

Absorber du phosphore ou de l'arsenic: les cultures peuvent-elles choisir?

De la biodisponibilité dans les sols aux mécanismes d'assimilation

Lucien Stolze¹ et Claude Plassard²

¹UMR 1114 EMMAH, Avignon Université, INRAE

²UMR Eco & Sols, INRAE, Montpellier Université, IRD, CIRAD et Institut Agro

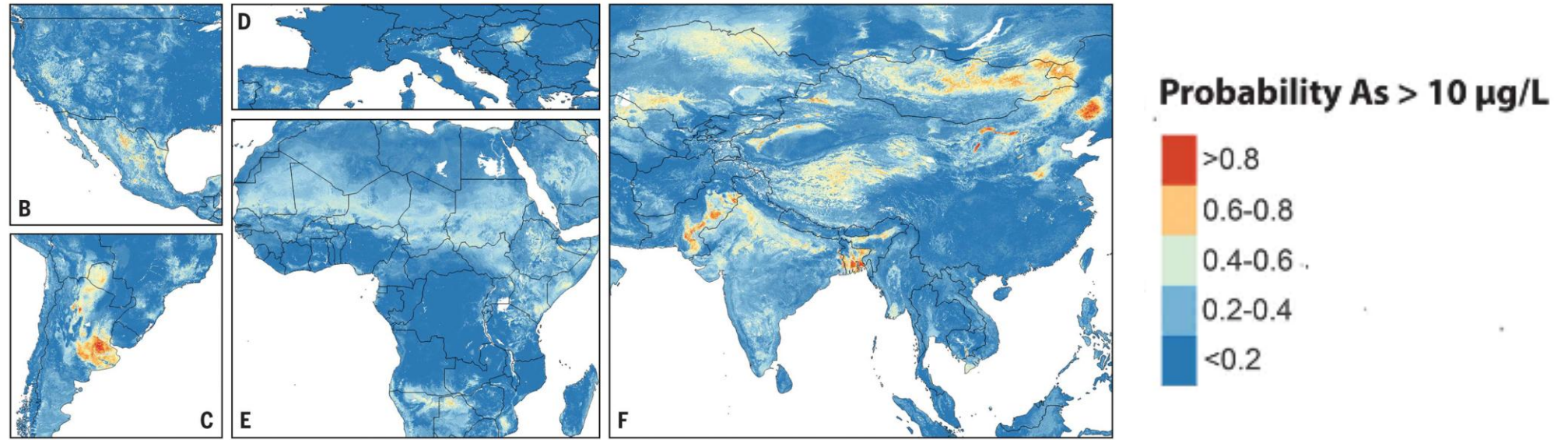
Séance hebdomadaire de l'Académie d'Agriculture de France, 17 Juin 2026



Plan de la présentation

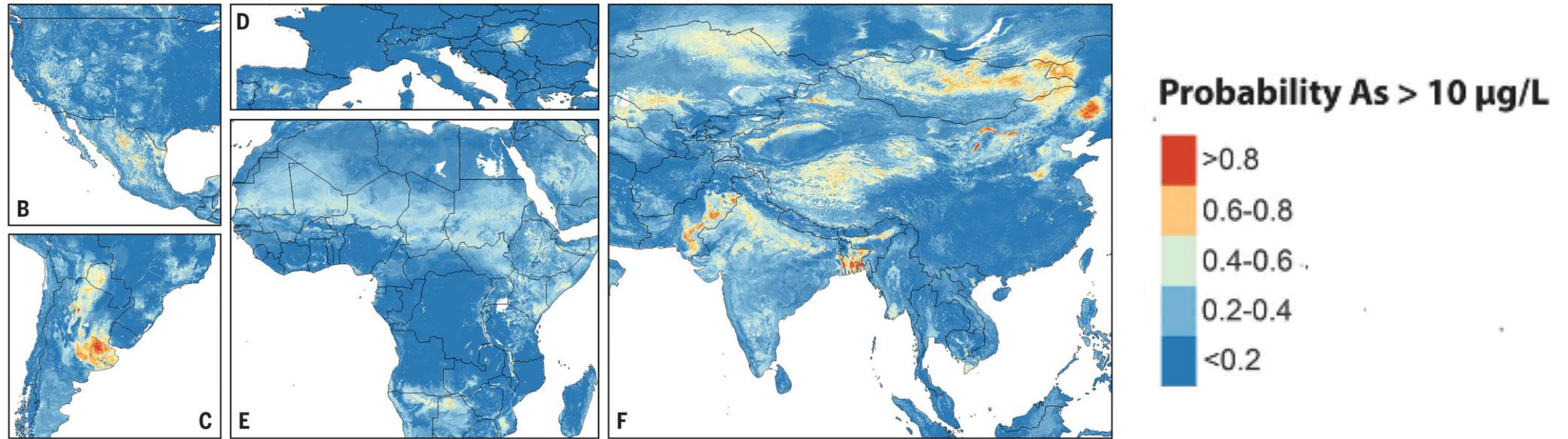
- 1. Sources de l'arsenic dans le sol**
- 2. Biodisponibilité de l'arsenic dans le sol**
- 3. Absorption de l'arsenic par la plante**

1. La contamination des eaux souterraines par l'arsenic



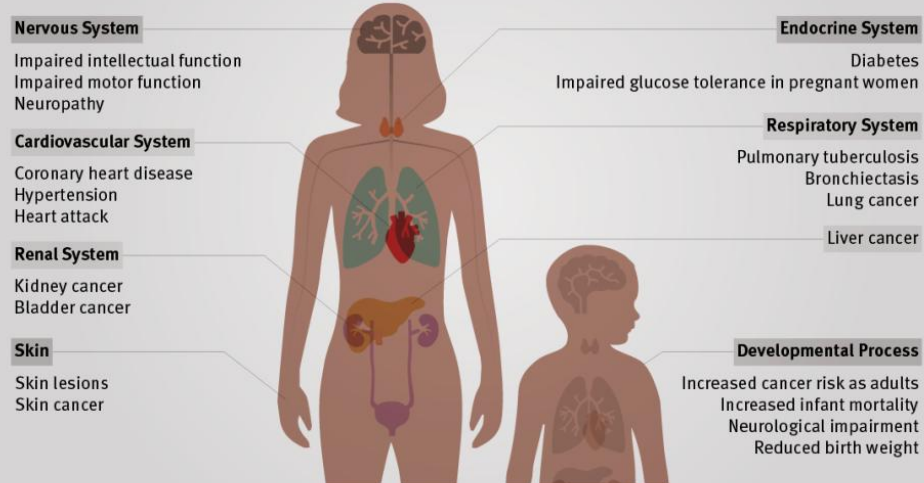
Podgorski and Berg (Science, 2020)

1. La contamination des eaux souterraines par l'arsenic



Podgorski and Berg (Science, 2020)

Arsenic's Effects on the Human Body



Human's right watch (2016)

1. Les sources de l'arsenic dans le sol

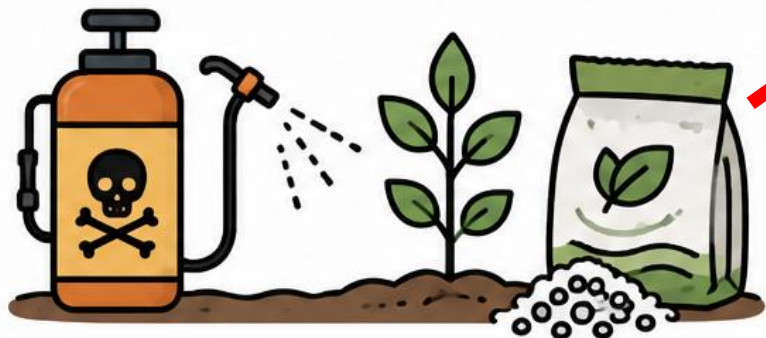
Sources anthropiques



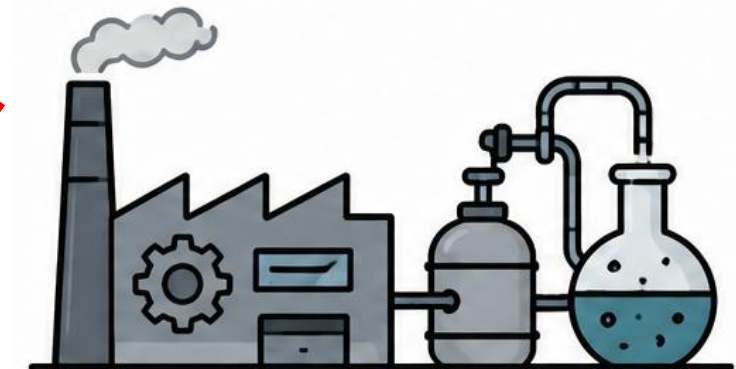
Activités minières



Combustion de combustibles fossiles et biomasse

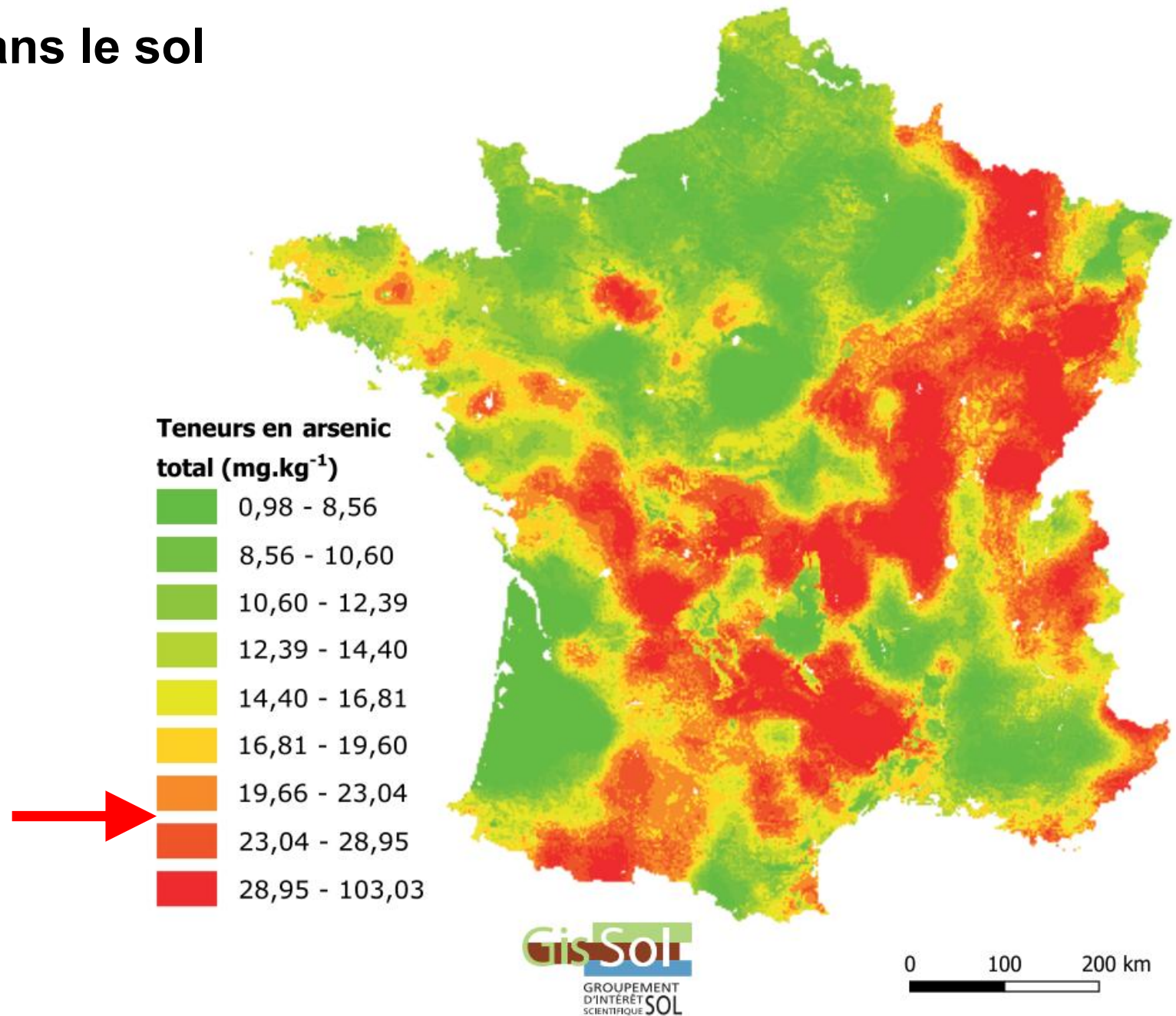


Pesticides et engrais



Production industrielle

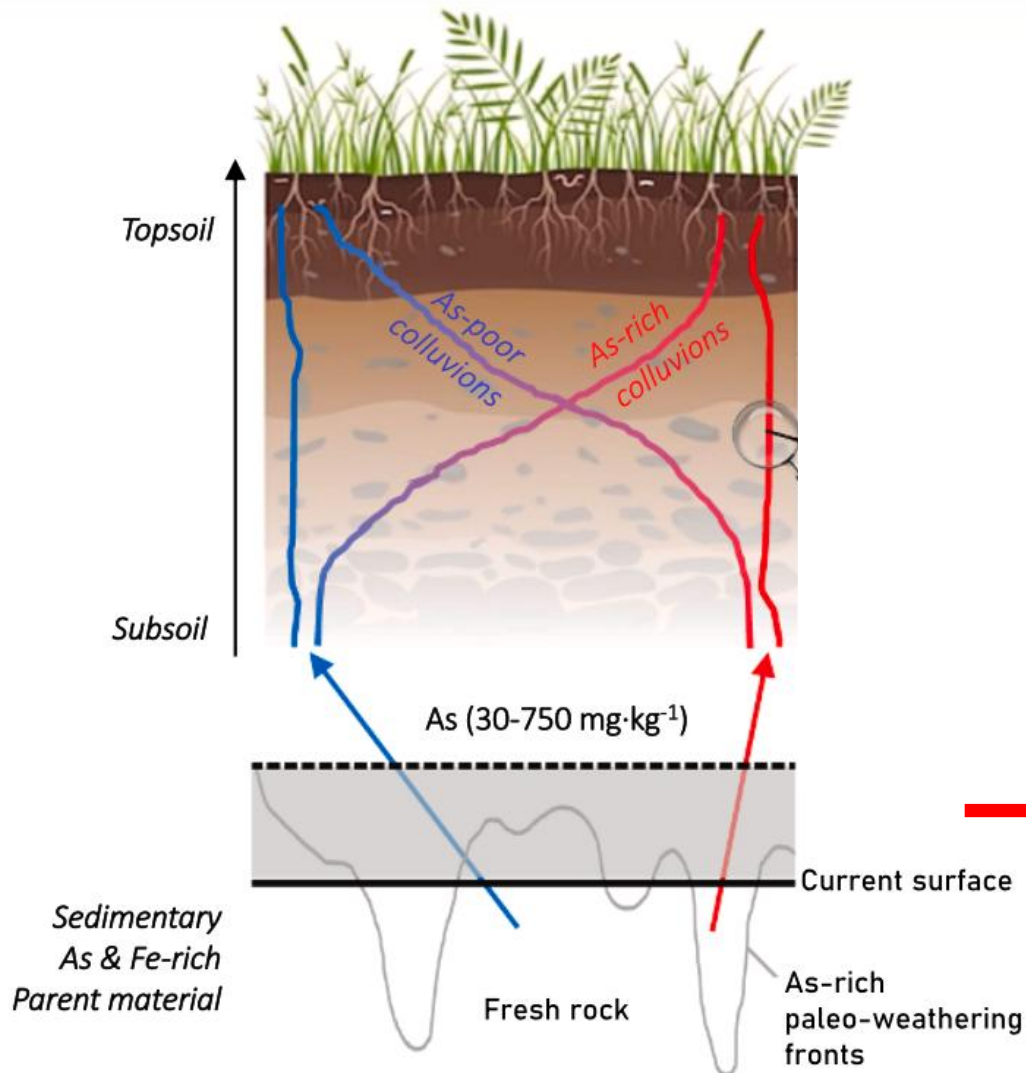
1. Les sources de l'arsenic dans le sol



Source : Gis Sol, 2019

1. Les sources de l'arsenic dans le sol

Sources géogéniques

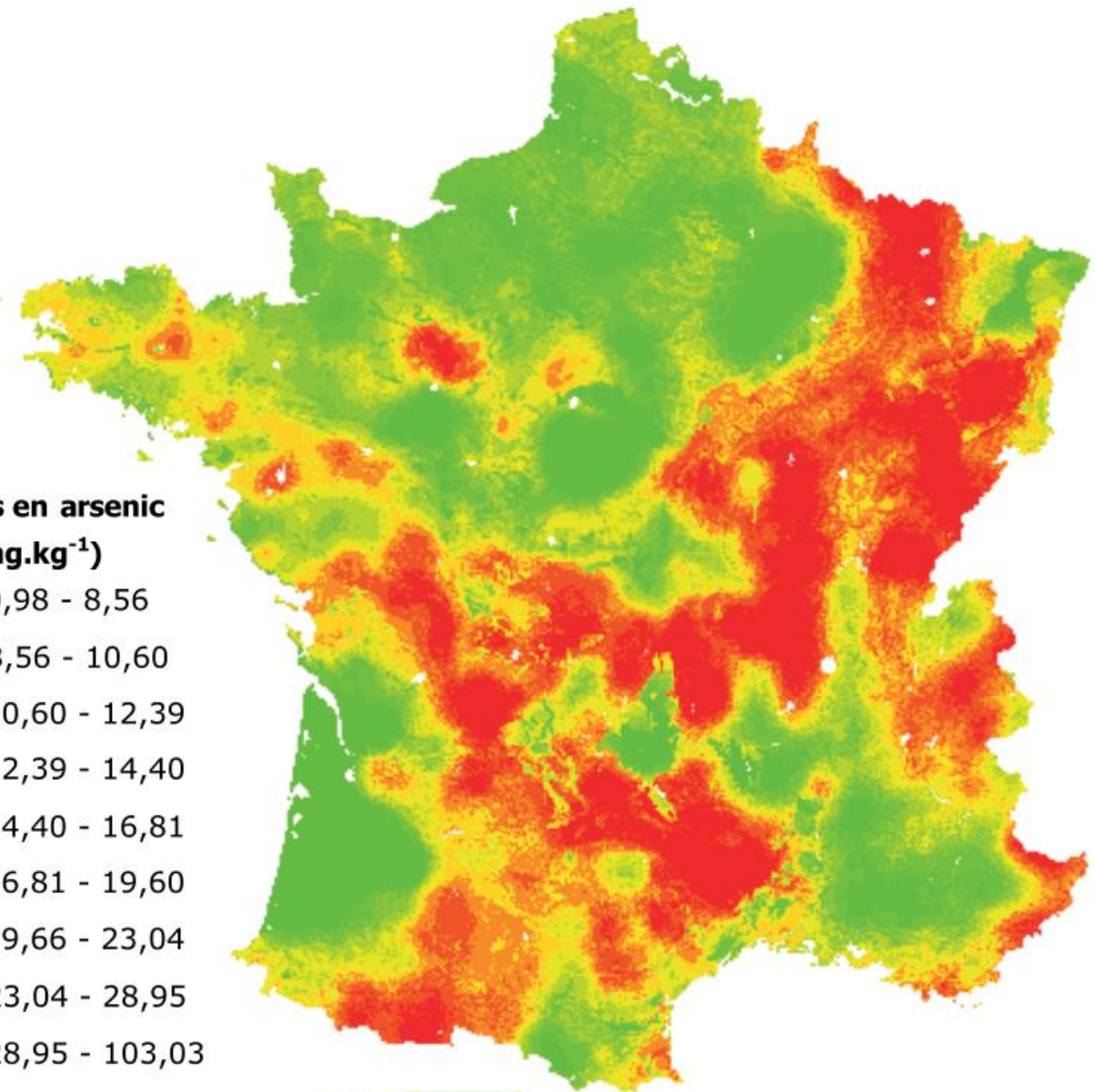


Vandereun et al. (JHM, 2025)

Teneurs en arsenic total (mg.kg⁻¹)

0,98 - 8,56
8,56 - 10,60
10,60 - 12,39
12,39 - 14,40
14,40 - 16,81
16,81 - 19,60
19,66 - 23,04
23,04 - 28,95
28,95 - 103,03

Source : Gis Sol, 2019

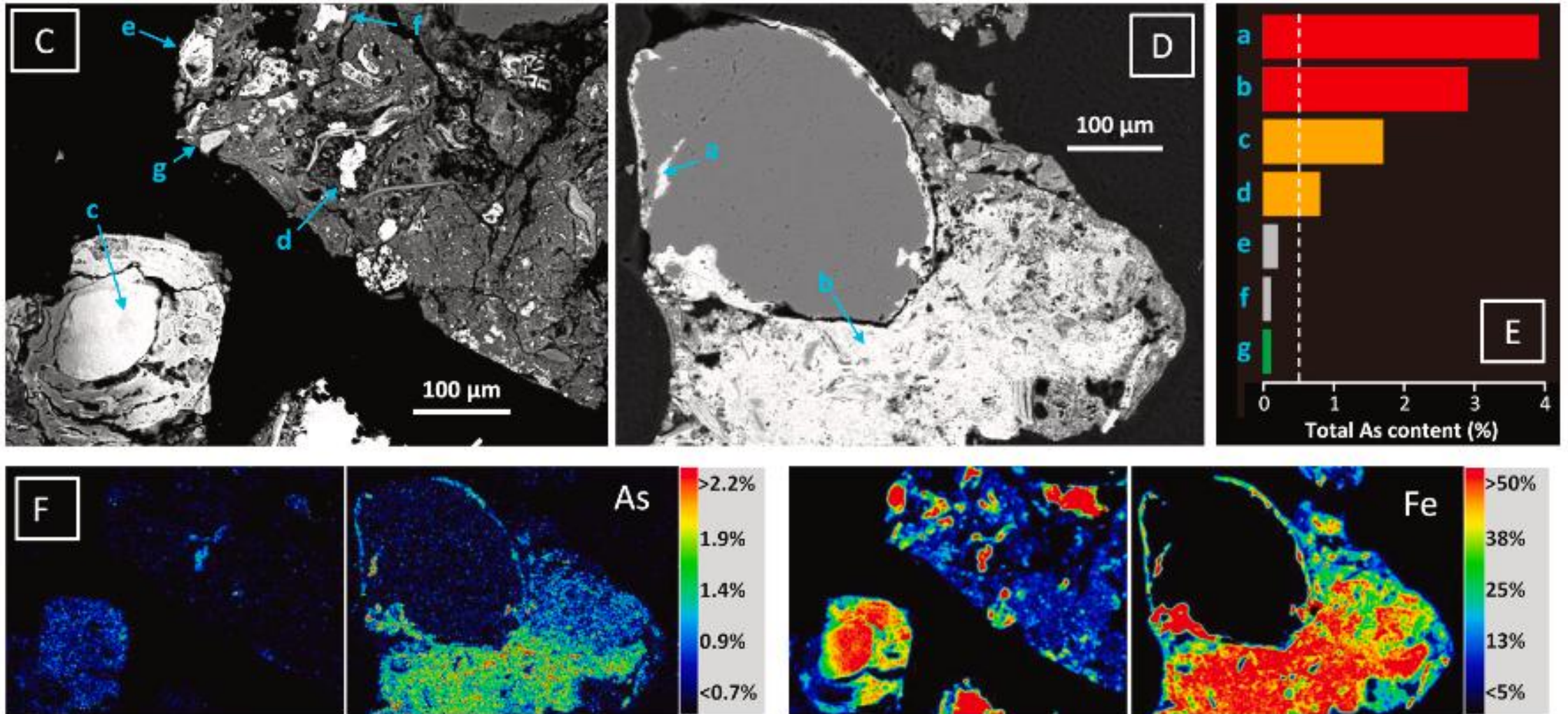


GisSol
GROUPEMENT
D'INTERÊT
SCIENTIFIQUE SOL

0 100 200 km

1. Les sources de l'arsenic dans le sol

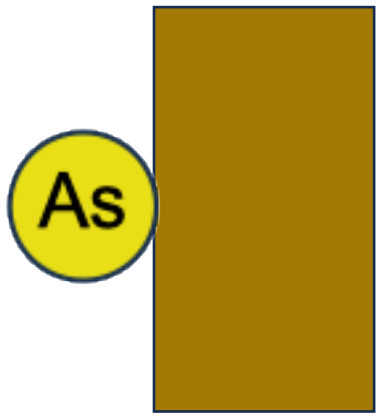
Sources géogéniques



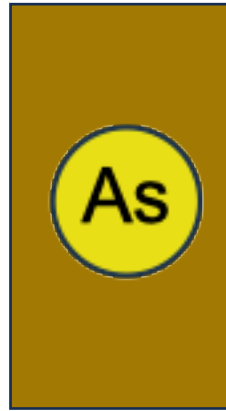
Plan de la présentation

1. Sources de l'arsenic dans le sol
- 2. Biodisponibilité de l'arsenic dans le sol**
3. Absorption de l'arsenic par la plante

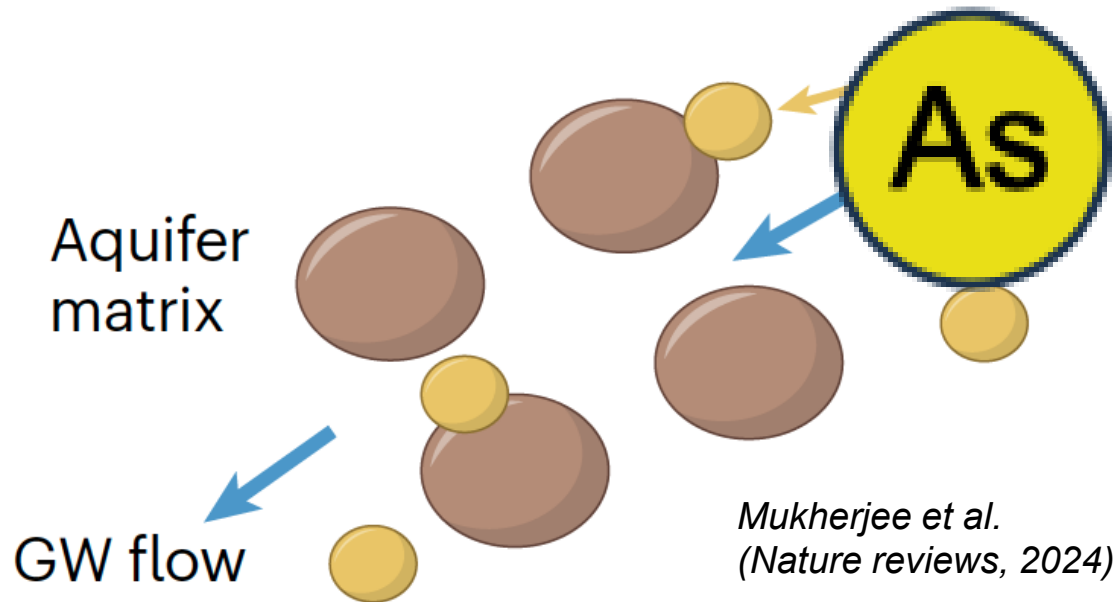
2.1. Processus réactifs: l'adsorption



Adsorption

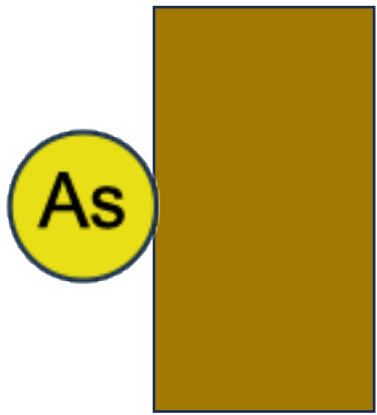


Absorption

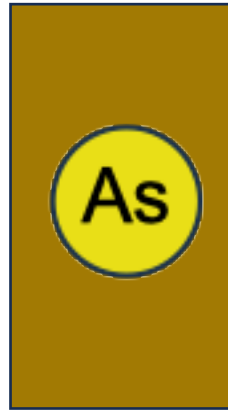


*Mukherjee et al.
(Nature reviews, 2024)*

2.1. Processus réactifs: l'adsorption



Adsorption



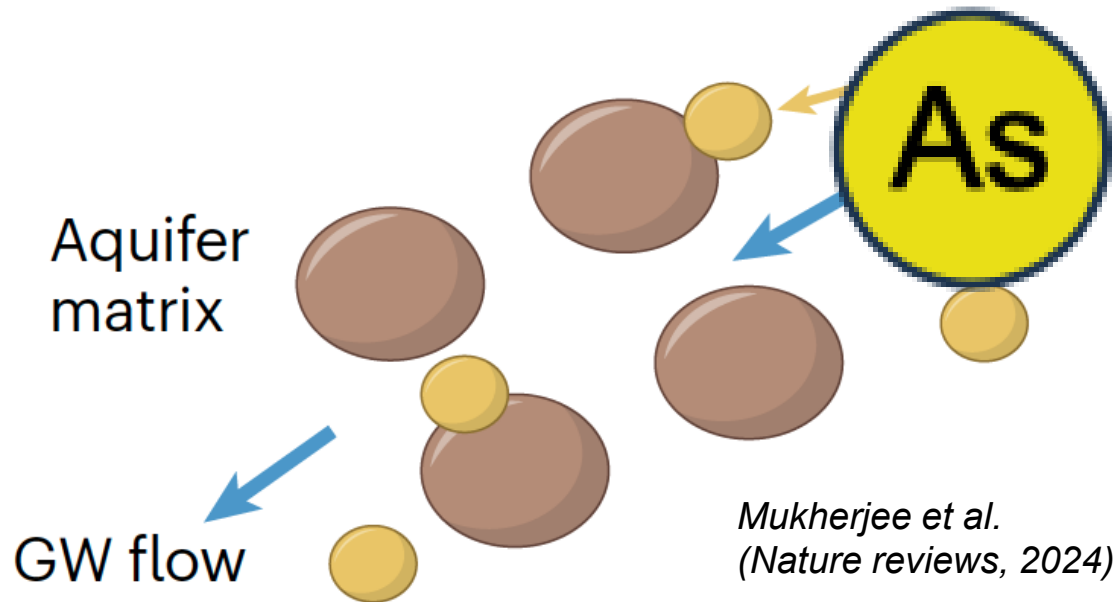
Absorption



(Hydr)oxydes de fer

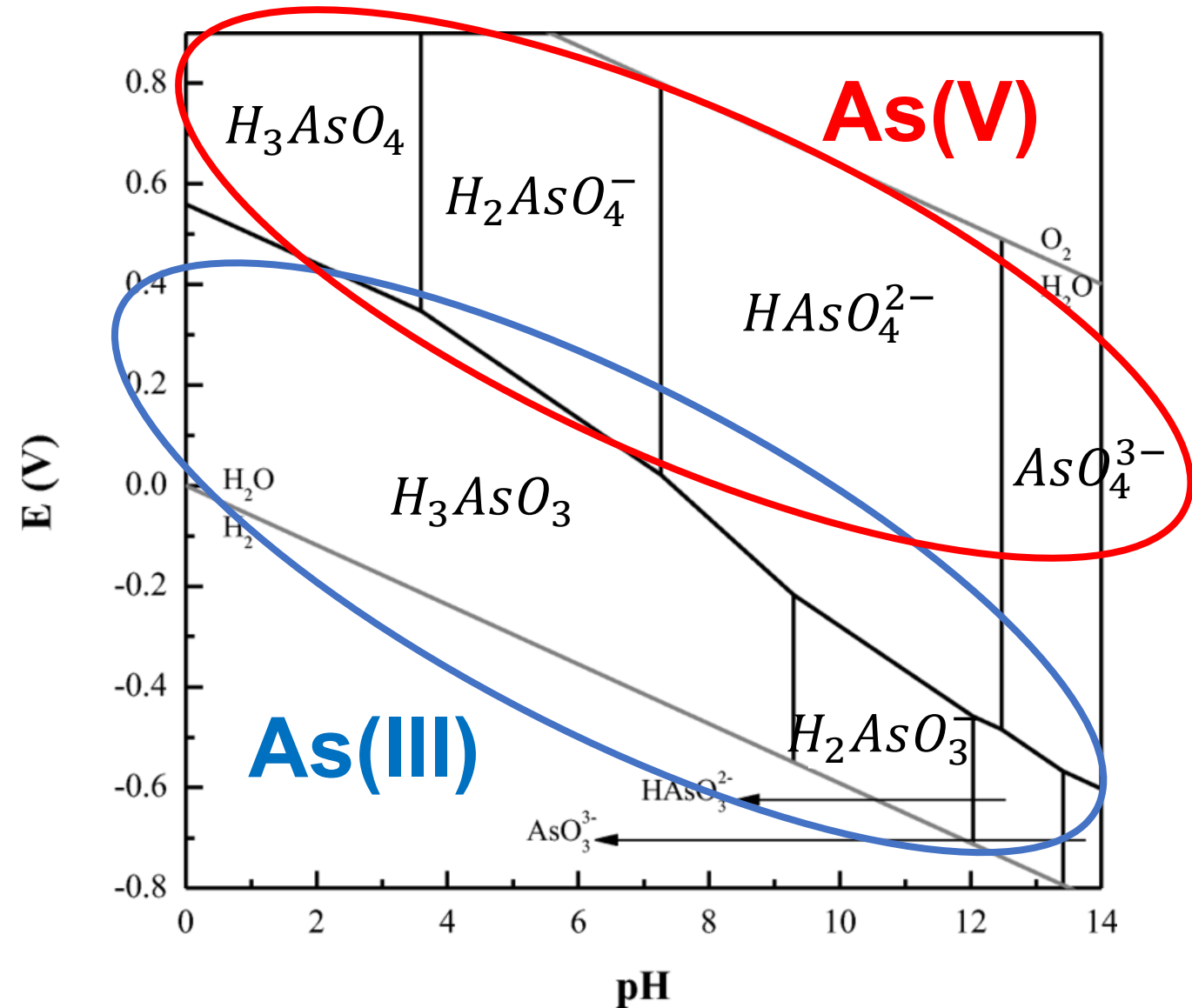


Oxydes d'aluminium

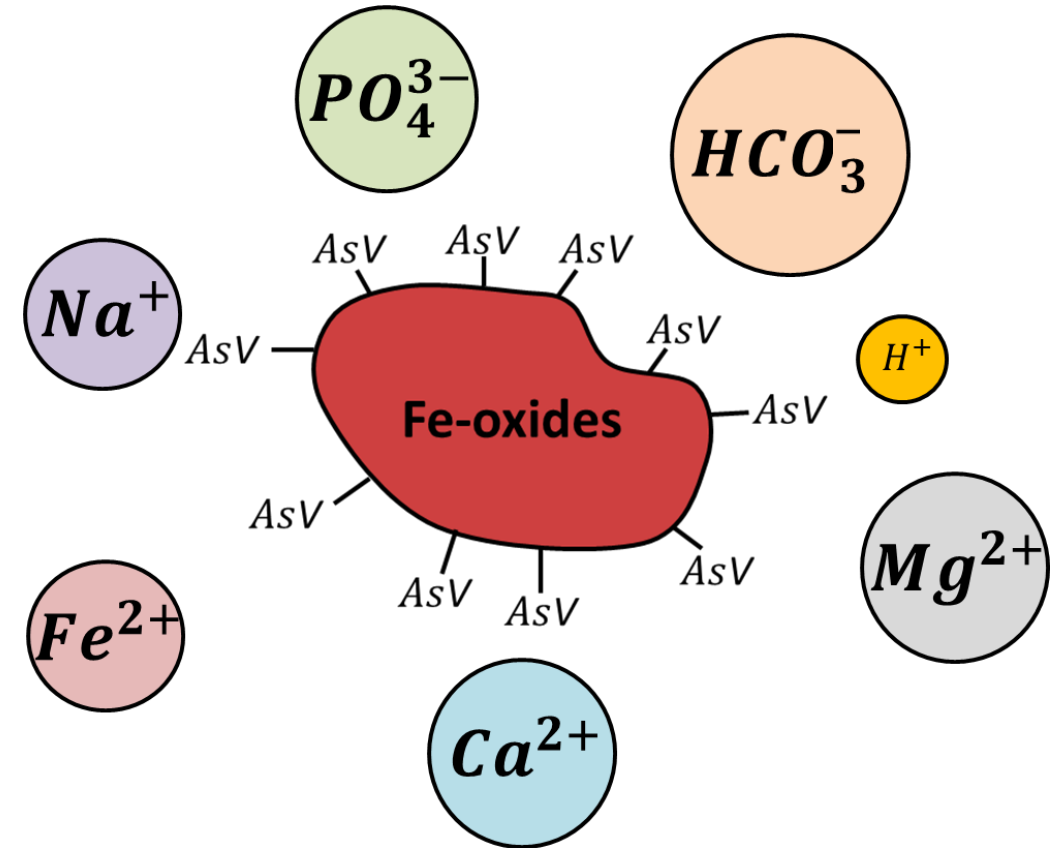
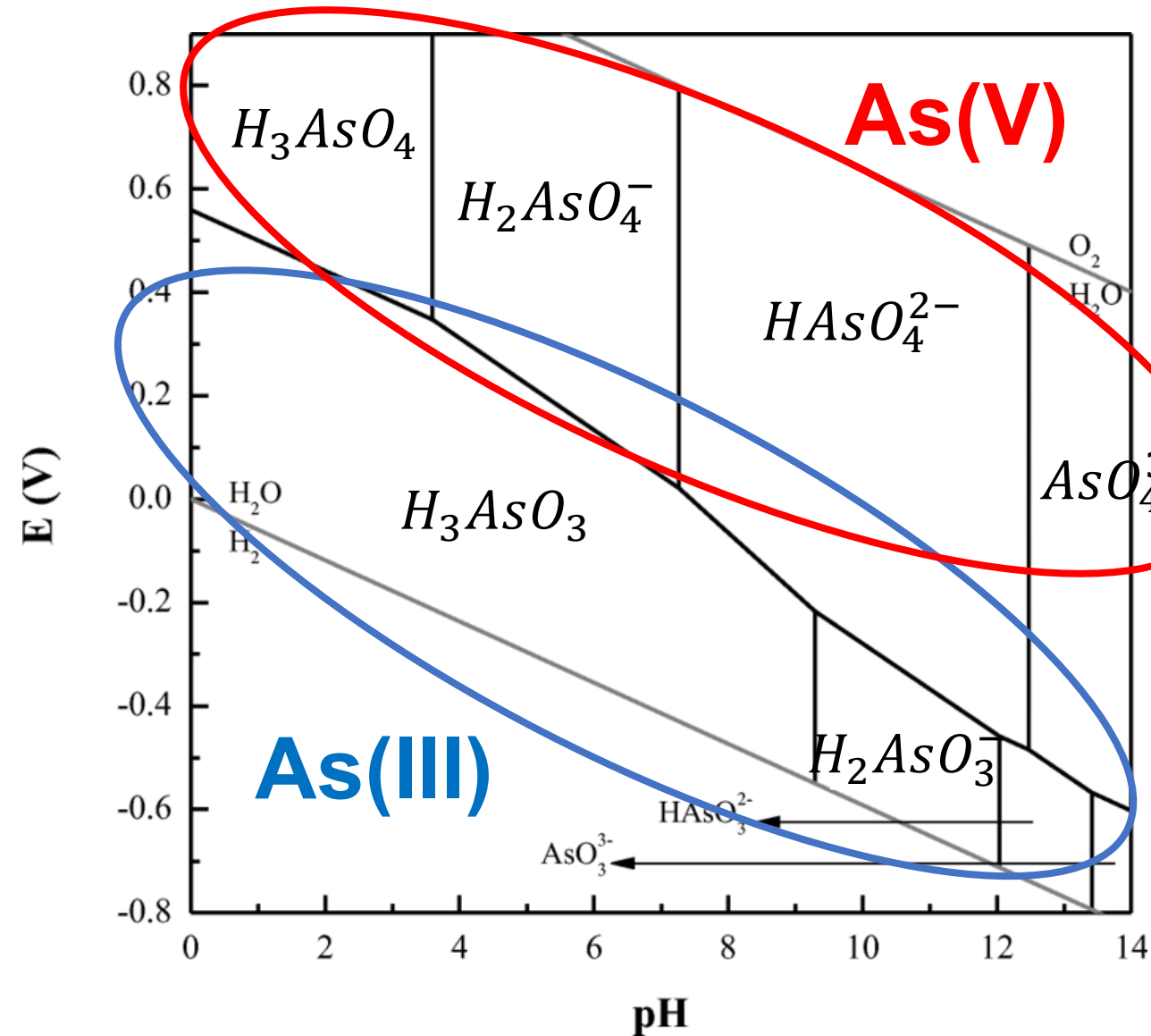


Oxydes de manganese

2.1. Processus réactifs: l'adsorption

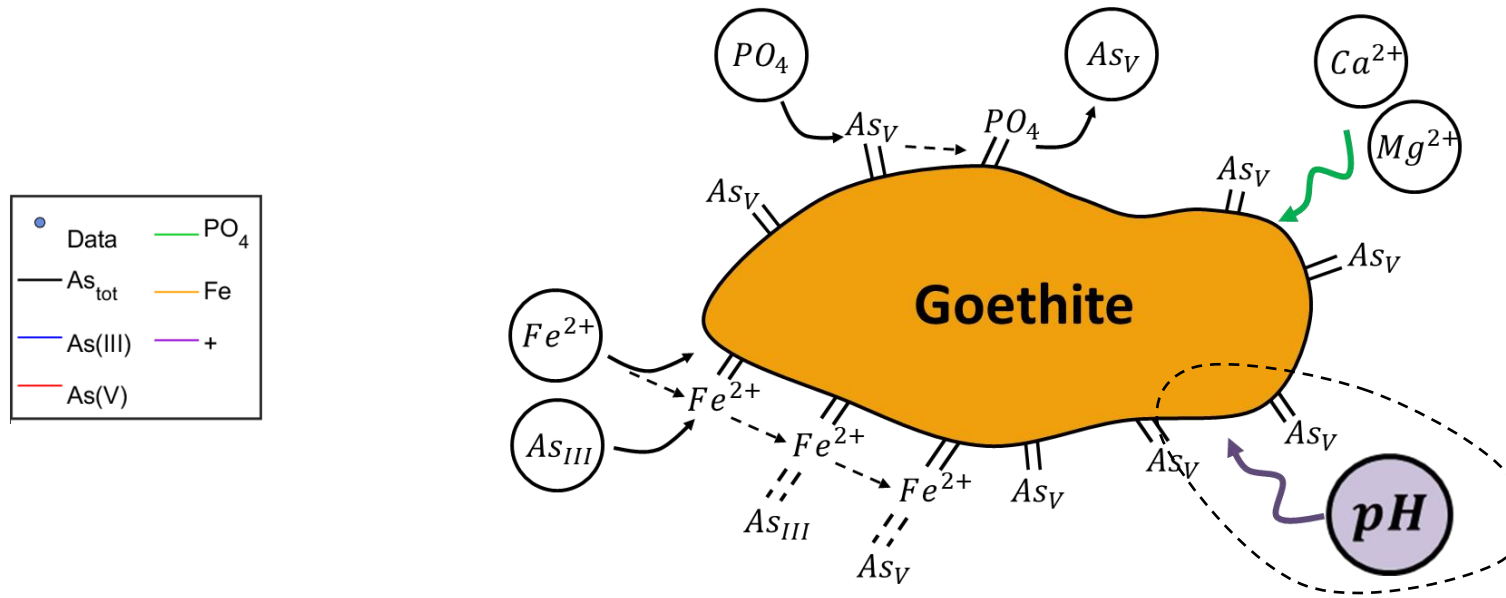


2.1. Processus réactifs: l'adsorption

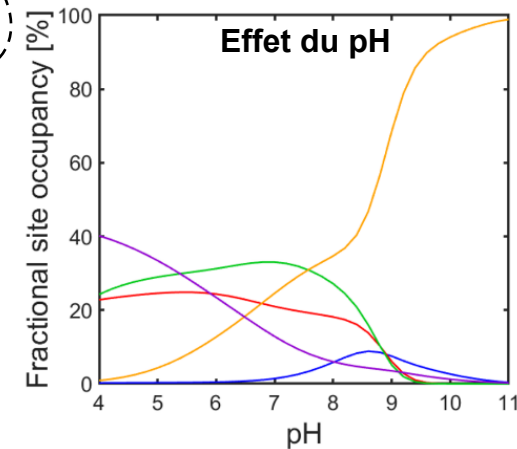


De nombreux paramètres hydrochimiques influencent la sorption

2.1. Processus réactifs: l'adsorption



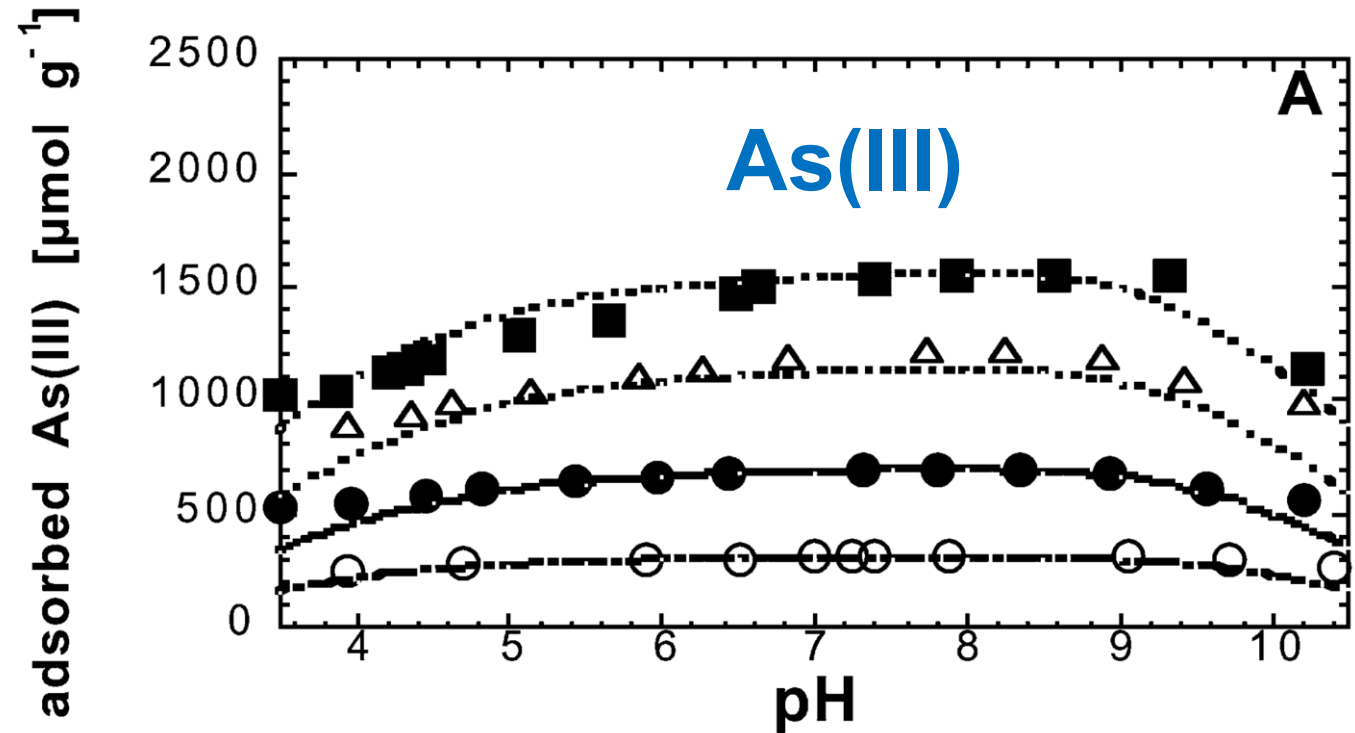
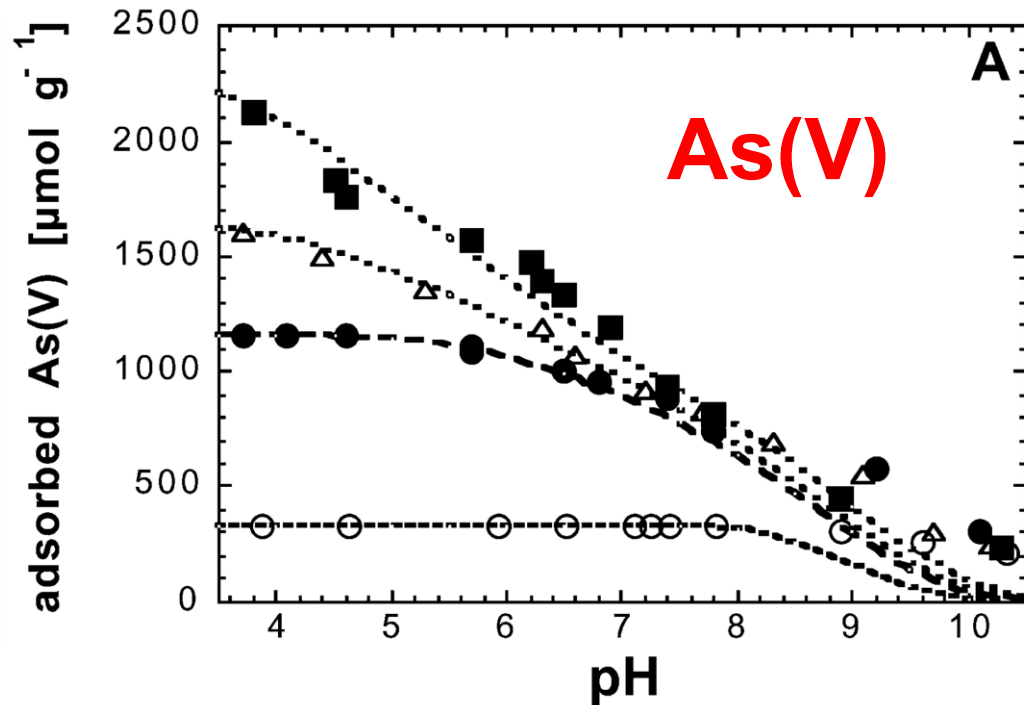
Compétition pour sites de sorption et interactions électrostatiques



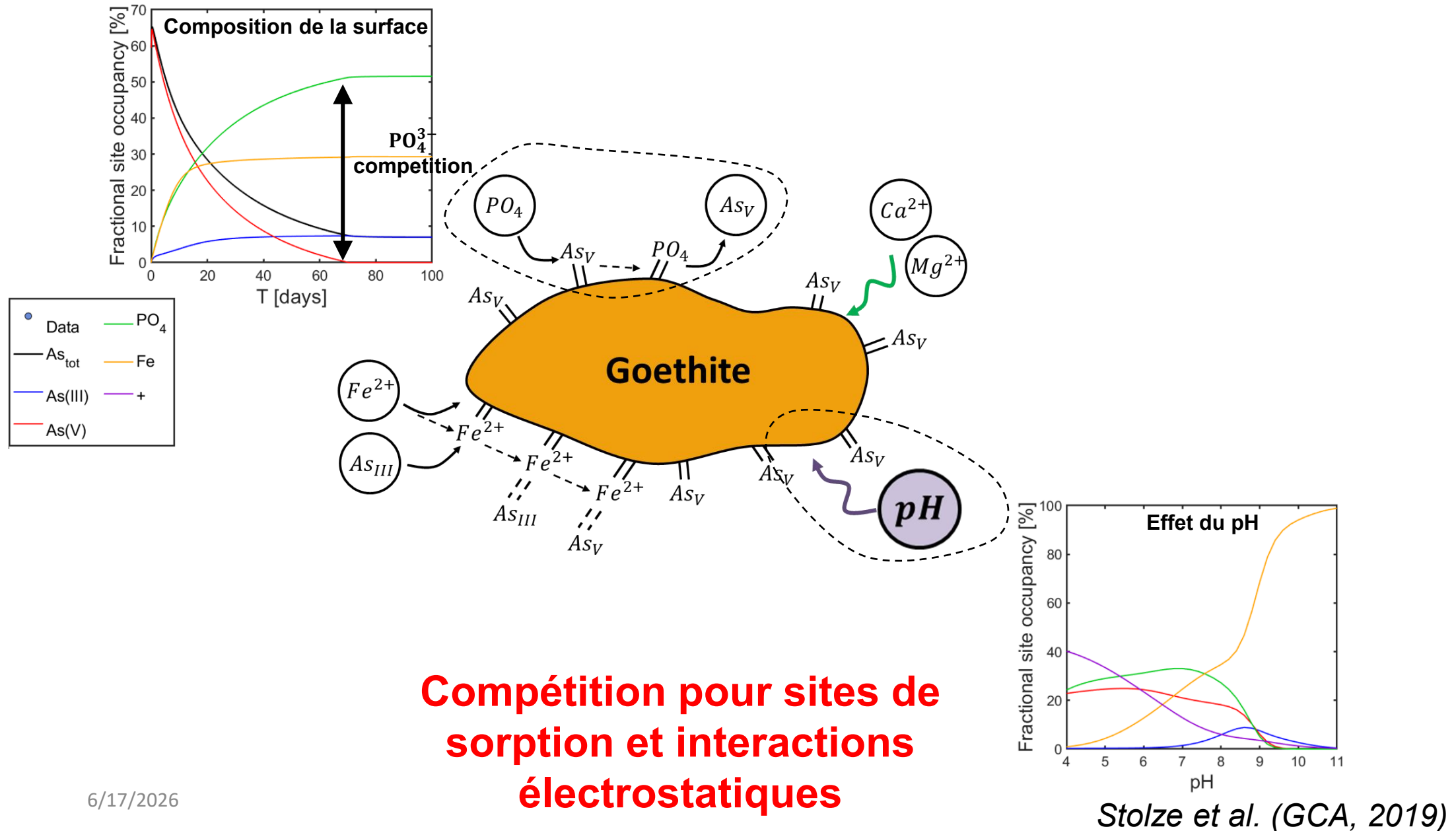
Stolze et al. (GCA, 2019)

2.1. Processus réactifs: l'adsorption

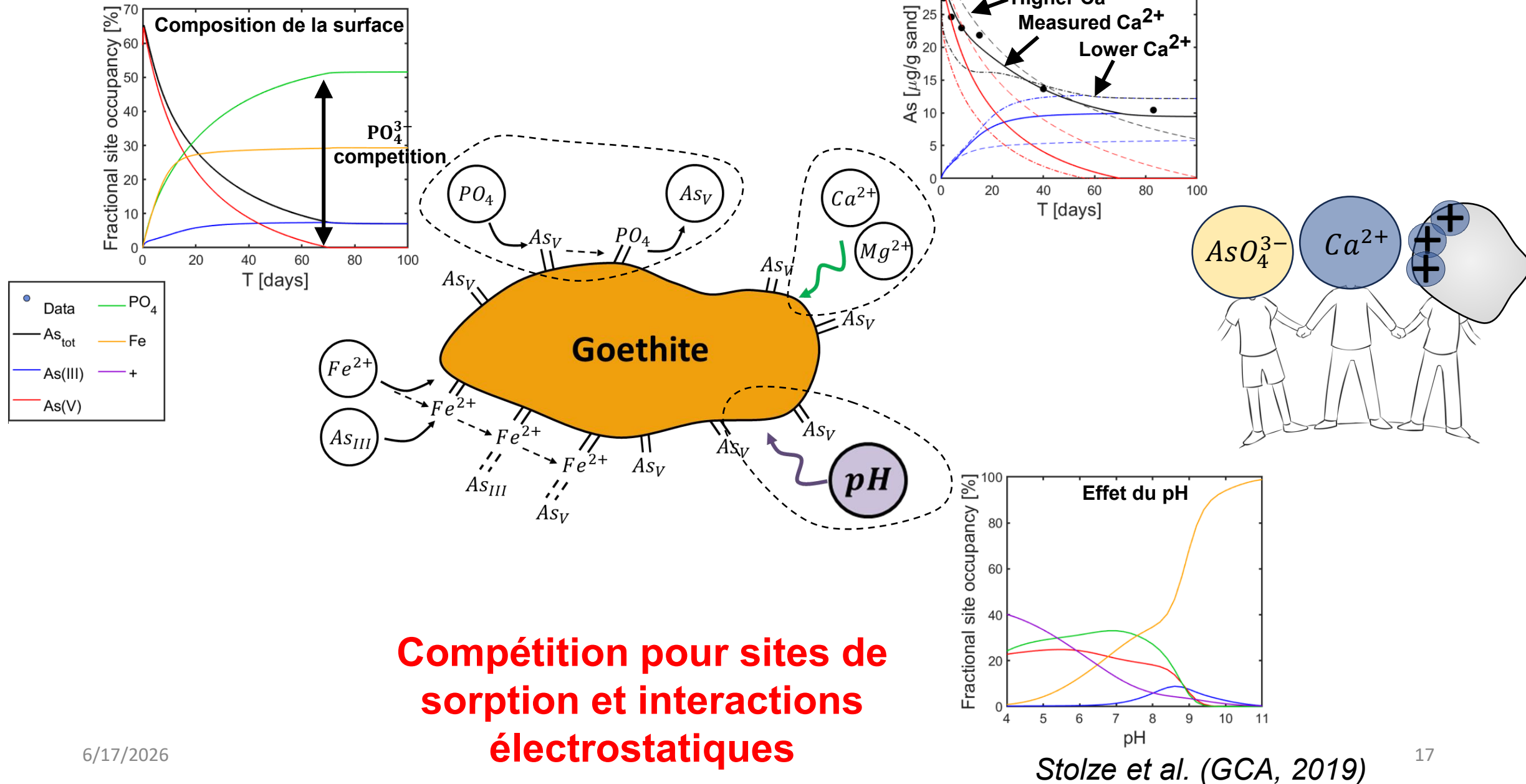
Le pH exerce un contrôle majeur sur la mobilité de l'arsenic



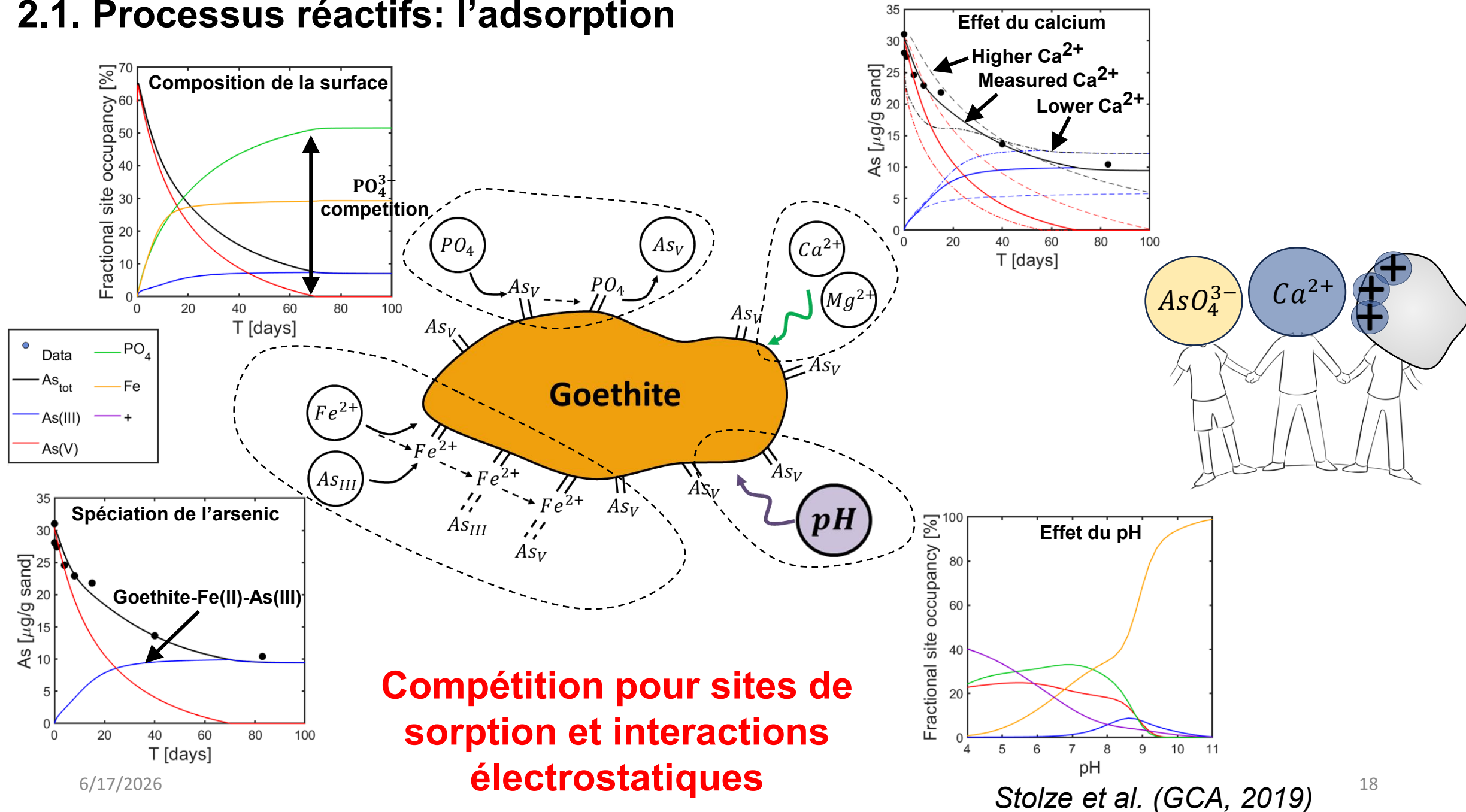
2.1. Processus réactifs: l'adsorption



2.1. Processus réactifs: l'adsorption

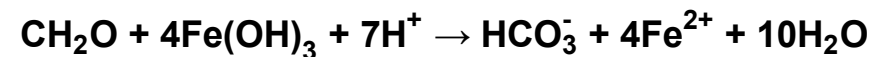
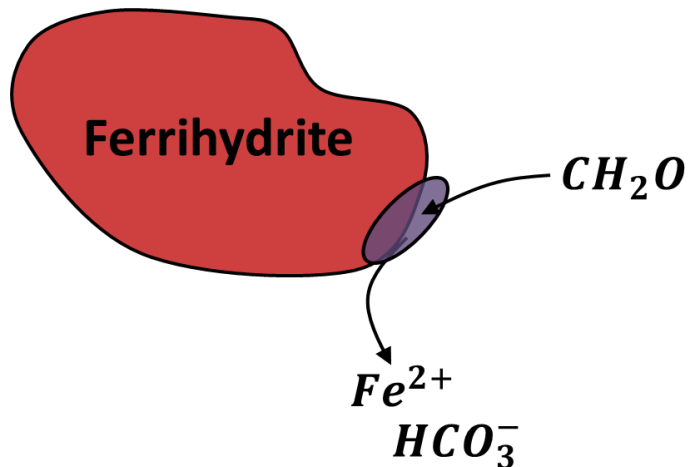


2.1. Processus réactifs: l'adsorption



2.2. Transformation redox des oxydes de fer

1) Dissolution reductive des hydroxydes de fer amorphe

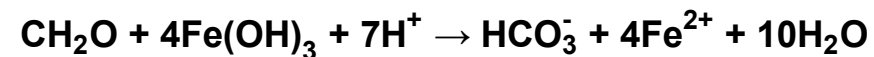
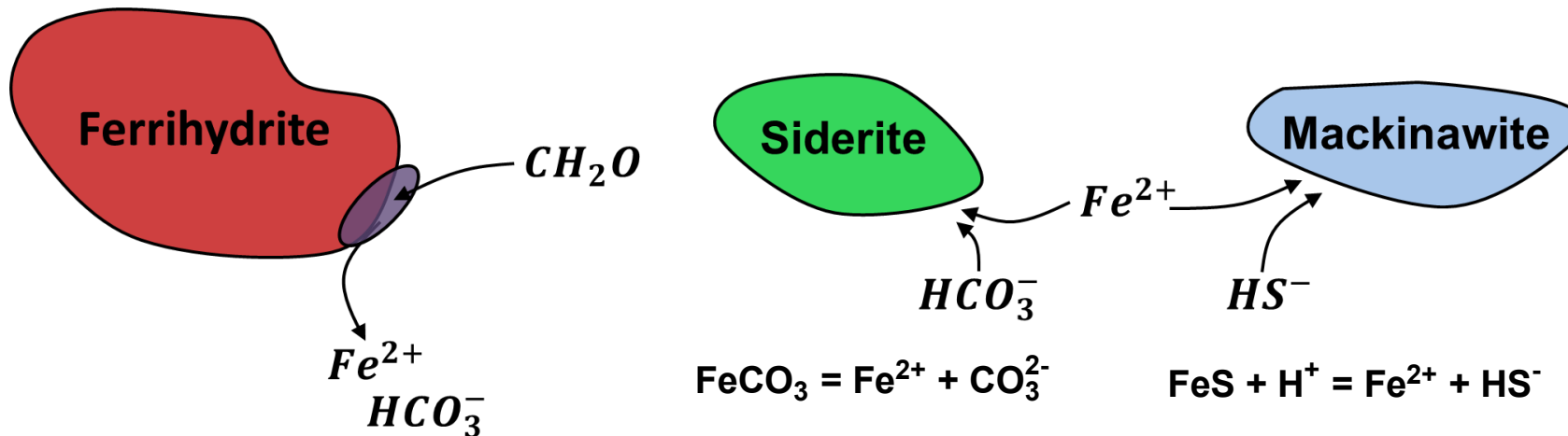


Dissolution réductive + transformations des oxydes de fer amorphes vers des états cristallins

2.2. Transformation redox des oxydes de fer

1) Dissolution reductive des hydroxydes de fer amorphe

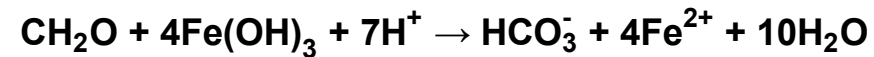
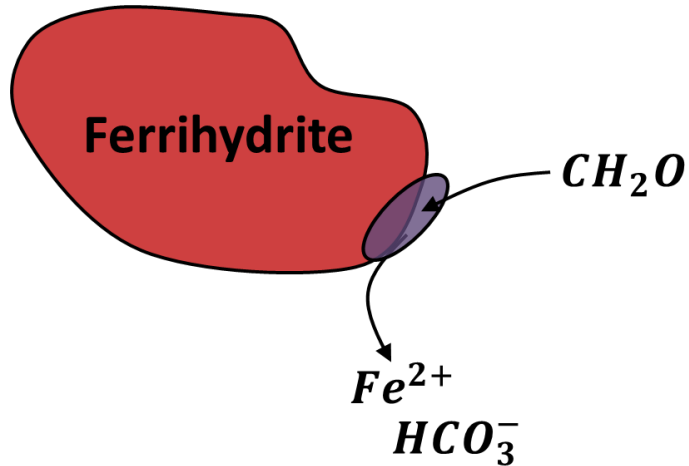
2) Precipitation de minéraux secondaires: siderite, vivianite, mackinawite, etc.



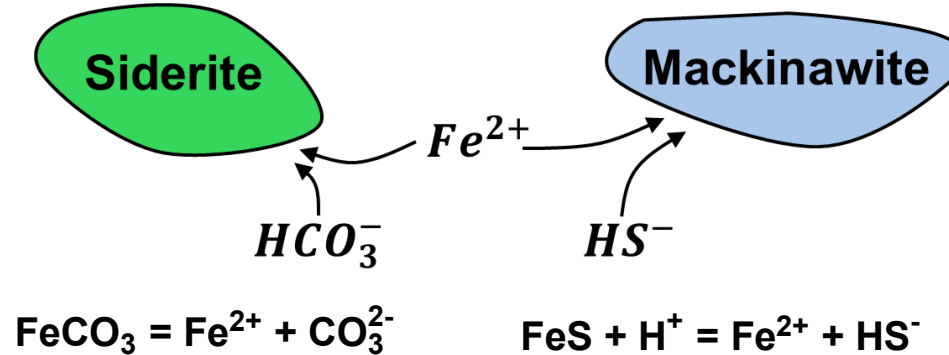
Dissolution réductive + transformations des oxydes de fer amorphes vers des états cristallins

2.2. Transformation redox des oxydes de fer

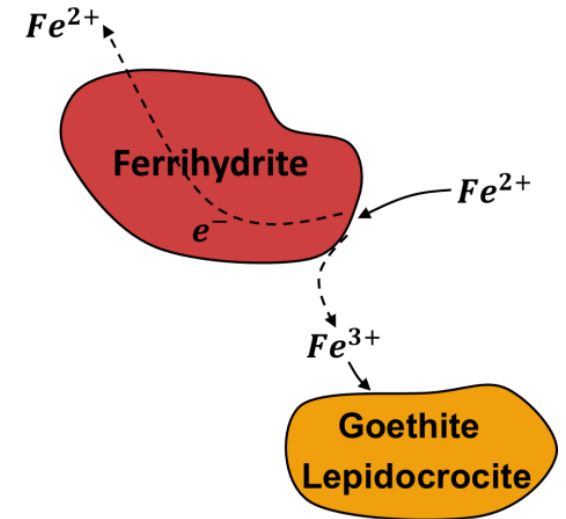
1) Dissolution reductive des hydroxydes de fer amorphe



2) Precipitation de minéraux secondaires: siderite, vivianite, mackinawite, etc.

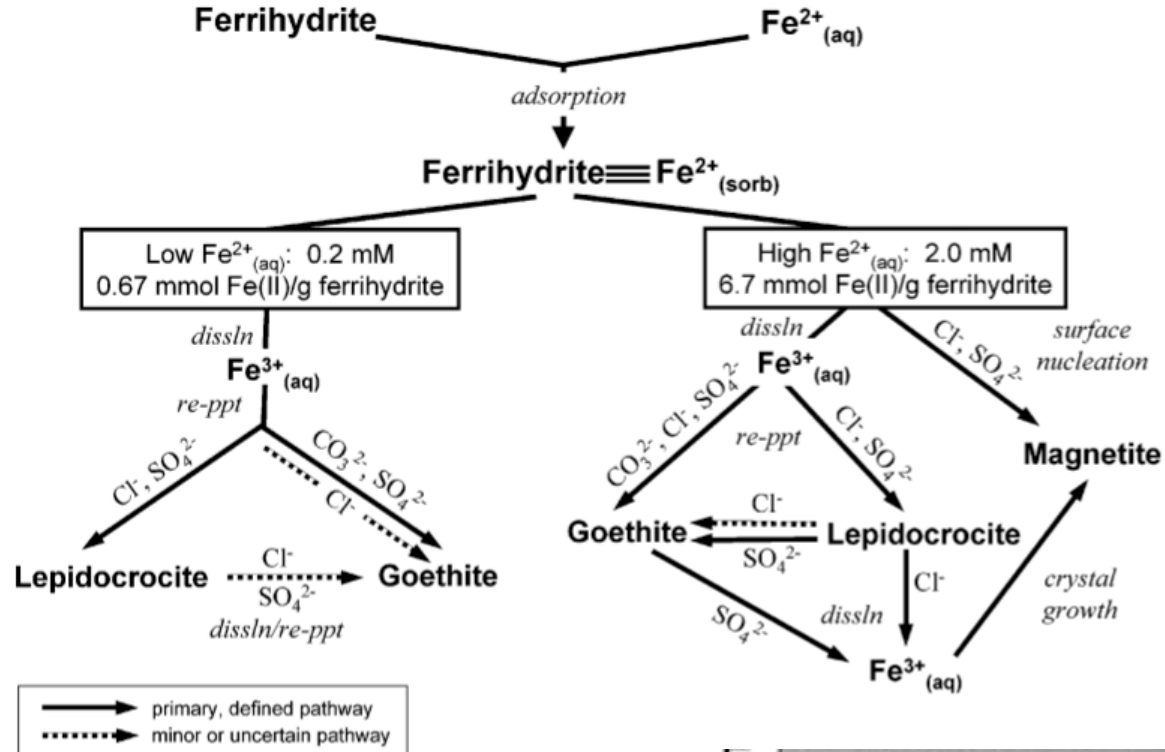


3) Cristallisation (mûrissement d'Ostwald)

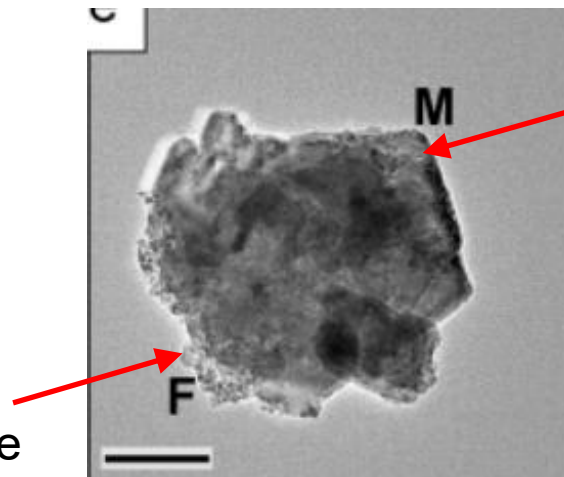


Dissolution réductive + transformations des oxydes de fer amorphes vers des états cristallins

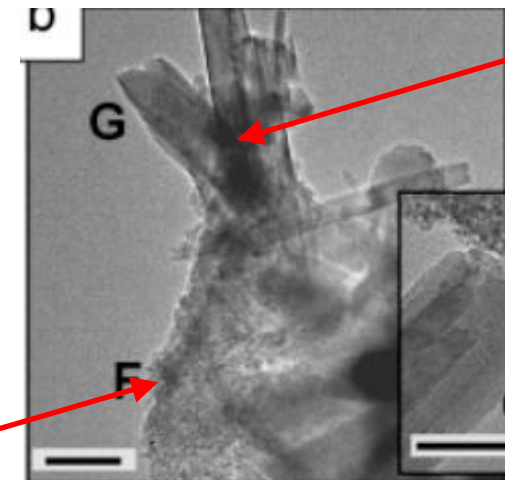
2.2. Transformation redox des oxydes de fer



Influence du **pH** et de la **salinité** sur la transformation des oxydes (Hansel et al., EST, 2005)



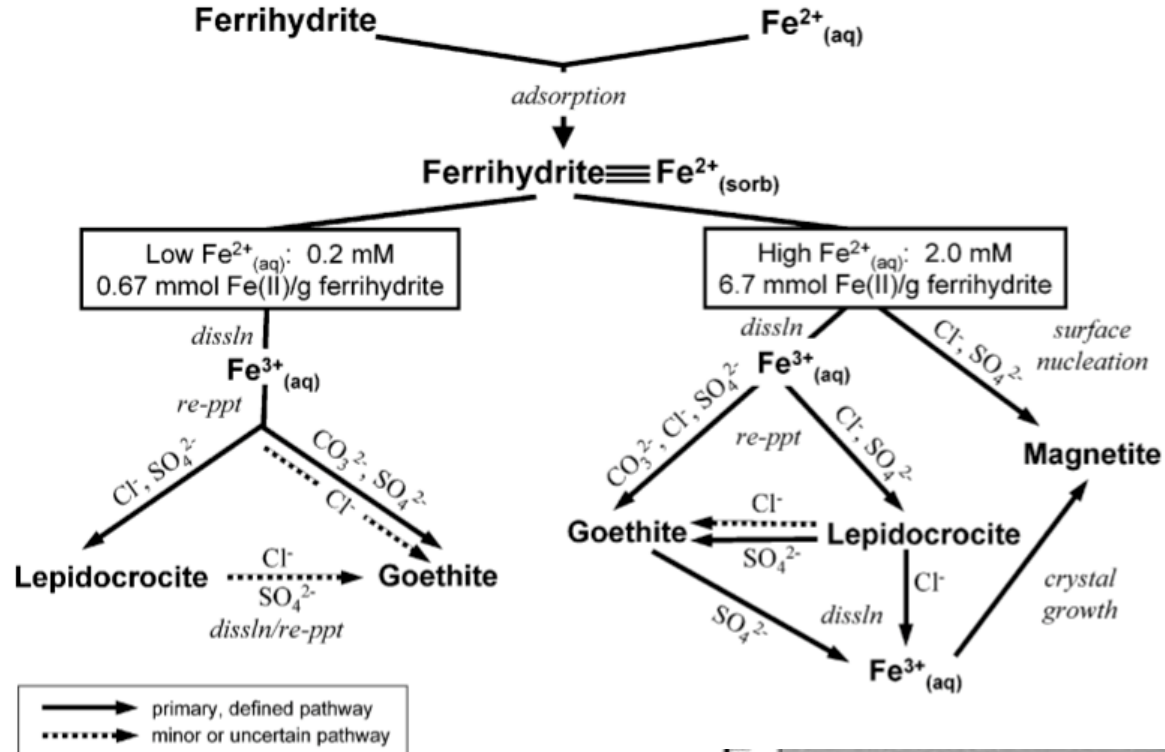
Magnetite



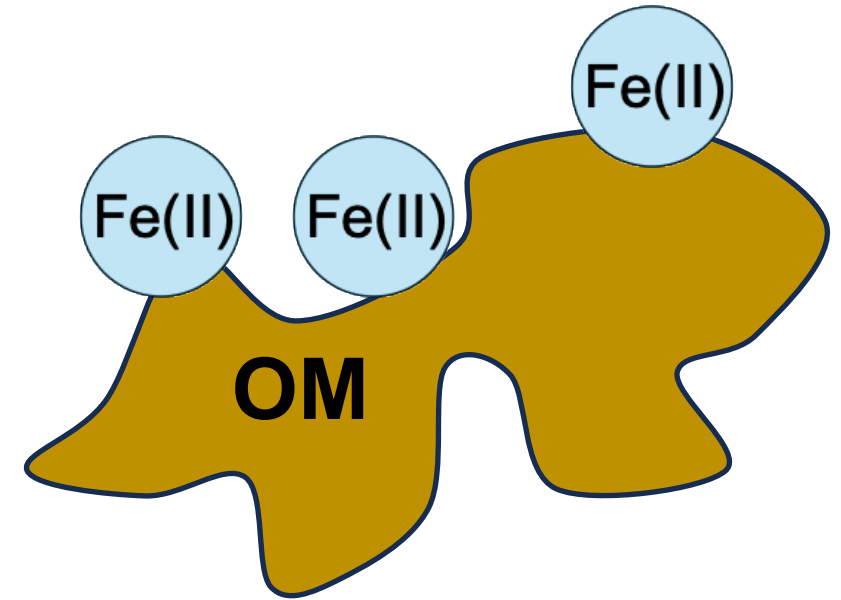
Goethite

Ferrihydrite

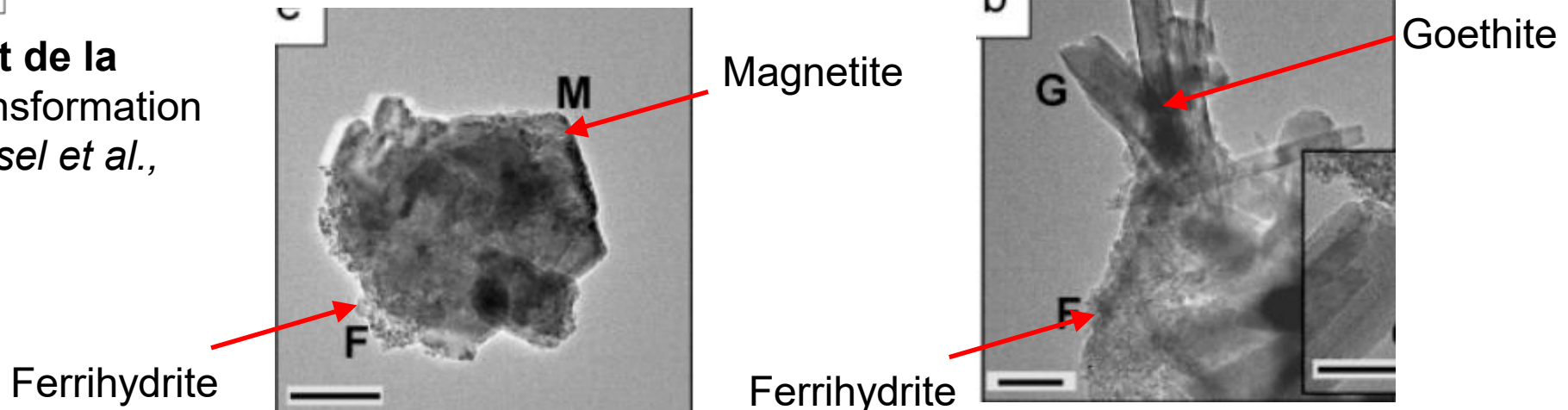
2.2. Transformation redox des oxydes de fer



Influence du **pH** et de la **salinité** sur la transformation des oxydes (Hansel et al., EST, 2005)



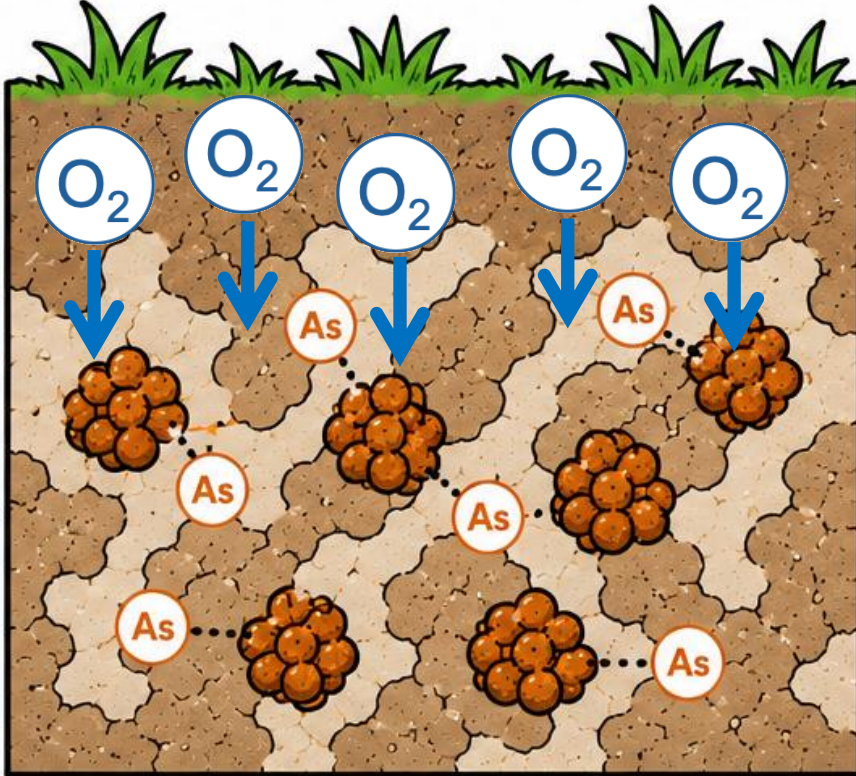
Complexation du fer ferreux avec la **matière organique** influence la cristallisation des oxydes de fer (Davranche et al., Chem. Geol. 2013)



2.2. Transformation redox des oxydes de fer

Sol non saturé en eau

Conditions oxydantes



Stabilisation ou précipitation des oxydes de fer offrant des sites de sorption

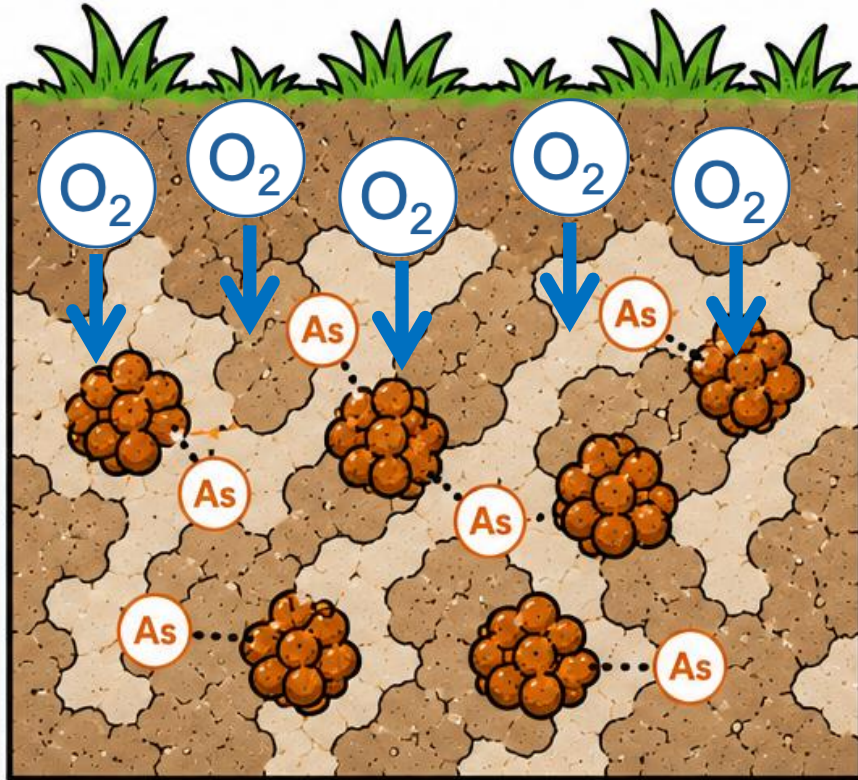
→ **Rétention de l'arsenic dans le sol**

-  Réduction et cristallisation des oxydes de fer
-  Précipitation des oxydes de fer
-  Micro-organismes réducteurs
-  Arsenic dissous
-  Arsenic adsorbé
-  Oxygène dissous

2.2. Transformation redox des oxydes de fer

Sol non saturé en eau

Conditions oxydantes

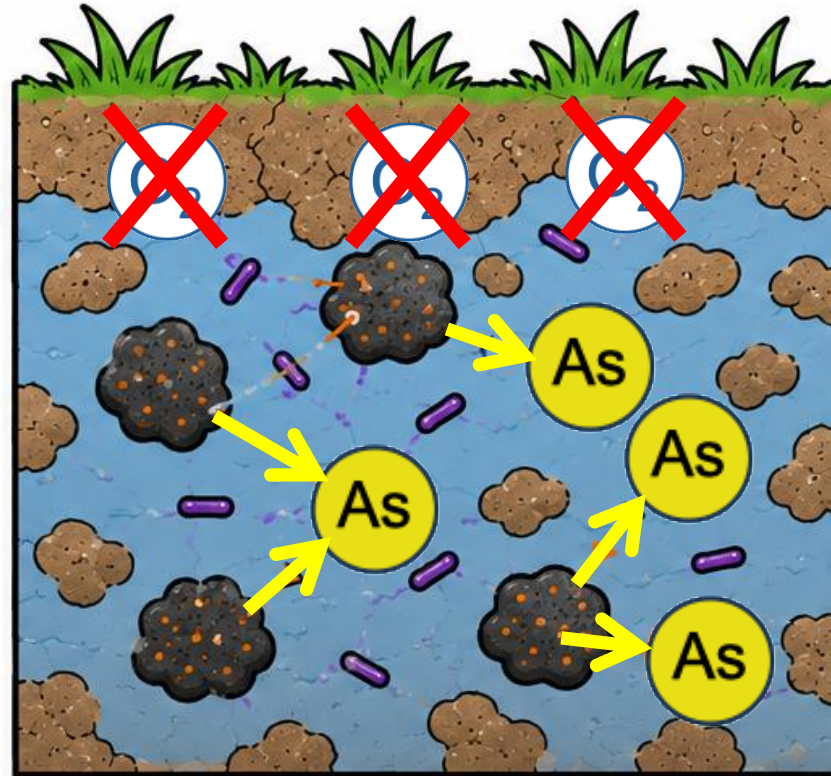


Stabilisation ou précipitation des oxydes de fer offrant des sites de sorption

→ **Rétention de l'arsenic dans le sol**

Sol saturé en eau

Conditions réductrices

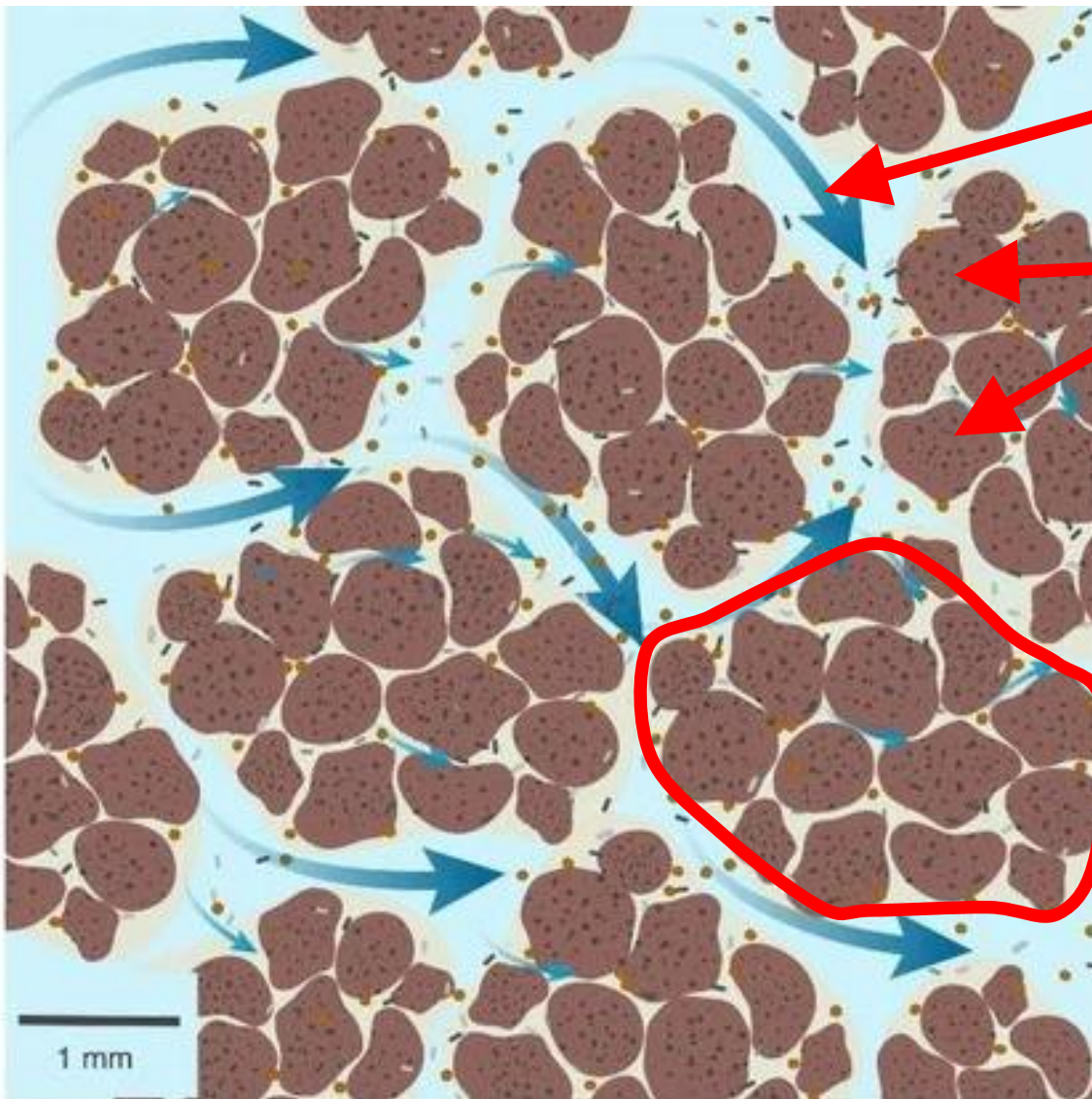


Dissolution réductrice des oxydes de fer médiée par les micro-organismes

→ **Libération d'arsenic en solution**

-  Réduction et cristallisation des oxydes de fer
-  Précipitation des oxydes de fer
-  Micro-organismes réducteurs
-  Arsenic dissous
-  Arsenic adsorbé
-  Oxygène dissous

2.3. Hétérogénéités spatiales et temporelles



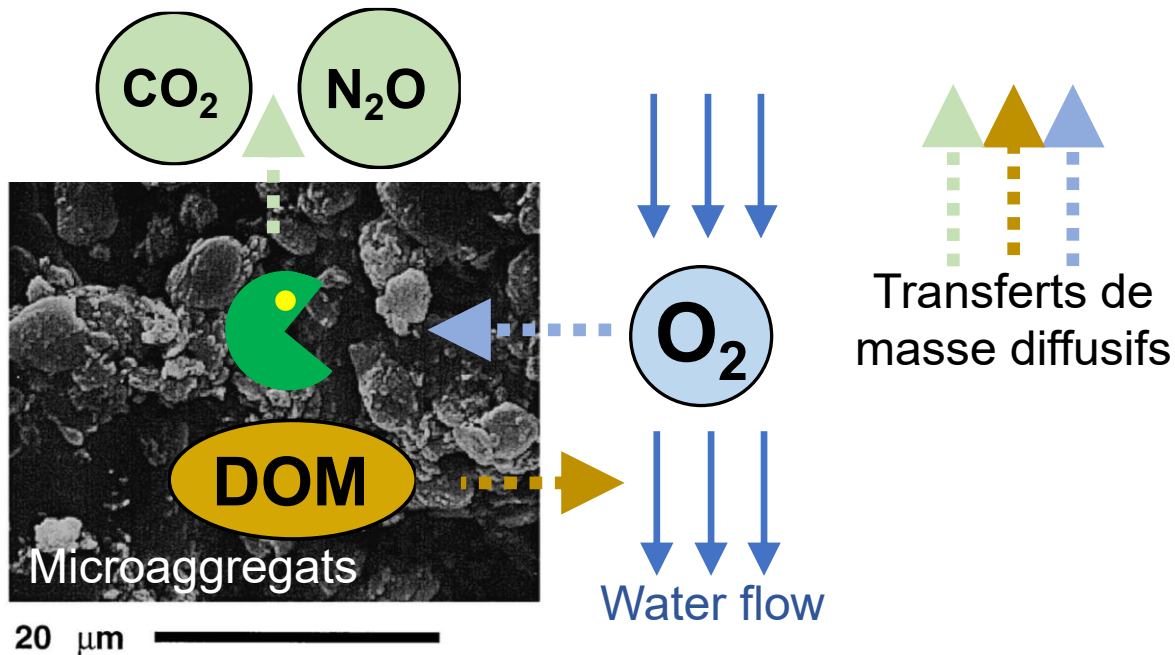
Macropore (transport advectif rapide)

Microagrégat (transport diffusif lent)

Macroagrégat (transport diffusif lent)

→ **Gradients
biogéochimiques**

2.3. Hétérogénéités spatiales et temporelles



Rôle clé des microaggrégats:

- Saturation en eau + microporosité + tortuosité = conditions anoxiques
- Forte teneur en matière organique
- **Points chauds pour l'activité microbienne en conditions de réduction**

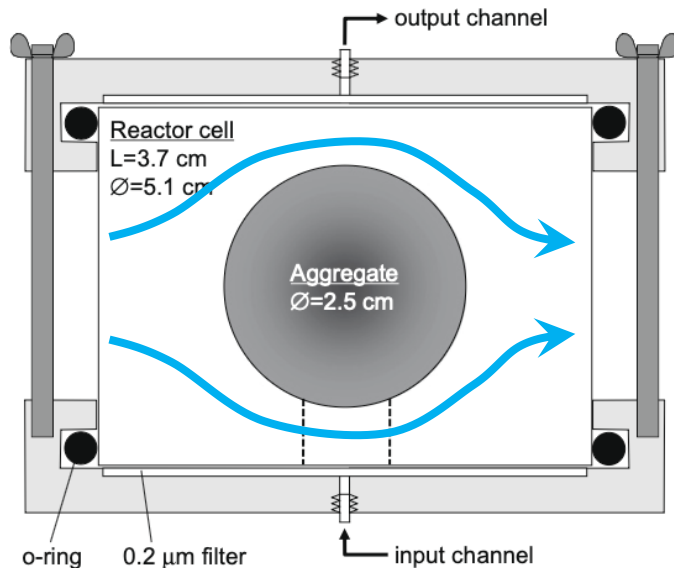
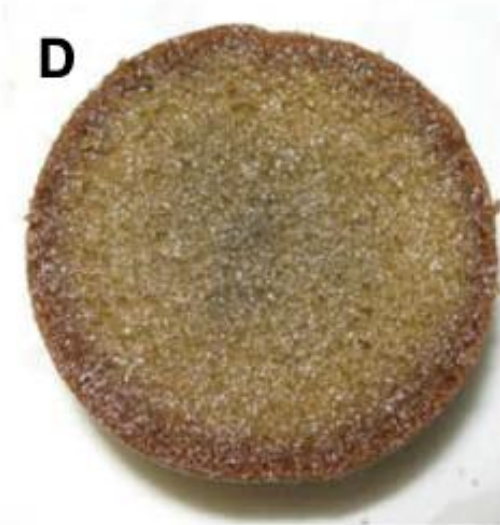
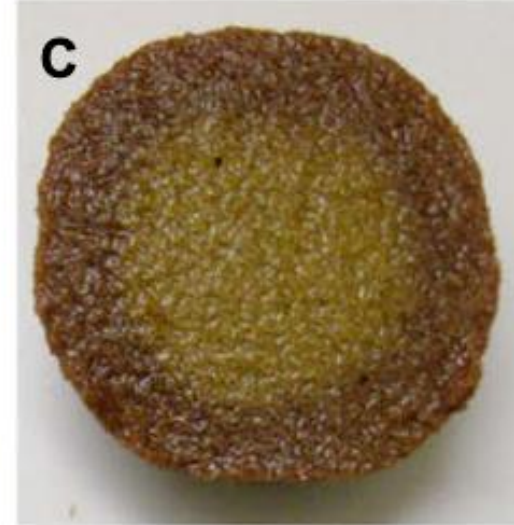
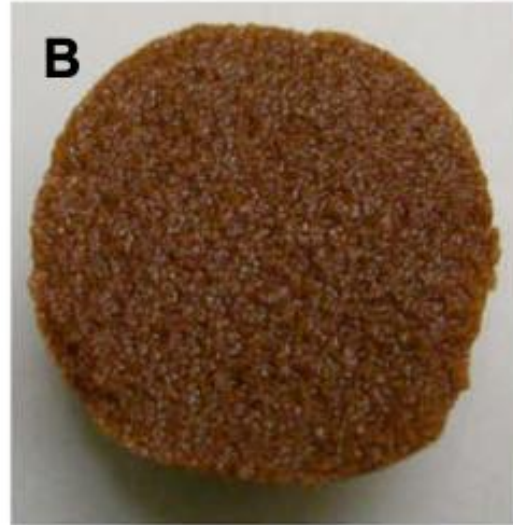
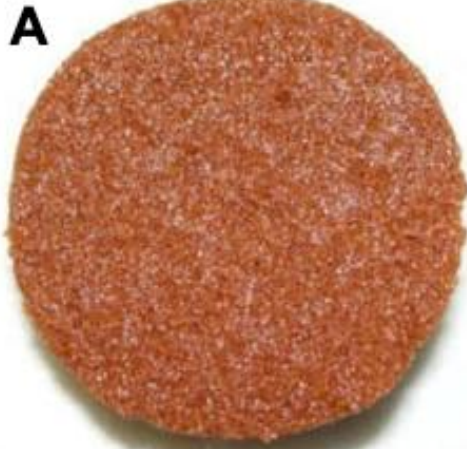
2.3. Hétérogénéités spatiales et temporelles

Conditions initiales

9 jours

21 jours

30 jours



**Hétérogénéités physiques = limitations cinétiques
de transfert de masse**

Pallud et al. (GCA, 2011)

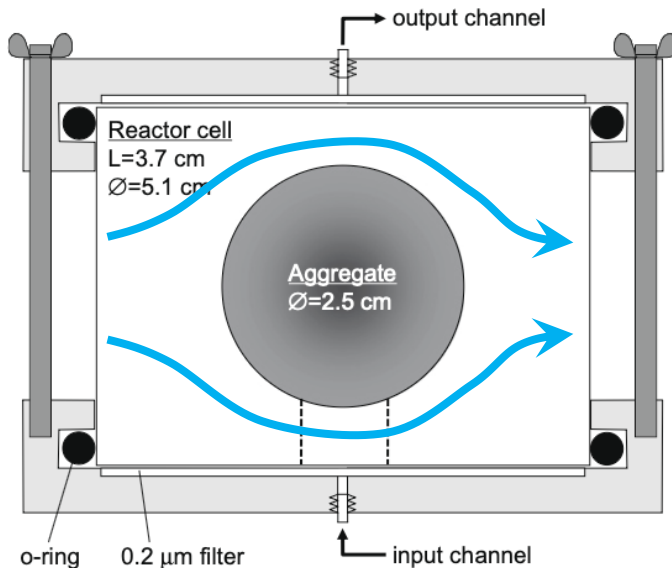
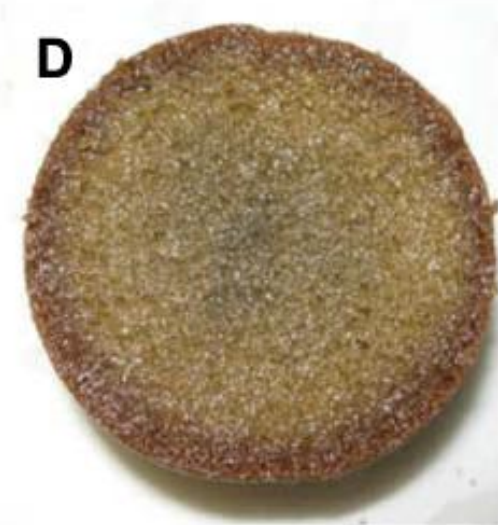
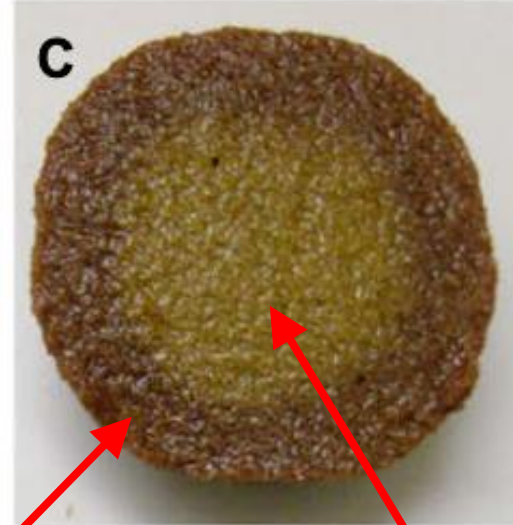
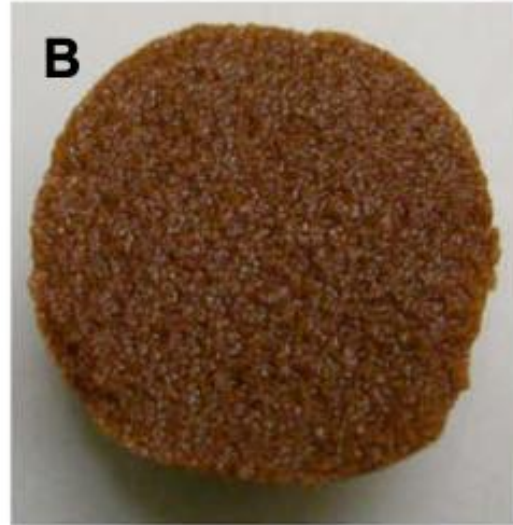
2.3. Hétérogénéités spatiales et temporelles

Conditions initiales

9 jours

21 jours

30 jours



Fe(II) peut s'échapper =
moins de formation de
minéraux secondaires

Fe(II) est piégé = plus
de formation de
minéraux secondaires

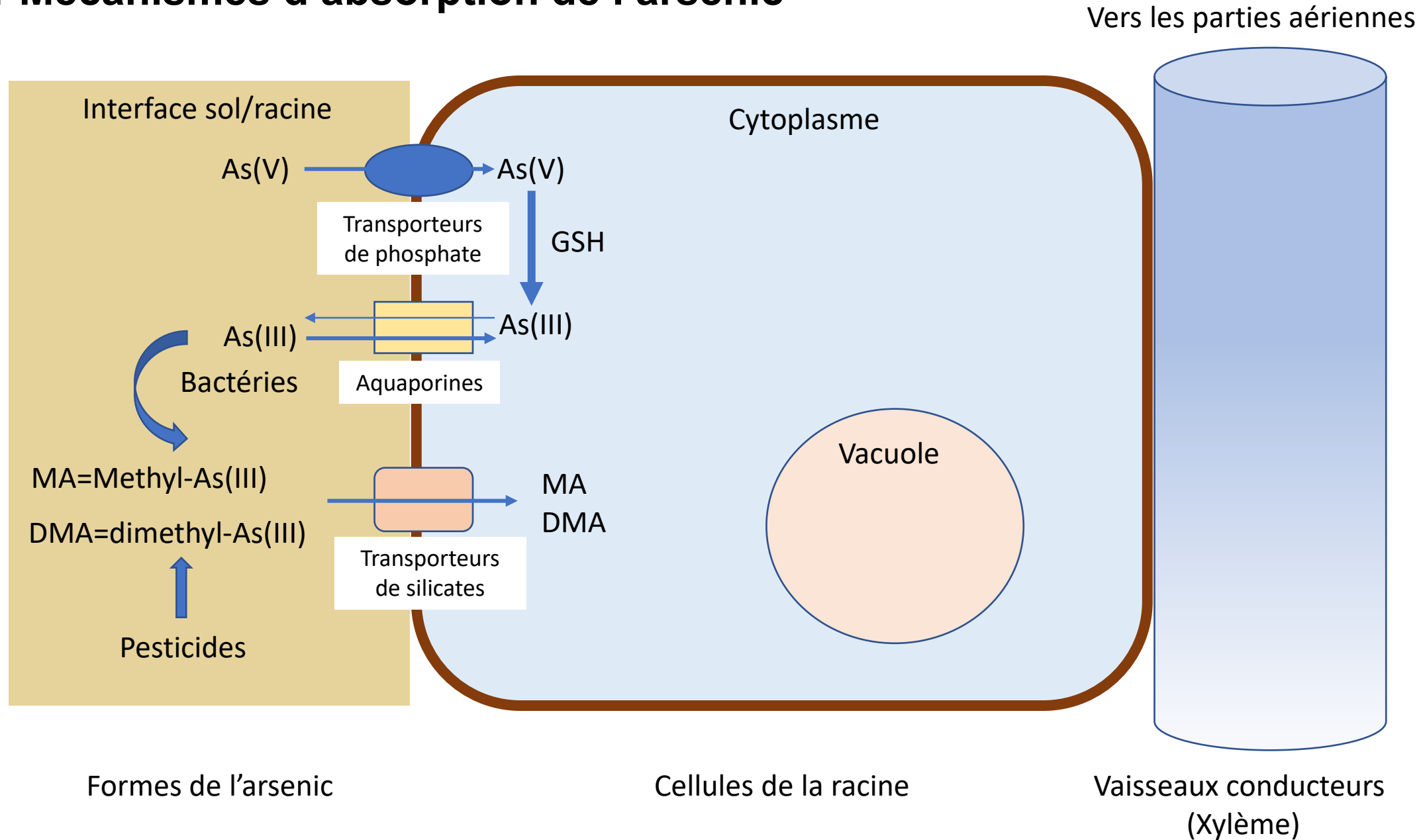
**Hétérogénéités physiques = limitations cinétiques
de transfert de masse**

Pallud et al. (GCA, 2011)

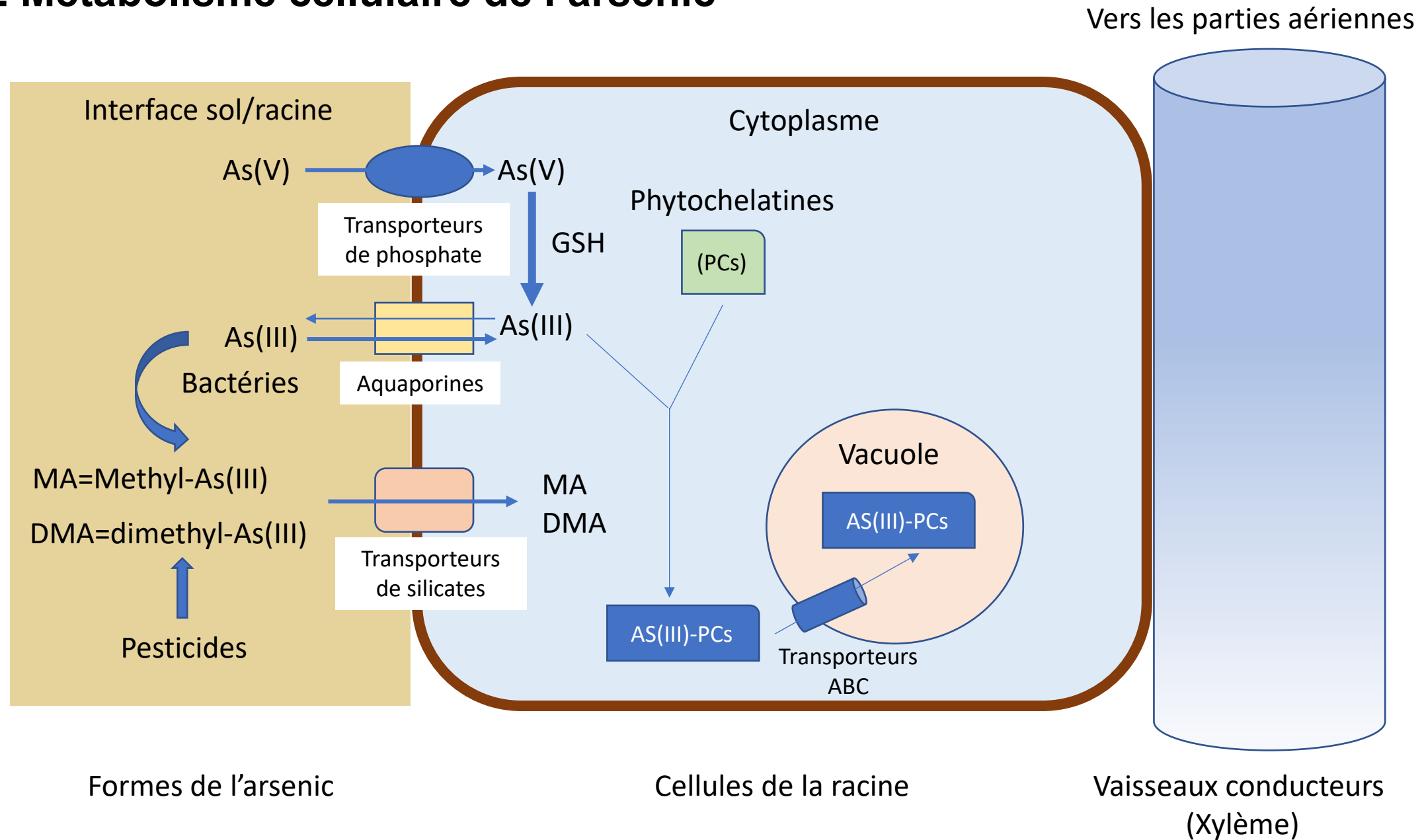
Plan de la présentation

1. Sources de l'arsenic dans le sol
2. Biodisponibilité de l'arsenic dans le sol
- 3. Absorption de l'arsenic par la plante**

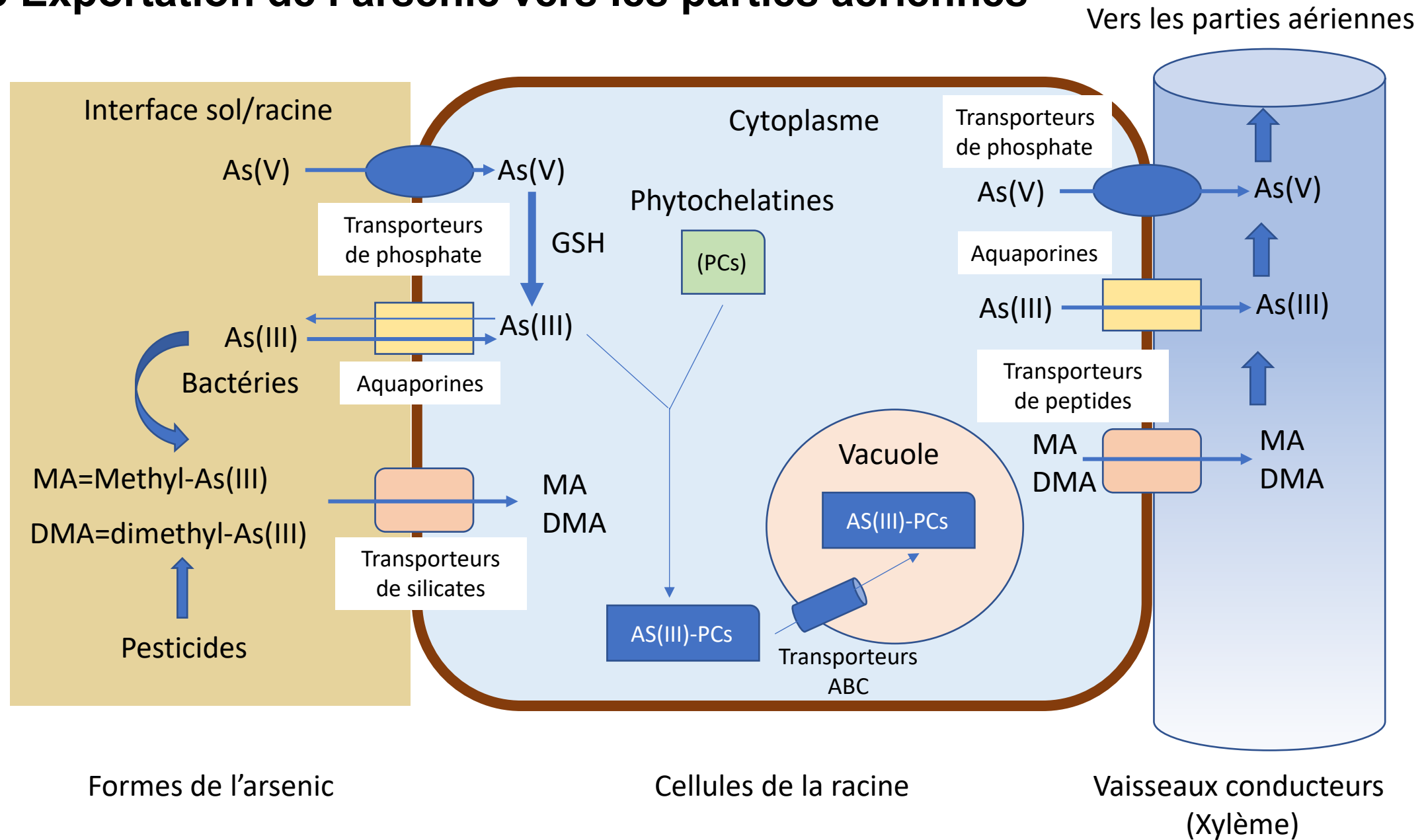
3.1 Mécanismes d'absorption de l'arsenic



3.2 Métabolisme cellulaire de l'arsenic



2.3 Exportation de l'arsenic vers les parties aériennes



2.4 Cas particulier du riz

Conditions de culture inondées :

- > apports importants d'arsenic via les eaux d'irrigation
- > conditions réductrices favorisant l'As(III)

Dans les rizières traditionnelles du Bangladesh, les rendements de riz ont baissé de **7,5 à 2,5 t/ha** lorsque la concentration en arsenic du sol est passée **de 12 à 60 mg/kg** :

Expérimentations : Très grande hétérogénéité des teneurs en As dans les organes de la plante

Conditions expérimentales	Dose As dans le milieu racinaire	Variété de riz	As Racines (mg /kg)	As Feuilles (mg /kg)	As Grain (mg /kg)	As Grain/As feuille	Pays
Sol	3.1 kg ha ⁻¹ (MA)		NM	NM	0,82		USA
Sol	15,68 mg kg ⁻¹		2,4	0,73	0,,14	0,2	Bangladesh
Eau d'irrigation	2 mg L ⁻¹	BRRI Dhan 33	NM	5,02	0,29	0,05	Bangladesh

Racines et feuilles accumulent plus d'Arsenic que les grains : entre **80 et 95 %**
Les mêmes résultats ont été observés chez le blé

2.4 Cas particulier du riz

Problème de qualité du riz vis à vis de l'Union Européenne qui a fixé des seuils de teneurs en As

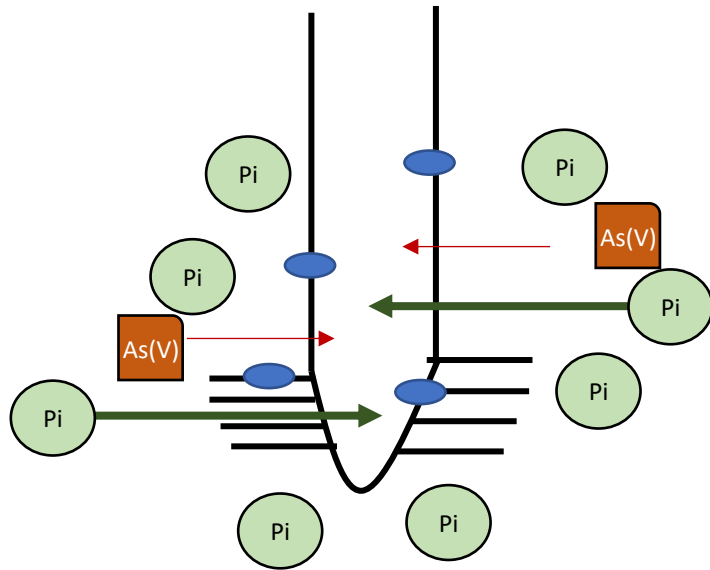
Teneurs maximales en As (mg kg^{-1}) - règlement de la Commission européenne (2015)

Denrée alimentaire	Riz blanc	Riz étuvé	Biscuits de riz	Riz entrant ds les aliments pour enfants
Teneur en As (mg/kg)	0,2	0,25	0,3	0,1

Beaucoup de riz provenant d'Asie sont trop riches en As

2.5 Quels sont les moyens de lutte contre l'Arsenic dans les céréales ?

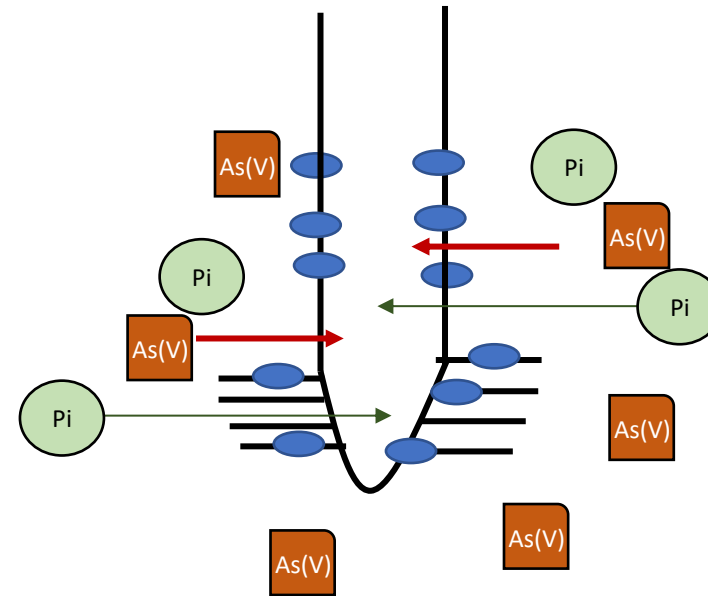
Fertilisation P -> assurerait une bonne disponibilité en Pi et une faible absorption de As



Milieu riche en Pi

Peu de transporteurs de phosphate

Concentration As(V) faible



Milieu pauvre en Pi

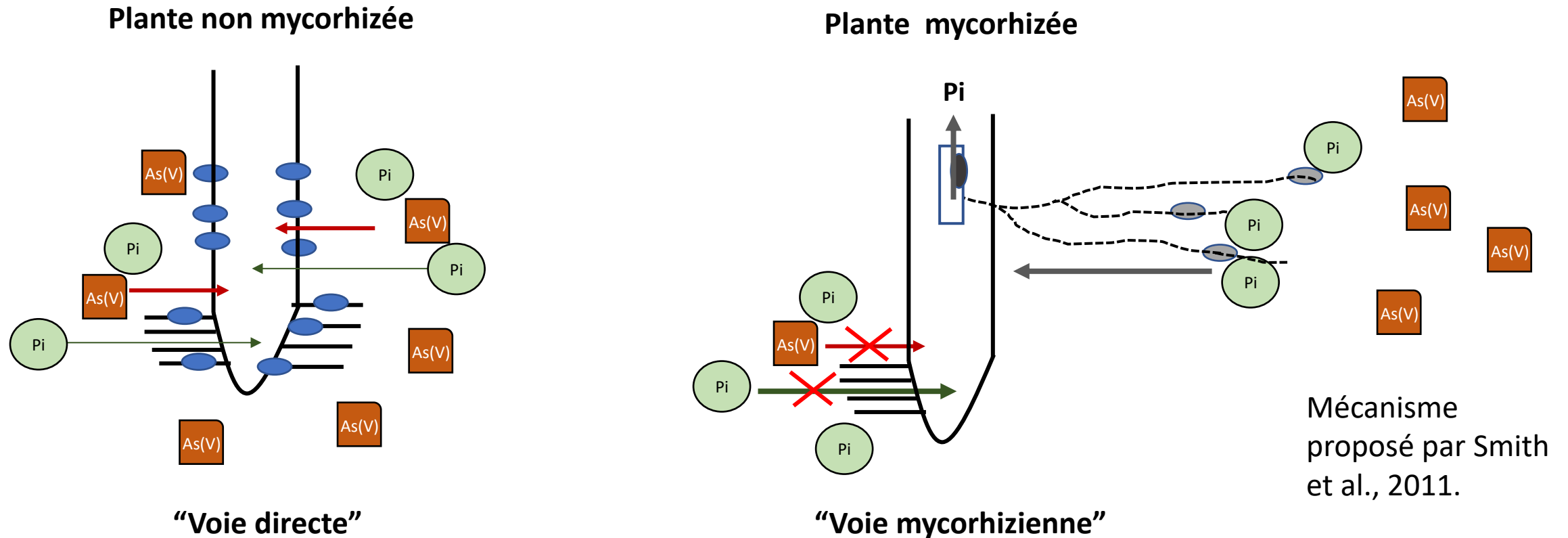
Beaucoup de transporteurs de phosphate

Concentration As(V) forte

2.5 Quels sont les moyens de lutte contre l'Arsenic dans les céréales ?

La mycorhization AM -> augmente la biodisponibilité de P et diminue les teneurs en As

La mycorhization AM diminue le prélèvement d'As par les racines



2.5 Autres effets de la mycorhization

Effets directs de la mycorhization (Gupta et al, 2026)

- Immobilisation de l'As dans le sol grâce à la production de glomaline
- Rétention de l'arsenic dans les hyphes (parois, vacuole), les spores et les arbuscules
- Réduction de l'As(V) en As(III) dans les structures fongiques
- Méthylation de l'As(III)
- Volatilisation de l'arsenic dans les feuilles des plantes

Effets indirects

- Renforcement de la réponse de défense antioxydante
- Restauration de la photosynthèse
- Rééquilibrage des taux de phytohormones.

2.6 Stratégies anthropiques pour diminuer l'absorption de l'arsenic

Apports de silice :

Relation inverse entre teneur en Si du sol et en As du riz - > absorption d'As(III) est réduite lorsque la disponibilité en Si dans le sol est élevée et inversement.

Techniques **très efficace** car des rizières amendées avec de la silice -> **-78 % d'As dans la paille et -16% dans les grains**

Pourquoi ?

La forte disponibilité en Si peut **diminuer l'expression des transporteurs de silice** et donc l'absorption d'As(III).

Le silicium peut aussi **entrer en compétition** avec l'arsenic (III) à cause de leurs similitudes chimiques

Limites de cette technique : **compétition** adsorption As/Si dans le sol -> **augmentation de la biodisponibilité de As** si le sol est **déjà riche en As**

2.6 Stratégies anthropiques pour diminuer l'absorption de l'arsenic

Apports de fer :

L'application de scories d'acier (riches en fer et en silicate) est courante dans les systèmes de production de riz en Asie du Sud-Est

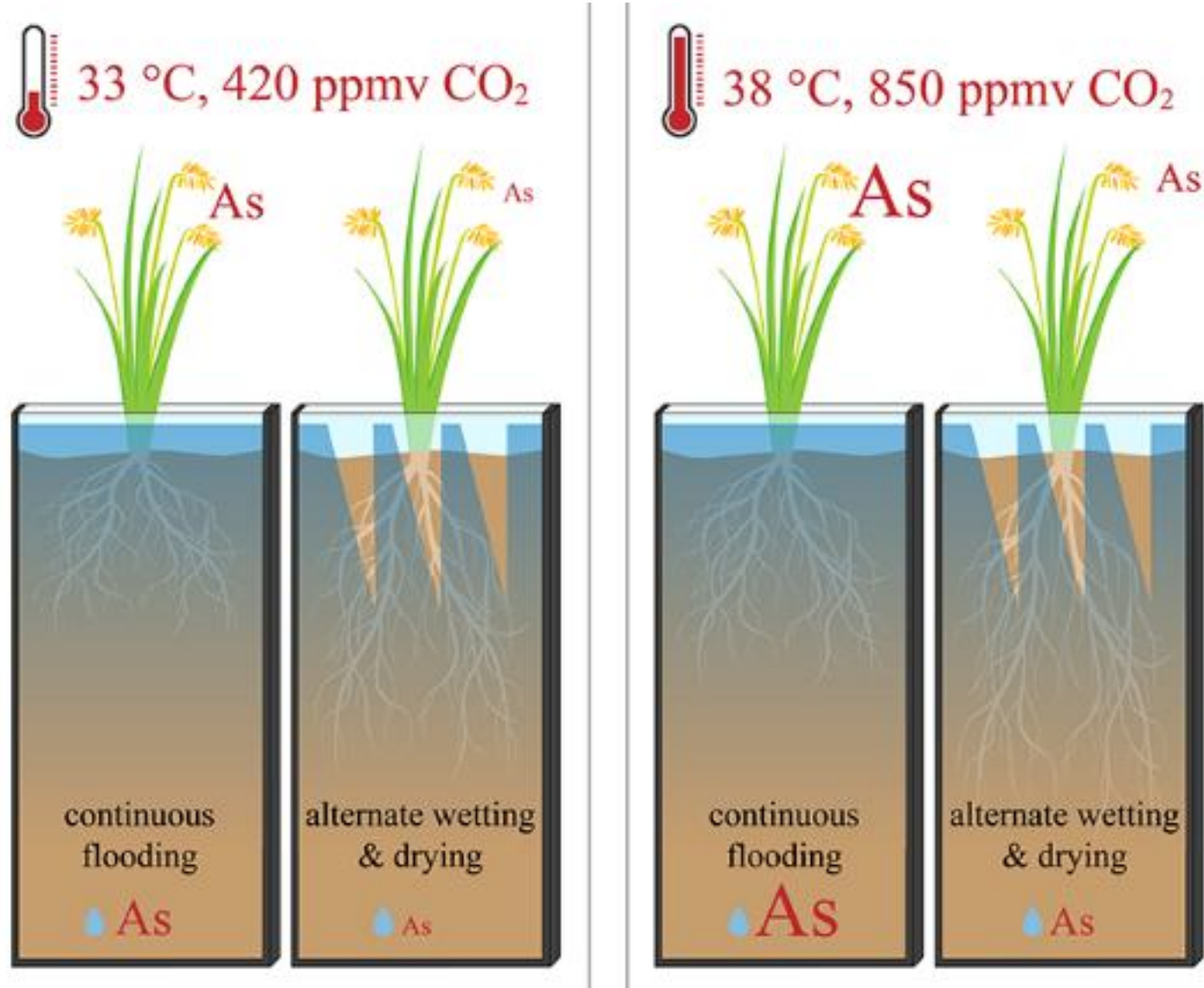
Techniques **très efficace** car des rizières amendées avec du Fe métallique et de l'oxyde de Fe -> **-50 % d'As dans les grains**

Pourquoi ?

Le fer peut former des plaques de fer oxydé autour des racines de riz qui sont oxygénées par leurs aérochymes. Ces plaques sont très affines pour l'As(V) et **diminuent drastiquement** sa biodisponibilité pour les plantes.

Limites de cette technique : **valable surtout pour le riz inondé**

2.6 Stratégies anthropiques pour diminuer l'absorption de l'arsenic

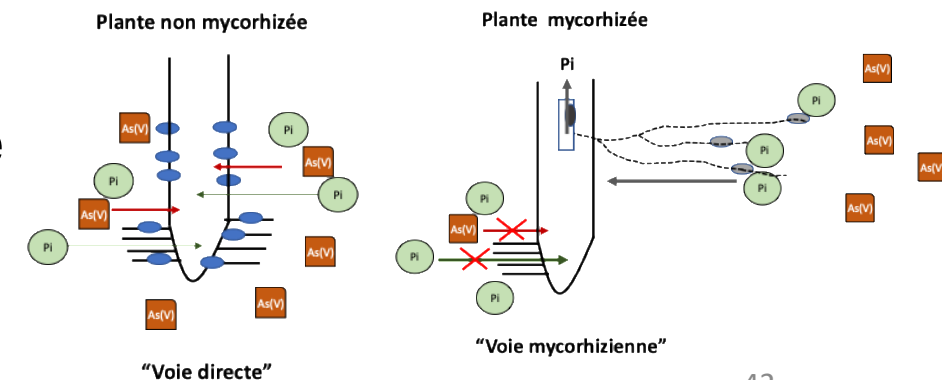
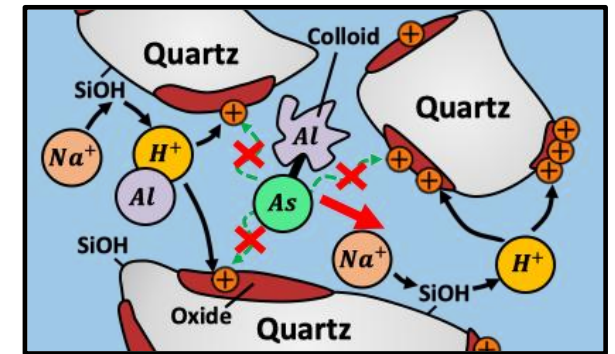
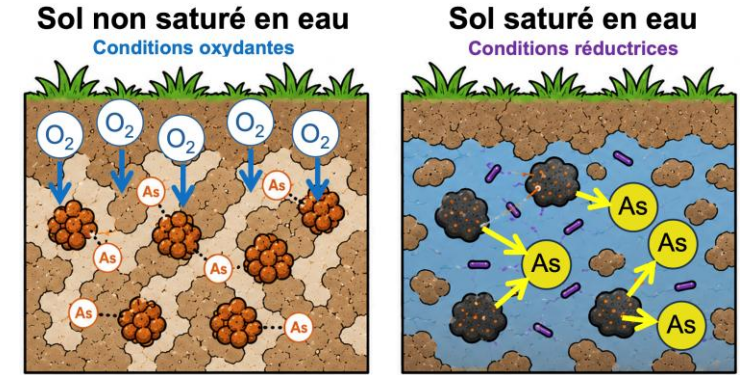


Duncan et al. (EST, 2025)

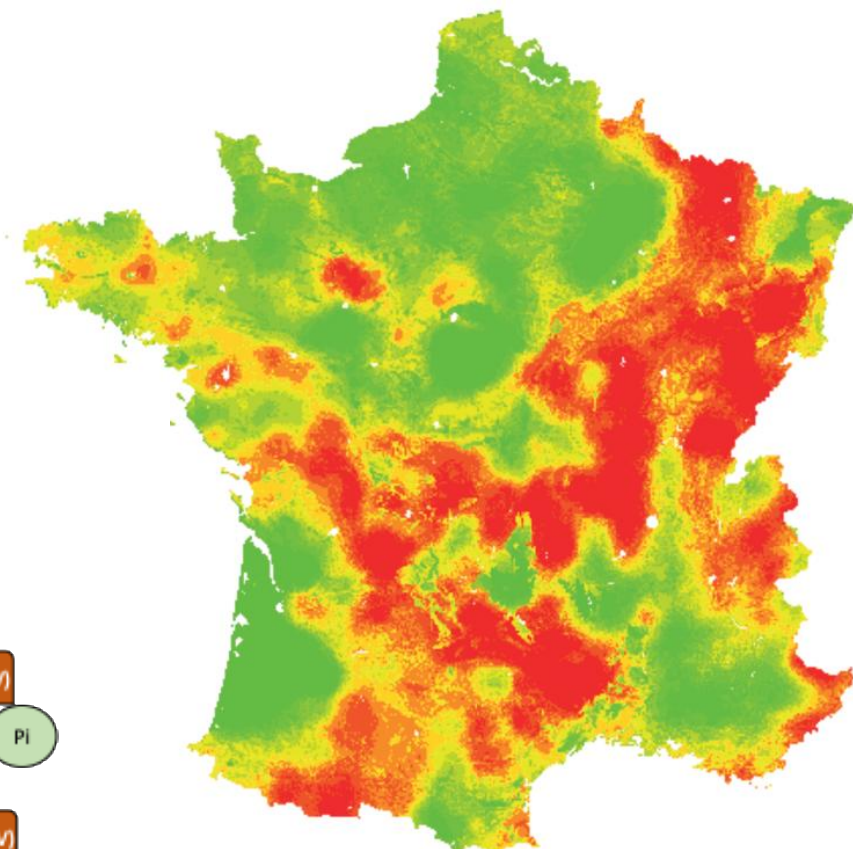
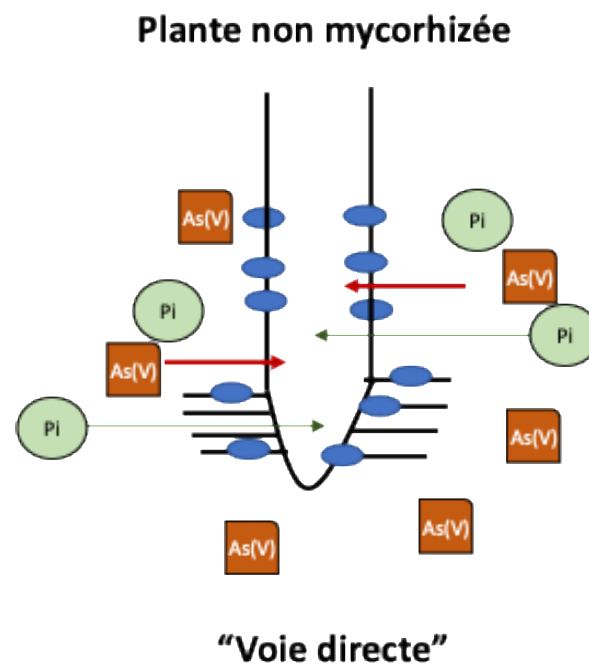
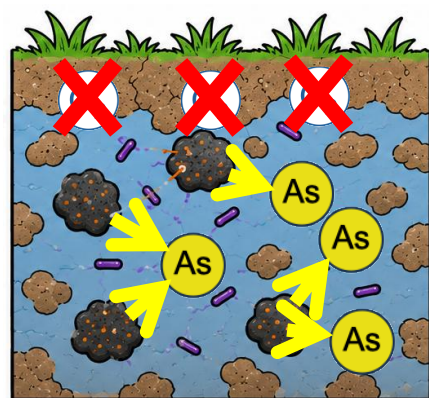
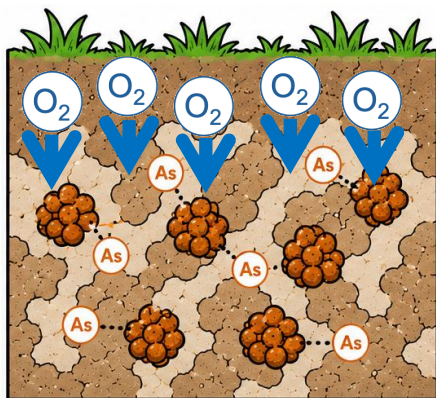
L'alternance humectation-dessiccation restaure l'oxygénation du sol et favorise la formation d'oxydes de fer capables d'immobiliser l'arsenic

Conclusions

- **Contrôle redox** : La biodisponibilité de l'arsenic reste faible en milieu oxydant, rendant crucial le maintien de ces conditions pour éviter la dissolution des oxydes et son relargage massif.
- **Modélisation mécaniste** : Son utilisation est indispensable pour simuler fidèlement les couplages complexes entre les réactions biologiques et géochimiques ainsi que les transferts physiques au sein du sol.
- **Paradoxe des phosphates** : Une baisse des phosphates limite le transfert de l'arsenic en phase aqueuse, mais peut paradoxalement stimuler son assimilation racinaire par les plantes.



Merci pour votre attention



Des questions ?

Fig. 1 Factor affecting As uptake and translocation in rice plant and its detoxification in root and shoot of the plant

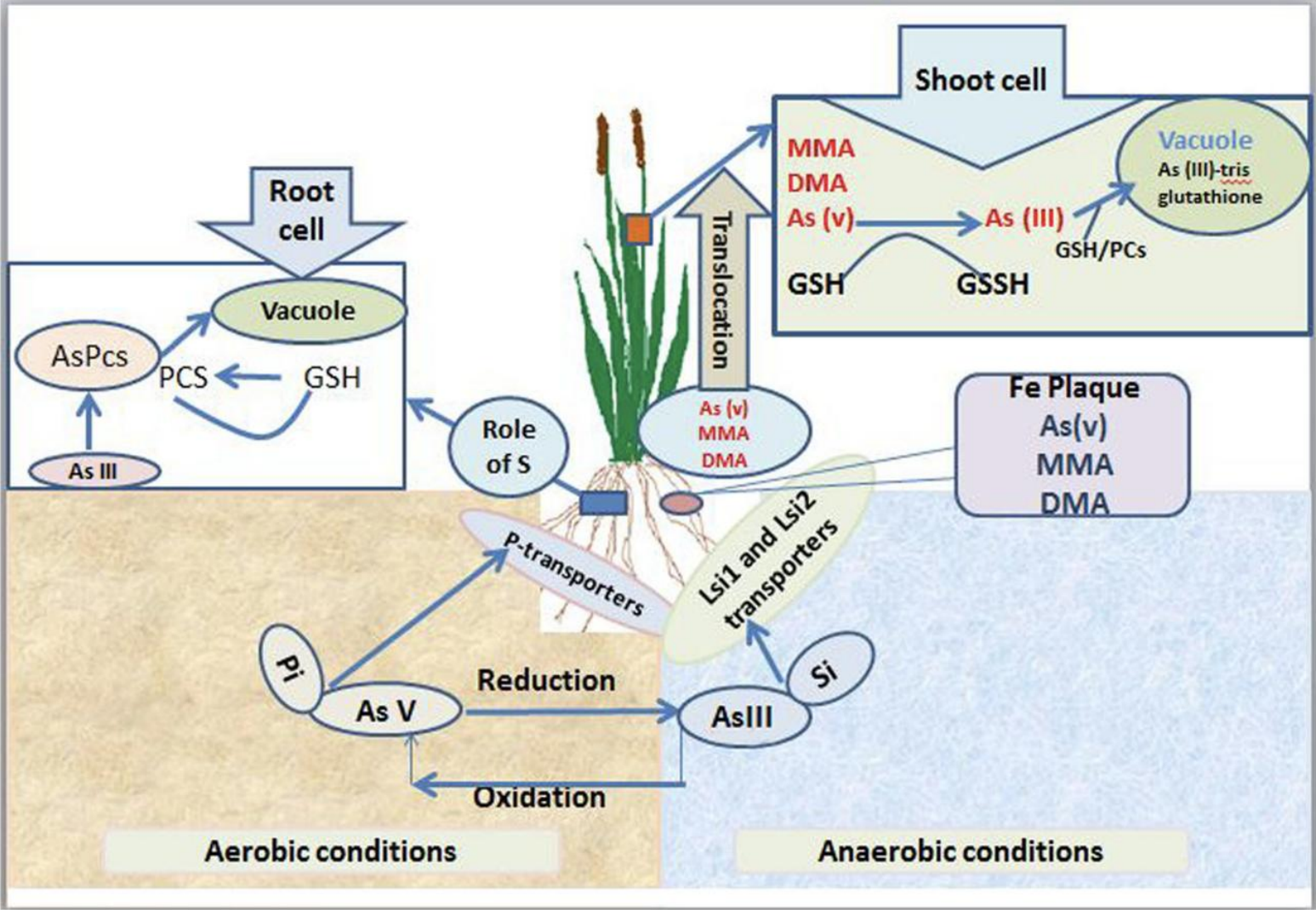


Fig. 2 Uptake and transport of different arsenic species in plants. Plants counteract arsenic accumulation by chelating arsenic with metallothioneins and phytochelatins followed by sequestering the arsenite-phytochelatin [As(III)-PC] complex to vacuoles

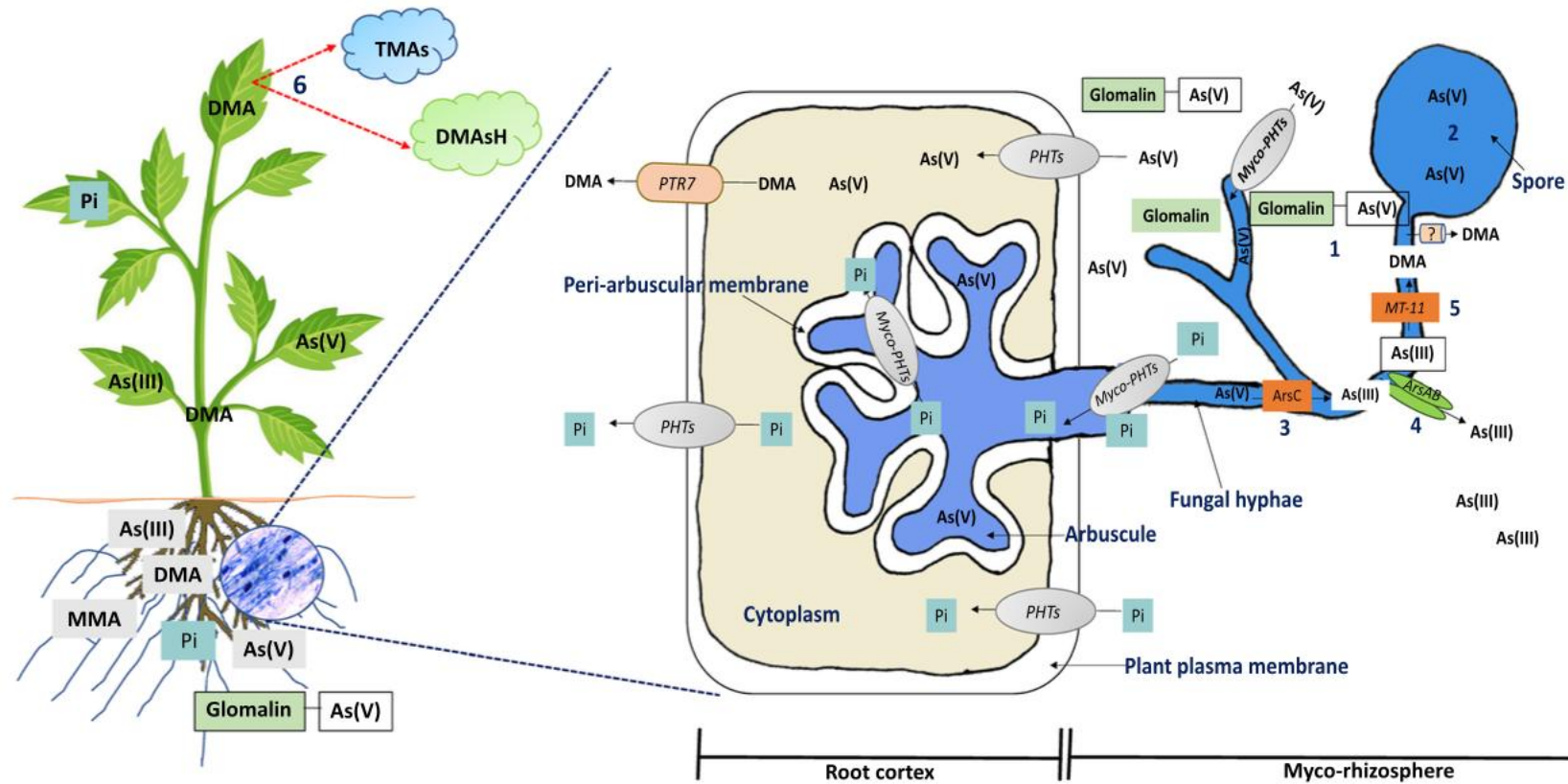


Fig. 3 Direct involvements of arbuscular mycorrhiza fungi in alleviating arsenic toxicity in plants. (1) complexation of arsenic with glomalin secreted by arbuscular mycorrhiza fungi; (2) retention of As in fungal structures such as, cell wall, hypha,

spores, and arbuscules; (3) reduction of arsenate to arsenite in fungal structures; (4) efflux of arsenite to external media; (5) methylation of inorganic acids to inorganic acids; and (6) volatilization of arsenic

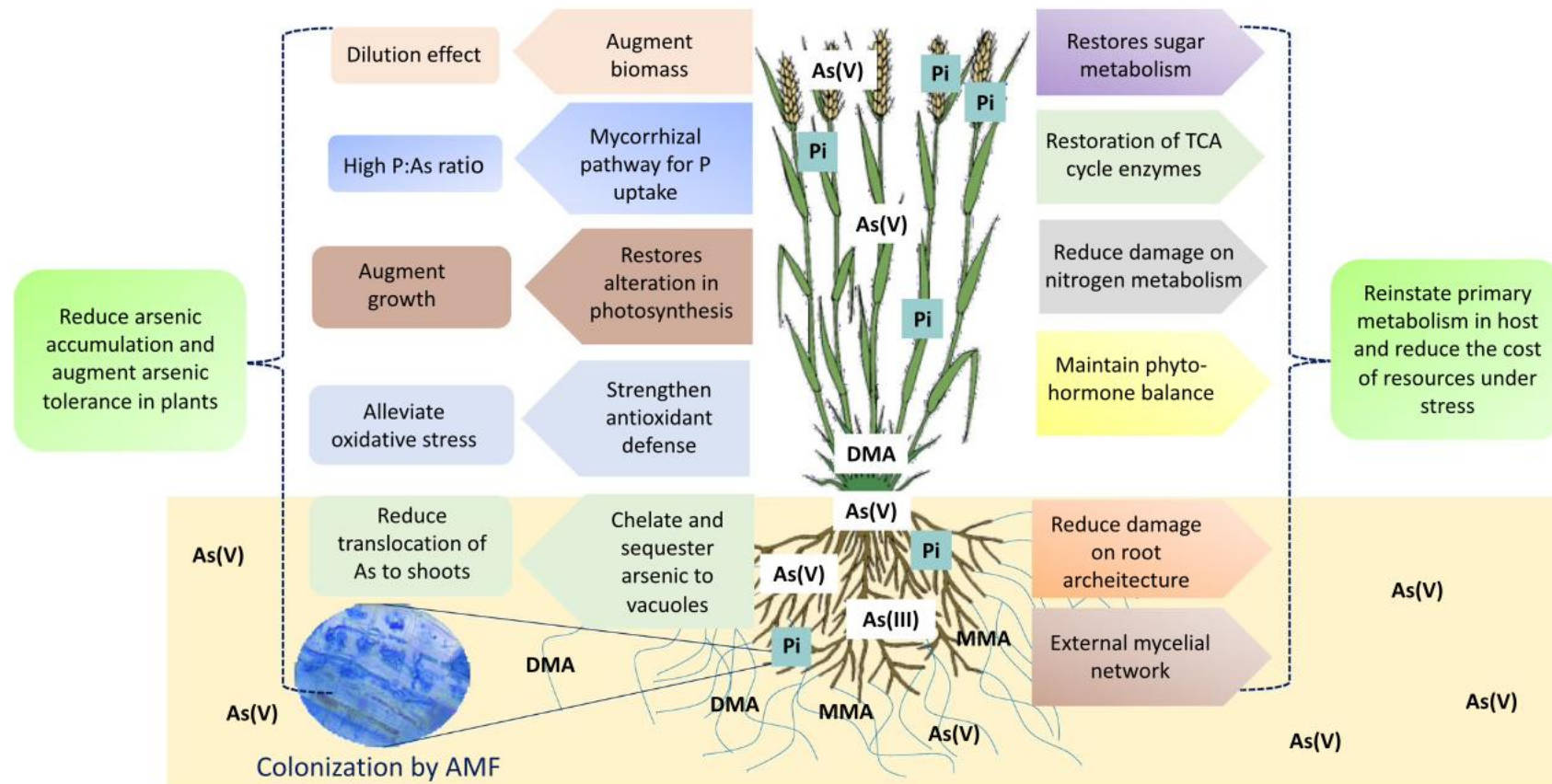


Fig. 4 Indirect involvements of arbuscular mycorrhiza fungi in alleviating arsenic toxicity in plants. (1) dilution of arsenic by virtue of augmented plant biomass; (2) enhanced P: As ratio due to activation of AM pathway for P uptake; (3) increased chelation and sequestration of arsenic to vacuoles; (4) strength-

ened antioxidant defense response; (5) restored arsenic mediated disturbances in photosynthesis; (6) reinstated primary metabolism in host; and (6) balanced phytohormone levels. As(III), arsenite; As(V), arsenate; DMA, dimethylarsenic acid; MMA, monomethylarsonic acid; Pi, inorganic phosphate

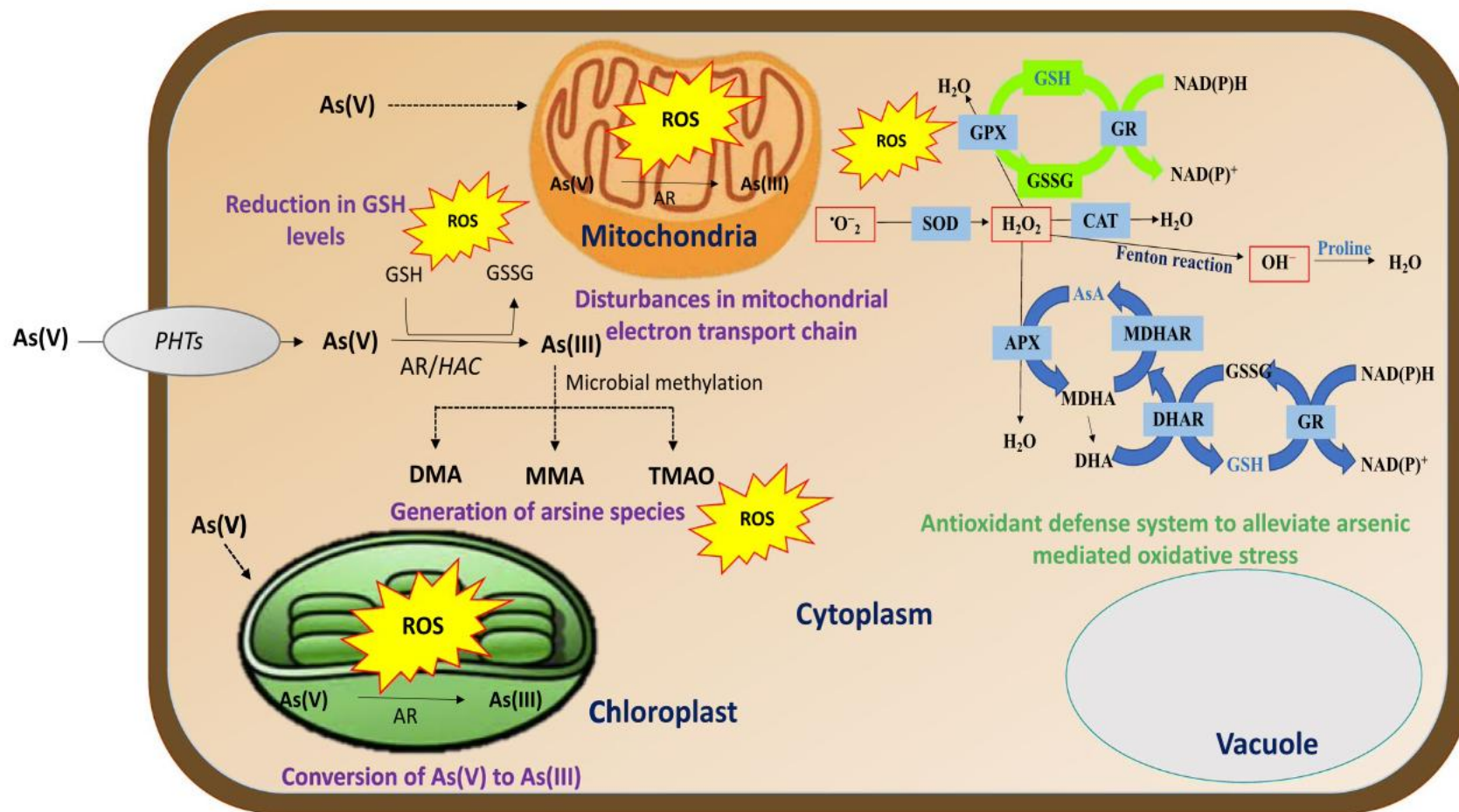
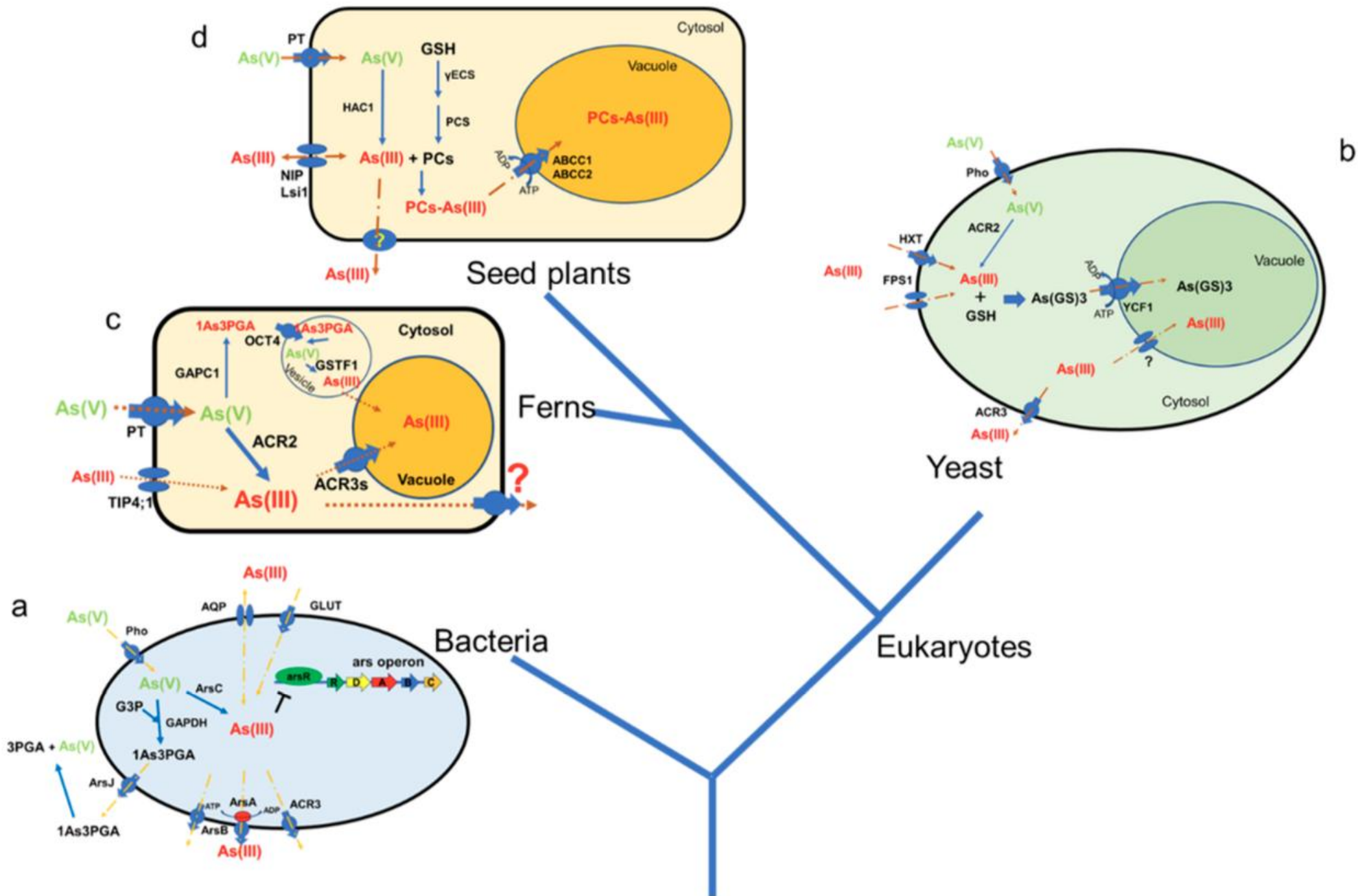
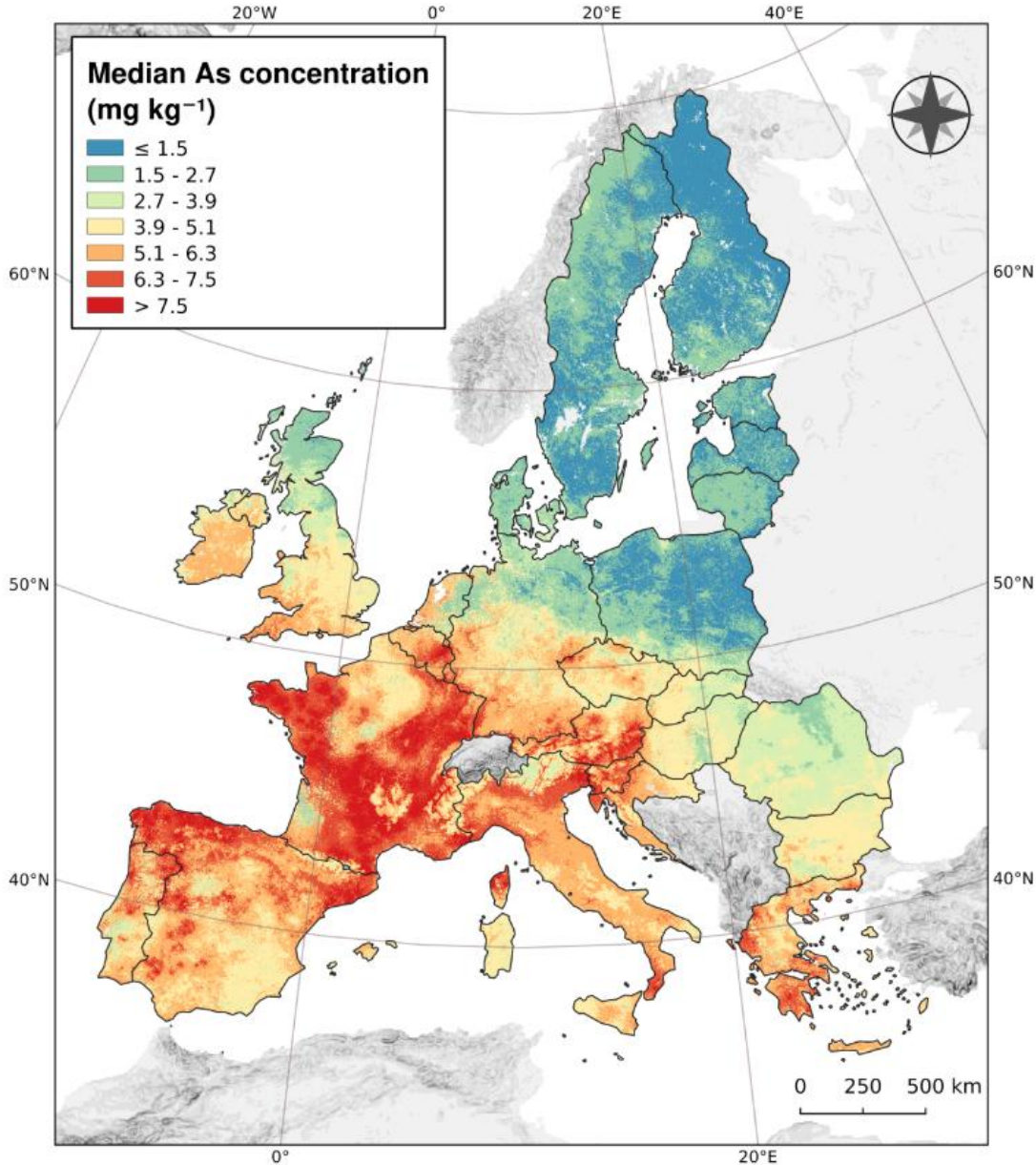


Fig. 5 Arsenic mediated induction of oxidative stress and the enzymatic and non-enzymatic antioxidants involved in quenching of reactive oxygen species to maintain redox homeostasis in plants under arsenic stress. APX, ascorbate peroxidase; AR/HAC, arsenate reductase; As(III), arsenite; As(V), arsenate; AsA, ascorbate; CAT, catalase; DHA, dehydroascorbate; DHAR, dehydroascorbate reductase; DMA, dimethyl-

arsenic acid; GPX, glutathione peroxidase; GR, glutathione reductase; GSH, glutathione reduced; GSSG, glutathione oxidised; MDHA, monodehydroascorbate; MDHAR, monodehydroascorbate reductase; MMA, monomethylarsonic acid; PHTs, phosphate transporter proteins; ROS, reactive oxygen species; SOD, superoxide dismutase; TMAO, trimethylarsine oxide

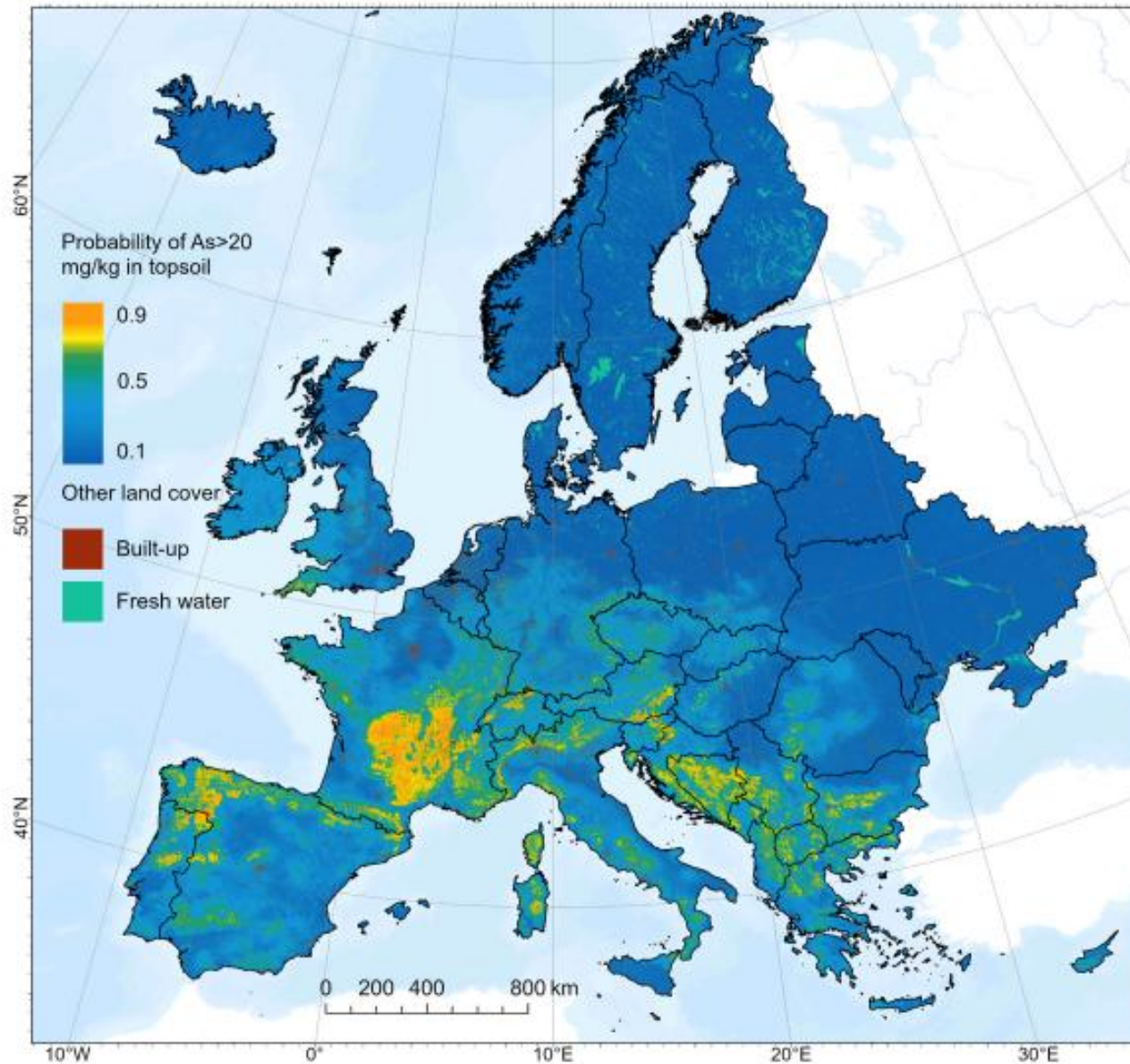


Distribution spatiale de l'arsenic dans les sols de l'Union Européenne



- Source: European Soil Data Centre (ESDAC)
- Données: Land Use/Cover Area frame statistical Survey LUCAS (~20,000 points de mesure)
- Modèle: Random Forst + Generalized Additive Models for Location, Scale, and Shape
- Teneur moyenne: ~9.71 mg/kg
- Facteurs qui augmentent la connetration en arsenic: chaleur, altitude, teneur en argile, teneur en phosphore

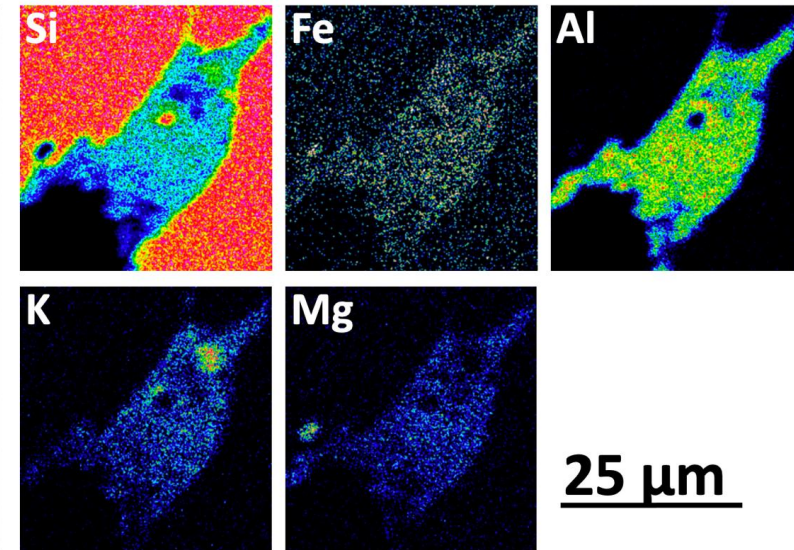
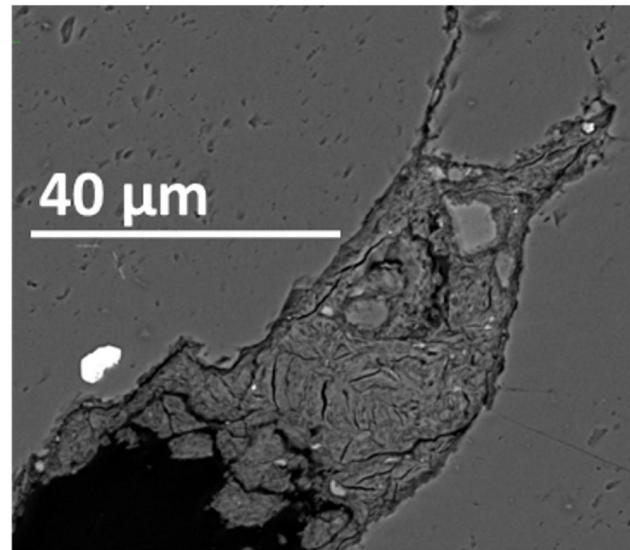
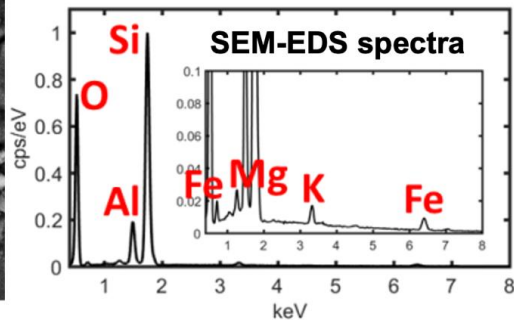
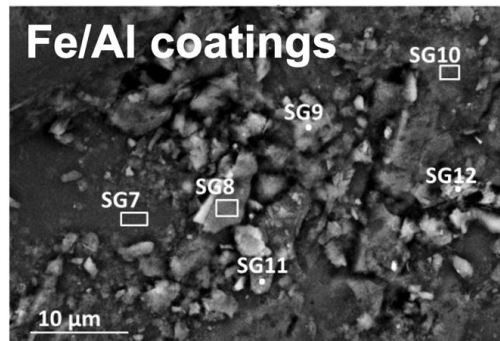
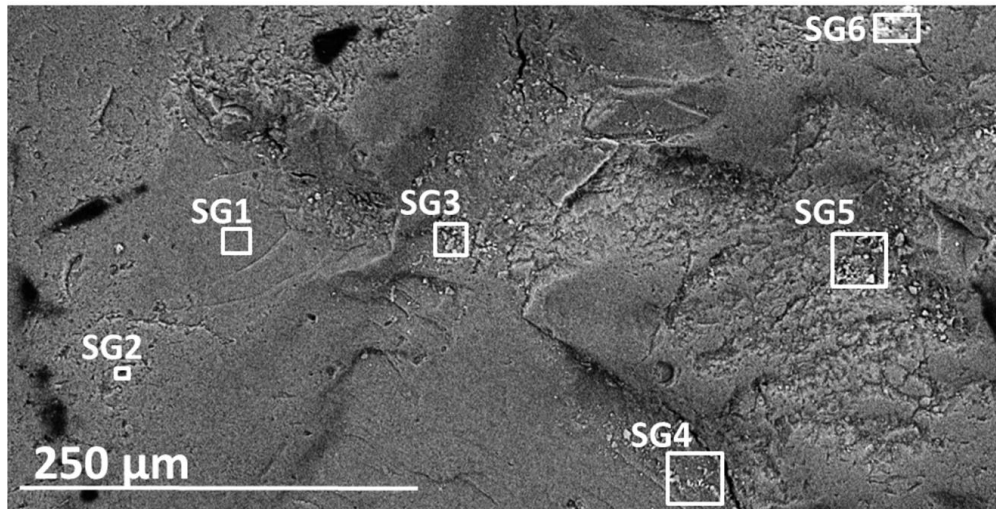
Distribution spatiale de l'arsenic dans les sols de l'Europe



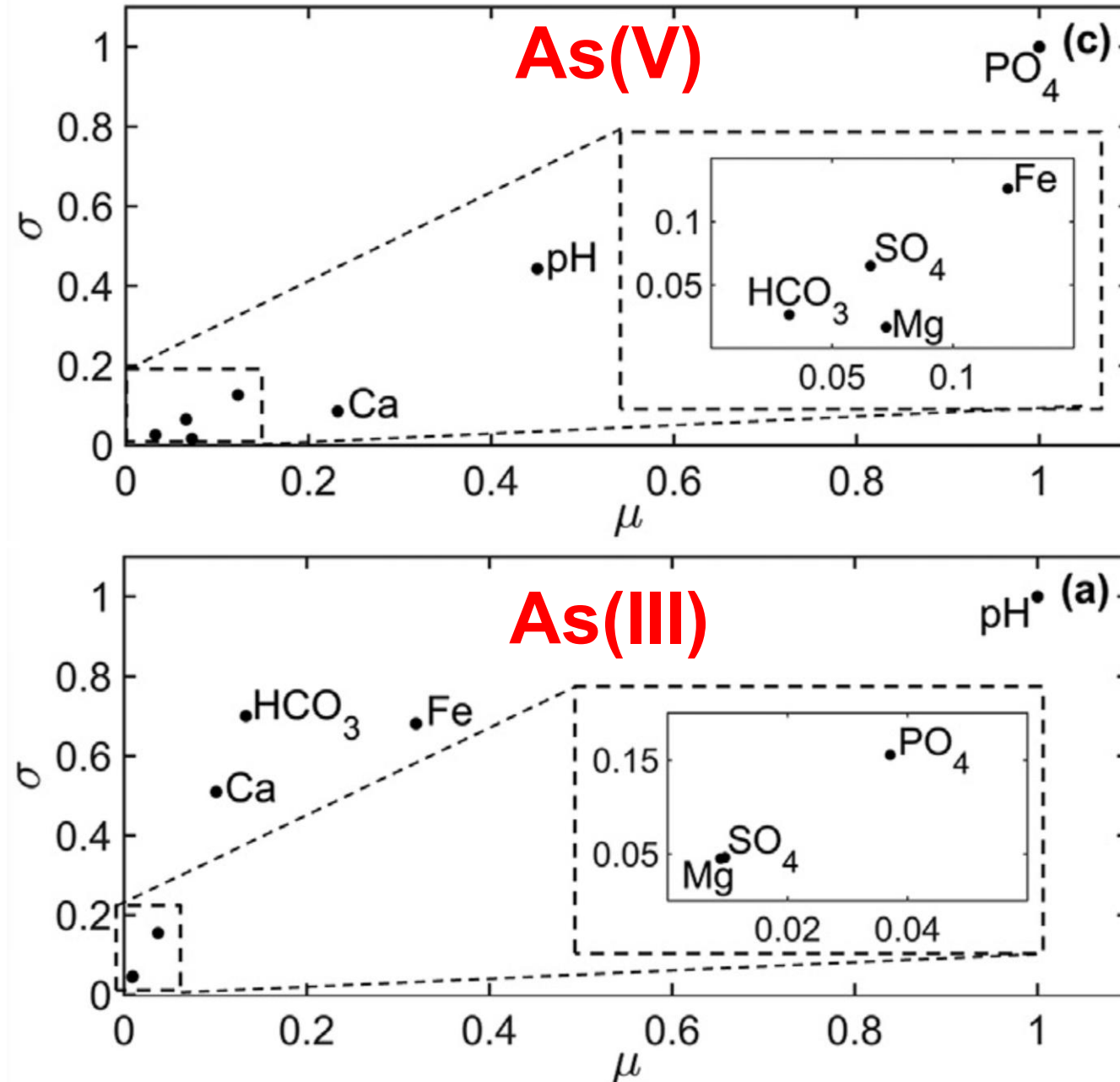
- Source: EAWAG et ETH Zürich
- Cartes construites à partir de
 - ~4100 points de Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing Land Soil in Europe (projet GEMAS)
 - 15 variables environnementales
 - Machine learning (Random Forest-based method)
- Niveau élevé d'arsenic associé à des zones de faible érosion hydrique.
- 33% du territoire agricole français avec des teneurs en arsenic dépassant 20 mg/kg (46% des prairies et 22% des terres arables)
- Teneur médiane: 12 mg/kg
- Teneur moyenne: 18 mg/kg

Processus réactifs: l'adsorption

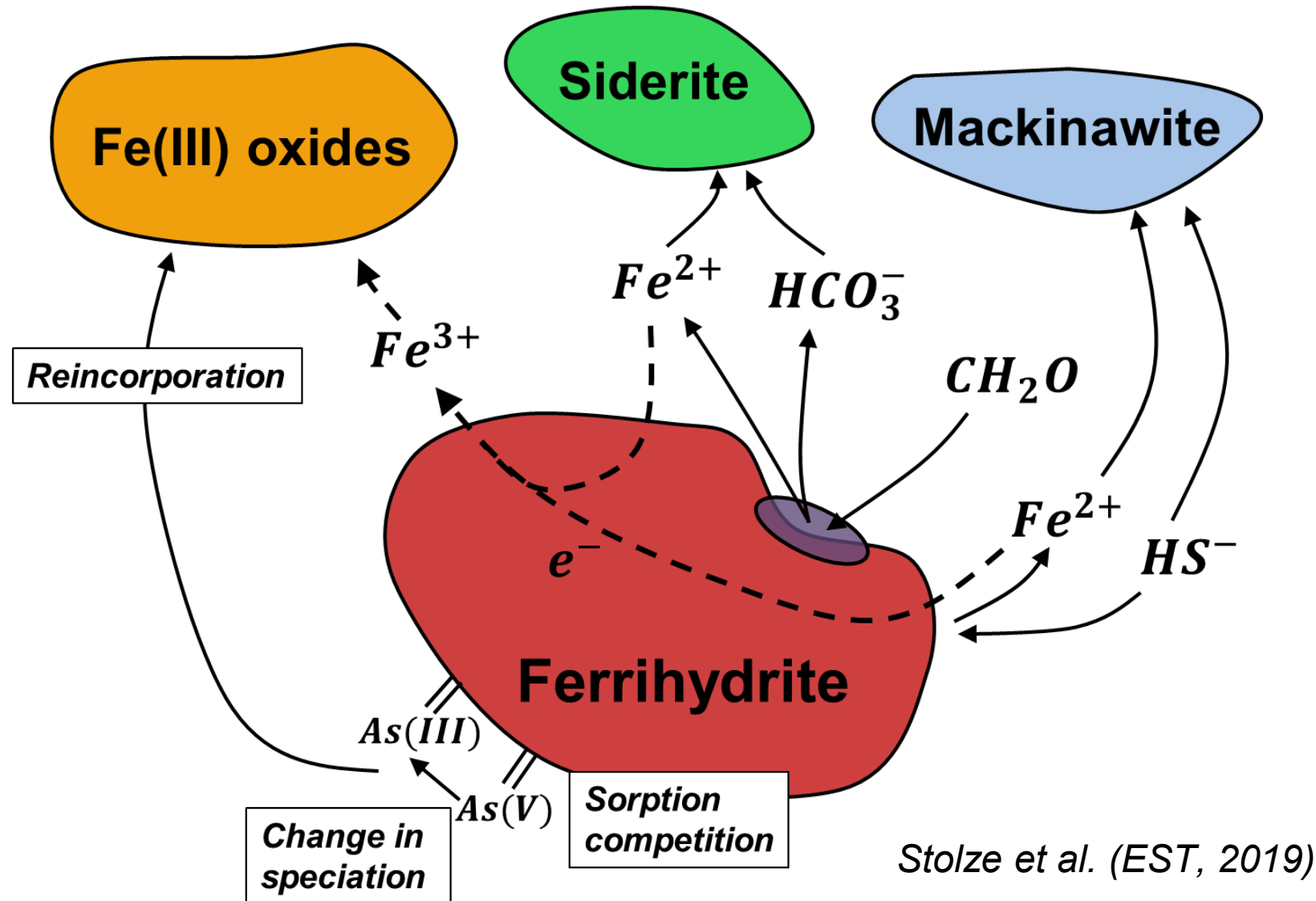
- Matrice solide dominée par les silicas
- Oxydes disséminés à la surface des grains de quartz



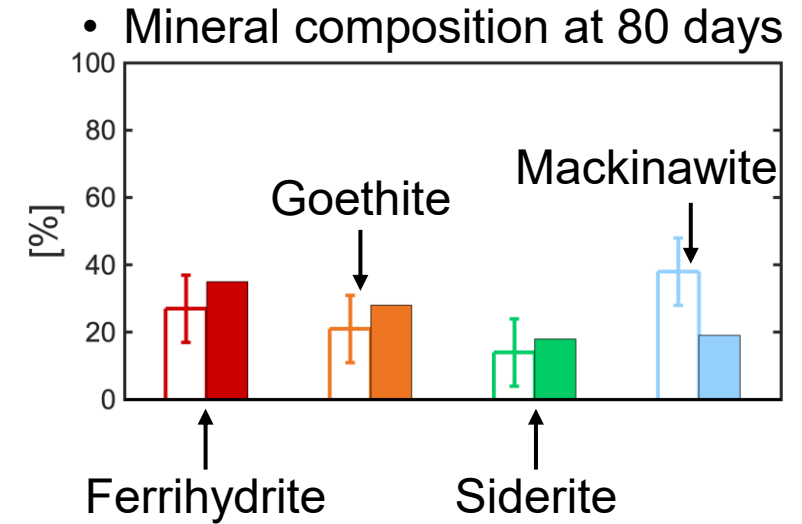
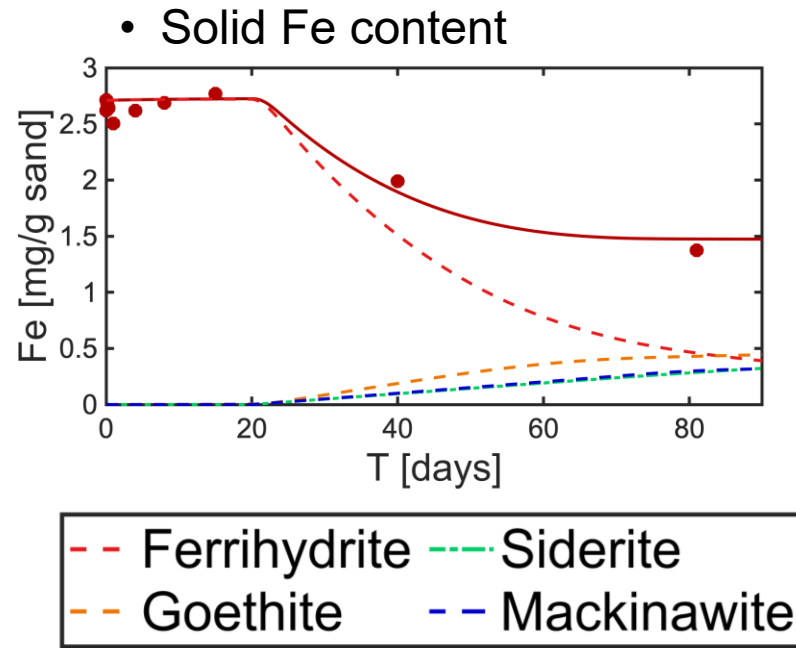
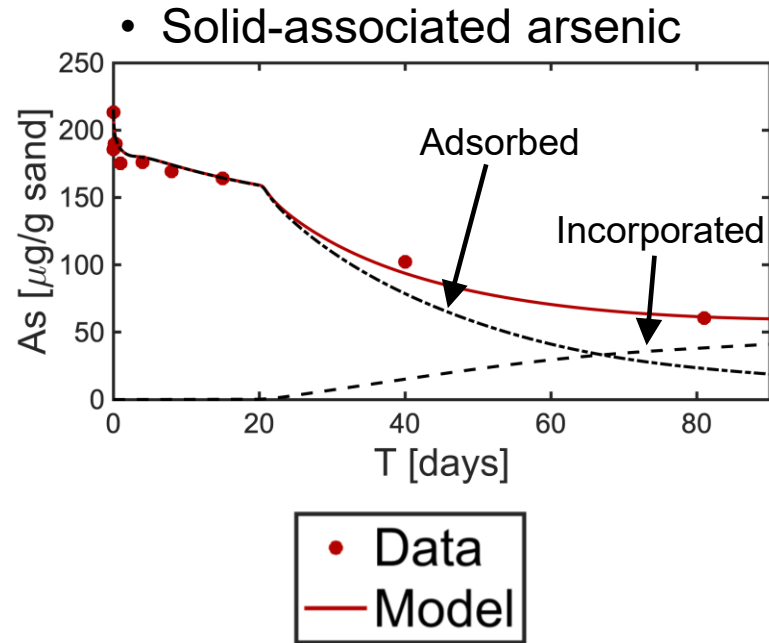
Facteurs clés de l'adsorption de l'arsenic en conditions hydrochimiques naturelles



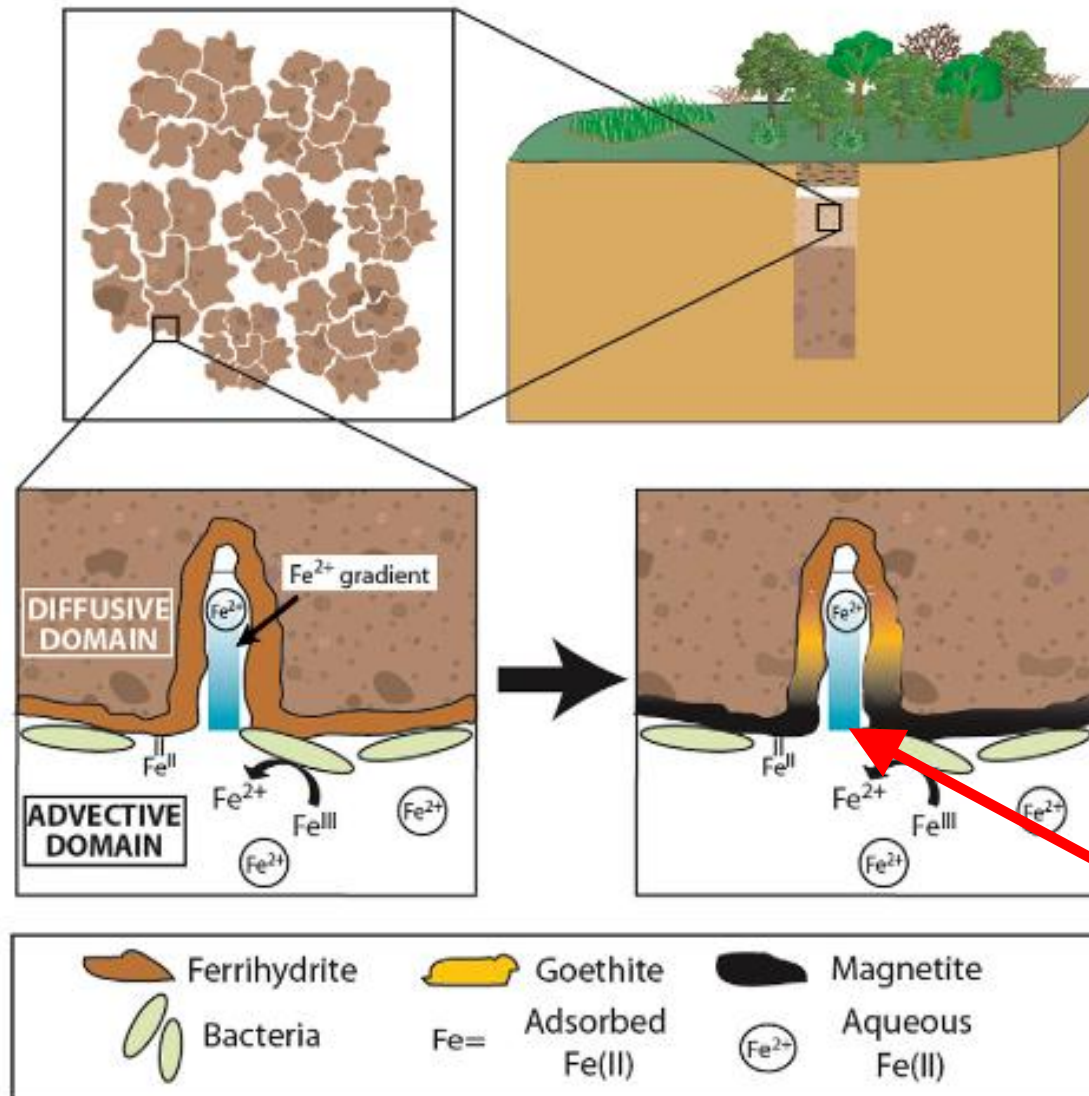
Transformation redox des oxydes de fer (unifiée)



Transformation redox des oxydes de fer (unifiée)

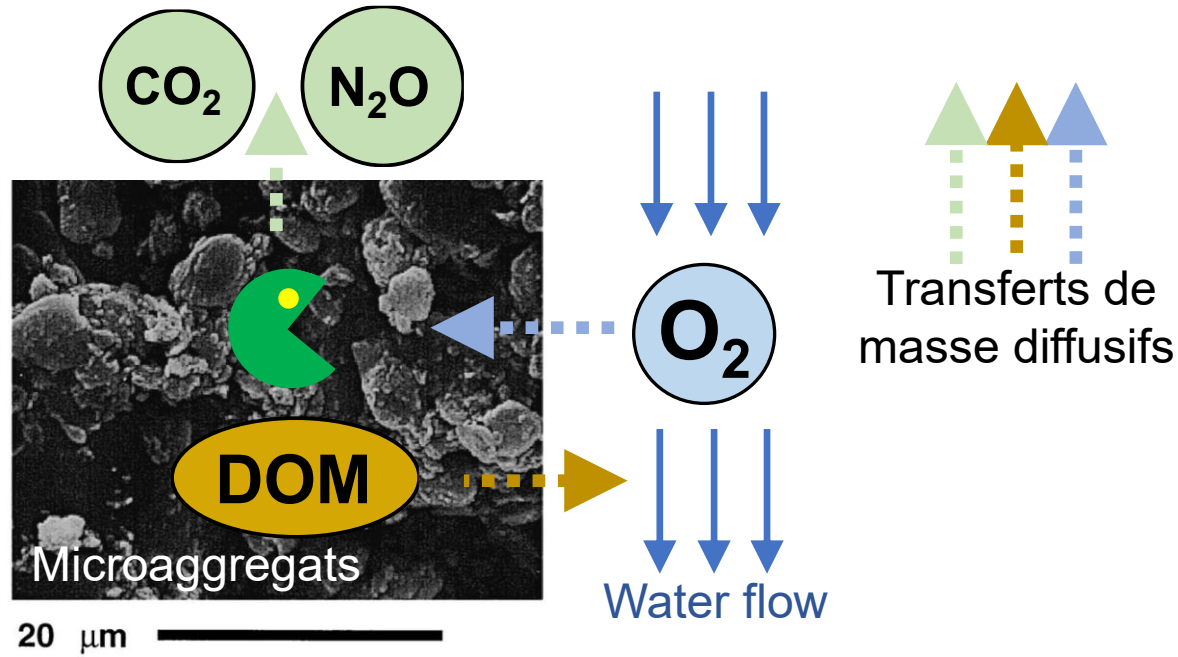


Hétérogénéités spatiales et temporelles



Tufano et al. (Vadose Zone J., 2009)

Hétérogénéités spatiales et temporelles

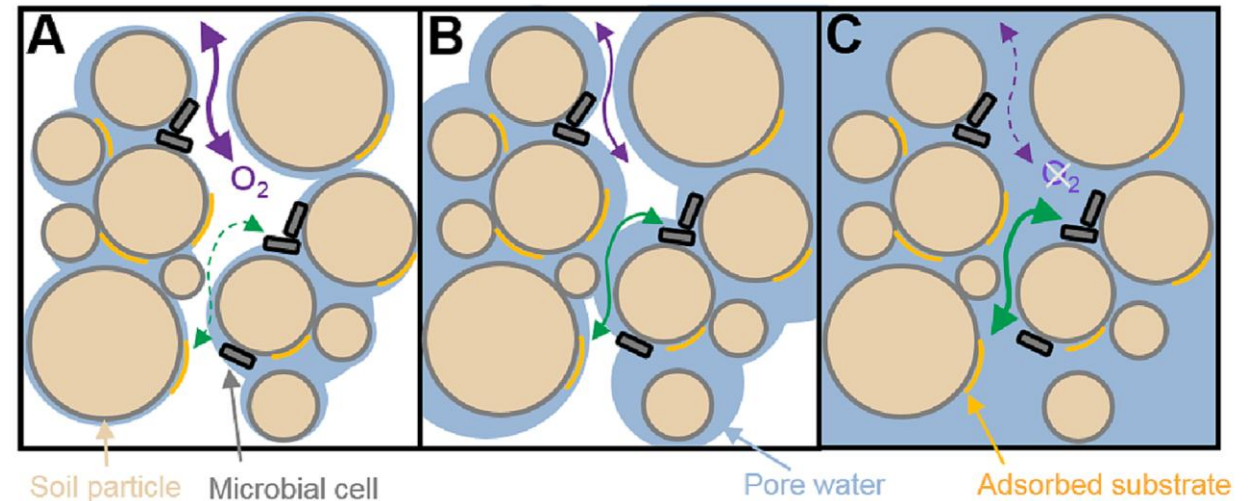


Rôle clé des changements dynamiques de la saturation en eau:

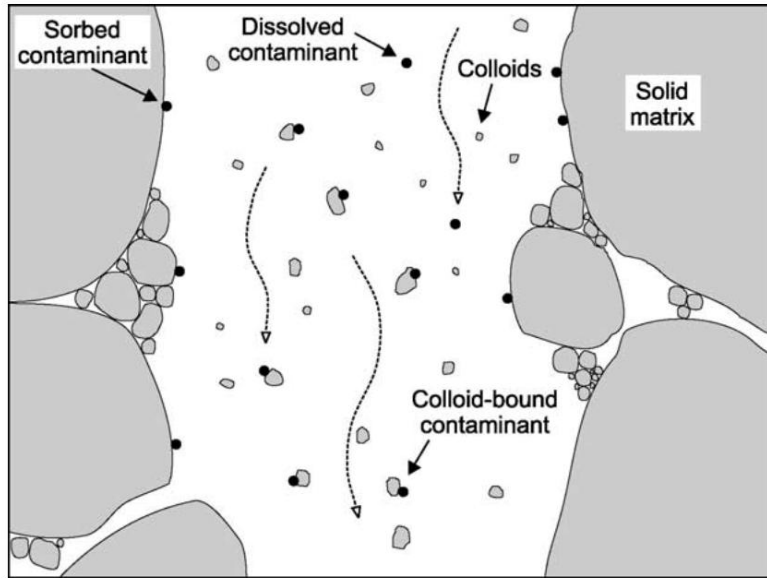
- **Évolution spatiotemporelle de la connectivité des pores**
- Influence le transport des substrats et donc les réactions biogéochimiques.

Rôle clé des microaggrégats:

- Saturation en eau + microporosité + tortuosité = conditions anoxiques
- Forte teneur en matière organique
- **Points chauds pour l'activité microbienne en conditions de réduction**



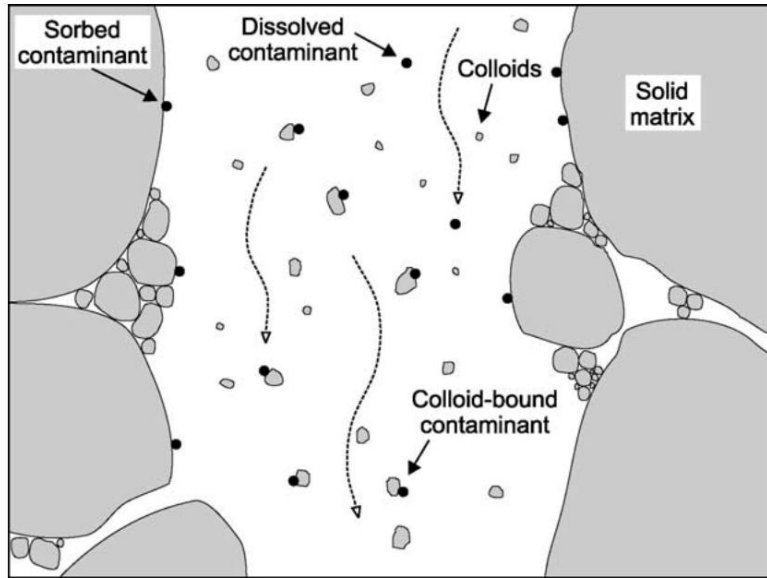
Hétérogénéités spatiales et temporelles



Importance des colloïdes sur la mobilité de l'arsenic

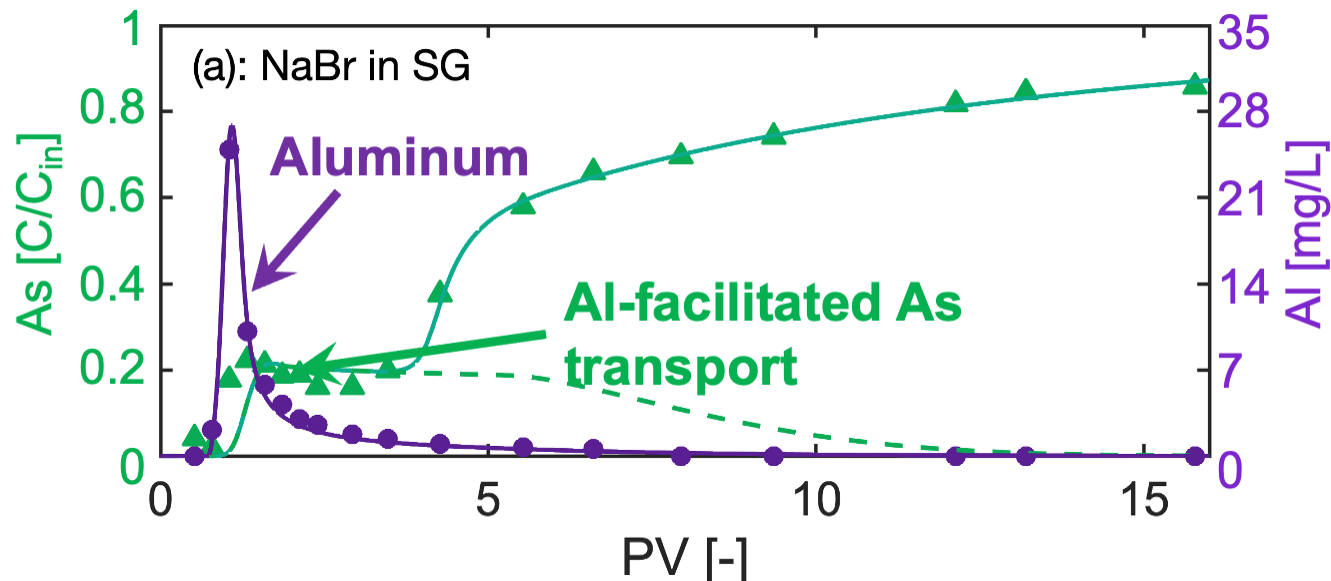
Kretzschmar et al., (Adv. Agr. 1999)

Hétérogénéités spatiales et temporelles



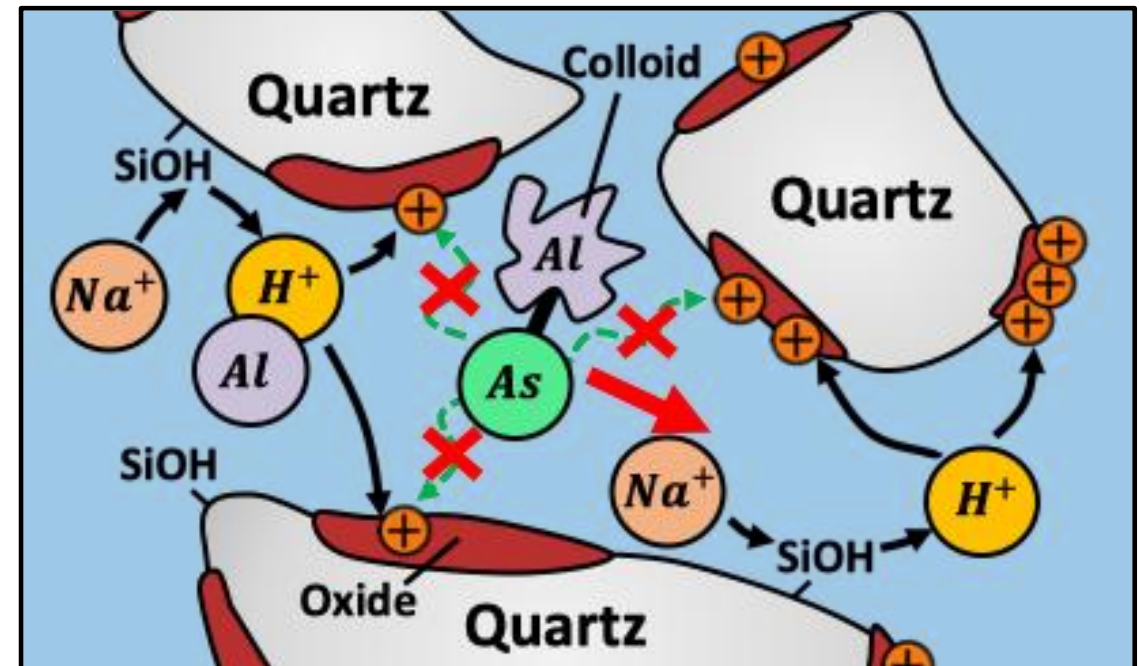
Importance des colloïdes sur la mobilité de l'arsenic

Kretzschmar et al., (Adv. Agr. 1999)

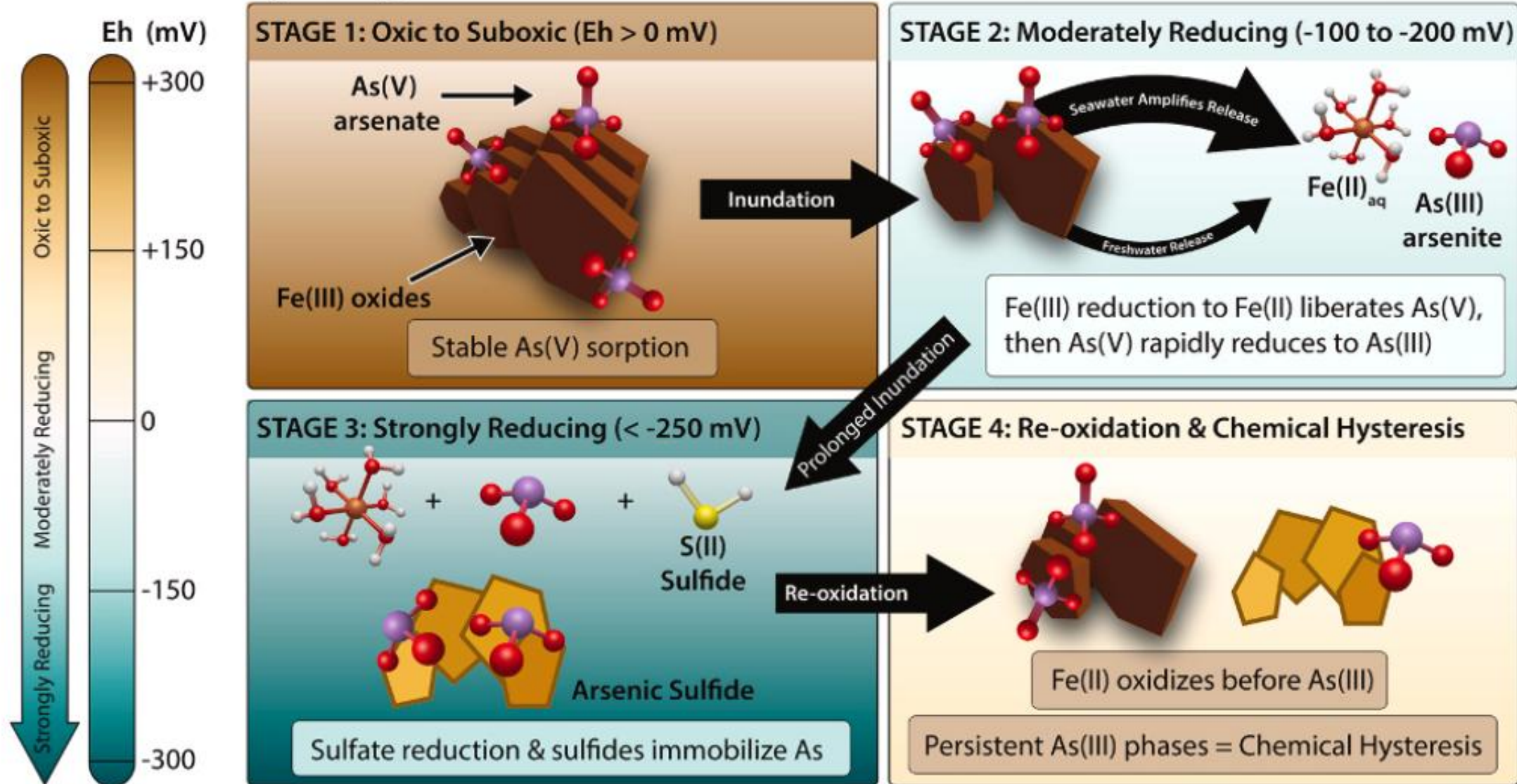


Stolze and Rolle (en cours de révision)

Impact des changements de salinité



Arsenic Cycling in Coastal Wetland Soils Under Sea-Level Rise



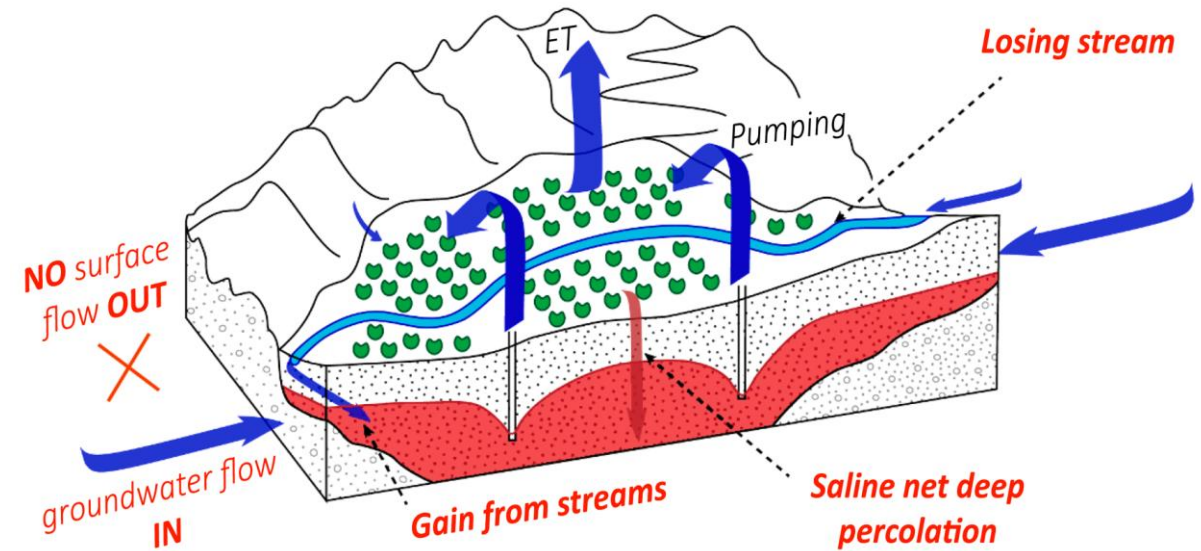
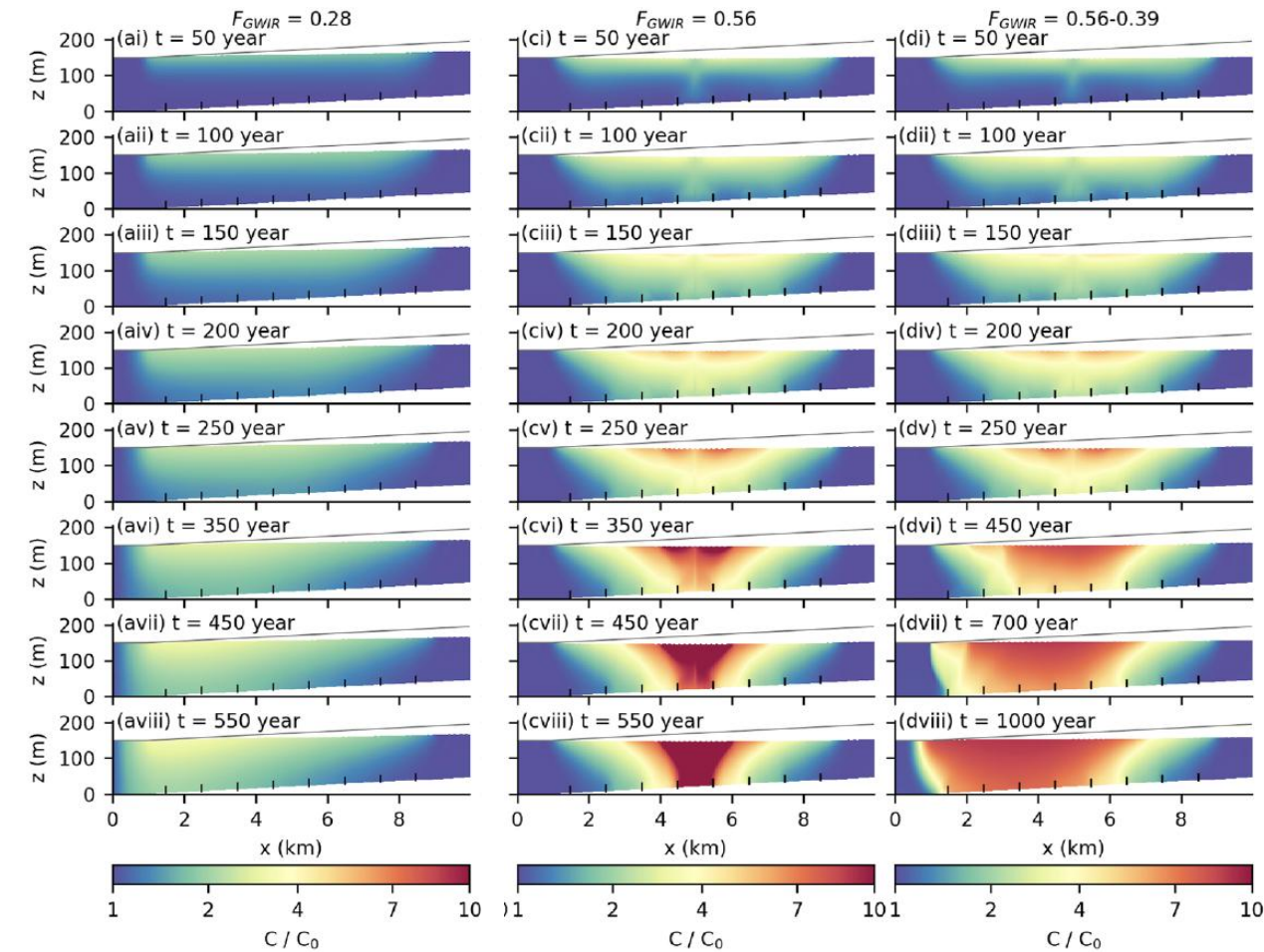
Changement climatique et salinité

Fermeture anthropique des bassins versants = salinisation

Bassin ouvert



Bassin fermé

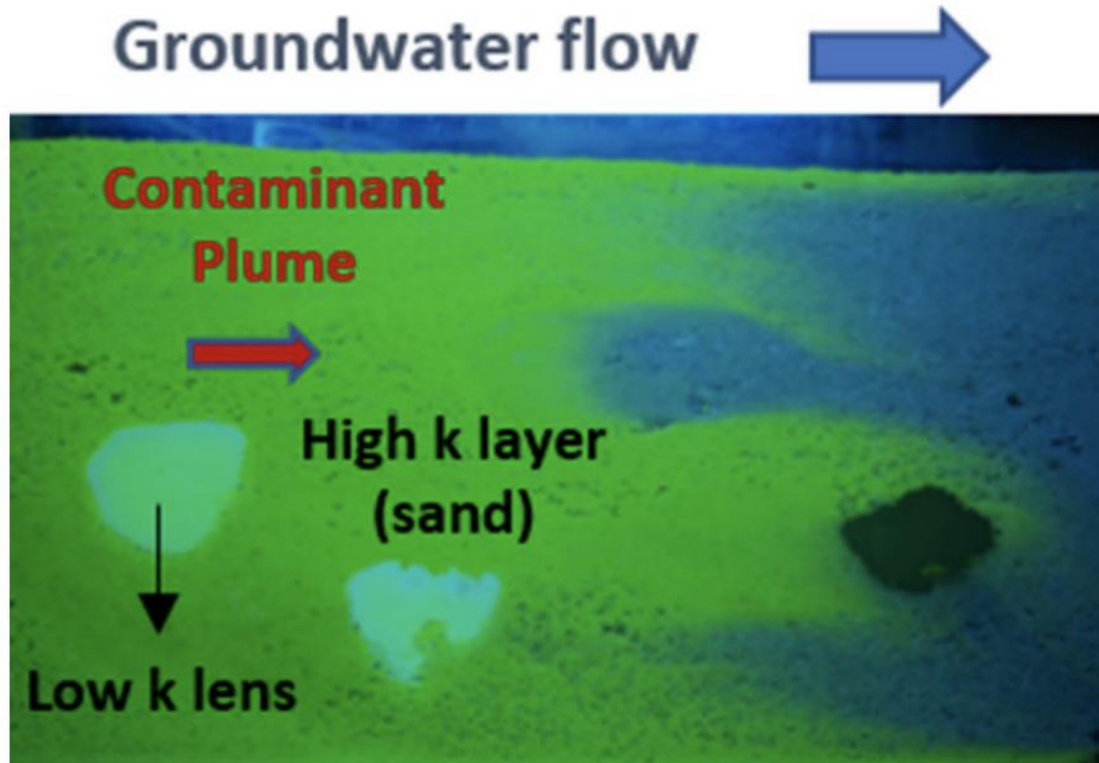


Pauloo et al. (2021)

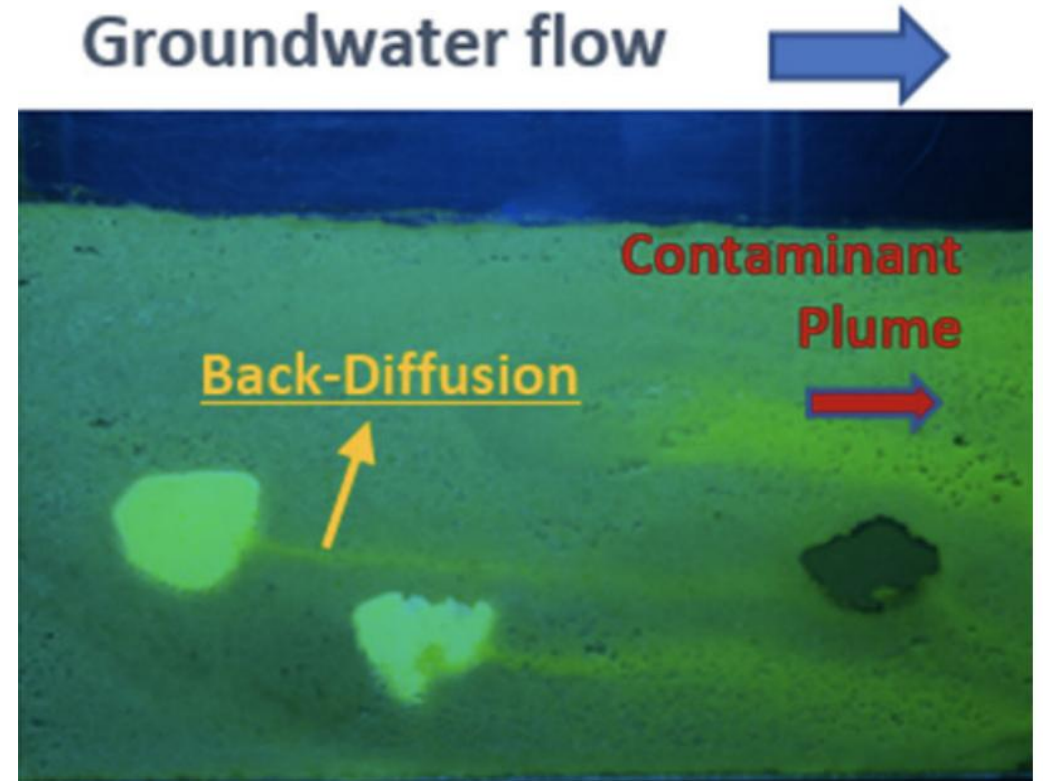
Wang et al. (2024)

Gradients diffusifs

La rétrodiffusion



Avec une source de contaminant



Après coupure de la source de contaminant

Contamination anthropique: La vallée de l'Orbiel

Accueil / Environnement

ENTRETIEN. Vallée de l'Orbiel polluée à l'arsenic : "Je voulais montrer comment on en est arrivé là", un nouveau documentaire raconte la face sombre de la mine d'or

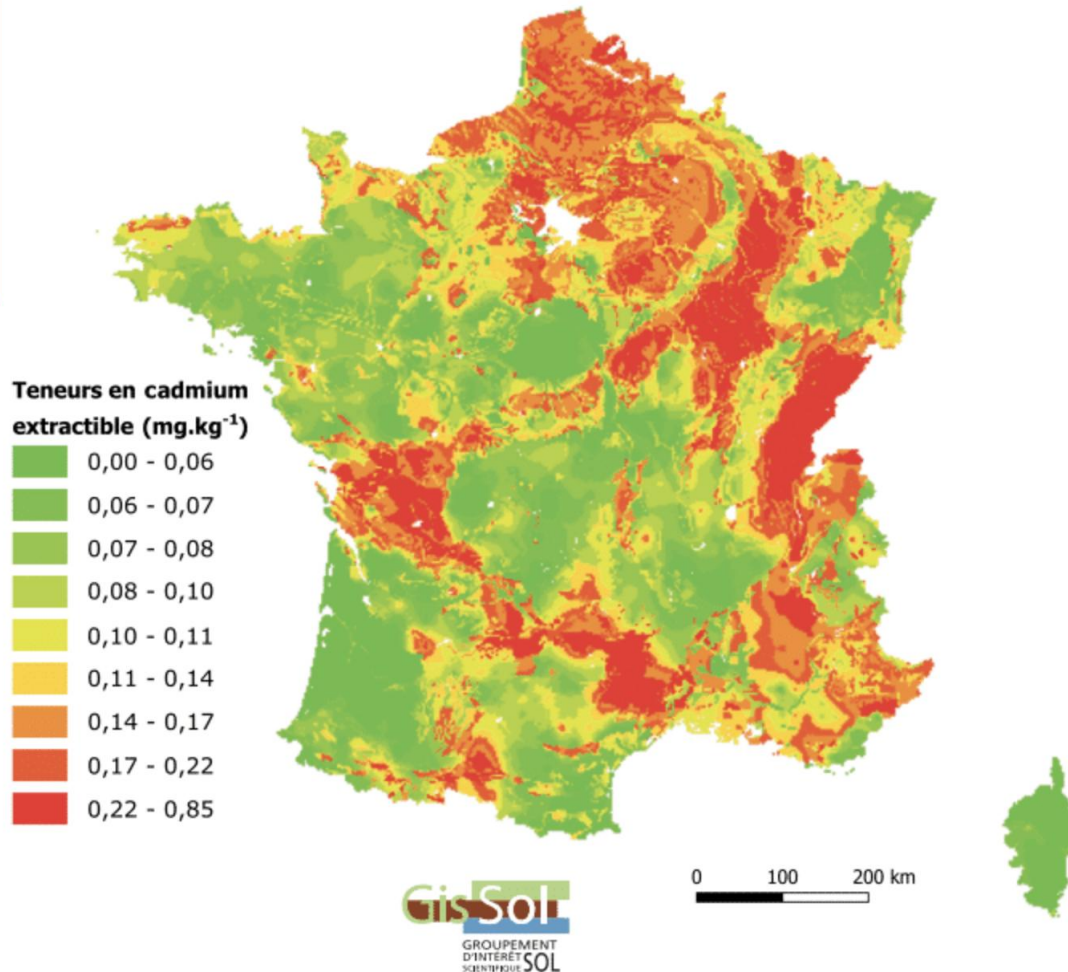
NATURE & ENVIRONNEMENT

Aude : pollution dans la "vallée de l'arsenic", 38 enfants surexposés



Le cadmium

Teneurs prédites en cadmium extractible des horizons de surface (0-30 cm) des sols en France.



Source : Gis Sol, 2019

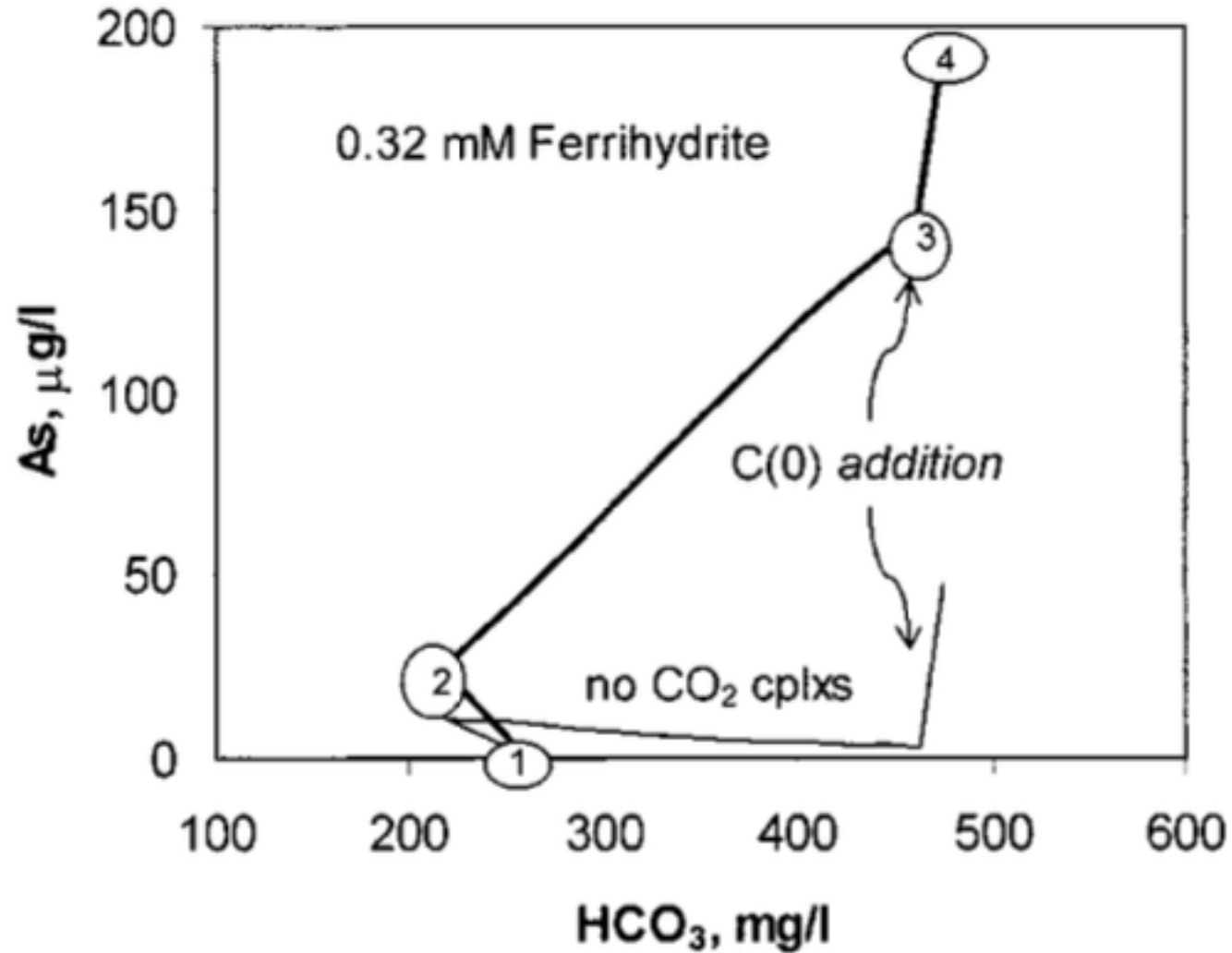
Population's cadmium overexposure requires urgent action, French food agency tells government

In a report published on Wednesday, France's National Agency for Food Safety recommends drastically reducing levels of this carcinogenic metal in phosphate fertilizers and limiting the consumption of cereals, bread and pasta.

LeMonde (Mars 2026)

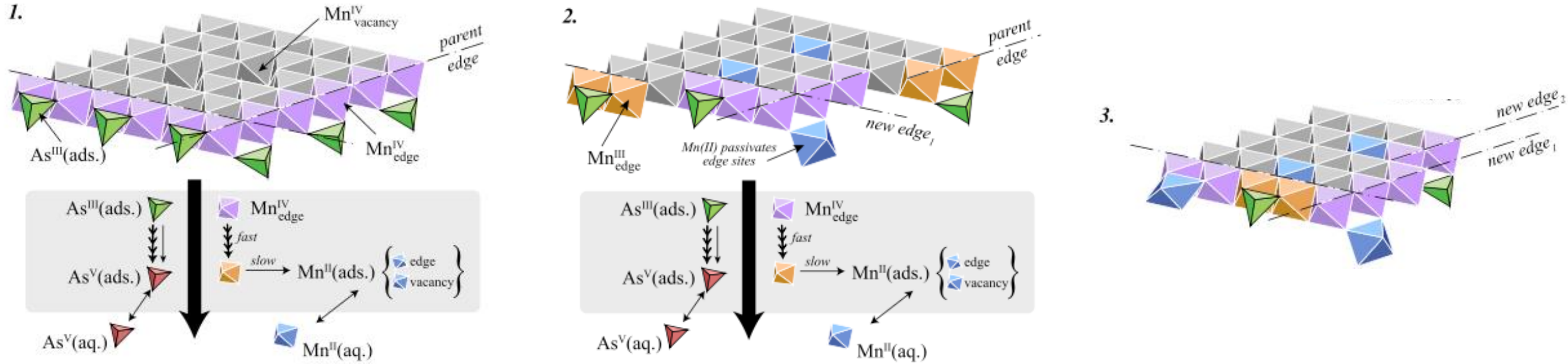
- **Près de la moitié de la population adulte dépasse les valeurs de référence en cadmium dans l'organisme (ANSES, 2026)**
- Sources:
 - Sols naturellement riches en Cd
 - Engrais phosphatés
 - Retombés atmosphériques

Impact des bicarbonates sur la mobilité de l'arsenic



Appelo et al. (EST, 2002)

Adsorption de l'arsenic sur les oxydes de manganèse



Rathi et al. (WR, 2020)

- Oxydation de l'arsenite en arsenate
- Réduction du Mn(IV) (ou Mn(III)) en Mn(II)
- Passivation de la surface du minéral par adsorption de Mn(II)
- **Expériences avec de la birnessite montre que 'arsenic n'est pas oxydé en conditions anoxiques.**