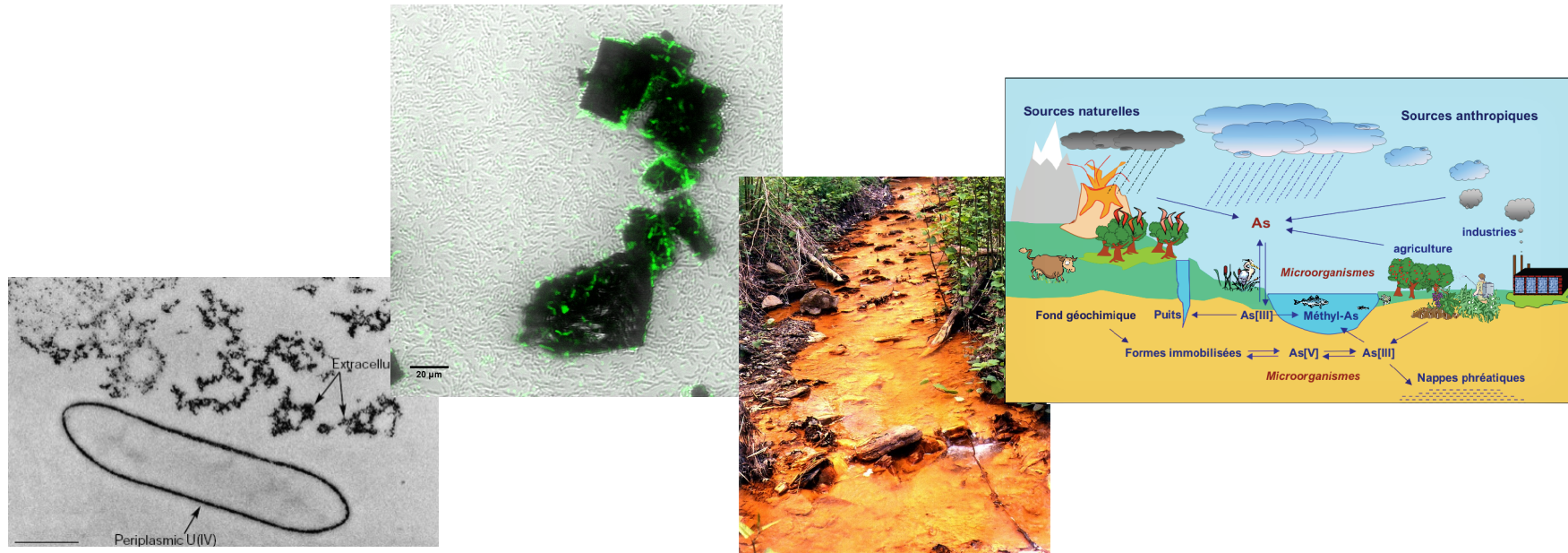


Interactions microorganismes-métaux



Rôle biologique des métaux

Table 5.2

Micronutrients (trace elements) needed by living organisms^a

Element	Cellular function
Boron (B)	Present in an autoinducer for quorum sensing in bacteria; also found in some polyketide antibiotics
Chromium (Cr)	Required by mammals for glucose metabolism; no known microbial requirement
Cobalt (Co)	Vitamin B ₁₂ ; transcarboxylase (propionic acid bacteria)
Copper (Cu)	Respiration, cytochrome c oxidase; photosynthesis, plastocyanin, some superoxide dismutases
Iron (Fe) ^b	Cytochromes; catalases; peroxidases; iron-sulfur proteins; oxygenases; all nitrogenases
Manganese (Mn)	Activator of many enzymes; present in certain superoxide dismutases and in the water-splitting enzyme in oxygenic phototrophs (Photosystem II)
Molybdenum (Mo)	Certain flavin-containing enzymes; some nitrogenases, nitrate reductases, sulfite oxidases, DMSO-TMAO reductases; some formate dehydrogenases

Table 5.2

Micronutrients (trace elements) needed by living organisms^a

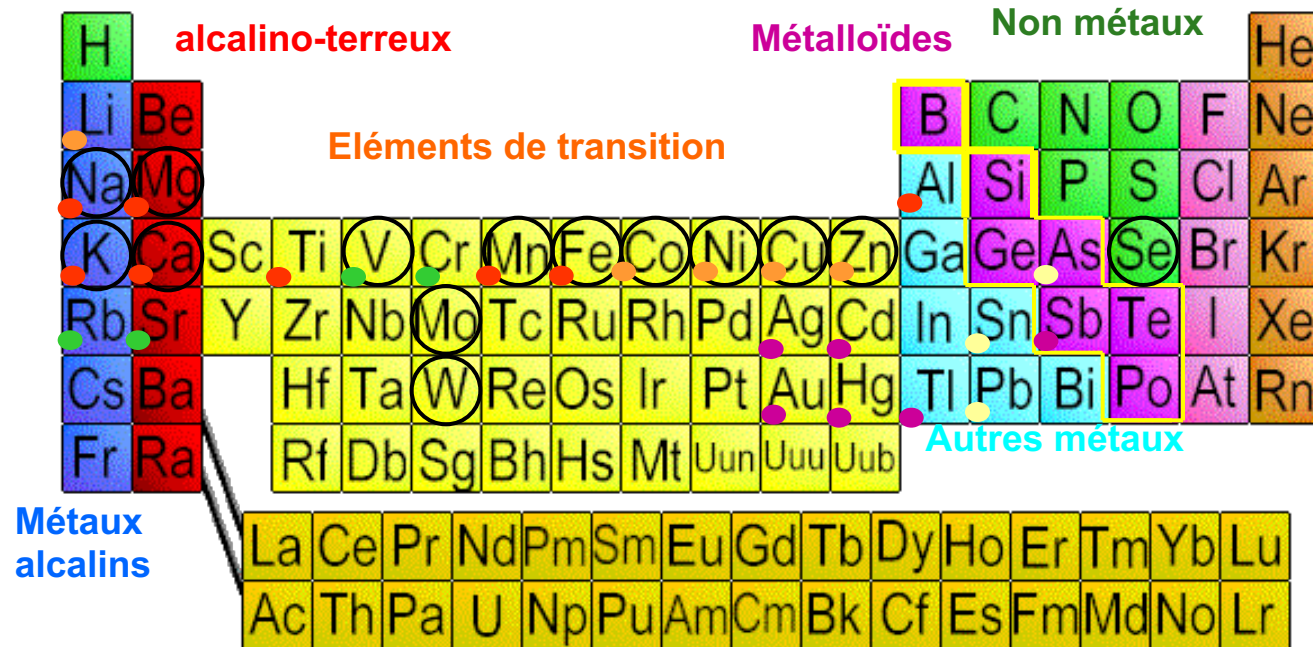
Element	Cellular function
Nickel (Ni)	Most hydrogenases; coenzyme F ₄₃₀ of methanogens; carbon monoxide dehydrogenase; urease
Selenium (Se)	Formate dehydrogenase; some hydrogenases; the amino acid selenocysteine
Tungsten (W)	Some formate dehydrogenases; oxotransferases of hyperthermophiles
Vanadium (V)	Vanadium nitrogenase; bromoperoxidase
Zinc (Zn)	Carbonic anhydrase; alcohol dehydrogenase; RNA and DNA polymerases; and many DNA-binding proteins

^a Not every micronutrient listed is required by all cells; some metals listed are found in enzymes present in only specific microorganisms.

^b Needed in greater amounts than other trace metals.

- Total micronutriments <0.4% poids sec (Fe = 0,2%)
- Requis comme cofacteurs par ~ 2/3 enzymes
- Chez procaryotes, métaux peuvent aussi servir de donneur ou accepteur d' électron.

Éléments essentiels / non essentiels



> 1000 ppm: ● 10-100 ppm: ● < 1 ppm: ●
 100-1000 ppm: ● 1-10 ppm: ●

○ : essentiels

- Sans fonction / Toxiques : Ag, Cd, Hg, Pb, Sn, Tl et As, Sb

- Liens / abondance géochimique

Toxicité

Elle dépend de la capacité du métal à former des complexes

- **Cations A ou durs** : peu polarisables. Interactions avec ligands de nature électrostatique
- **Cations B ou mous** : De préférence liés à des ligands S ou N par des liaisons de nature covalentes.

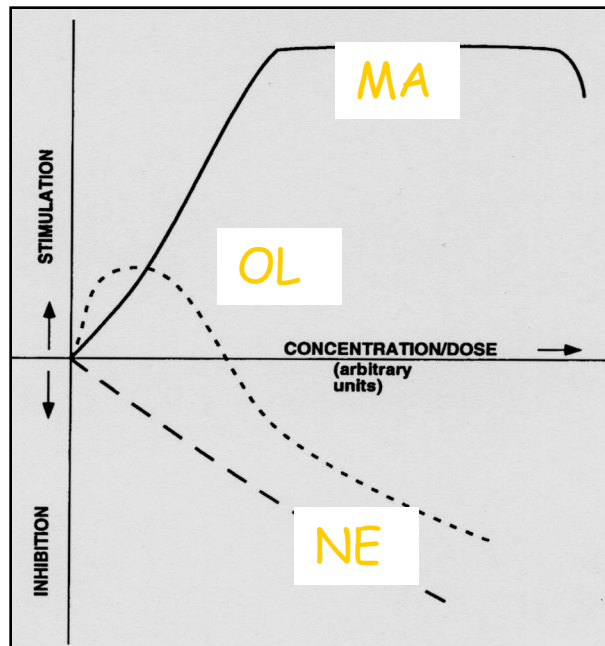
I		II								III		IV		V		VI	
Li	Be									B		C		N			
Na	Mg			III	IV	V	VI			Al		Si		P		S	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr ^{III} _{VI}	Mn ^{II} _{IV}	Fe ^{II} _{III}	Co ^{II}	Ni ^{II}	Cu ^I _{II}	Zn	Ga	Ge	As ^{III} _V	Se ^{IV} _{VI}		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo					Ag ^I	Cd	In	Sn	Sb ^{III} _V	Te		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W					Au ^I _{III}	Hg	Tl ^I _{III}	Pb ^{II}	Bi ^{III}			

	Cations A		Cations B		Espèces hydrolysées
	Cations avec un caractère A prédominant		Cations avec un caractère B prédominant		

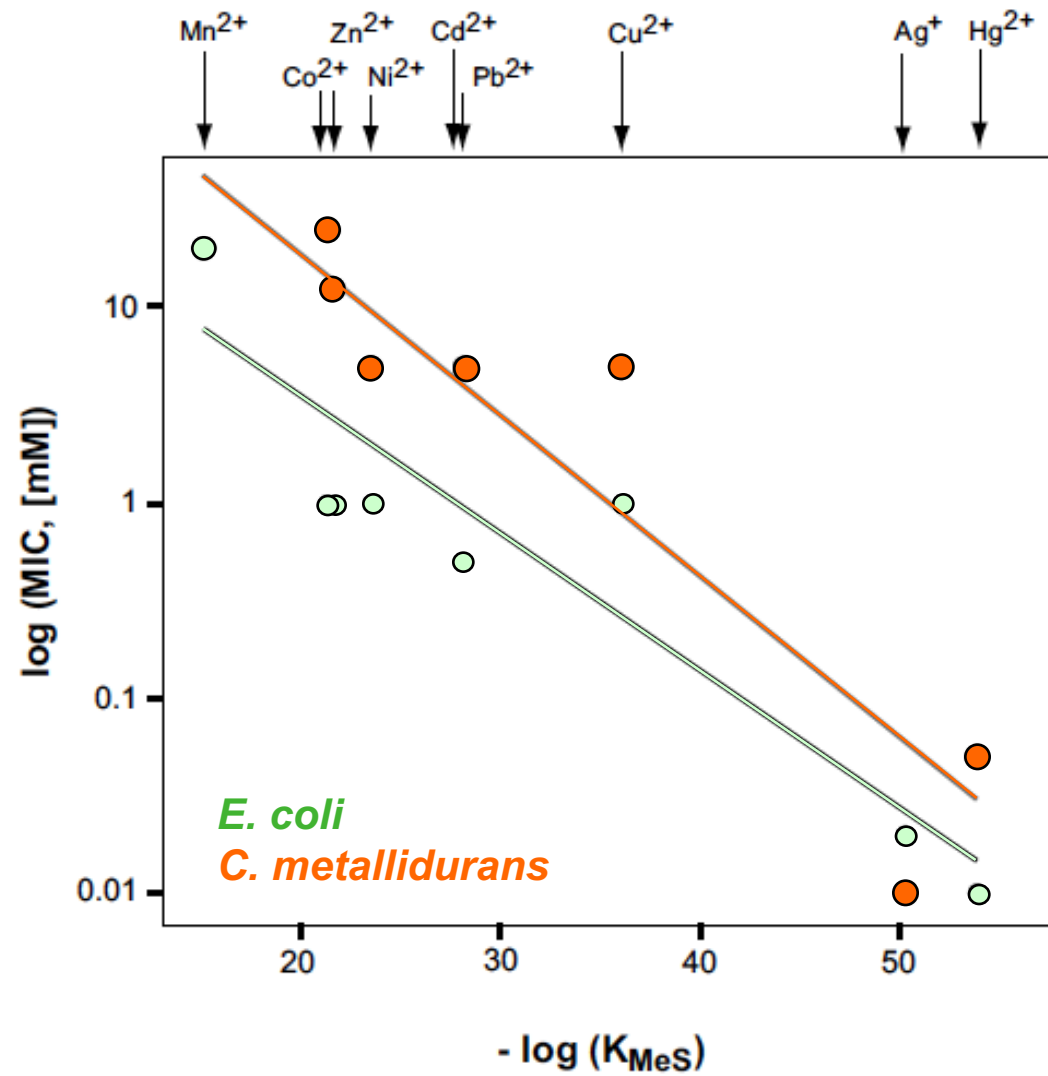
Toxicité

Dépend de la capacité du métal à former des complexes

Accepteurs d'e- durs (groupe A)	Macro-éléments Na, K, Ca, Mg, Fe	Non toxiques sauf si perturbation de l'ionorégulation à forte conc.
Accepteurs d'e- mous (groupe B)	Eléments non essentiels Hg, Ag, (Cd)	Très toxiques ; complexes stables avec groupements -SH et -S-S- des enzymes, Peuvent déplacer des métaux co-facteurs
Métaux intermé- diaires	Oligo-éléments essentiels Zn, Cu, Co, Ni	Toxicité intermédiaire; peuvent déplacer des co-facteurs appartenant au groupe A



Courbes dose-réponse typiques pour
(MA) un macro-élément typique
(OL) un oligo-élément
(NE) un élément non-essentielle toxique



Corrélation CMI / produit de solubilité de sulfures métalliques

Importance de la spéciation

FORMES REDOX	COMPOSÉS ORGANOMÉTALLIQUES	BIOMOLÉCULES
As(III)/As(V)	Méthyl-Hg, Sn, Se, As	Acides Aminés Se
Se(IV)/Se(VI)	Butyl et Phényl-Sn	Sucres arséniés
Cr(III)/Cr(VI)	Alkyl Pb	Métalloprotéines



DIFFERENCE DE
Mobilité, Biodisponibilité, Toxicité

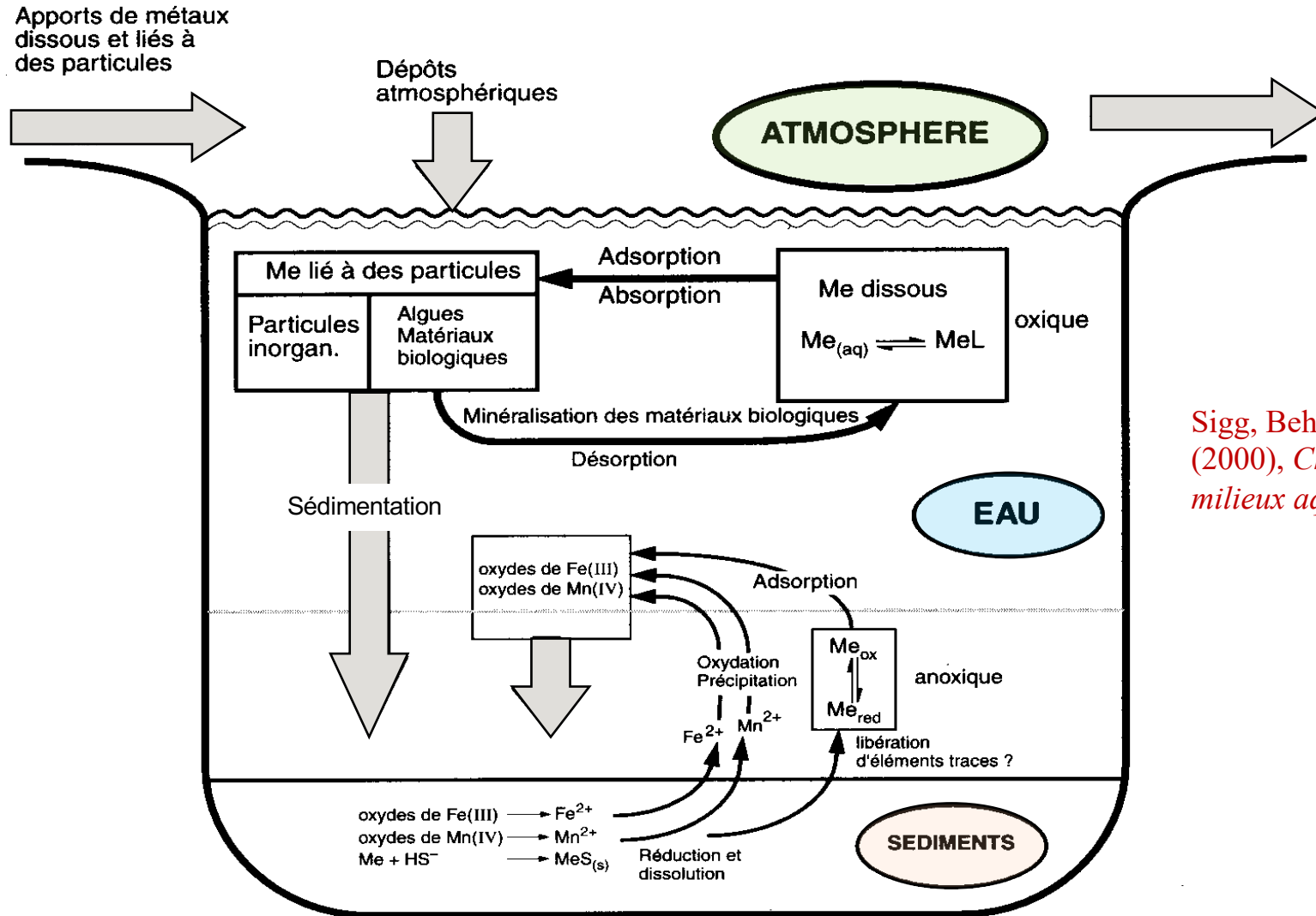
Exemple: l'arsenic

FORMES CHIMIQUES	DL50* (mg/kg)	
Arsénite (As(III))	14	} Toxiques
Arséniate (As(V))	20	
Arsine (AsH ₃)	3	
Acide monométhylarsonique (MMA)	700 - 1800	} Peu toxiques
Acide diméthylarsinique (DMA)	700 - 2600	
Arsénocholine	> 10000	} Non toxiques
Arsénobétaïne	> 10000	
Aspirine	1000 - 1600	
Strychnine	10	

Evaluation du risque : Mesure de [As_{total}] très insuffisante

*DL50 rat: dose létale 50 (dose entraînant la mort de 50 % d' une population)

Comportement des ETM dans l'eau



Sigg, Behra et Stumm
(2000), *Chimie des milieux aquatiques*

Figure 12.16 – Représentation schématique des processus qui déterminent les concentrations des métaux dans la colonne d'eau d'un lac

Spéciation des métaux associés aux phases liquides et solides

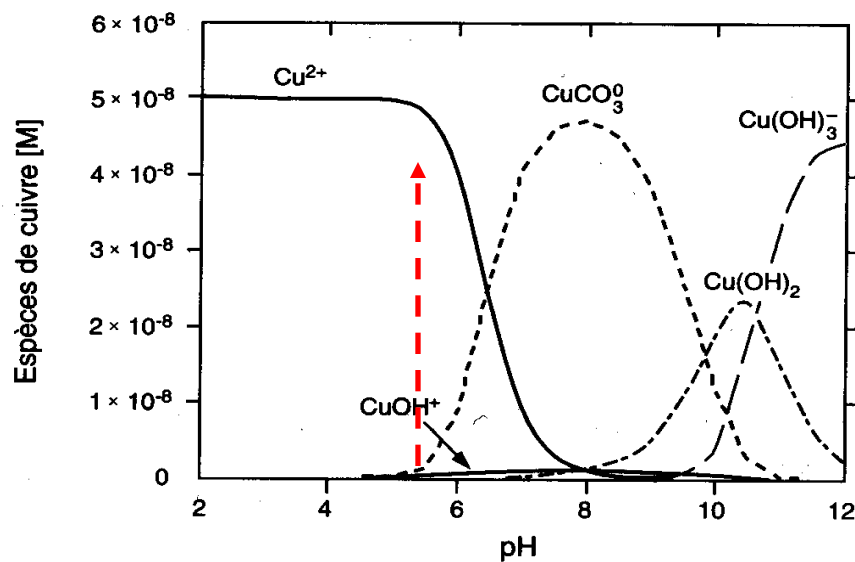
TABLEAU 4-2 Spéciation physico-chimique des métaux associés à la phase liquide (en solution) et solide dans les eaux naturelles. Les formes dissoutes sont définies arbitrairement comme celles passant au travers un filtre dont les pores ont 0,45 μm de diamètre. M = métal; L = ligand inorganique ou organique.

Phase, espèces	Exemples	Biodisponibilité et toxicité
Dissoute (<0,45 μm)		
Ion libre (M^{z+})	Zn^{2+} , Cd^{2+} , Al^{3+}	Élevée
Complexes inorganiques (ML)	MCO_3^0 , M(OH)^+ , M(OH)_2^0	Indirecte
Complexes organiques (ML)	M-humate, M-fluvate	Indirecte
Formes colloïdales (0,01 - 0,45 μm)	M lié aux hydroxydes de Fe, Mn,	Indirecte
Solide (>0,45 μm)		
Espèces adsorbées	M lié aux hydroxydes de Fe, Mn	Indirecte
Phases pures	ZnCO_3 , ZnS , CdS (milieux anoxiques)	Indirecte, faible
Solides mixtes	Métaux occlus dans des solides inertes (silicates, argiles, etc...)	Très faible

Exemple: spéciation du Cu^{2+} en présence des ligands OH^- , CO_3^{2-}

Tableau 1. Distribution des espèces chimiques présentes en solution et leur concentration, à pH 8.

	C [mol ℓ^{-1}]	% Cu _T
Cu^{2+}	8.2×10^{-10}	1.6
CuOH^+	8.2×10^{-10}	1.6
Cu(OH)_2^0	5.2×10^{-10}	1.0
Cu(OH)_3^-	1.3×10^{-12}	3×10^{-3}
Cu(OH)_4^{2-}	1.0×10^{-17}	2×10^{-8}
CuCO_3^0	4.7×10^{-8}	94
$\text{Cu(CO}_3)_2^{2-}$	8.0×10^{-10}	1.6



Cu^{2+} majoritaire pour $\text{pH} < 5.5$

Figure 6.8 – Spéciation de Cu en fonction du pH ($C_T = 2 \times 10^{-3}$ M, $\text{Cu}_T = 5 \times 10^{-8}$ M)

Sigg, Behra et Stumm (2000),
Chimie des milieux aquatiques

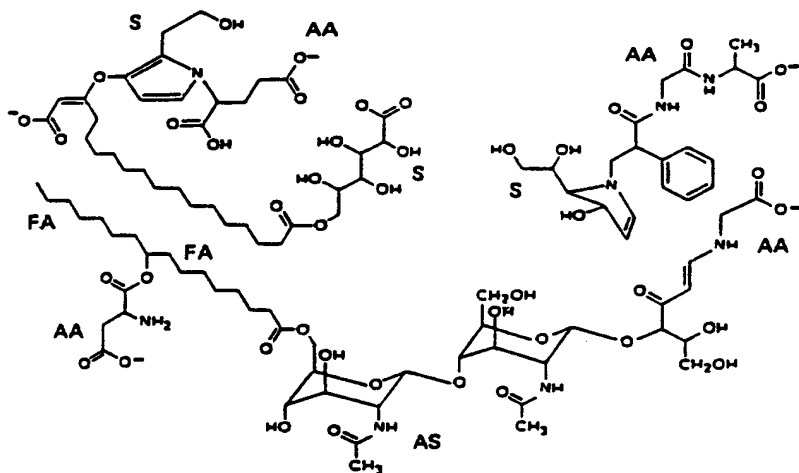
Spéciation de Cu en présence de complexants organiques

Tableau 2. Distribution des espèces chimiques présentes et leur concentration à pH 8, après l'ajout d'un complexant organique L ($2 \cdot 10^{-7}$ mole/L) à la solution précédente.

		C [mol ℓ^{-1}]
Espèces :	Cu^{2+}	3.2×10^{-11}
	CuOH^+	3.2×10^{-11}
	$\text{Cu}(\text{OH})_2^0$	2.0×10^{-11}
	CuCO_3^0	1.8×10^{-9}
	CuL	4.8×10^{-8}

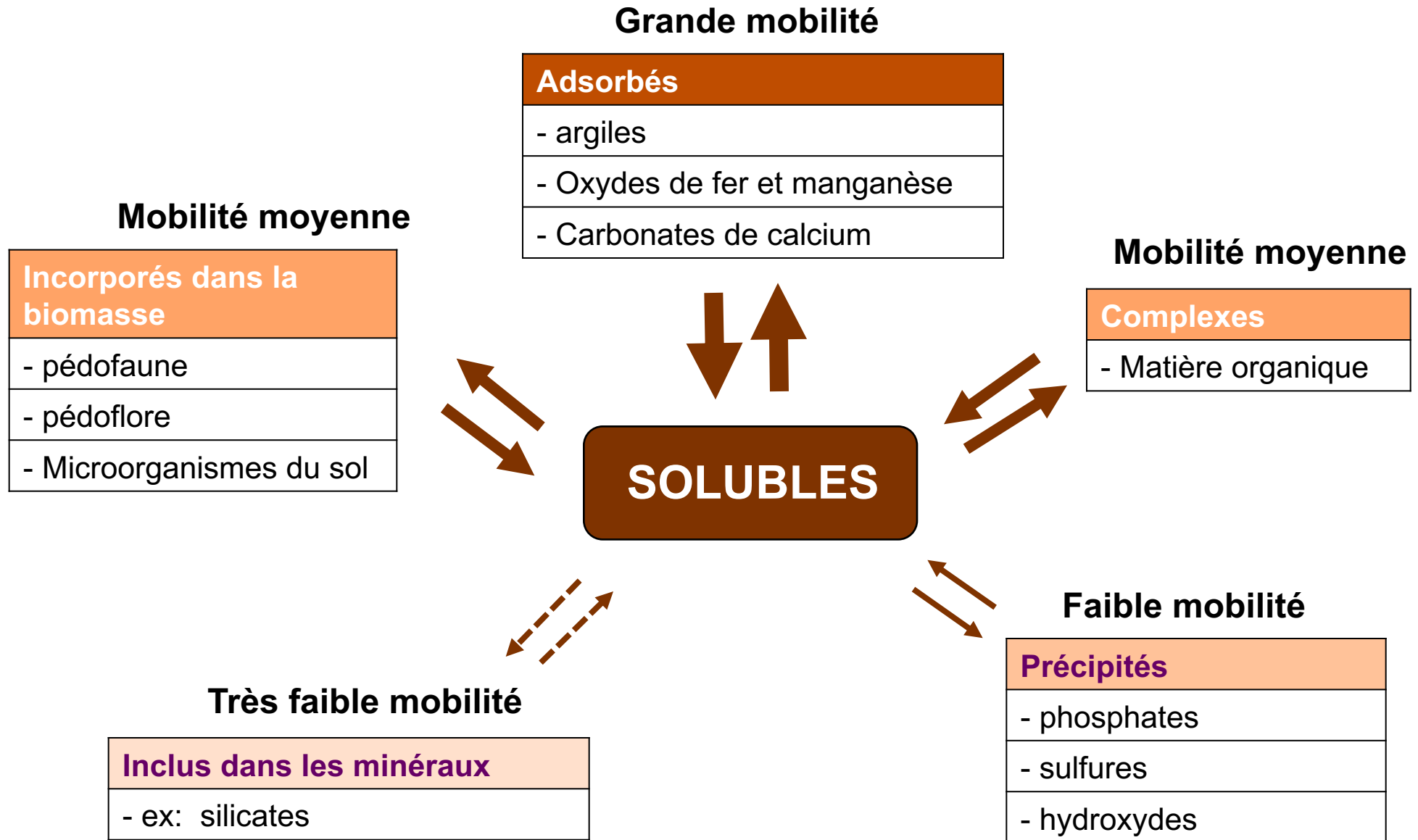
(Les autres espèces sont négligeables)

En milieu naturel, importance des acides humiques et fulviques



Source: Sigg, Behra et Stumm (2000),
Chimie des milieux aquatiques

Distribution et mobilité des ETM dans les sols



Facteurs physico-chimiques influant la mobilité/toxicité des ETM

pH : - solubilité des cations (Cd, Cu, Zn, Ni, Pb, Cr(III) ...) augmente avec l'acidité
 - solubilité des anions (Cr(VI), As, Sb, Se ...) augmente avec le pH

Eh : varie de -300 mV (cond. réductrices) à +600 mV (cond. oxydantes)
 - changement de l'état d'oxydation de l'ETM
 - changement de l'état d'oxydation du ligand de l'ETM
 - formation ou dissolution de phases porteuses de l'ETM

Mobilité relative	pH		Potentiel rédox	
	Neutre-alkalin	Acide	Oxydant	Réducteur
Très haute	Se, Mo	B	B	-
Haute	As	Zn, Cd, Hg, Co, Ni, (Mn)	Mo, Se	
Moyenne	Mn	Cu, Al, Pb, Cr	Cu, Co, Hg, Ni, Zn, Cd	Mn
Basse	Pb, Fe, Zn, Ti, Cd	Fe(III), Ti	Pb, Ti	Fe, Zn, Co, Ni, Ti
Très basse	Al, Cr, Hg, Ni, Co, Cu	Mo, Se, As	Al, Cr, Fe, Mn	Al, Cr, Hg, Cu, Se, B, Mo, Cd, Pb

Source : Förstner (1985).

III. Le fer comme donneur d'électrons (oxydation)

- Oxydation de Fe(II) en Fe(III), chimique ou biologique, est fonction de pH et O₂
- **pH neutre**
 - oxydation abiotique spontanée
 - Qq bactéries: *Gallionella*, *Sphaerolitus*, *Leptothrix*
- **pH acide <3**
 - Fe²⁺ stable, oxydation biologique plus importante
 - bactéries acidophiles litho-autotrophes

Acidithiobacillus ferrooxidans

Leptospirillum ferrooxidans

Croissance optimale

T= 30-35 ° C

pH ~2

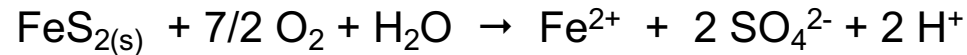


Impliquées dans **drainage minier acide** et procédés de **biolixiviation**

Drainage acide des mines

- Formation DMA au contact de l'eau et O₂
- Oxydation du Fe²⁺ aboutissant à une acidification

(1) Dissolution spontanée pyrite et oxydation sulfure en sulfate

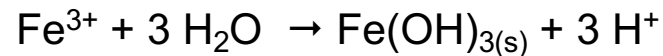


(2) Milieu aérobie et neutre, oxydation spontanée du fer ferreux



Bactéries tq *Acidithiobacillus ferrooxidans* peuvent accélérer ce processus (x 10⁵). Contribution augmente quand pH diminue (cf. 2H⁺ (1))

(3) Précipitation du fer ferrique



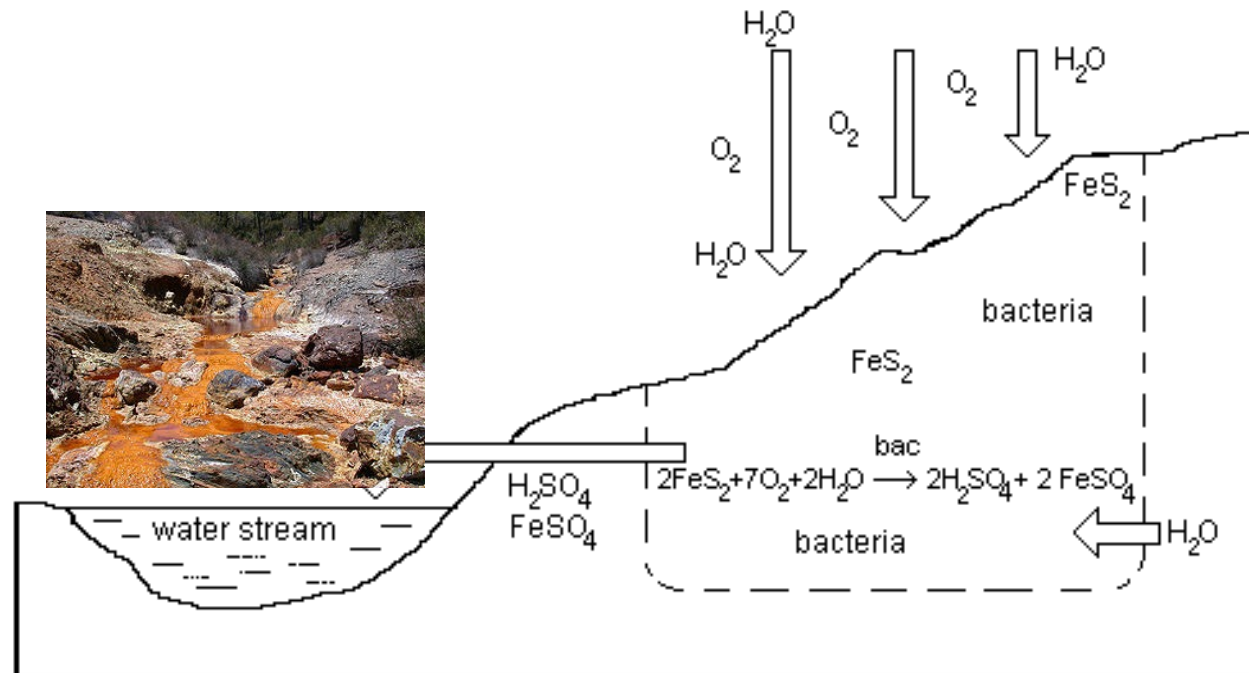
(4) bilan : **$\text{FeS}_{2(s)} + 15/4 \text{O}_2 + 7/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_{3(s)} + 2 \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+$**



(5) A pH acide, Fe^{3+} produit en (2) reste soluble et oxyde chimiquement la pyrite :



⇒ front d'acidification qui progresse +/- rapidement selon nature des milieux traversés (carbonatés ou non) ---> pollution acide + métallique



Generation of Acid Mine Drainage

⇒ modification structure communautés microbiennes, ↘ biodivers., ↘ dégradation MO...
disparitions d'organismes supérieurs ... (<pH5)

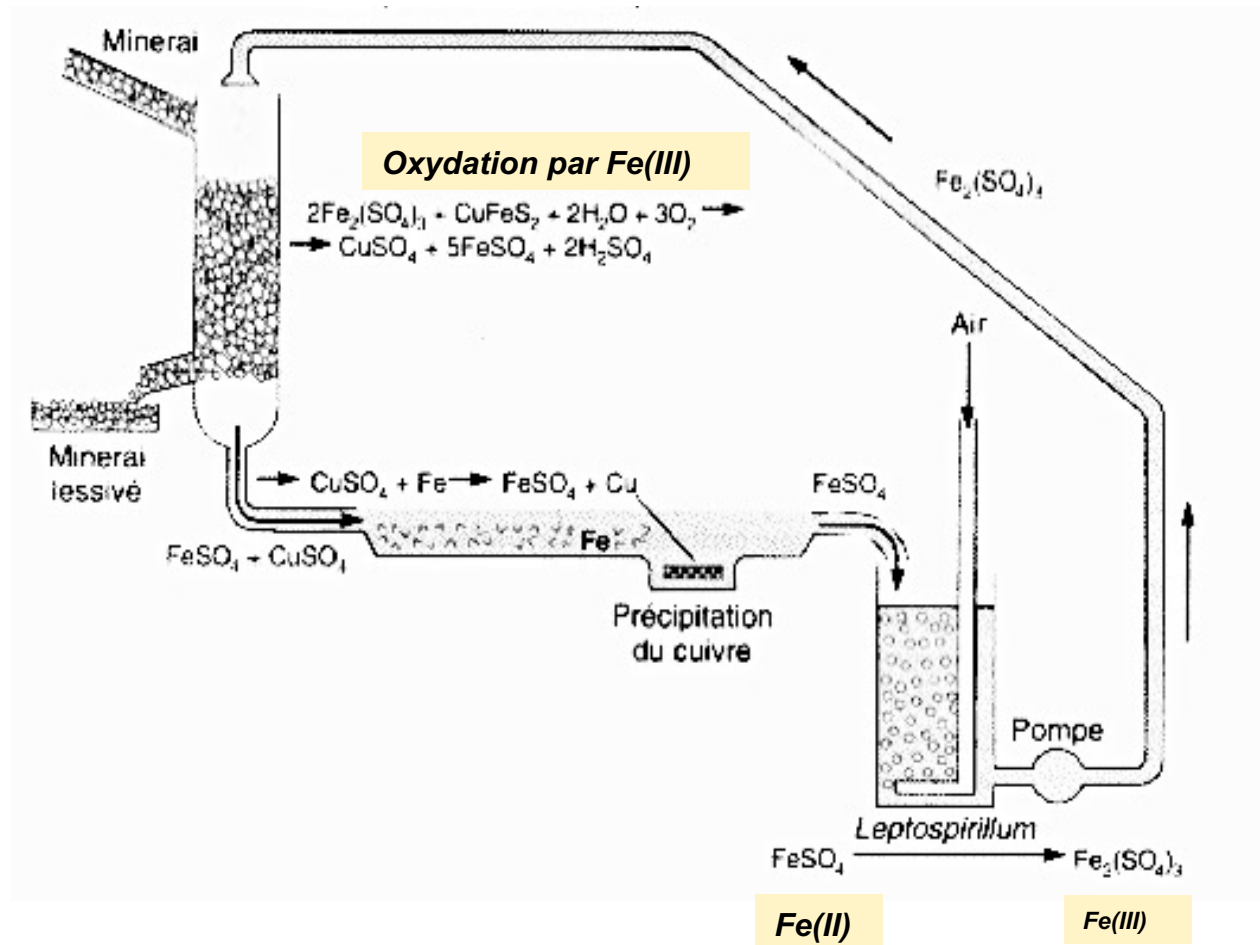
Mobilisation du métal par biolixiviation

- Extraction des métaux de minerais à faible teneur (< 0,4%)
- Bactéries oxydant le fer (*Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*...).



+ eau, d'air (+ CO₂)
 ↗ température à 35° C ;
 + apport nutriments : N, K, Mg
 adaptation de la granulométrie
 mélange des phases solide et liquide.

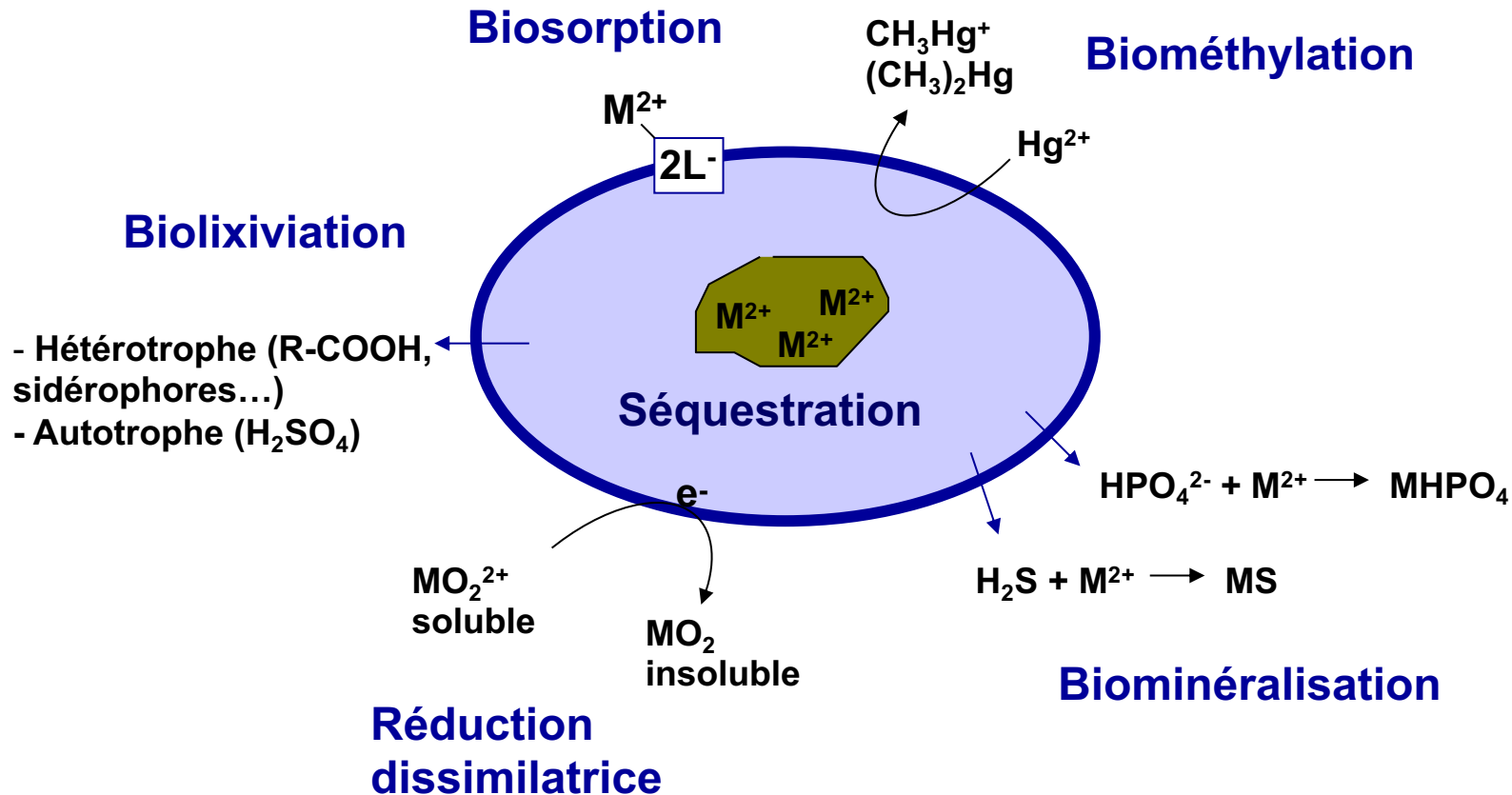
- Ex: biolixiviation Cu : 20-25% production mondiale
- Applicable à d'autres métaux : Au, U, Co...





The bioleaching pile from the Andina copper mine in Salado, Chile, contains ~60,000 tons of ore (mainly chalcopyrite). Microorganisms such as *Acidithiobacillus ferrooxidans* inhabit these piles and catalyze the leaching of precious metals. The scanning electron micrograph (inset) shows the cells, 1 to 2 μm in length, attached to a chalcopyrite particle.

Interactions microorganismes-métaux



- Modification de la mobilité, biodisponibilité et toxicité
- Exploitations biotechnologiques (extraction des métaux, dépollution)

L'arsenic dans l'environnement

- Origine naturelle (altération de minéraux
Volcanisme, ...) ou anthropique (mines, fongicide,
xyloprotecteurs...)

- Principales formes

Arséniate As(V)

Arsénite As(III)

- Cytotoxicité :

- . As(V) interférence phosphorylation (ATP)

- . As(III) affinité pour S (thiols)

- Intoxication chronique: Altération pigmentaire,
hyperkératose, cancers



FeAsS



Arsenopyrite

As₂S₃

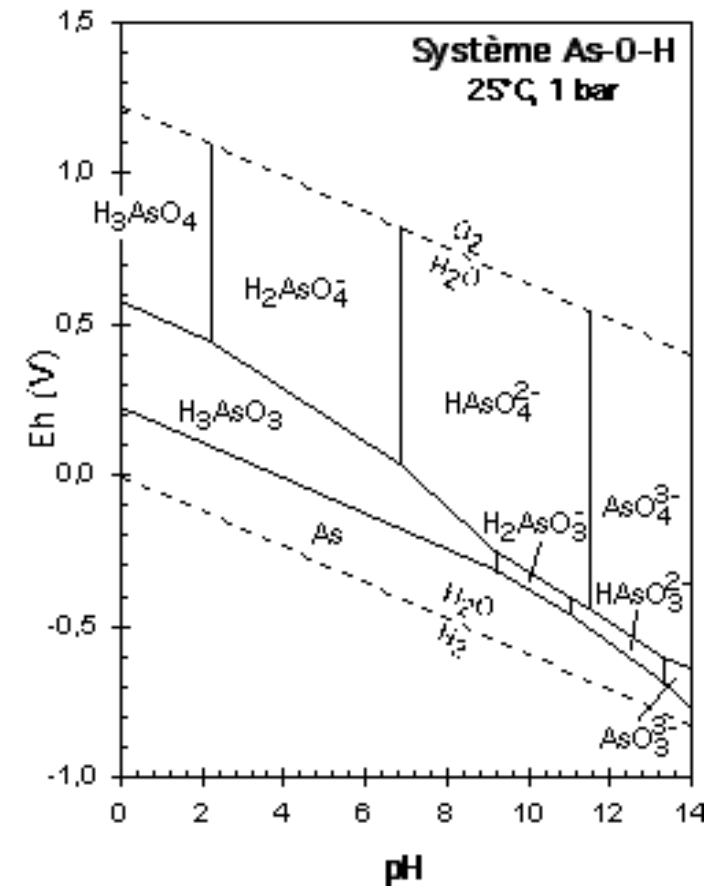


Orpiment

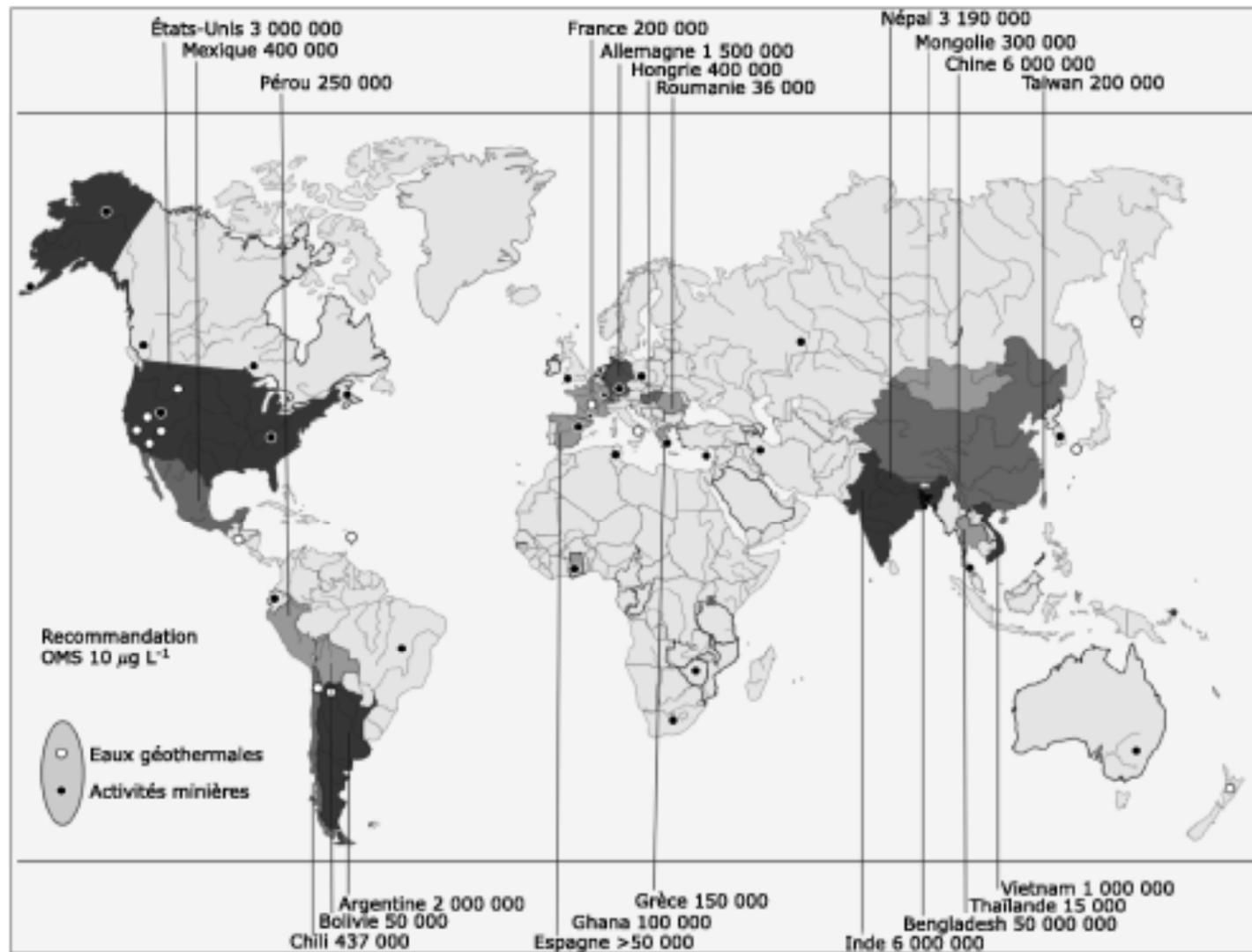
AsS



Realgar

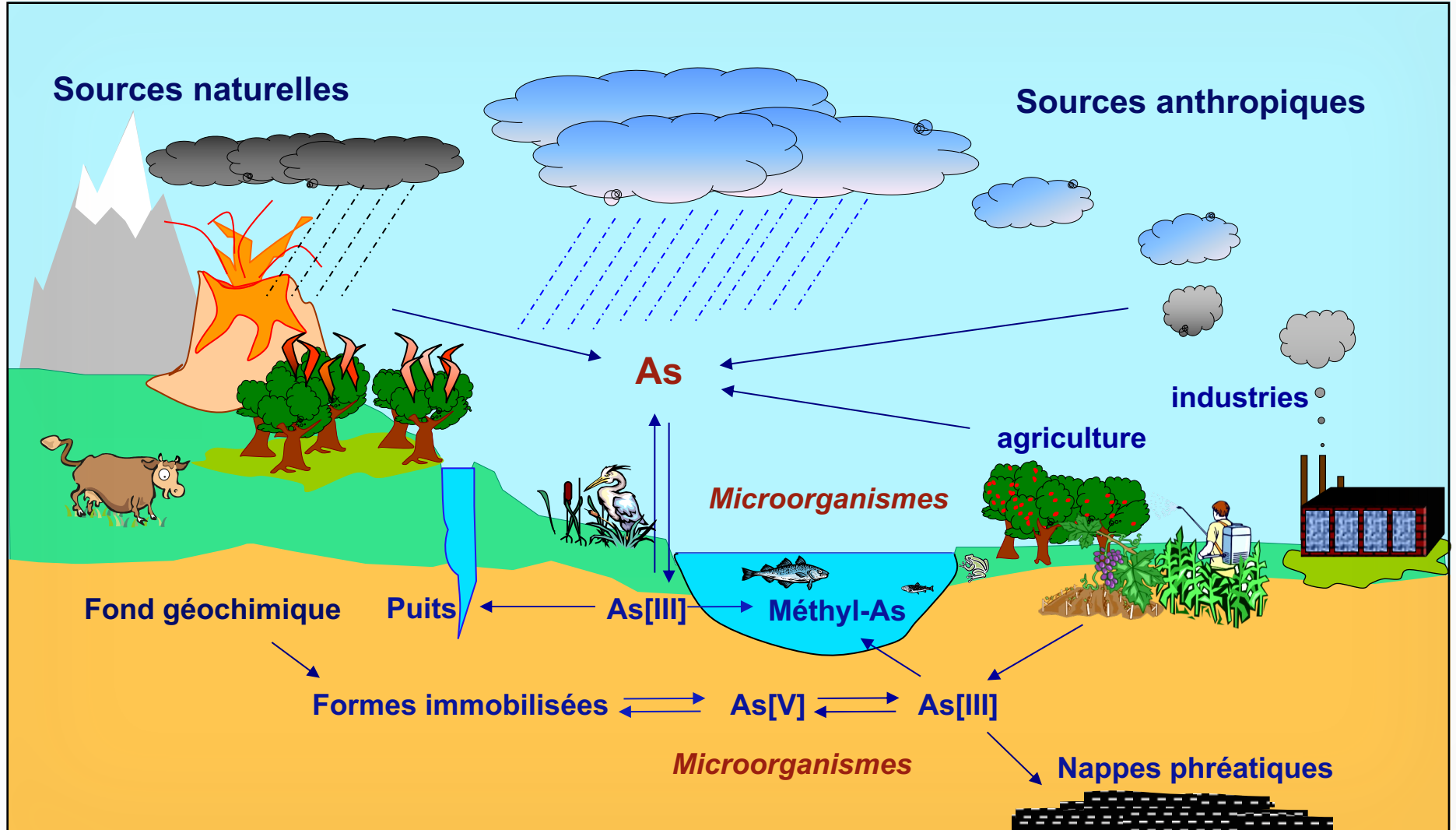


Contamination de l'eau par l'As : un problème mondial



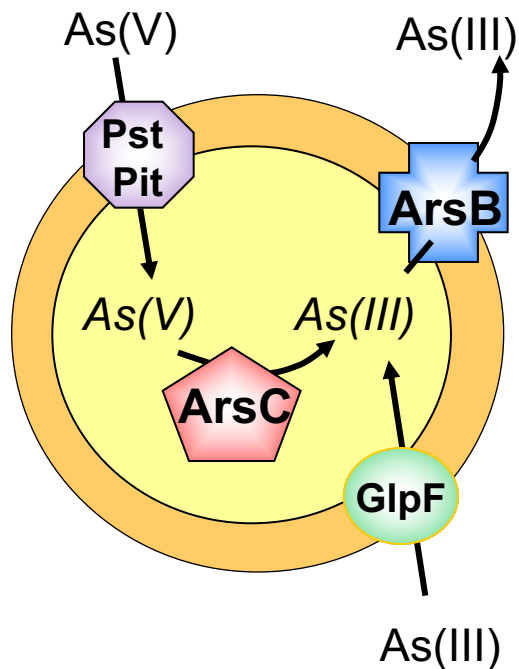
Les chiffres indiquent le nombre de personnes consommant quotidiennement une eau dont la concentration en arsenic est supérieure à 10 µg L⁻¹. La gradation des gris est fonction du nombre de personnes contaminées, du plus clair (moins élevé) au plus foncé (le plus élevé).

Cycle de l'arsenic

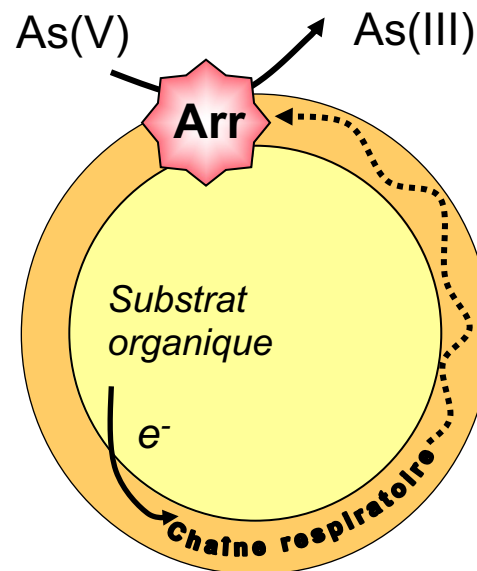


Transformations microbiennes de As

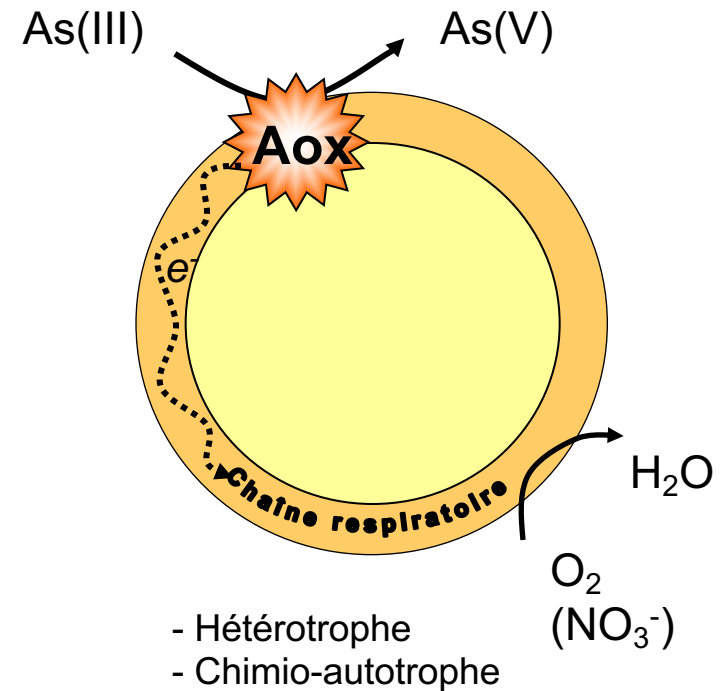
Détoxification (système ars)



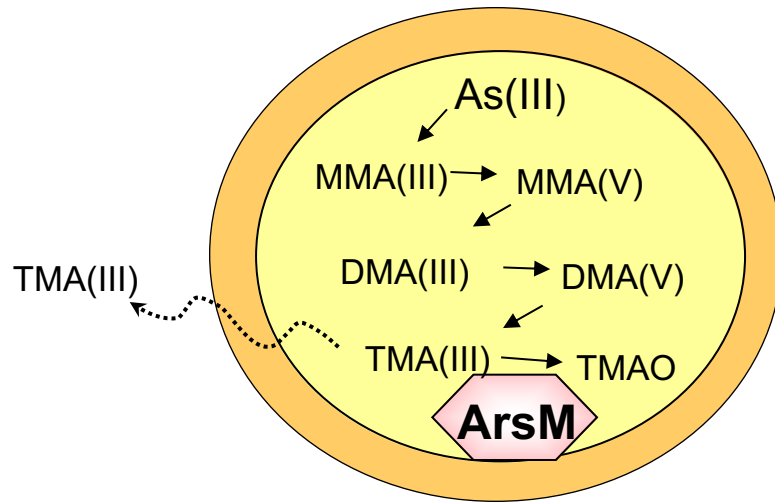
Respiration de l'arséniate



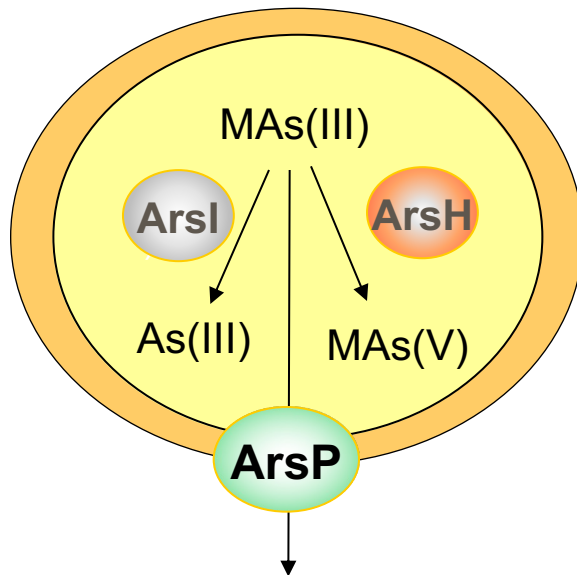
Oxydation de l'arsénite



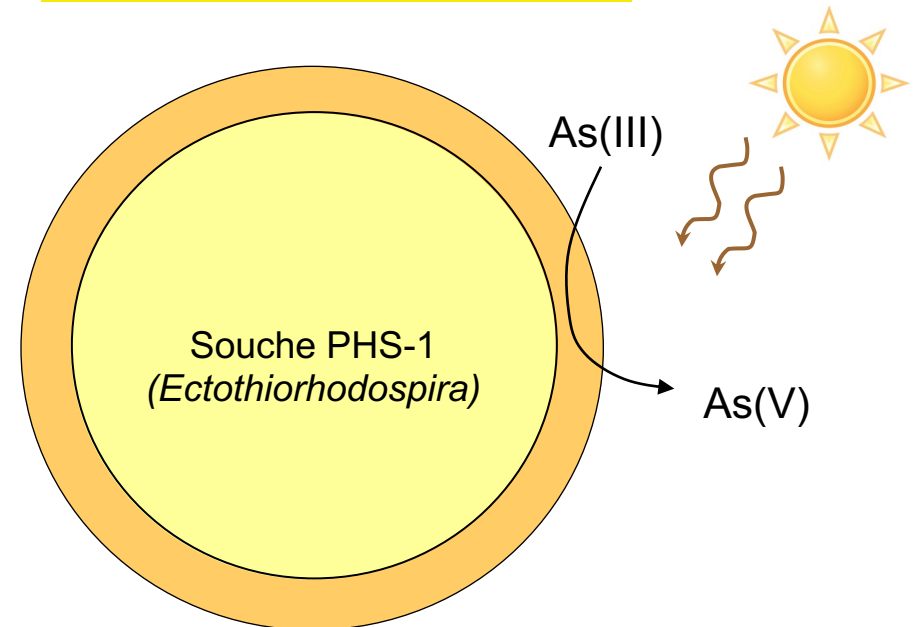
Méthylation



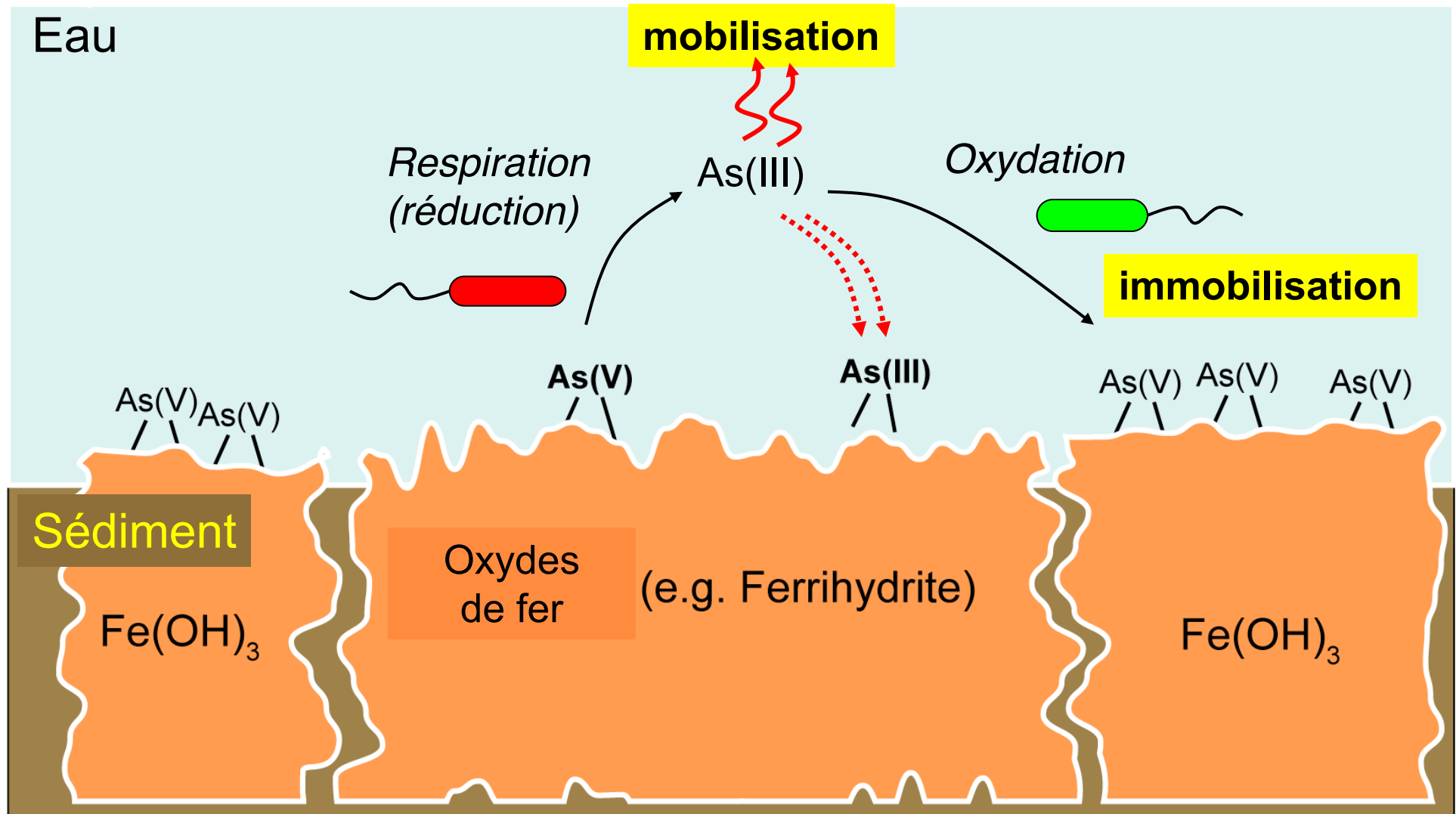
Détoxication MAs(III)



Oxydation (Photosynthèse anoxygénique)



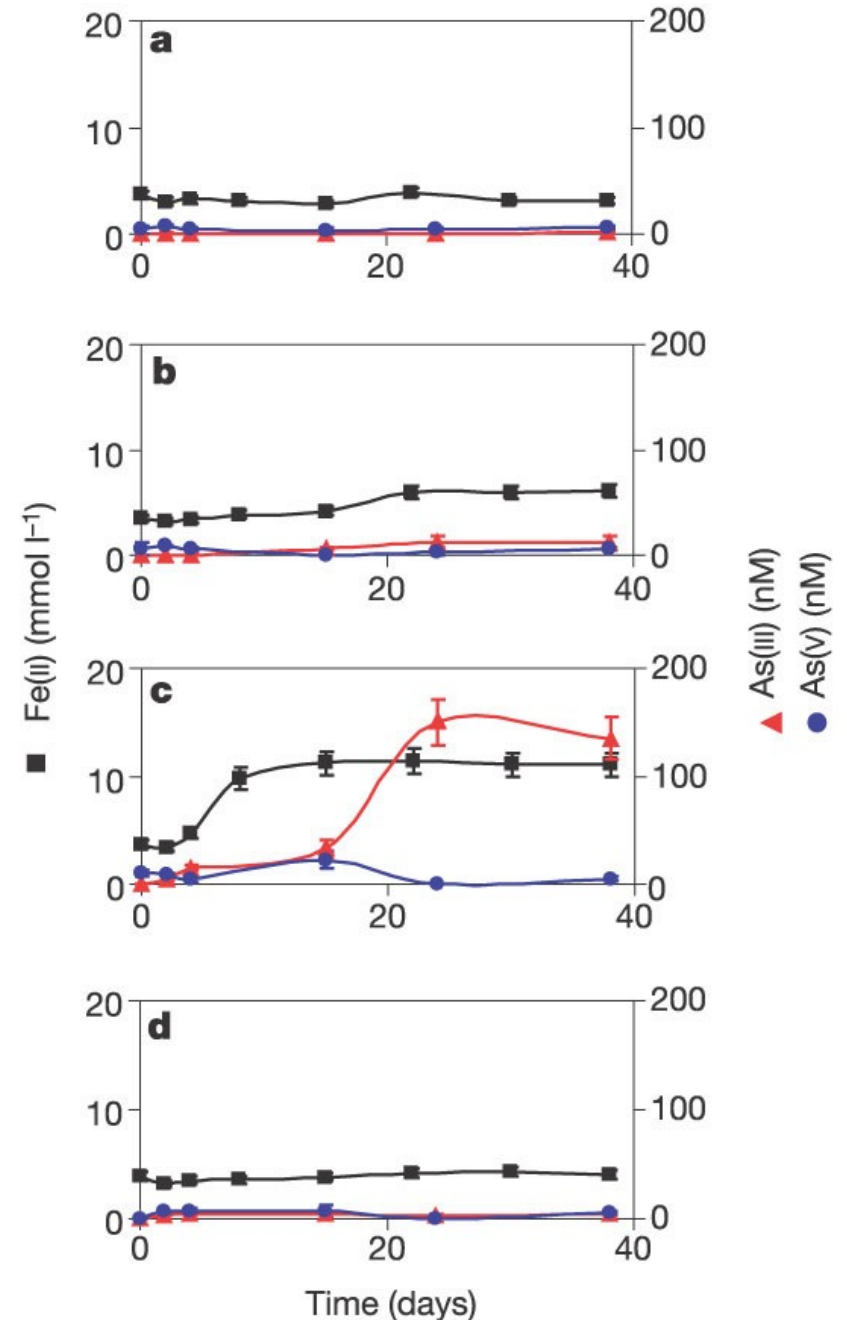
Impact des transformations redox sur la mobilité



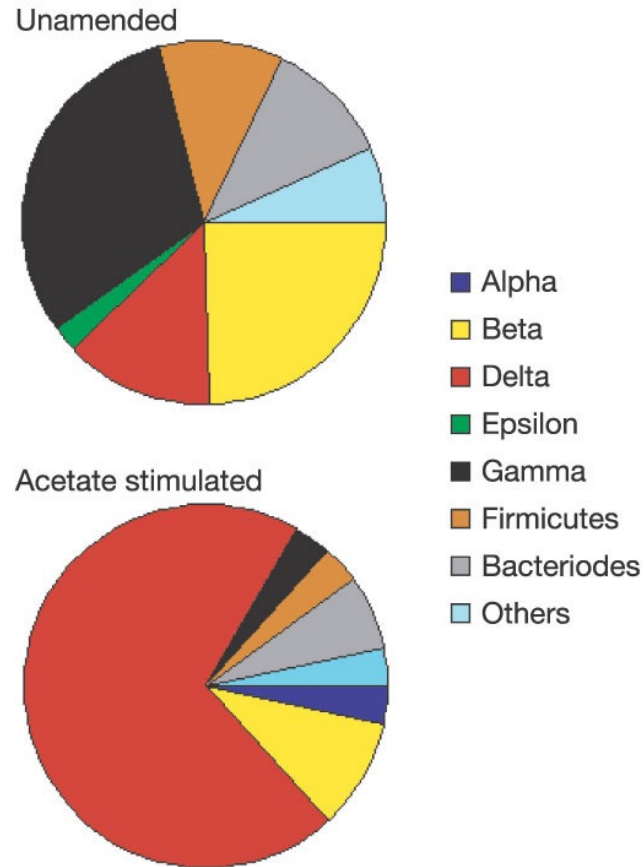
Mobilisation de l'arsenic par réduction bactérienne

A: Microcosmes sédiment contaminé As (delta Gange)

1. Aérobie;
2. Anaérobie;
3. anaérobie + acétate
4. Idem 3 + sédiment autoclavé

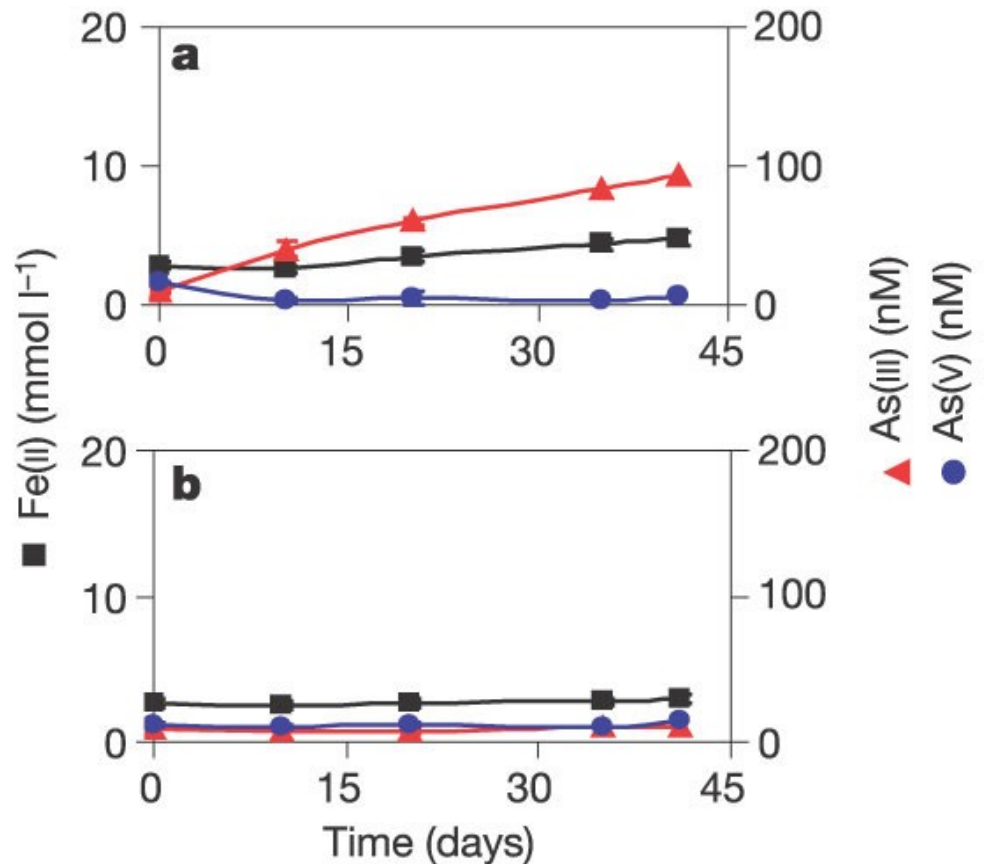


B: Diversité bactérienne (banque 16S rDNA) sédiment $\pm$ acétate



70% *Geobacter* (IRB)

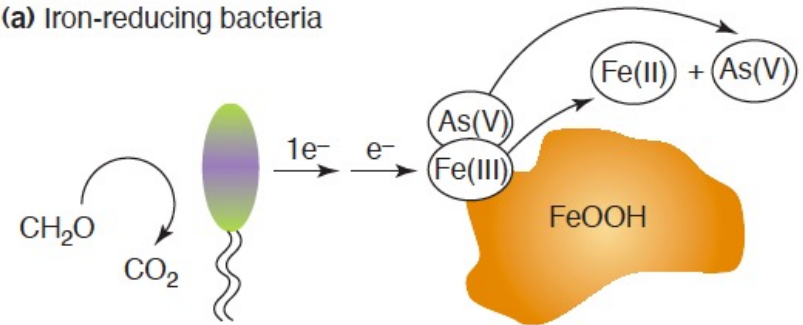
C: Microcosmes sédiment stérilisé $\pm$ bactéries ferrireductrices isolées du sédiment



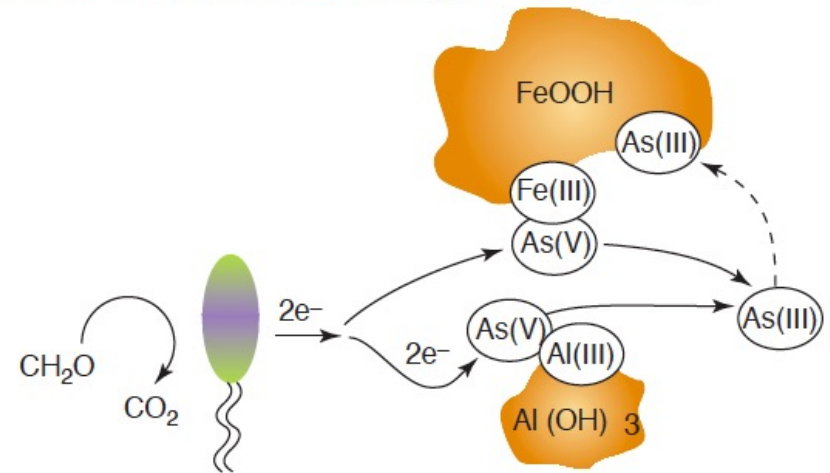
Mécanismes de mobilisation

- A: libération de As(V) par dissolution de la phase porteuse (bactéries ferri-red tq *Geobacter*)
- B: désorption de As(V) d'oxyde de fer ou Al par réduction dissimilatrice
- C: réduction du Fe et de As par des bactéries respirant ces deux éléments (*Sulfurospirillum barnesii*)

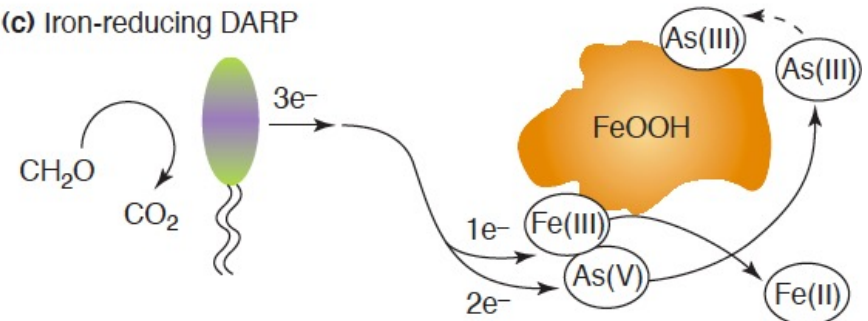
(a) Iron-reducing bacteria



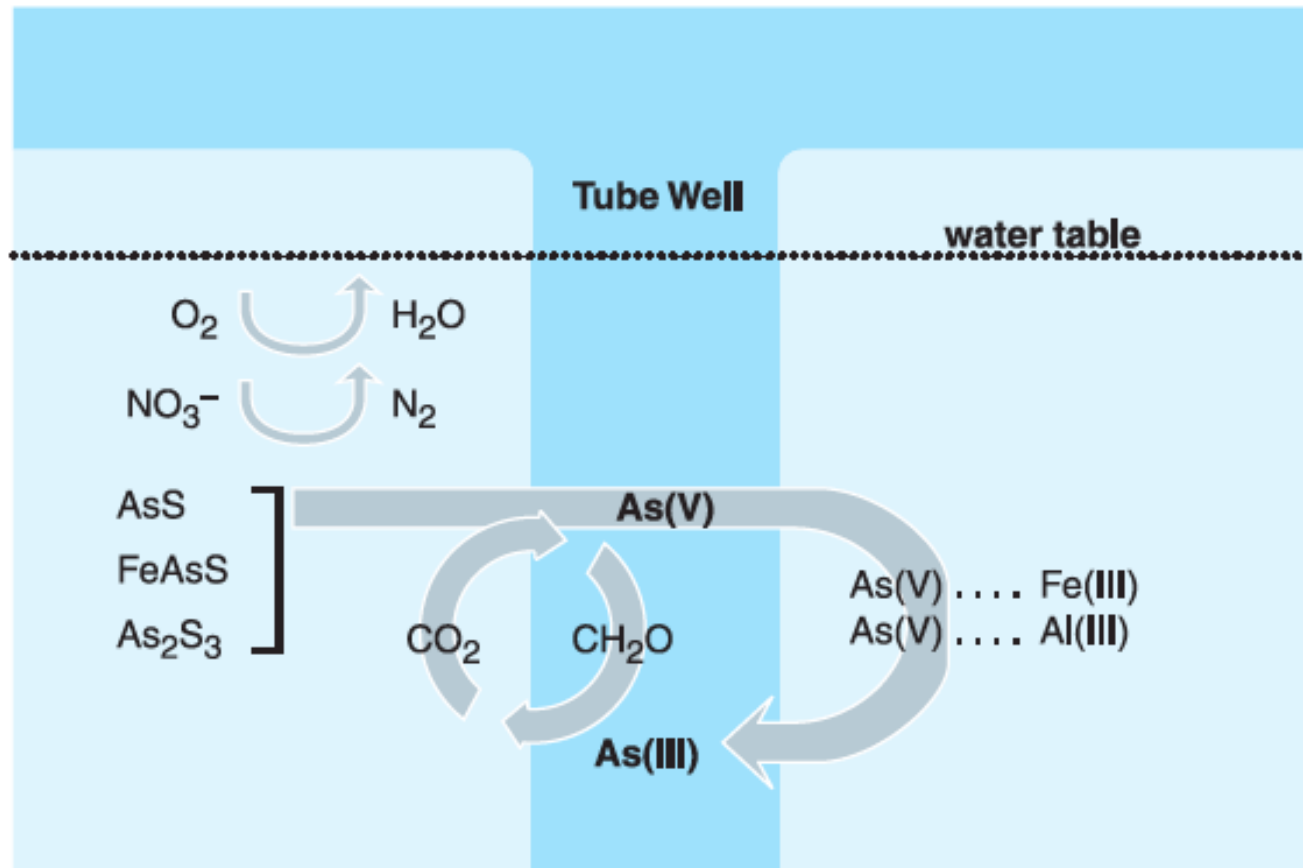
(b) Dissimilatory arsenate-reducing prokaryote (DARP)



(c) Iron-reducing DARP



Modèle conceptuel de mobilisation As dans les aquifères

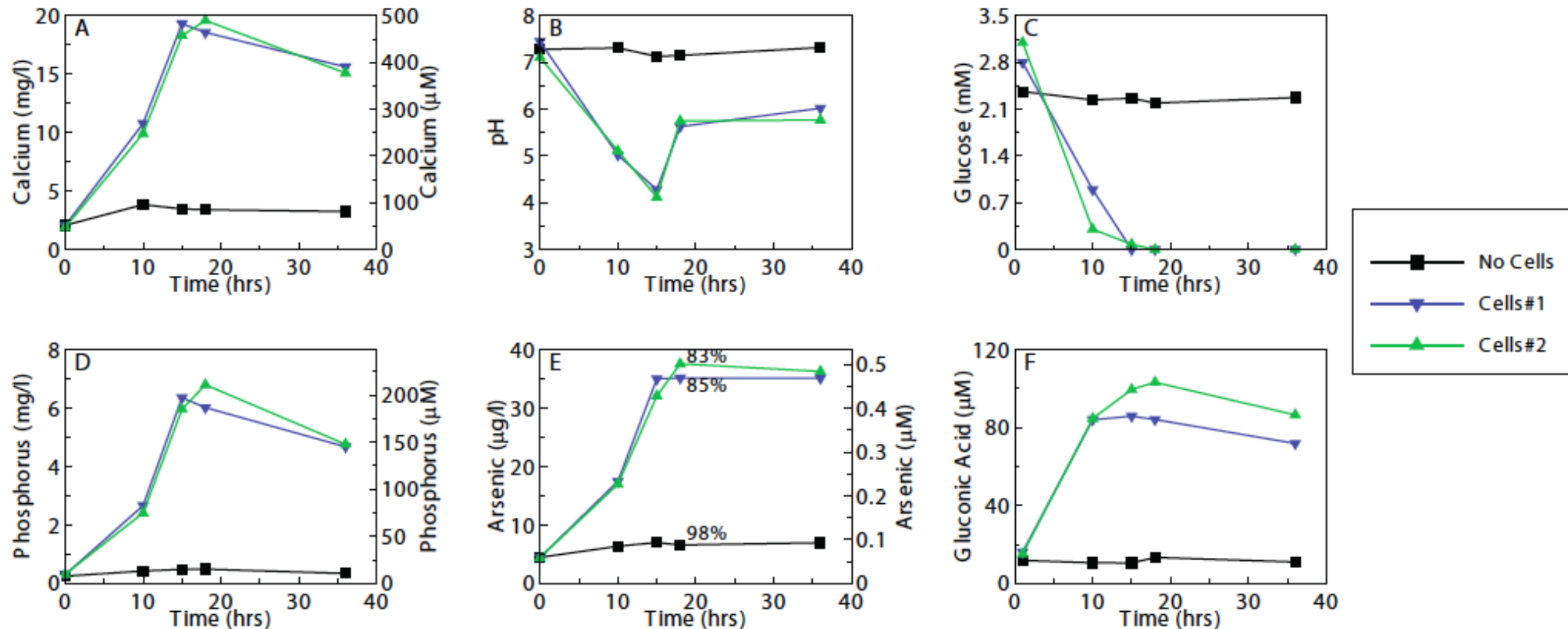


Oremland (2003)
Science 300, 941

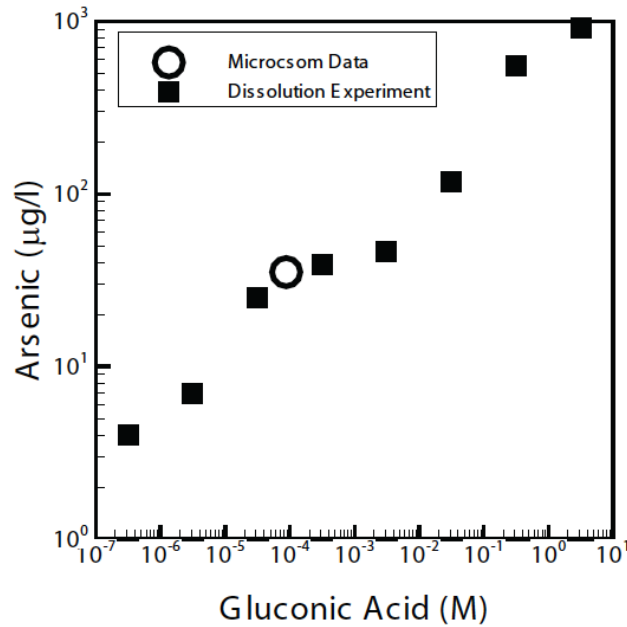
- oxydation $As(III)$ minéraux sulfurés par chimioautotrophes
- forage de puits accélèrent ce processus (O_2 , NO_3^-)
- adsorption $As(V)$ aux oxydes de Fe/Al
- influx de MO (dépôts enfouis, eau de surface, biomass mic.) stimule respiration anaérobie et libération de $As(III)$

Altération minérale et mobilisation de As

- Les microorganismes hétérotrophes participent à l'altération des minéraux par production d'acides et/ou complexants ---> solubilisation et acquisition de nutriments
- Microcosmes: suivi de la libération de As à partir d'apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ -impureté source de phosphate) contenant As (Himalaya) par *Burkholderia fungorum*.

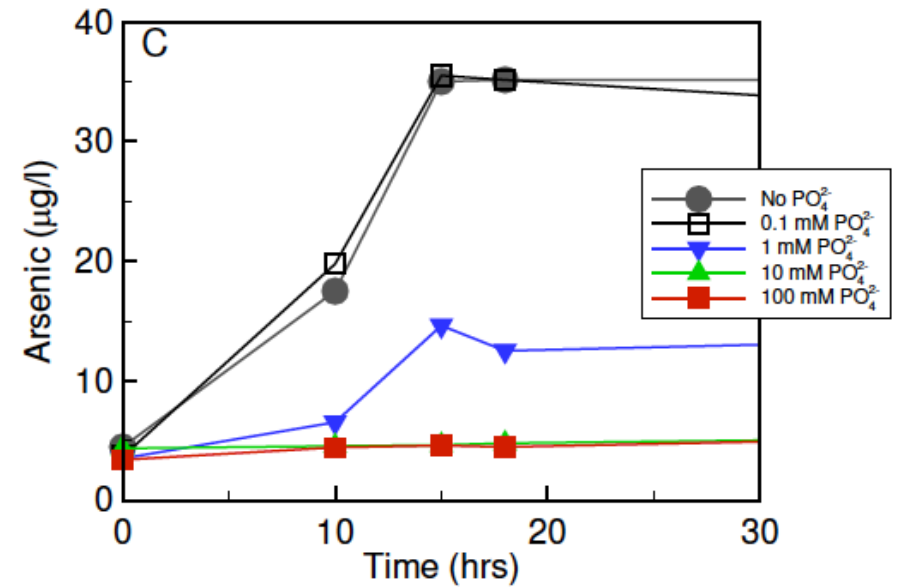


Contrôle abiotique: Apatite + acide gluconique

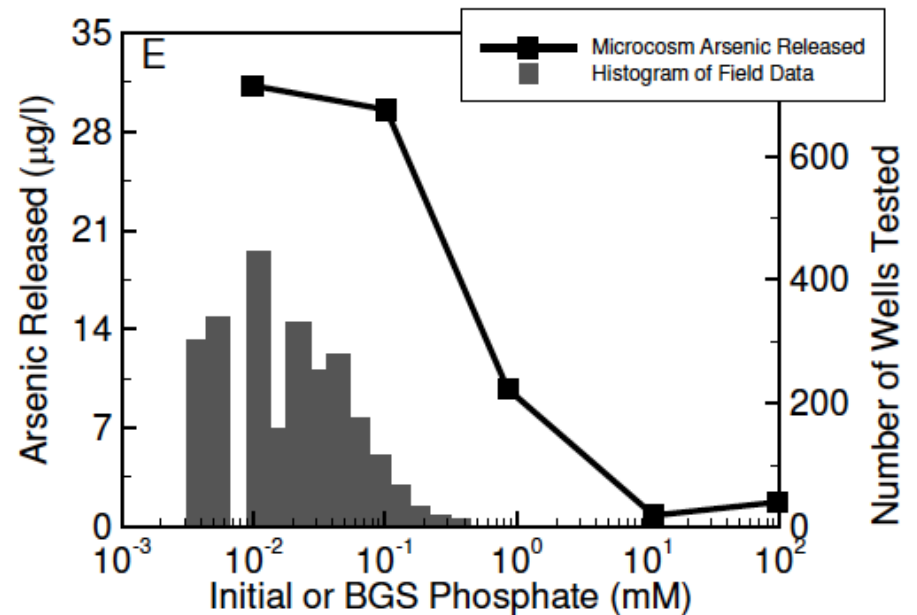


Altération minérale pour la nutrition
microbienne contribue à la mobilisation As.

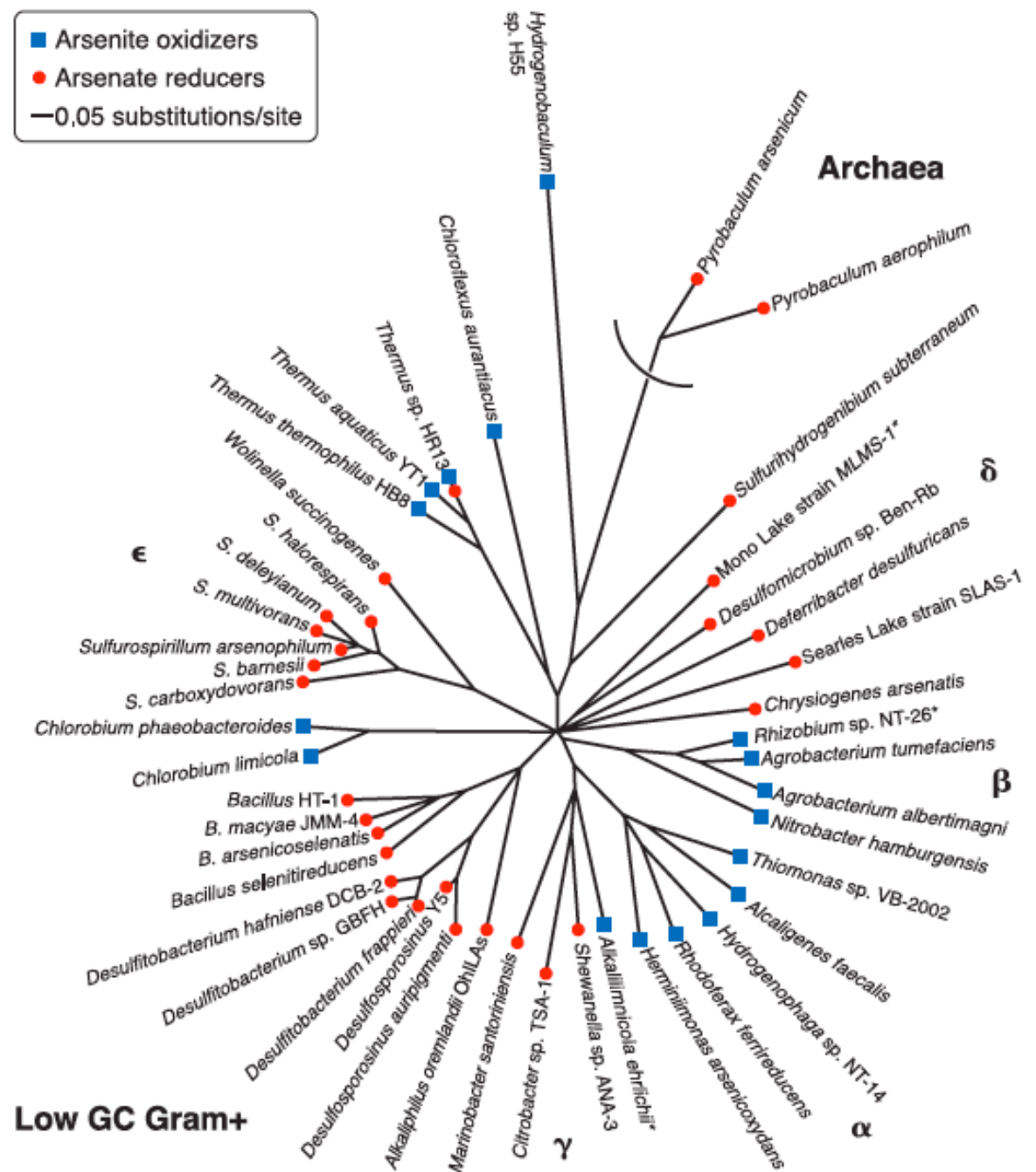
Influence du phosphate



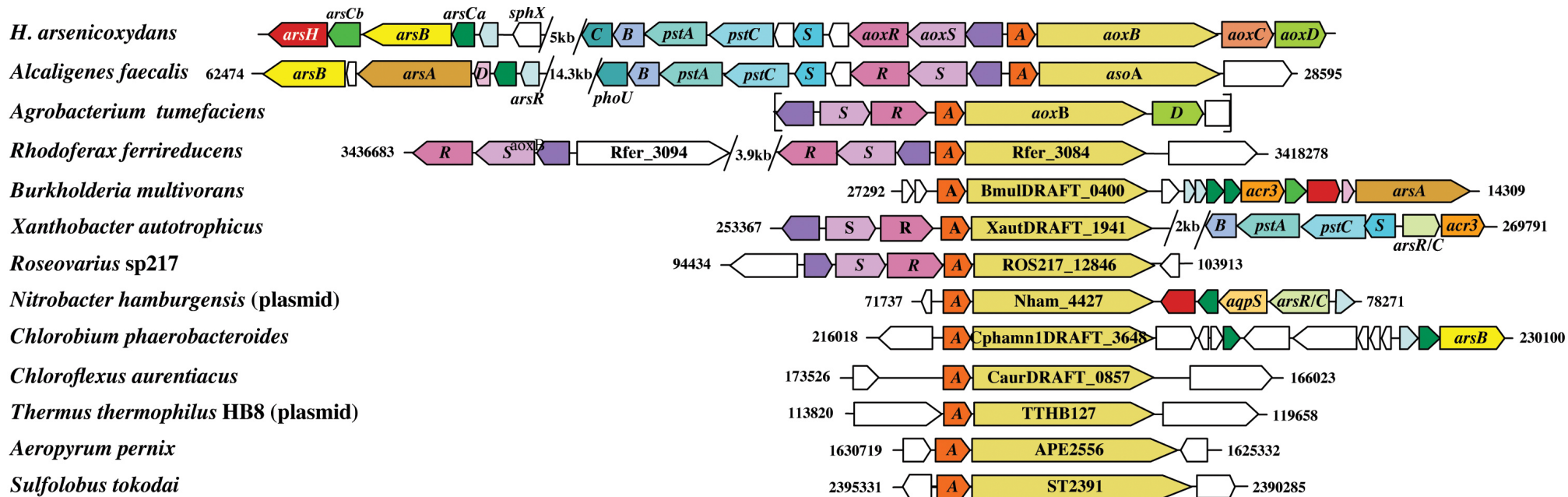
Distribution [phosphate] aquifères Bangladesh



Diversité des microorganismes métabolisant l'arsenic



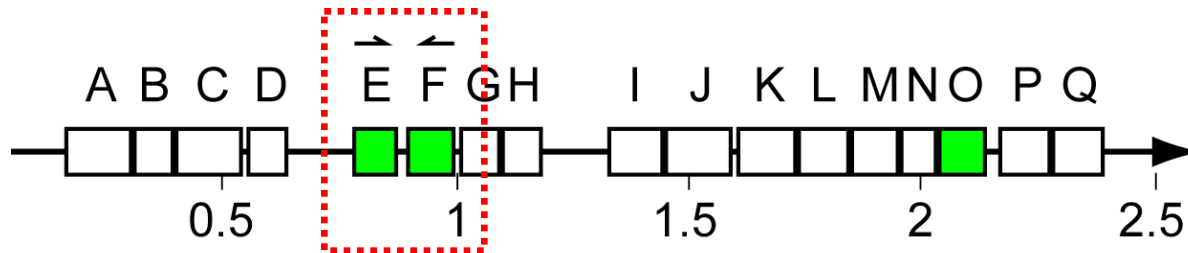
Gènes fonctionnels



- Conservation des gènes impliqués dans la transformation de As (*aox*, *arr*, *ars*)
- Marqueurs moléculaires de ces métabolismes
- Etude des bactéries non cultivables, abondance, diversité *in situ*

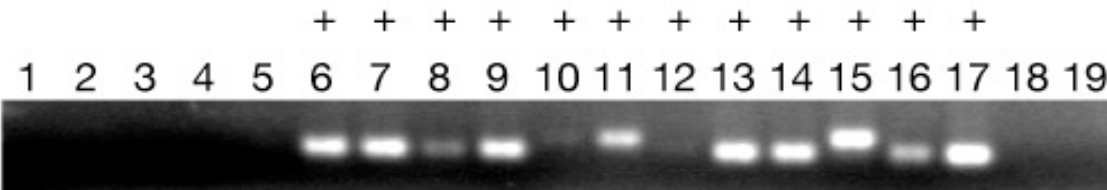
arrA : un biomarqueur de la réduction de As(V) ?

A. Dessin d'amorces PCR dégénérées

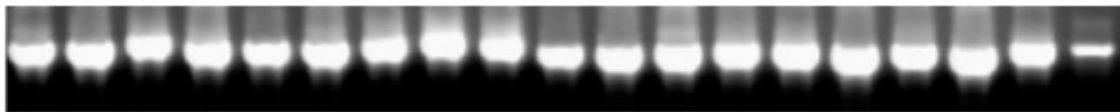


B. Detection dans le génome de diverses souches

amorces *arrA*



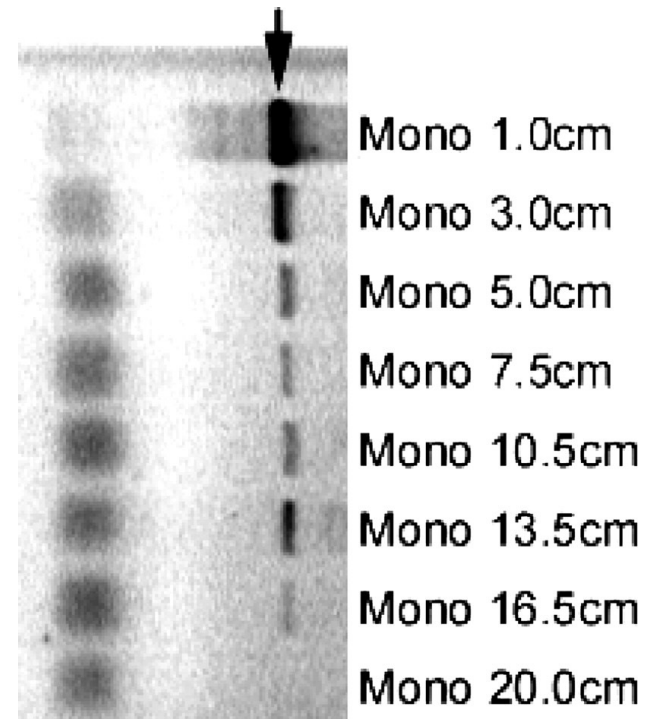
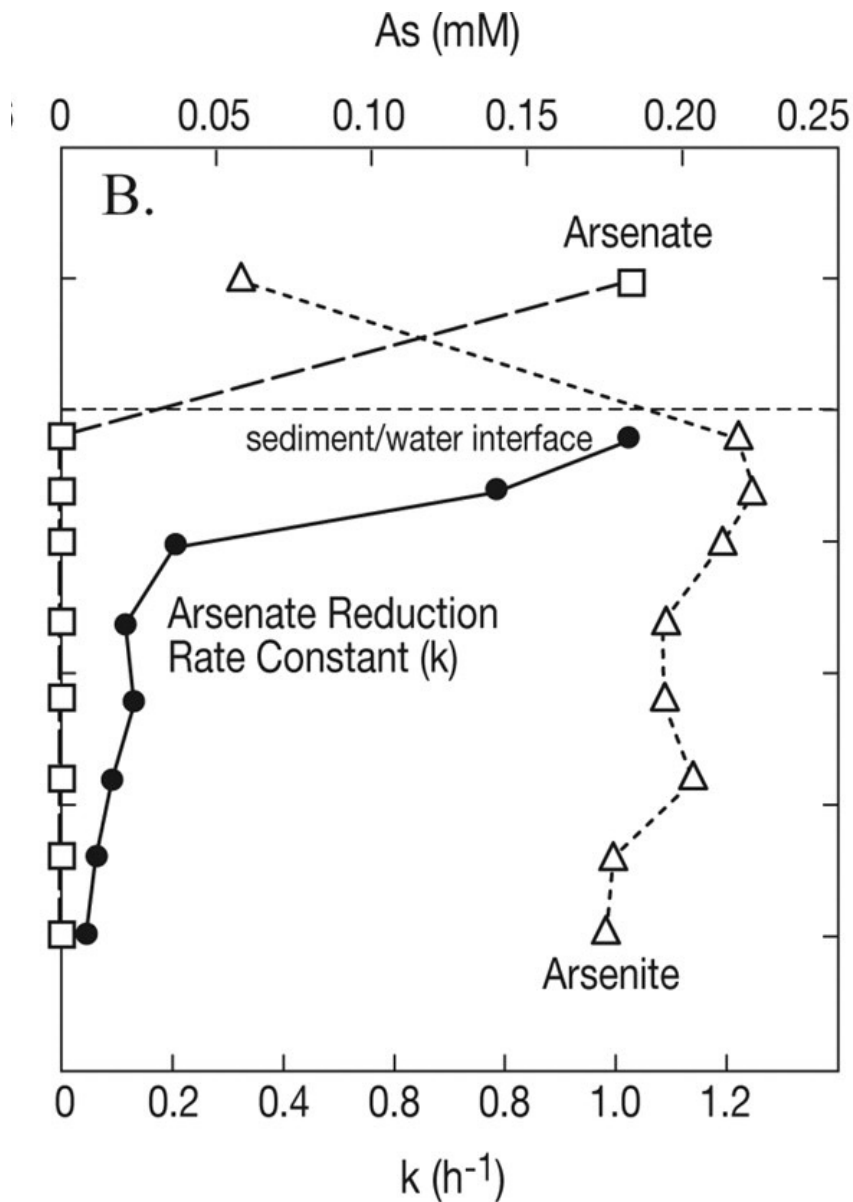
amorces ANRr 16S



- L. Ladder: 100 bp
- 1. ANA-3 *arrA* deleted
- 2. *Shew. oneidensis* MR-1
- 3. *Desulfitobacterium dehalogenens*
- 4. *E. coli*
- 5. *Pseudomonas chloraphis*
- 6. *Shewanella* sp. ANA-3
- 7. *Desulfito. hafniense*
- 8. *Desulfito. frappieri*
- 9. D. strain GBFH
- 10. *Wolinella* sp.
- 11. *Wolinella succinogenes*
- 12. *Citrobacter* sp.
- 13. *Bacillus* str. E1H
- 14. *Bacillus*, str. MLS10
- 15. *Sulfur. barnesii* SES-3
- 16. *Shewanella* sp. HAR-4
- 17. *Chrysiogenes*
- 18. OREX-4
- 19. *Pyrobac. arsenaticum*

ARB

Sédiments du lac Mono (Californie)



Kulp, et al. (2006) AEM 72, 6514

Corrélation (qualitative)

- intensité des produits PCR *arrA*
- activité de respiration de As(V)

A Bacterium That Can Grow by Using Arsenic Instead of Phosphorus

?

Felisa Wolfe-Simon,^{1,2*} Jodi Switzer Blum,² Thomas R. Kulp,² Gwyneth W. Gordon,³ Shelley E. Hoefft,² Jennifer Pett-Ridge,⁴ John F. Stolz,⁵ Samuel M. Webb,⁶ Peter K. Weber,⁴ Paul C. W. Davies,^{1,7} Ariel D. Anbar,^{1,3,8} Ronald S. Oremland²

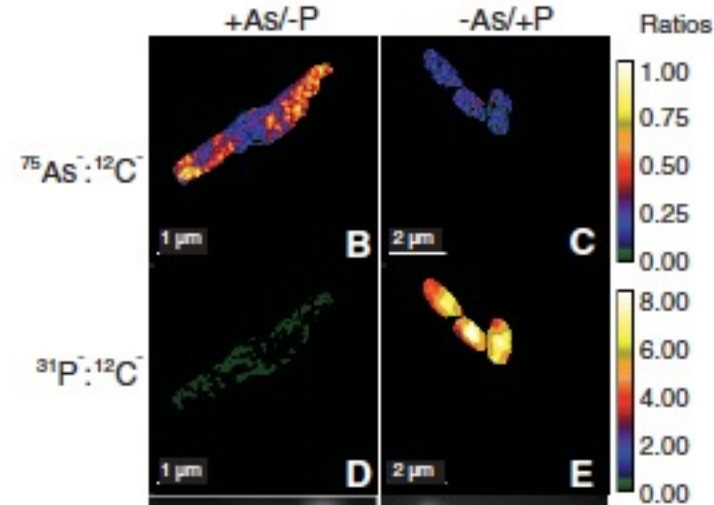
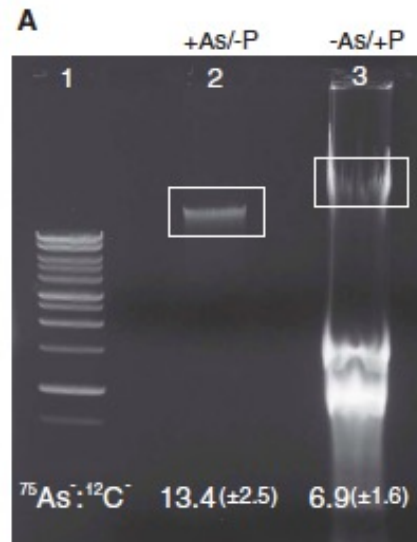
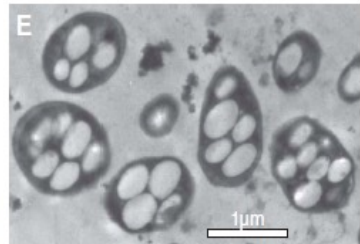
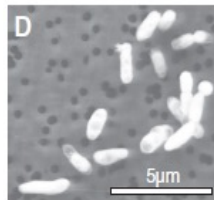
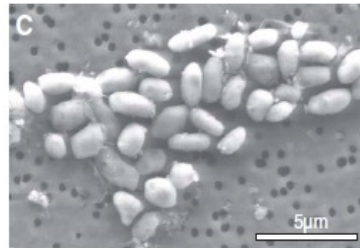
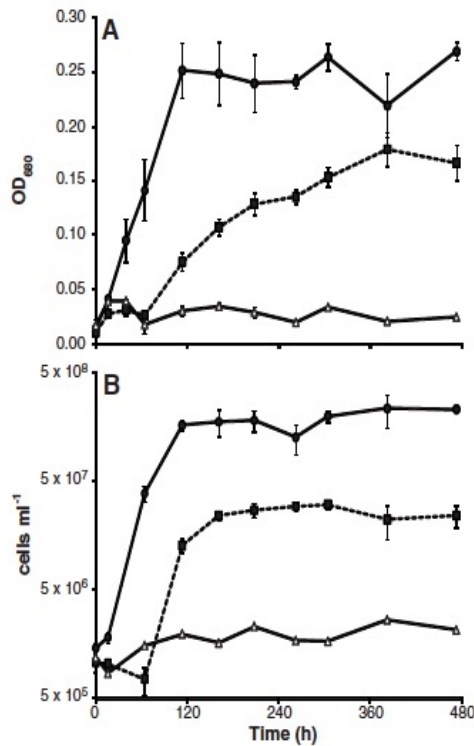
www.sciencemag.org **SCIENCE** VOL 332 3 JUNE 2011

Souche GFAJ-1 isolée du lac Mono par enrichissement en milieu -P / + As

Analyse ICP-MS

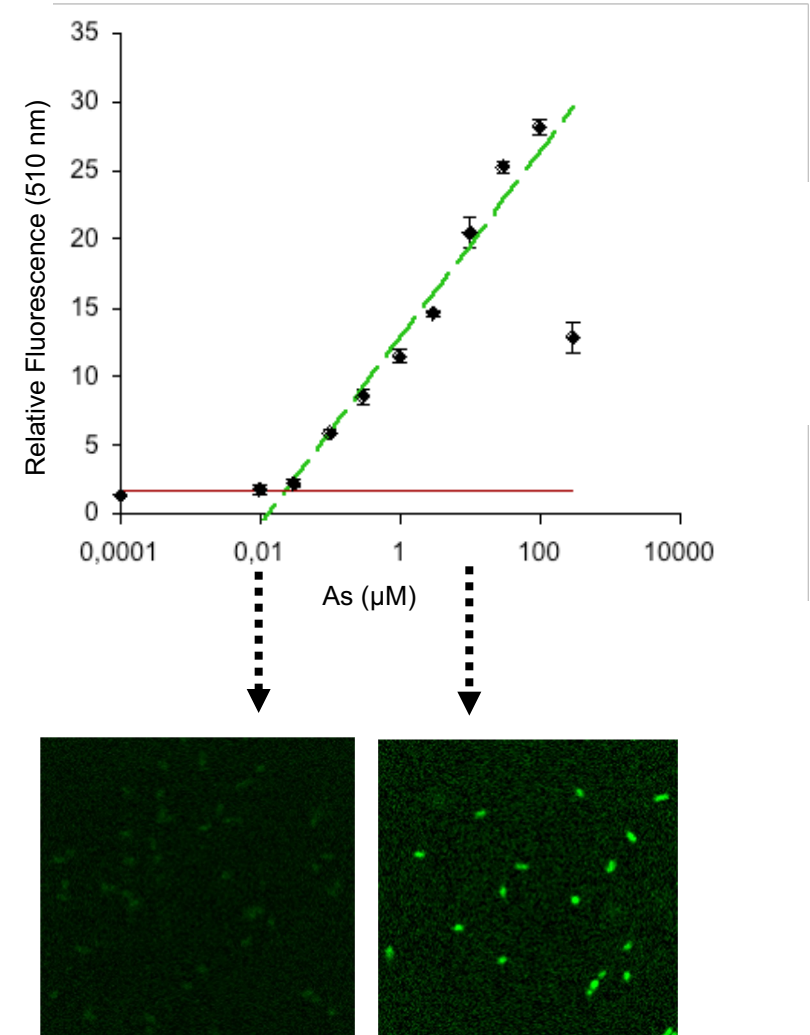
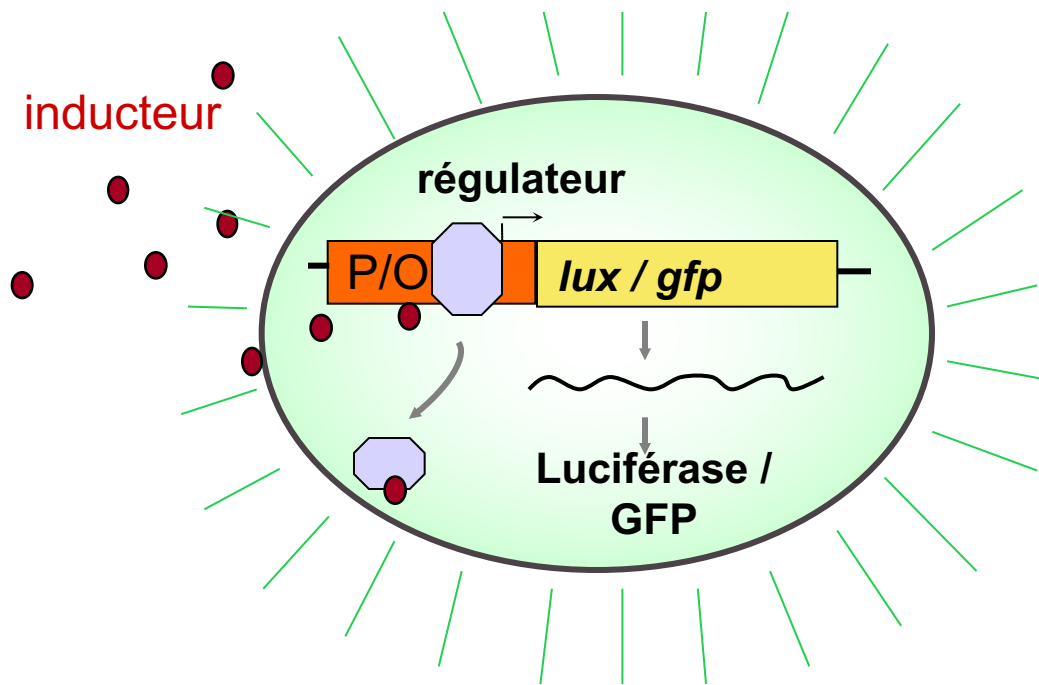
Table 1. Bulk intracellular elemental profile of strain GFAJ-1. Cells were grown and prepared with trace metal clean techniques (11). Numbers in parentheses indicate replicate samples analyzed. As:P ratios were calculated based on all samples analyzed (11). Units are percent dry weight.

Condition	As	P	As:P
+As/-P (8)	0.19 ± 0.25	0.019 ± 0.009	7.3
-As/+P (4)	0.001 ± 0.0005	0.54 ± 0.21	0.002



Analyses NanoSIMS ADN et cellules

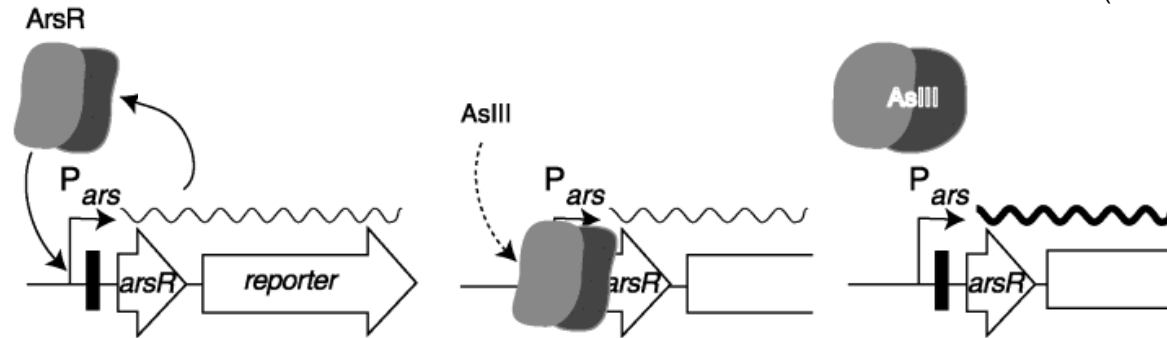
Biosenseurs bactériens



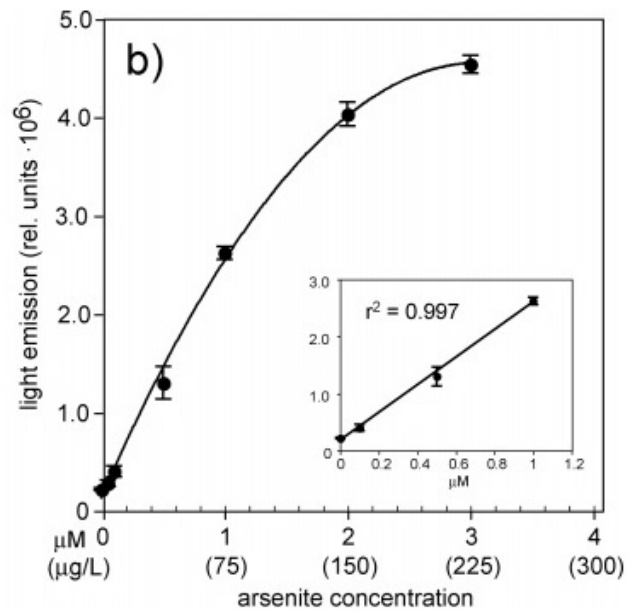
⇒ Biotest de détection rapide des quantités biodisponibles de polluants env.

Biosenseur As

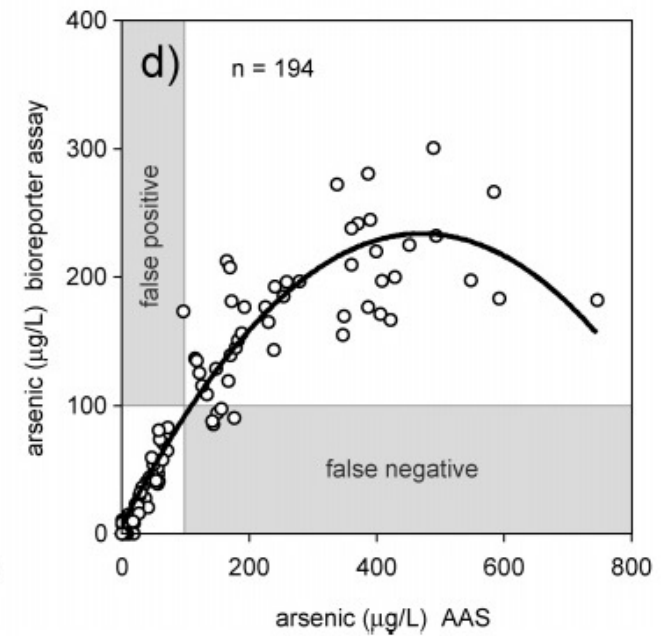
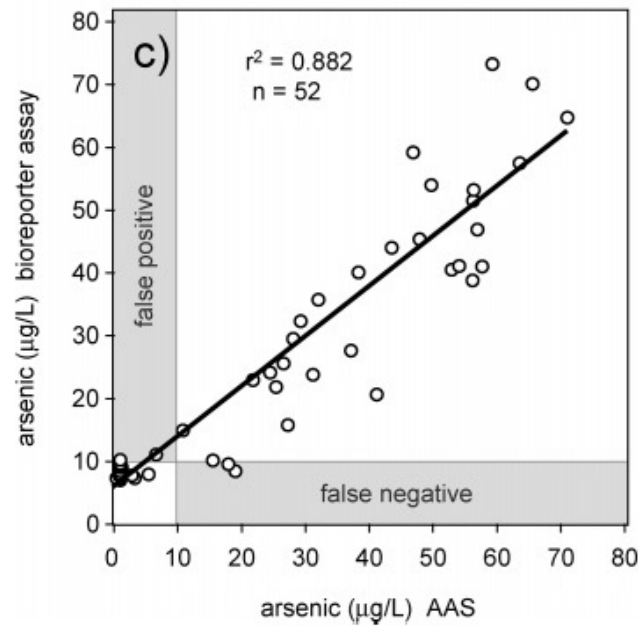
Stocker et al. (2003) EST 37, 4743



Trang et al. (2005) EST 39, 7625



Courbe calibration



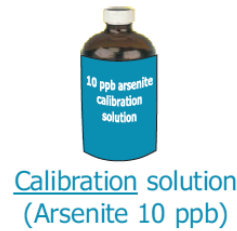
Analyse 194 échantillons eaux souterraine Vietnam

- 8% faux négatifs
- 2,4% faux positifs

ARSOLux® Biosensor

www.arsolux.ufz.de

Arsenic - Detection
fast, easy, precise, economical



Calibration solution
(Arsenite 10 ppb)



Arsenic contaminated
groundwater sample

- 1.) Fill the syringe either with the calibration solution or with the sample
- 2.) Penetrate the septum stopper and fill the calibration solution or the sample into the vial and give it a brief shake
- 3.) Incubate for two hours (temperature range 20 to 35°C)
- 4.) Firstly measure the calibration vial (note down the displayed value)
- 5.) Secondly measure the sample vial (note down the displayed value and compare it to the calibration value)



Display:
The luminescence is measured in
Relative Light Unit - RLU.



- 6.) ● The value of the sample is higher ⇒ arsenic contamination
The value of the calibration solution is equal to WHO limit 10 ppb
- The value of the sample is lower ⇒ no arsenic contamination

>10 ppb ↑
10 ppb ±
<10 ppb ↓

Characteristics: The light intensity correlates with the concentration of arsenic.

Measuring range: Arsenite As3
5 to 1000 ppb

Precision: +/- 10%

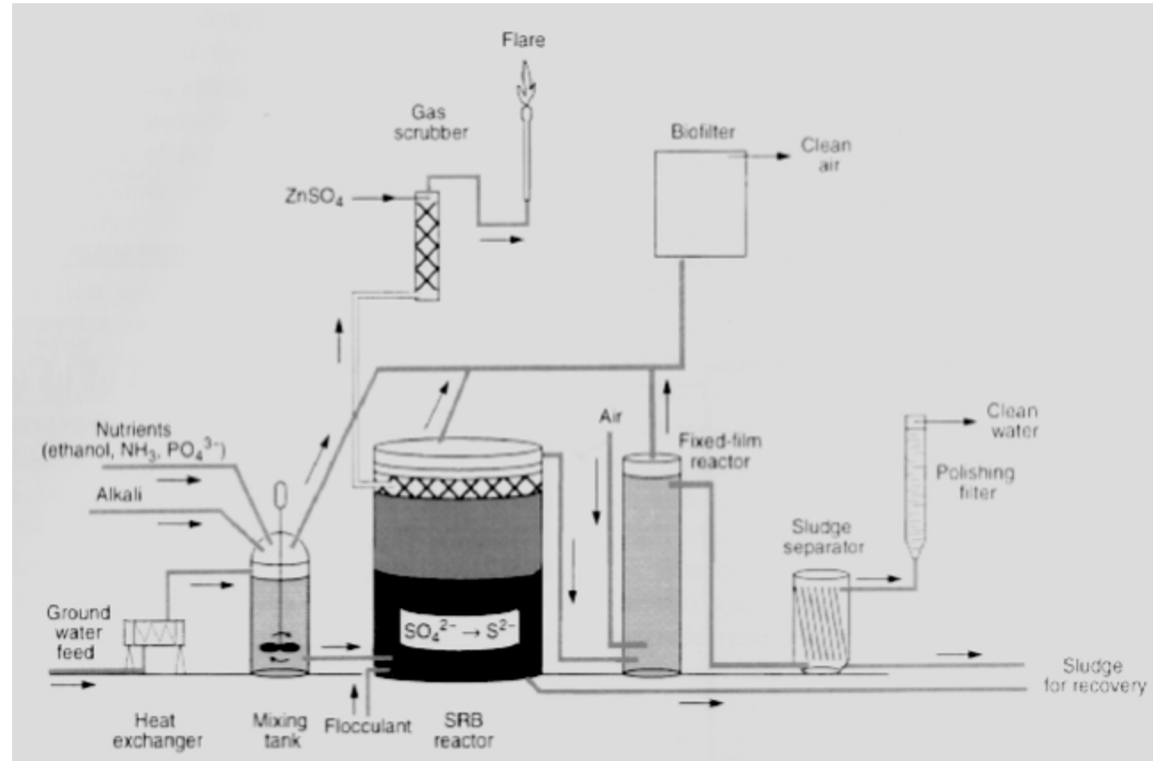
Immobilisation de métaux par les BSR

➤ Bactéries sulfato-réductrices

- Anaérobies ubiquistes
- Donneurs d' e- : H₂, MO de faible PM (éthanol, acétate, lactate...)
- Accepteur d' électron : SO₄²⁻
- ex: *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfobacter*
- Forte production de S²⁻

$$\text{S}^{2-} + \text{Me}^{2+} \rightarrow \text{MeS}$$

➤ Quelques applications industrielles pour le traitement d' eau contaminée



Système Thiopac d' immobilisation des métaux à l' aide de BSR (Budelco-Shell, Pays-Bas) - 300 m³/h

Ion	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)
Sulfate	1000	200
Zinc	100	0.15
Cadmium	1	0.01

Le mercure

Sources naturelles

- La plus abondante : minerais de mercure = HgS , cinabre
- sols : $100 \mu\text{g kg}^{-1}$
- eaux de surface : $0,1 \mu\text{g L}^{-1}$

Sources anthropiques

- composés organomercureux : pesticides (fongicides, traitement des semences – limité depuis les intoxications collectives dont Irak 1971), industrie papetière (Cl_2 pour blanchiment) industrie pharmaceutique (amalgam dentaire Hg-Ag , Hg-Sn , peintures antifongiques,...)
- activité d'orpaillage clandestine, ...

3 états de valence

- Hg^0 liquide volatil, peu réactif, peu toxique (mais rendu toxique par oxydation - catalase, peroxydase...)
- Hg(I) , Hg_2^{2+} (mercureux),
- Hg(II) , Hg^{2+} (mercurique) = les + toxiques (forte affinité pour S et NH_3)



Cinabre sur dolomite (Chine)



Hg - seul métal liquide à température ambiante

Forme la plus toxique = **monométhylmercure** (MMHg) CH_3Hg^+

- forte affinité pour le système nerveux
- taux élevé de passage des membranes biologique
- long temps de résidence dans les tissus comparés aux formes inorganiques
→ **Accumulation 10x plus rapide de MMHg / Hg inorganique**

Liposolubilité n'explique pas cette différence de bioaccumulation :

Kow dépendant de la spéciation et relativement faibles

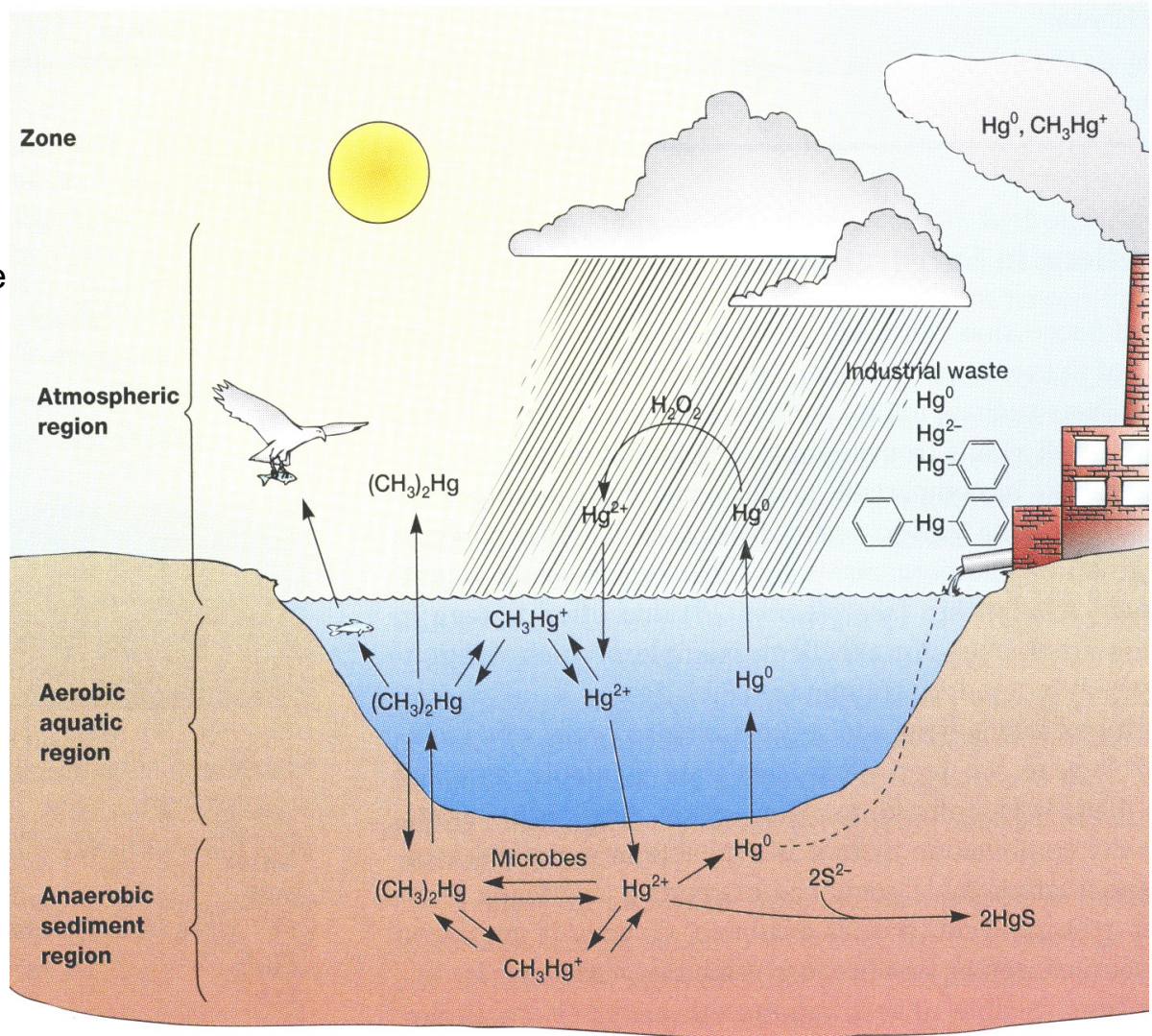
- $\text{HgCl}_2 = 3.3$
- $\text{Hg}(\text{OH})_2 = 0.05$
- $\text{CH}_3\text{HgCl} = 1.7$
- $\text{CH}_3\text{HgOH} = 0.07$

Constat: rapport MMHg / Hg total > 50% dans les organismes contaminés
< 10% colonne d'eau ou sédiments

→ **Bioaccumulation selective du MMHg et bioamplification**

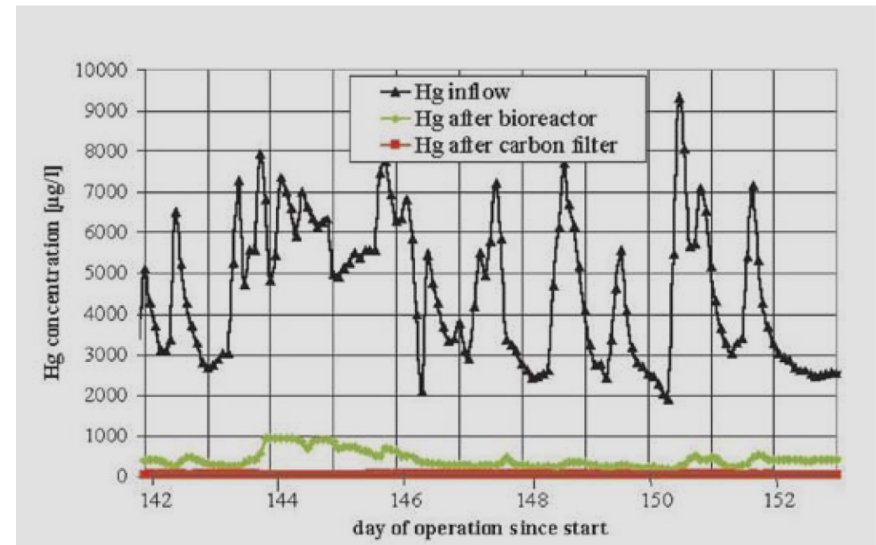
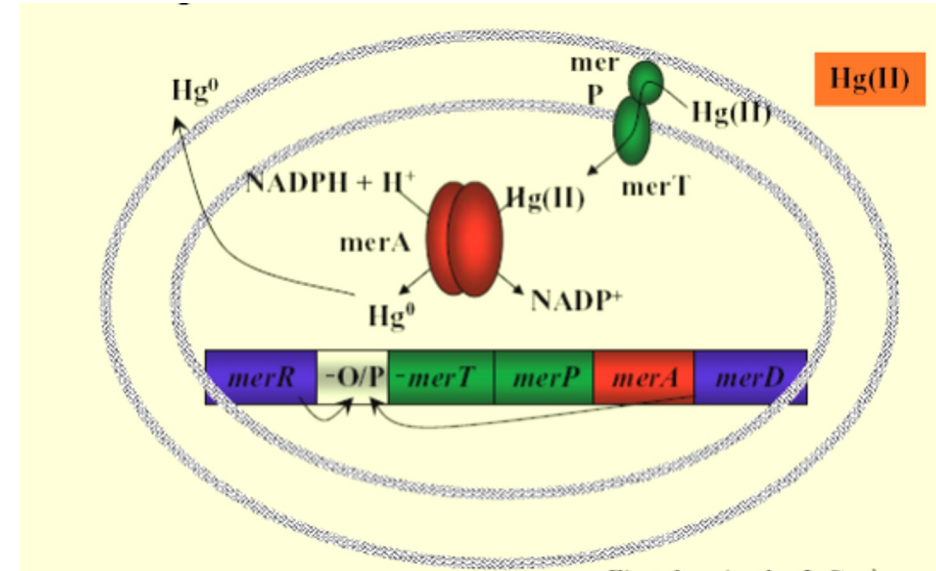
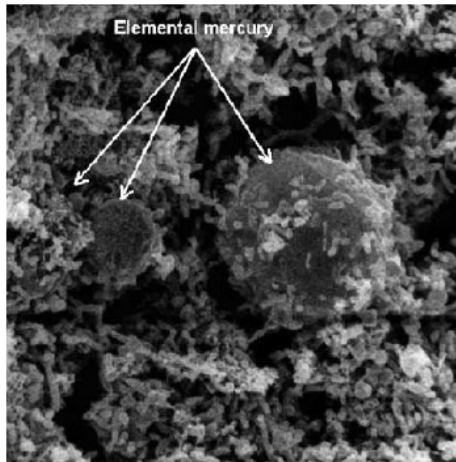
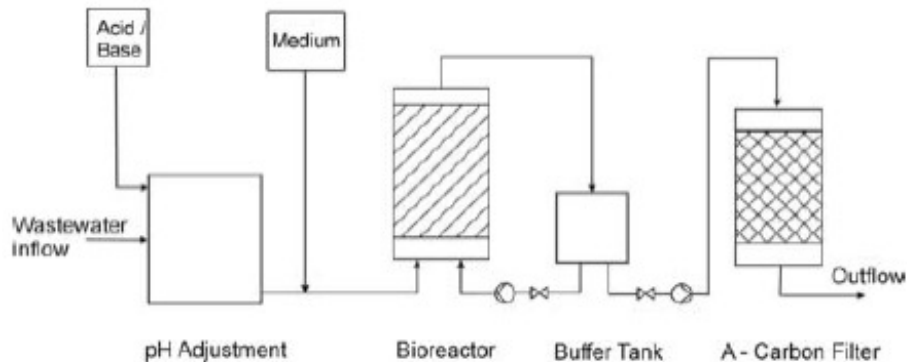
Transformation microbiennes du mercure

- La plupart des conversions sont assurées par les microorganismes
- Biométhylation : BSR et méthanogènes
- $\text{Hg}^{2+} + \text{vitB}_{12}\text{-CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{Hg}^+ + \text{vitB}_{12}\text{-red}$
- Réduction en Hg^0 : systèmes de résistance (opéron *mer*)



Dépollution d'effluents contaminés par le mercure

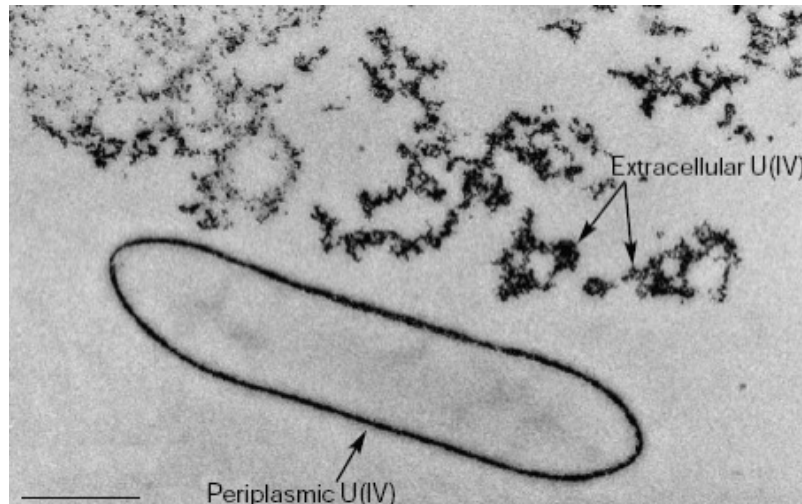
- Fonctionnement de l'opéron *mer*
- Bioréacteur pour l'immobilisation de Hg^0 (100 m^3 d'effluent contaminé/jour)
Matrice poreuse inerte + biofilm bactérien



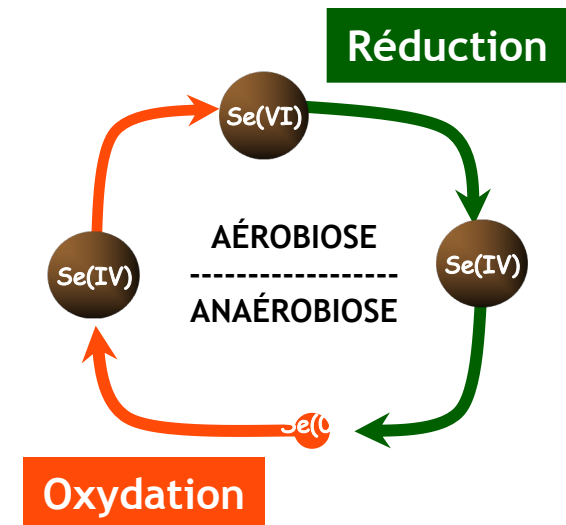
Performances du réacteur

Autres exemples de transformations microbiennes

- Sélénium : formes les plus toxiques Se(VI) et Se(IV)
 - réduction successive en Se^0 permet l'immobilisation
 - méthylation (idem Hg) permet la volatilisation (formes méthylées peu toxiques)
- Chrome: réduction Cr(VI) en Cr(III)
- Uranium, technétium, neptunium (déchets radioactifs) peuvent être réduits en formes moins solubles



- Dissimilatory Reducers
 - *Sulfurospirillum barnesii*
 - *Thauera selenatis*
 - *Bacillus arsenicoselenatis*



- Sulfur Oxidizers
 - *Thiobacillus ferrooxidans*
 - *Bacillus megaterium*

- Non Dissimilatory Reducers
 - *Desulfovibrio desulfuricans*
 - *Wolinella succinogenes*
 - *Pseudomonas stutzeri*

* From Dowdle and Oremland; 1998