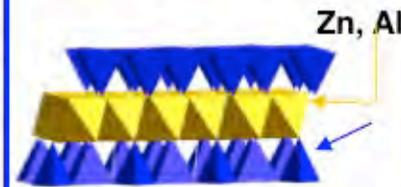


Magnétite Zn

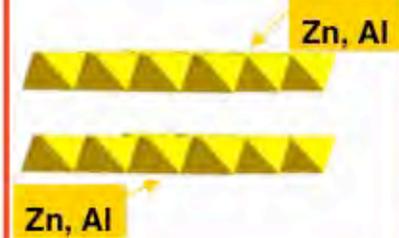


Précipitation

Phyllosilicate Zn



Hydrotalcite Zn/Al

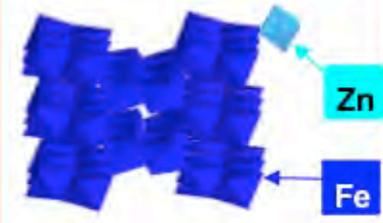


Adsorption

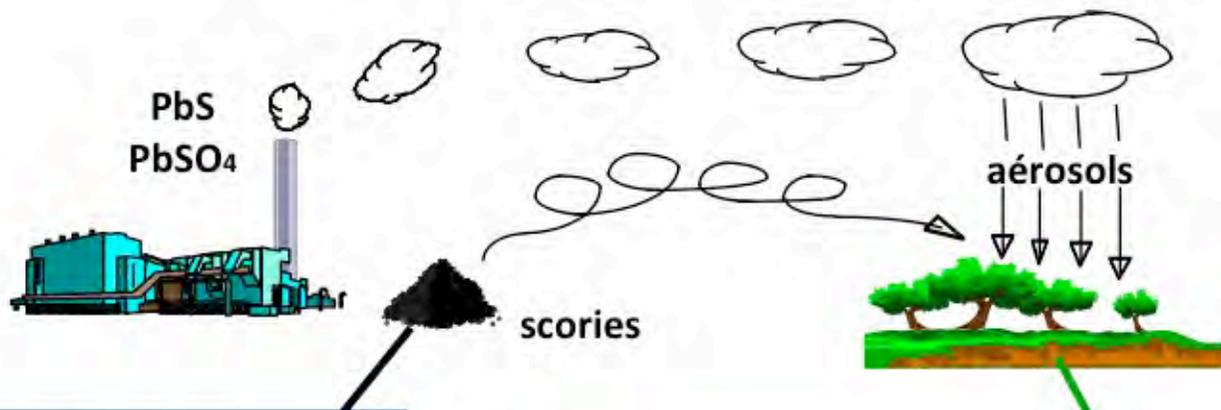
Zn(II) / M.O.



Zn(II) / oxyde Fe.



... et pour le plomb



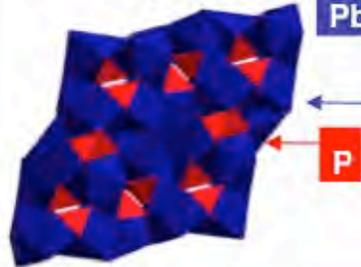
Emissions Pb/Zn
40 t/an
(DRIRE 1991)

(Morin et al., 1999)

Scories

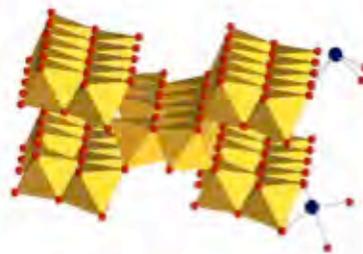


Pyromorphite
 $Pb_5(PO_4)_3Cl$



Adsorption majoritaire

Pb(II) / oxydes
(Fe et Mn)



Pb(II) / M.O.



L'arsenic: un problème environnemental important

Deux degrés d'oxydation en surface: +3 (arsénites) et +5 (arséniates).

Une forme réduite: -3 stable en conditions géologiques (arséniures). Complexes organiques et interaction avec activité biologique.

Impacts sur la santé

Souvent présent en élément associé non valorisé.

Stabilisation de As

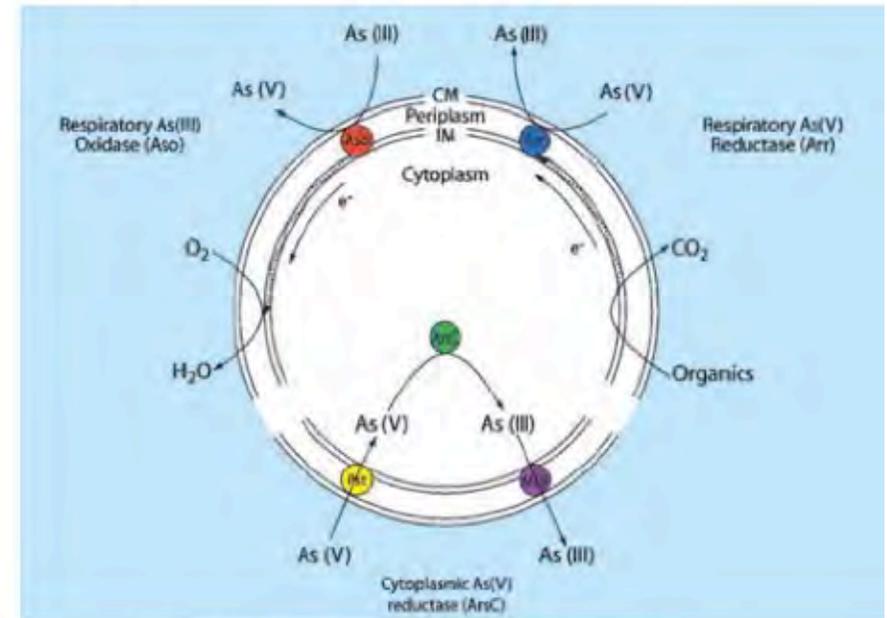
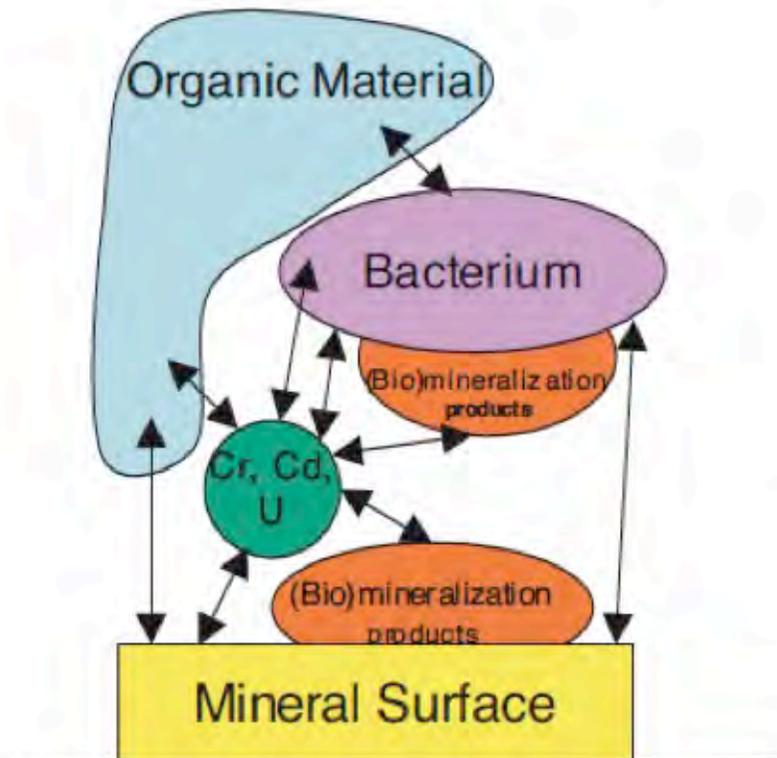
- Oxydation des sulfures (contenant As) et des arséniures
- Piégeage de l'arsenic dans des phases minérales secondaires (oxydes Fe, Mn, arséniates Ca, Fe...)
- Processus d'adsorption et/ou de coprécipitation avec les oxyhydroxydes de fer.
- Rôle crucial du facteur microbiologique

L'activité minière n'est que l'une des causes de contamination en As

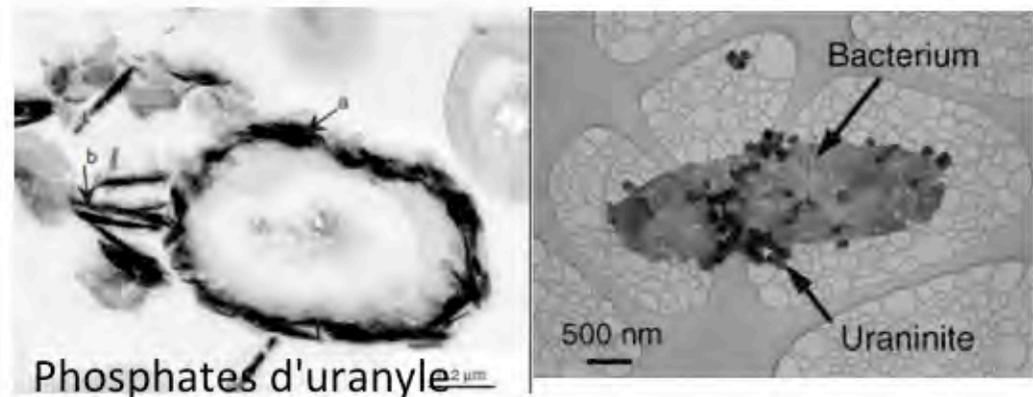


Le rôle actif des micro-organismes

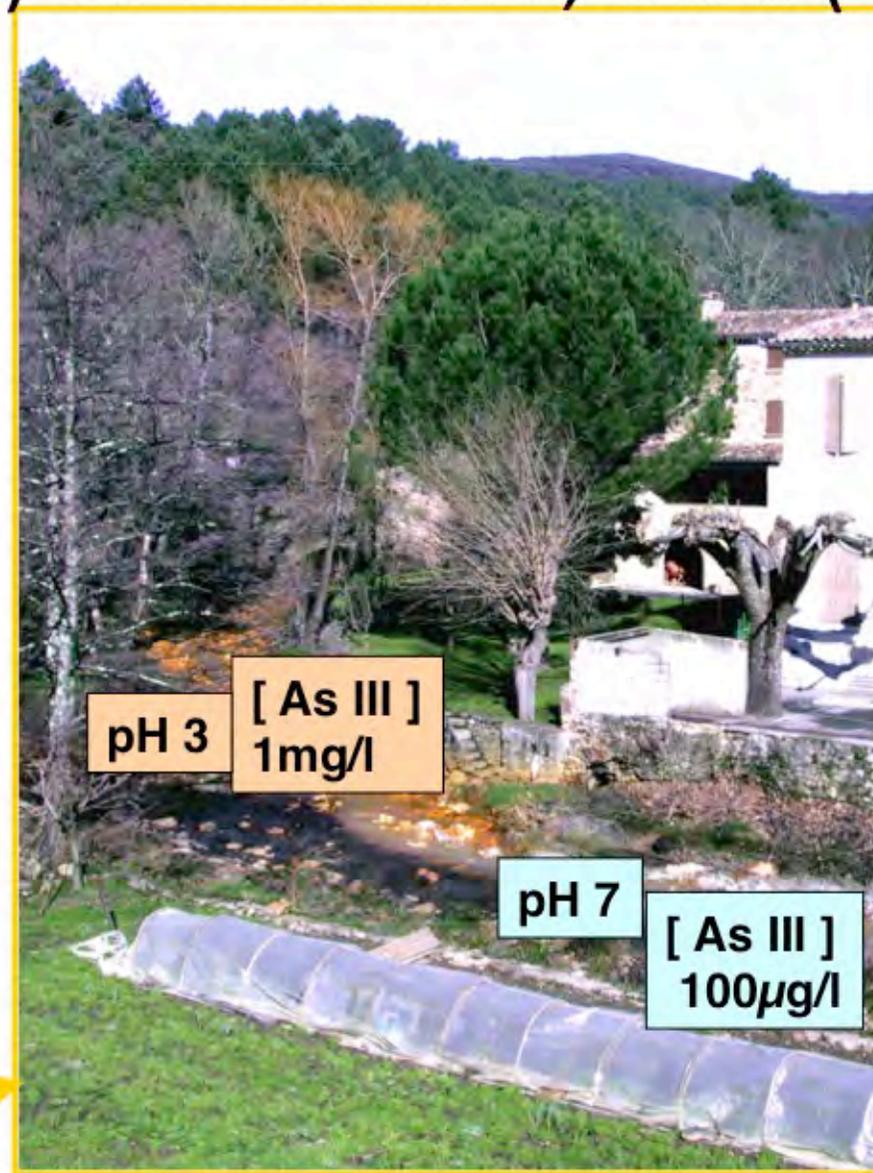
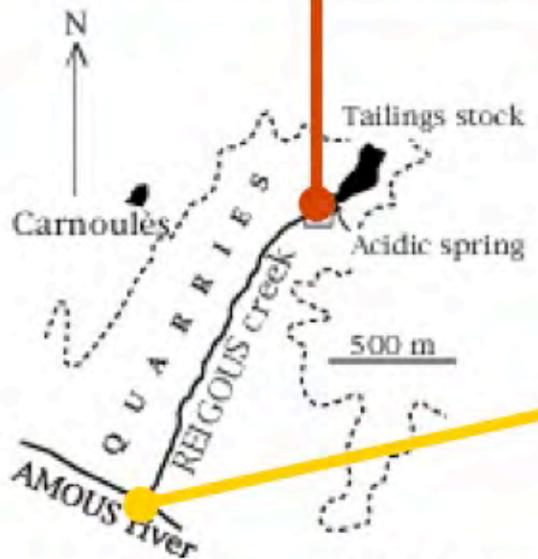
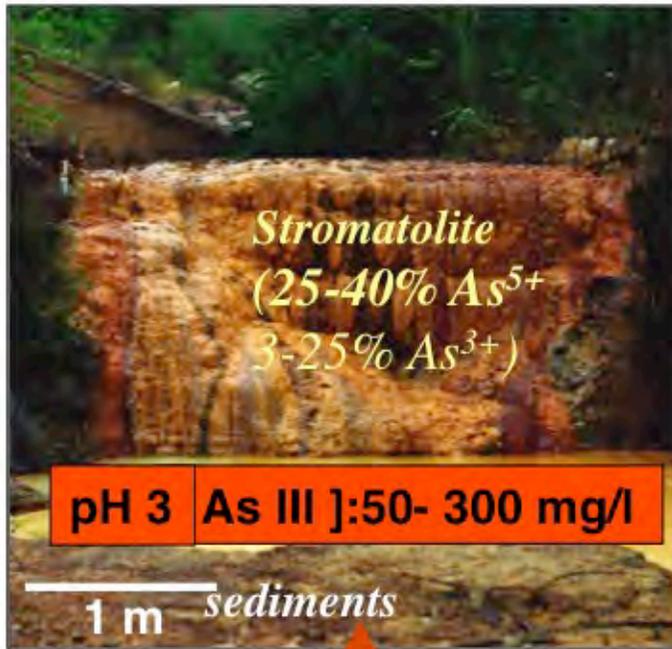
- catalyse des réactions (redox)
- biominéralisations
- adsorption en surface



La modification de la spéciation des polluants dépend du métabolisme bactérien.



Le site contaminé (As) de Carnoulès, Gard (1)



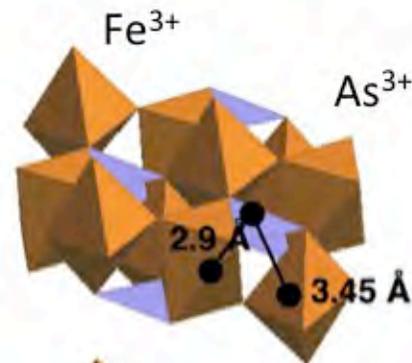
(Morin et al., 2003) Les concentrations baissent vers l'aval mais restent au-dessus des normes (10 µg/l)

Printemps

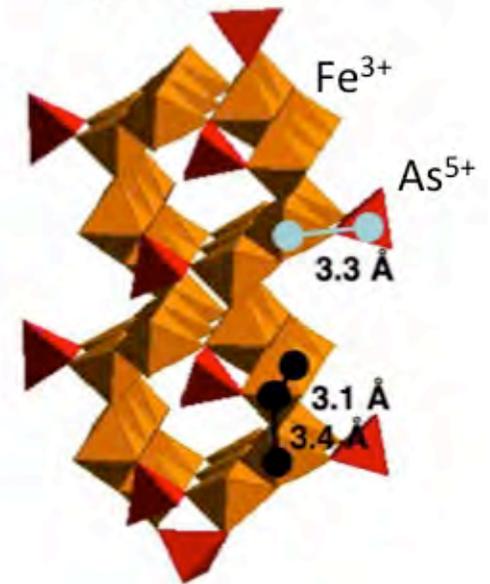
Thiobacillus ferroxydans

Tooeleite:
 Fe^{3+} & As^{3+}

SCOMAJ Photo No.=54 200nm



Des structures minérales pour piéger $As^{3+/5+}$



Eté

Bactéries:
Thiomonas

As-schwertmannite:
 Fe^{3+} & As^{5+}

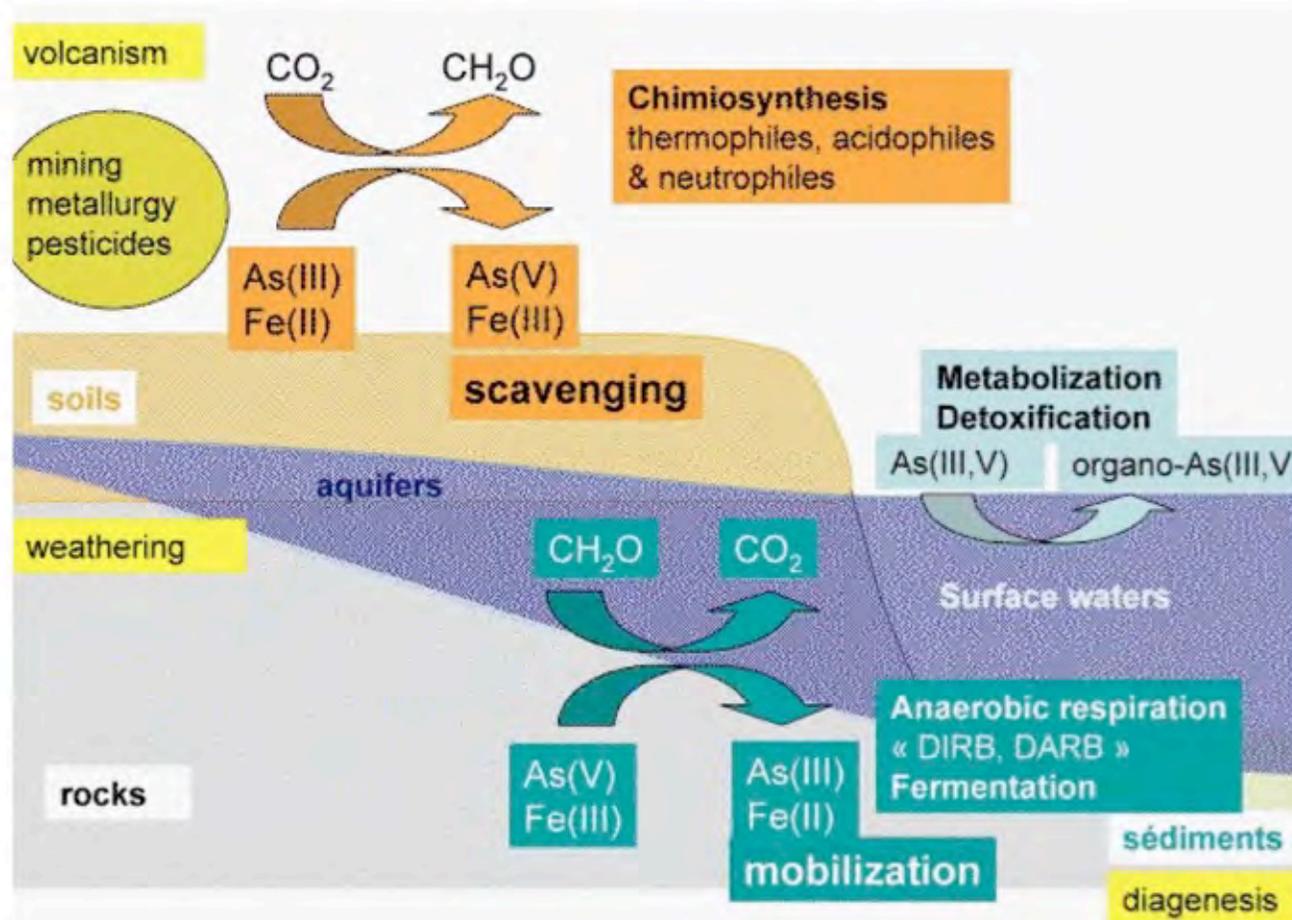
SCOMCM Photo No.=47 200nm

Printemps: As^{3+} co-précipite avec Fe^{3+} (Thiobacillus Ferrooxydans n'oxyde que Fe^{2+} : minéraux $As^{3+}-Fe^{3+}$)

Eté: Thiobacillus (Fe^{2+}) + Thiomonas (As^{3+}) = minéraux $As^{5+}-Fe^{3+}$ adsorption

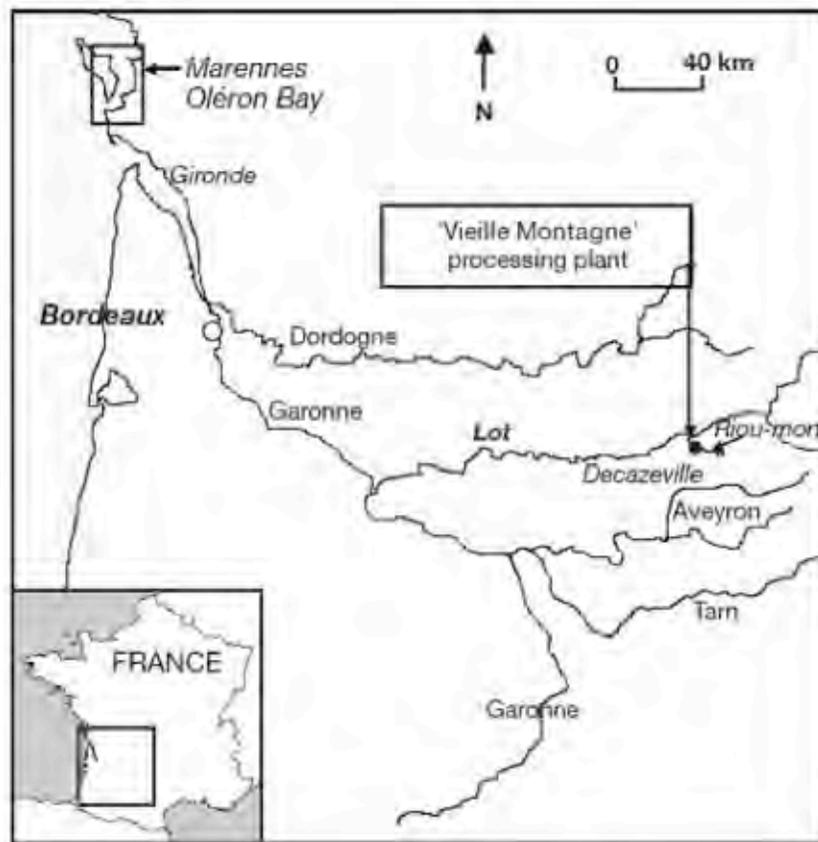
(Morin et al., 2003, 2007)

Des réactions couplées



Interaction biochimie-géochimie

Transport de Cd dans la Garonne

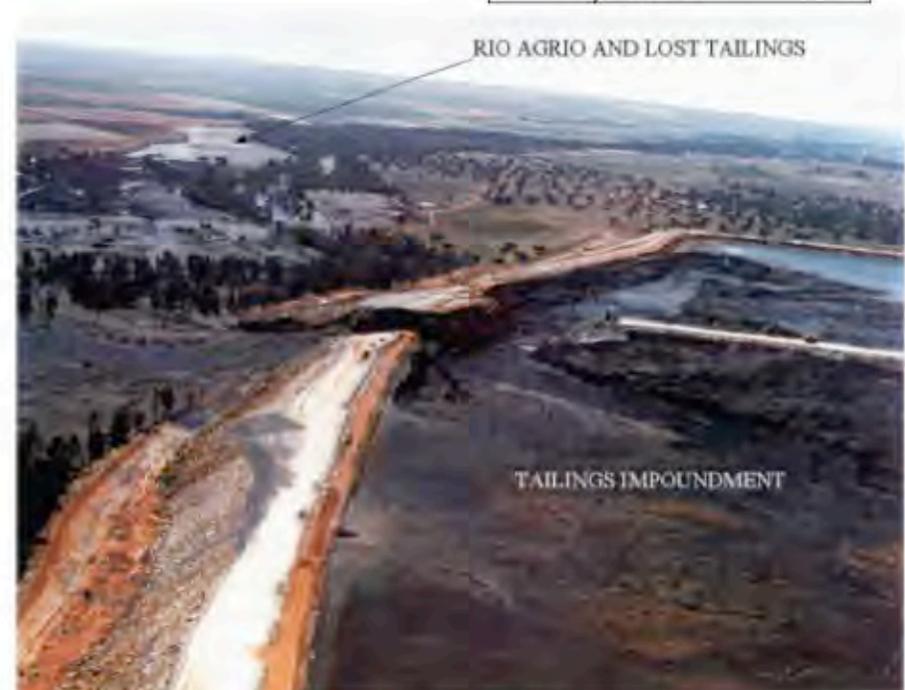
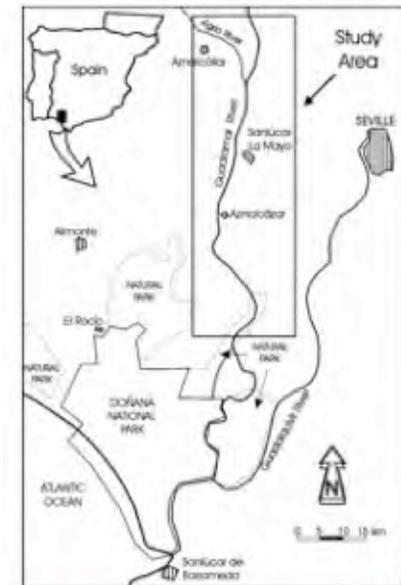


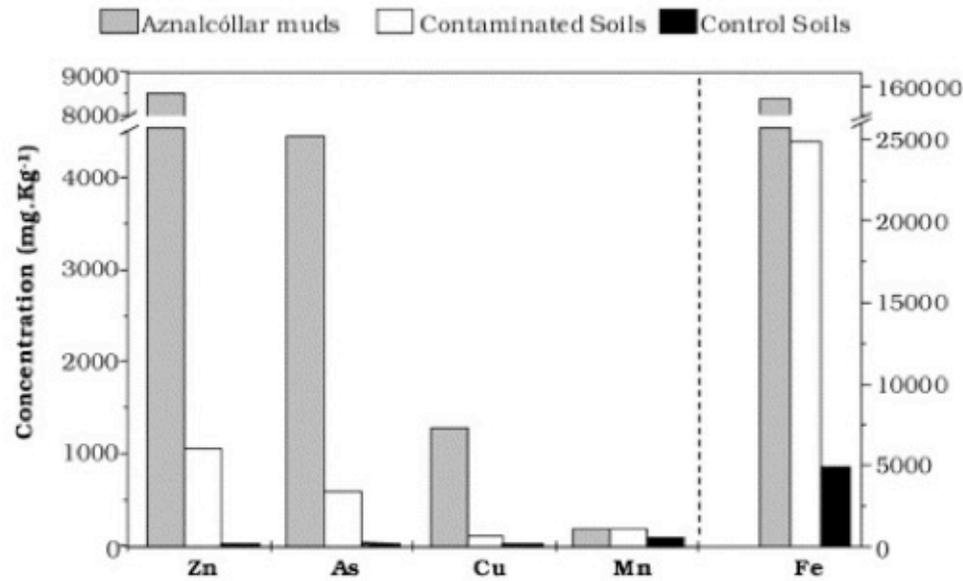
- Activité métallurgique ancienne (1840): stériles d'extraction
- Action des crues: lessivage et mise en suspension. Transport sous forme particulaire ou dissoute
- Formes réduites insolubles (sulfures: CdS...), formes adsorbées, carbonates...
- Transformations durant le transport. Estuaire de la Gironde: libération progressive de tout le stock Cd
- Baisse du stock Cd et des flux (stabilisation des crassiers, évacuation vers l'aval): la production d'huitres de la Gironde est autorisée depuis Juin 2014

(Pigeot et al., 2006)

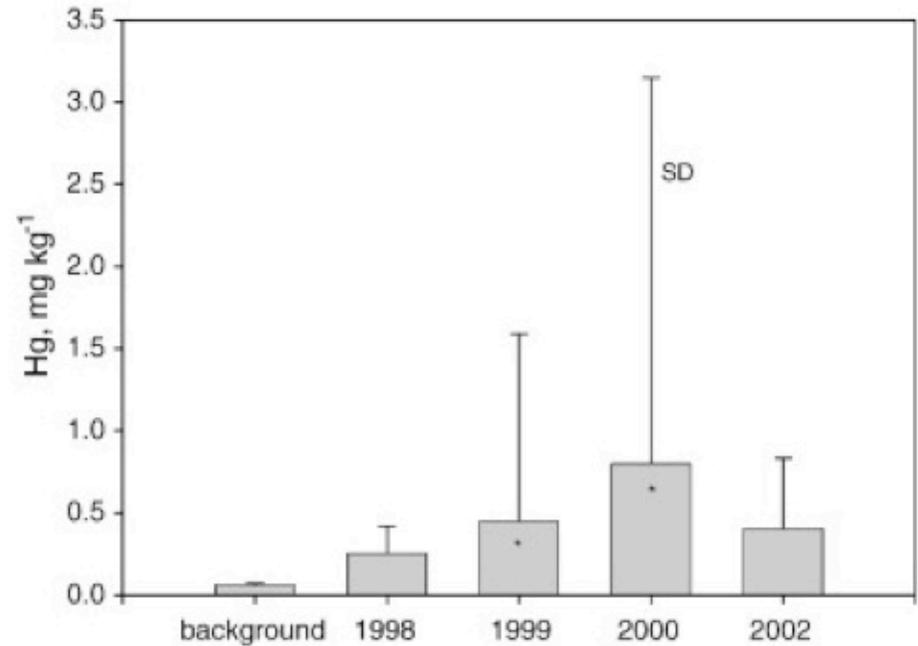
La catastrophe d'Aznalcollar (1998, Andalousie)

- 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)

La contamination a fortement baissé au cours des premières années, mais reste importante (par ex. 16 mg/L de Zn)