

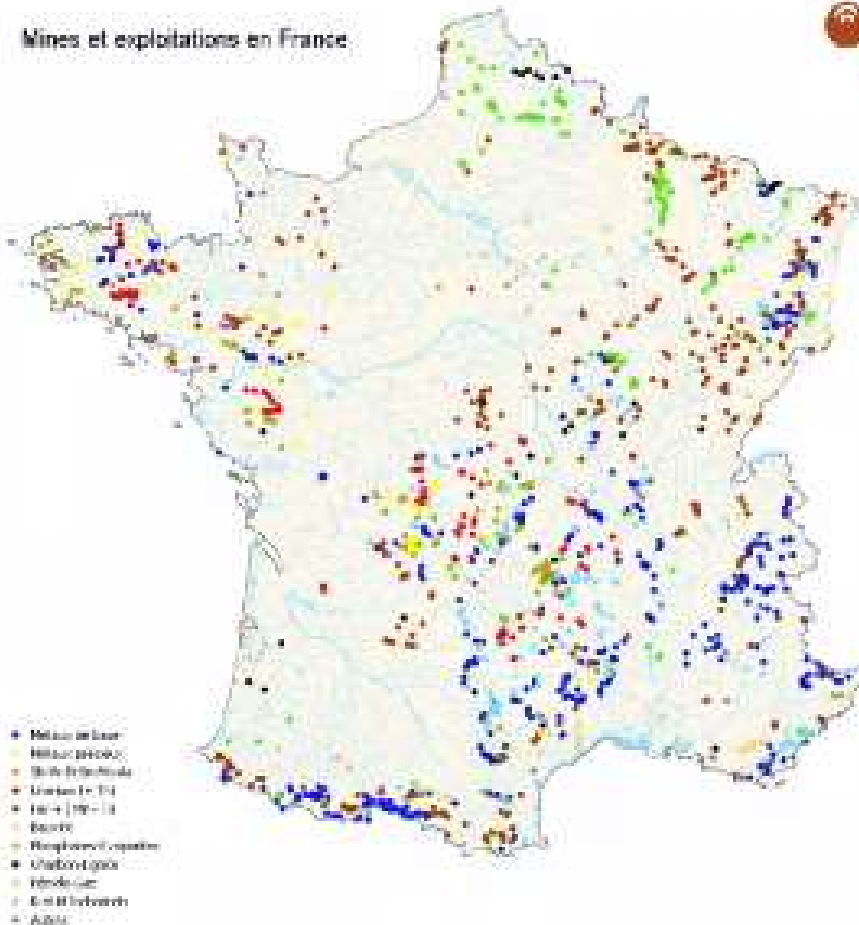
## Influence des activités microbiennes sur la mobilité, la biodisponibilité et la toxicité de l'arsenic et des métaux pour les plantes dans un déchet minier arsénié phytostabilisé

Marina Le Guédard, Hugues Thouin, Louis De Lary De Latour, Nicolas Devau, Lydie Le Forestier, Hafida Tris, Mickaël Charron, Catherine Jouliau, Fabienne Battaglia-Brunet



# LES MINES EN FRANCE

Mines et exploitations en France



- France = riche patrimoine minier
  - ⇒ 300 gisements d'exploitations ou d'explorations significatives
- Production de déchets miniers = **arsenic dans plus de 50% des sites**
- As = **élément hautement toxique**
  - ⇒ Risques pour la santé humaine et l'écosystème



# IMPACT GLOBAL DES DECHETS MINIERES

---



**Sites miniers**



**Concentrations élevées  
d'éléments toxiques (As, Cd,  
Cu, Pb, Zn...)**

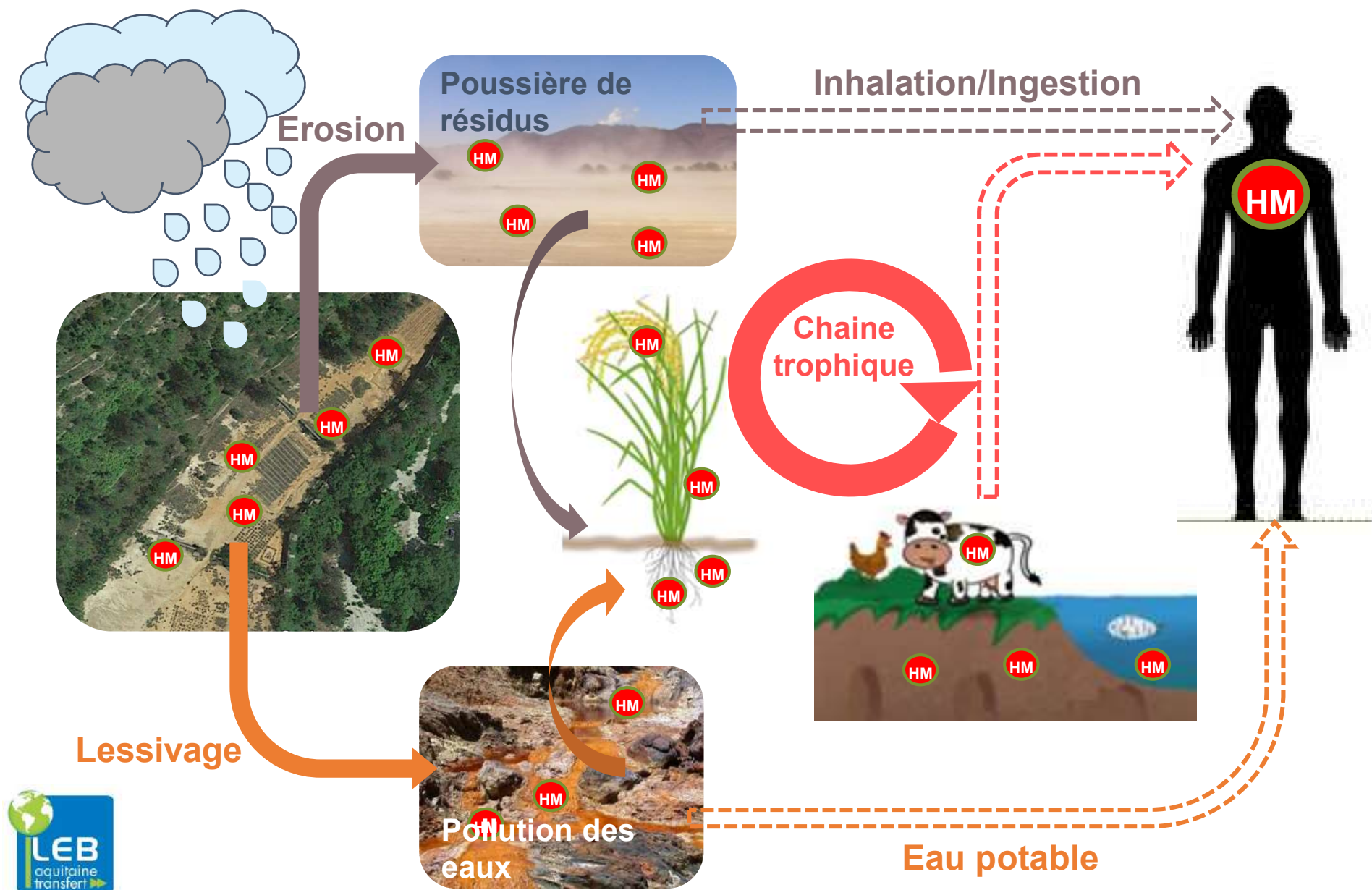


**IMPACT  
SUR LA  
BIODIVERSITE  
DU SITE**

**Sites miniers non réhabilités  
restent généralement dépourvus de  
végétation pendant des dizaines,  
voire des centaines d'années**



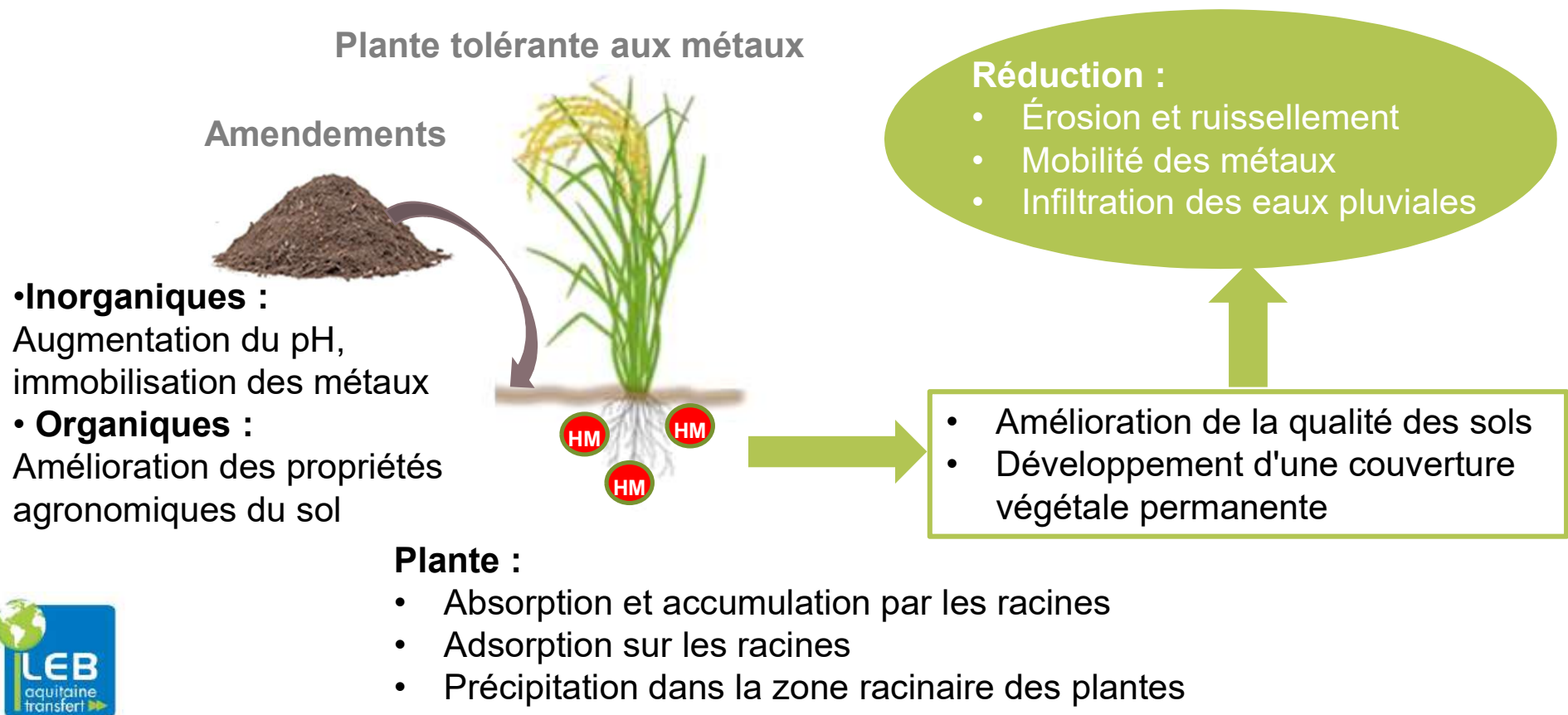
# VOIES D'EXPOSITION DE L'ARSENIC ET DES METAUX PRESENTS DANS LES RESIDUS MINIER



# TECHNOLOGIE DEVELOPPEE POUR REDUIRE LES EMISSION D'ARSENIC ET DE METAUX

⇒ dissémination d'éléments toxiques tels que l'As à l'échelle régionale doit être rapidement atténuée

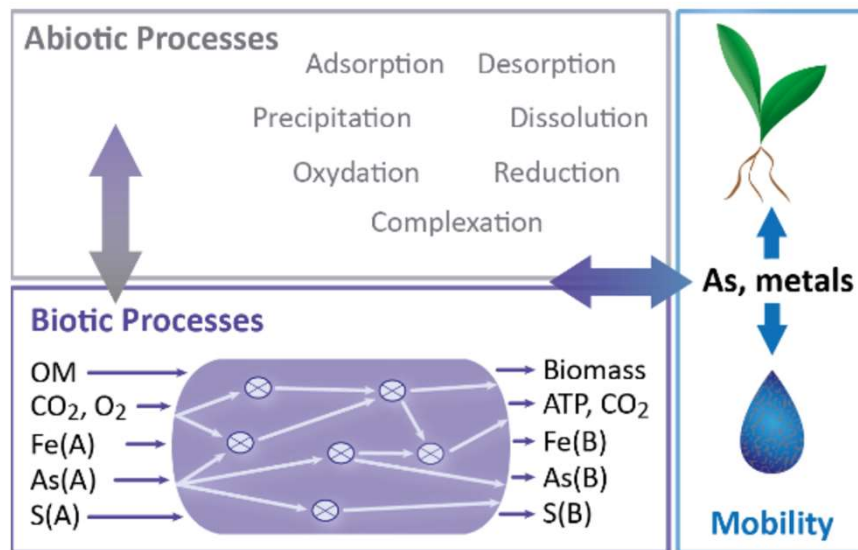
**PHYTOSTABILISATION AIDEE** ⇒ technologies les plus développées pour résoudre ce problème



# ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE PHYTOSTABILISATION

## Modèles de transport réactif (RTM)

= évaluer quantitativement l'évolution de la composition chimique des milieux poreux, ainsi que les flux d'eau et de bilan massique



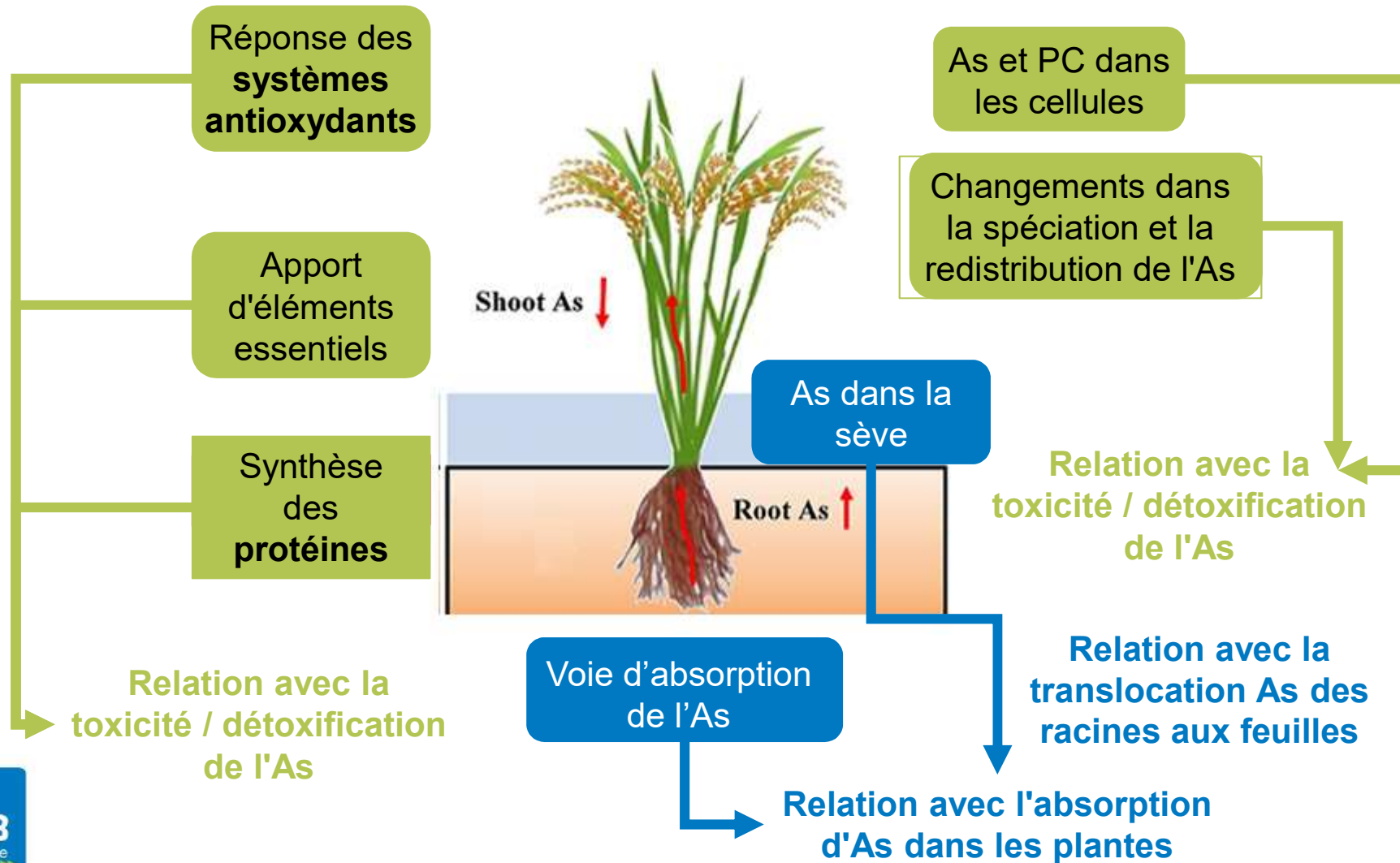
**Processus microbiens** = non intégrés à ce type de modèles prédictifs à ce jour

**Processus biogéochimiques** = influencés non seulement par les conditions macroscopiques, mais aussi par les **différentes conditions microscopiques**.

La mobilité de l'As et des métaux est fortement liée aux métabolismes microbiens de l'As, du S et du Fe.

# RÉPONSE DE LA PLANTE À LA MOBILITÉ

La mobilité de l'As et des métaux est liée à leur accumulation dans les plantes et à leur toxicité



# OBJECTIFS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

## HYPOTHESES

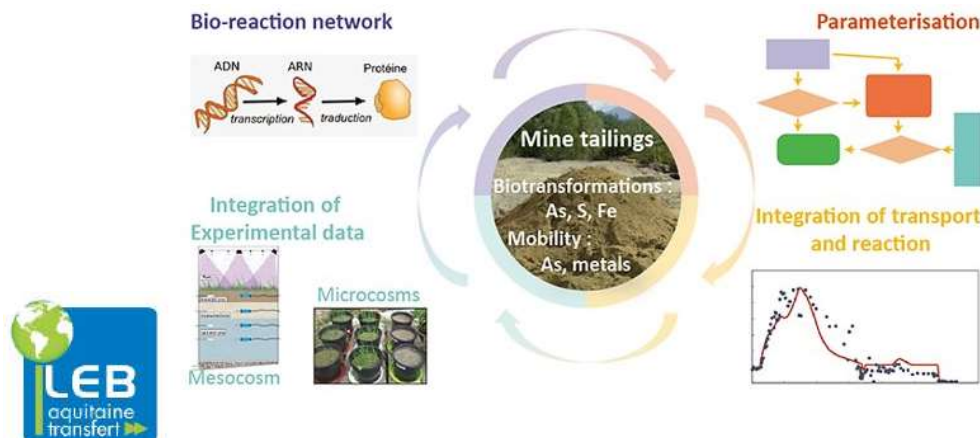
Amendements, développement des plantes et conditions redox



Influencent les processus microbiens responsables des caractéristiques des polluants (spéciation, mobilité, biodisponibilité et toxicité) et la durabilité à long terme de la phytostabilisation

## OBJECTIF GÉNÉRAL DU PROJET

Développer un outil prédictif de la mobilité de l'As et des métaux et de leur disponibilité pour les plantes dans ce contexte, basé sur une méthodologie de RTM intégrant des paramètres microbiens.

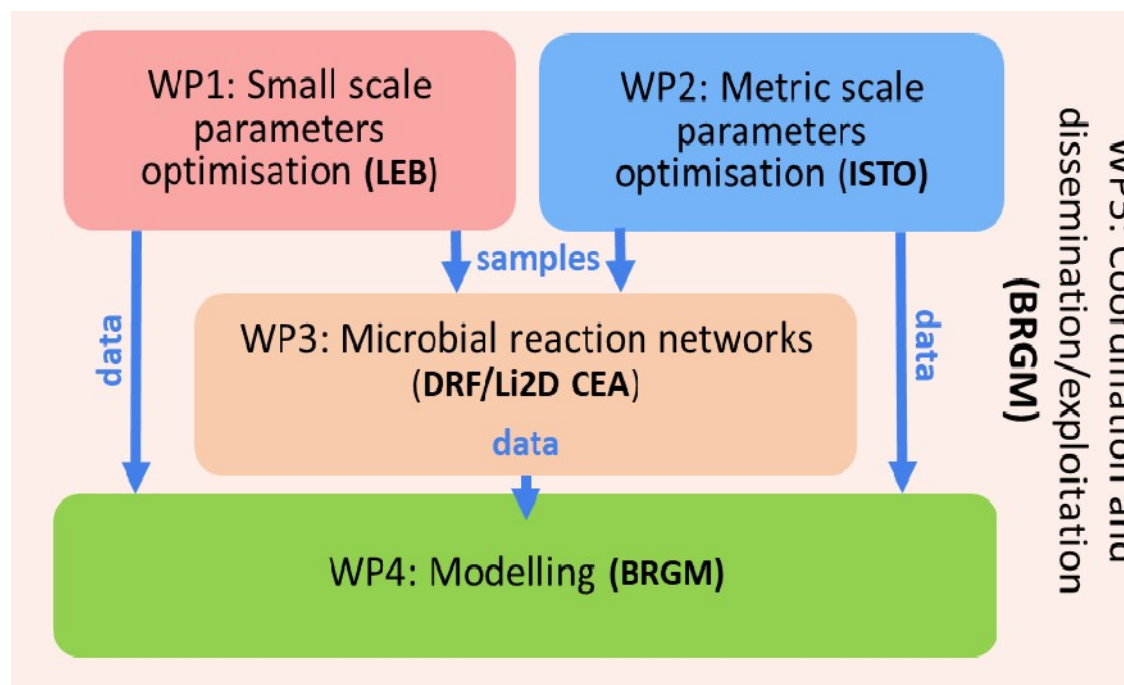


= Programme **interdisciplinaire** (géochimie, microbiologie, métagénomique, protéomique, physiologie végétale et simulation numérique)

= basé sur des **expériences et des modélisations multi-échelles**



# ORGANISATION DU PROJET

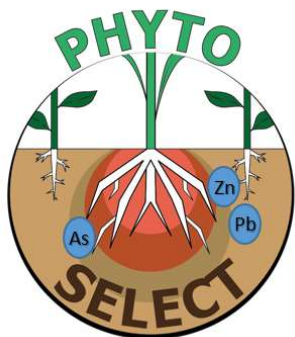
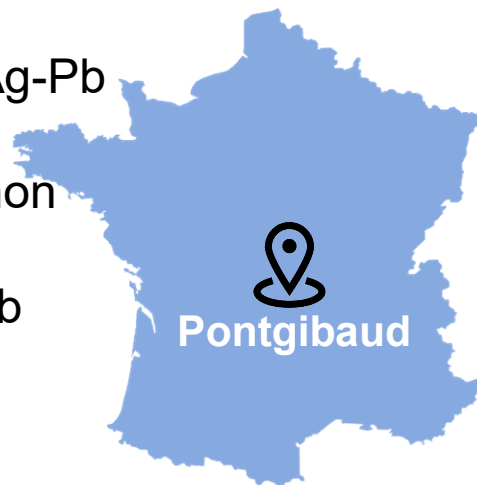


## WP1: Expérience en pot avec pour objectif

Produire un premier niveau de données sur l'influence microbienne sur le cycle biogéochimique des métaux et contribuer aux premières étapes de la conception du modèle

# SITES ETUDIES

- Ancienne mine d'Ag-Pb
- pH = 4.9
- 1000 mg/kg d'As non mobile
- 26432 mg/kg de Pb



Travaux antérieurs = concevoir et étudier la faisabilité de techniques de phytostabilisation assistée ou non assistée

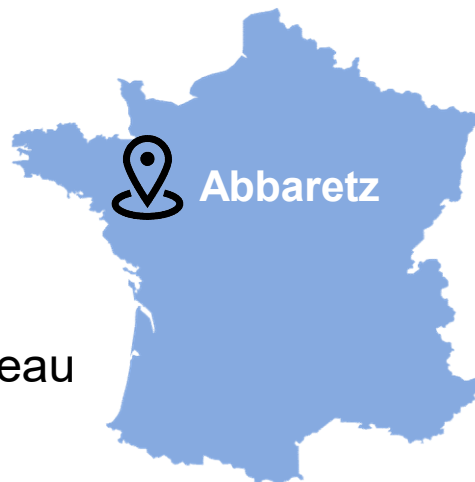


Données acquises au cours de ce projet  $\Rightarrow$  développement d'un **modèle géochimique simulant l'évolution du Pb et du Zn**



# SITES ETUDIES

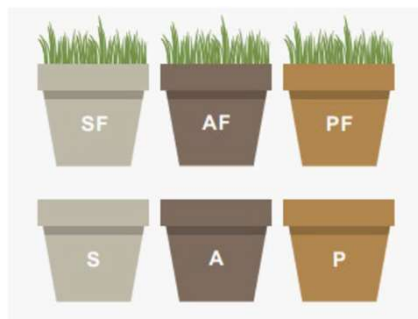
- Mine de Sn
- Réseau GDR TAEMA
- pH = 6,4
- 638 mg/kg d'As
- Relargage de l'As dans l'eau



Depuis septembre 2021 : La **phytostabilisation** est testée sur des parcelles du site (BRGM) afin d'évaluer sa faisabilité



# METHODOLOGIE



P = résidu de Pontgibaud  
A = résidu de Abbaretz  
S = Sable comme contrôle

PF = résidu P + *Festuca rubra*  
AF = résidu A + *Festuca rubra*  
SF = Sable + *Festuca rubra*

Pots remplis de résidus ou de sable amendé avec 3% de compost + 2% de calcaire



Tous les 6 mois :

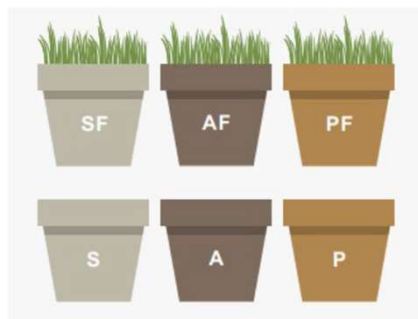
- **Prélèvements d'eaux porales et de solides** pour analyses géochimiques et microbiologiques
- **Prélèvements foliaires** pour analyse du **stress oxydatif** (antioxydants enzymatiques et non enzymatiques...) et **accumulation d'As et de métaux dans les feuilles**

Tous les ans : Sacrifice du pot

- **Phytotoxicité** du sol avec l'indice oméga-3 de *Lactuca* (NF X31-233)
- **Accumulation As et métaux dans les racines**



# METHODOLOGIE



P = résidu de Pontgibaud  
A = résidu de Abbaretz  
S = Sable comme contrôle

PF = résidu P + *Festuca rubra*  
AF = résidu A + *Festuca rubra*  
SF = Sable + *Festuca rubra*

Pots remplis de résidus ou de sable amendé avec 3% de compost + 2% de calcaire



Tous les 6 mois :

- **Prélèvements d'eaux porales et de solides** pour analyses géochimiques et microbiologiques
- **Prélèvements foliaires** pour analyse du **stress oxydatif** (antioxydants enzymatiques et non enzymatiques) et **accumulation d'As et de métaux dans les feuilles**

Tous les ans : Sacrifice du pot

- **Phytotoxicité** du sol avec l'indice oméga-3 de *Lactuca* (NF X31-233)
- **Accumulation As et métaux dans les racines**





# CARACTERISATION DES SOLS À T0

T0 : pH des résidus	A	AF	P	PF
Pas d'amendement	6.4		4.9	
Avec amendement	7.9	7.9	6.7	6.7

**Amendement augmente le pH, comme prévu**

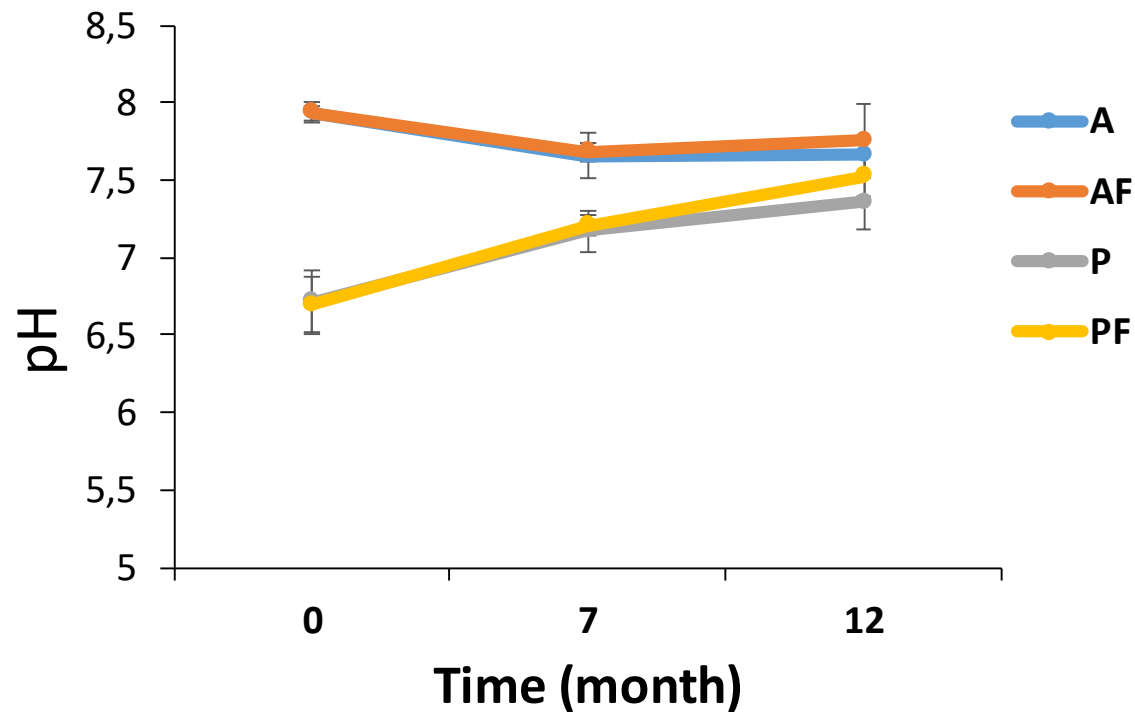
T0 : Eléments dans eaux porales	Unité	Avec amendement			
		A	AF	P	PF
As		1833	1867	4	4
Fe	µg/L	1268	1260	2	1
Zn		28	12	24	19
Pb		nd	nd	1243	1263

**La mobilité de l'As dépend des résidus : stabilisés à Pontgibaud et mobiles à Abbaretz**

Test	Etat de stress	SA	PA	AA
Indice Oméga-3	Nul à faible			
	Moyen			
	Fort			
	Très fort			

**Phytotoxicité des résidus avec l'indice Oméga-3 de Lactuca (NF X31-233) : Pontgibaud apparaît moins toxique qu'Abbaretz**

# ÉVOLUTION DU PH AU COURS DU TEMPS



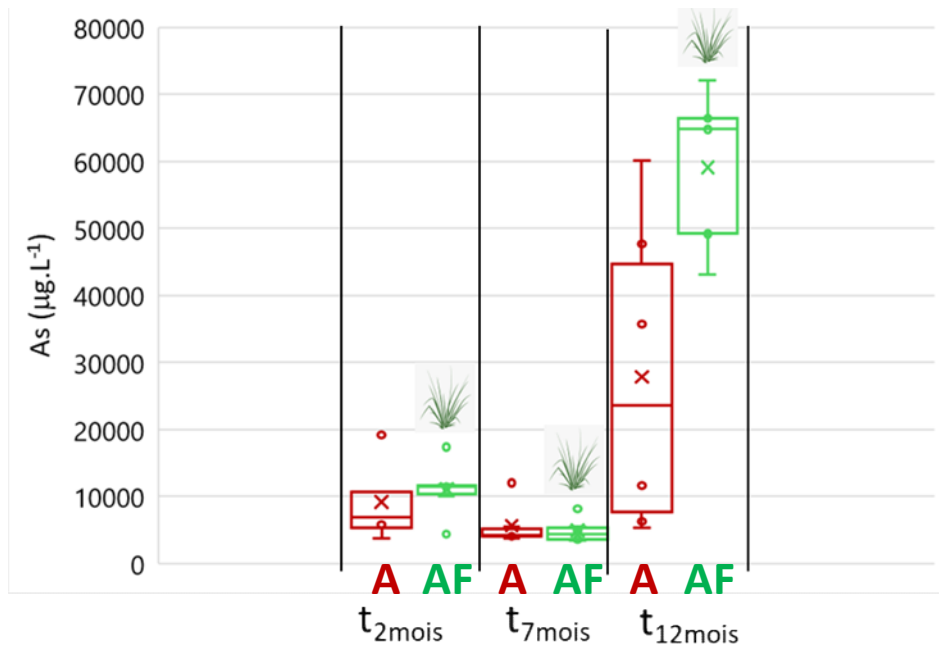
T0 : pH résidu P légèrement inférieur à celui du résidu A

T12 : les deux résidus tendent vers une valeur de pH similaire

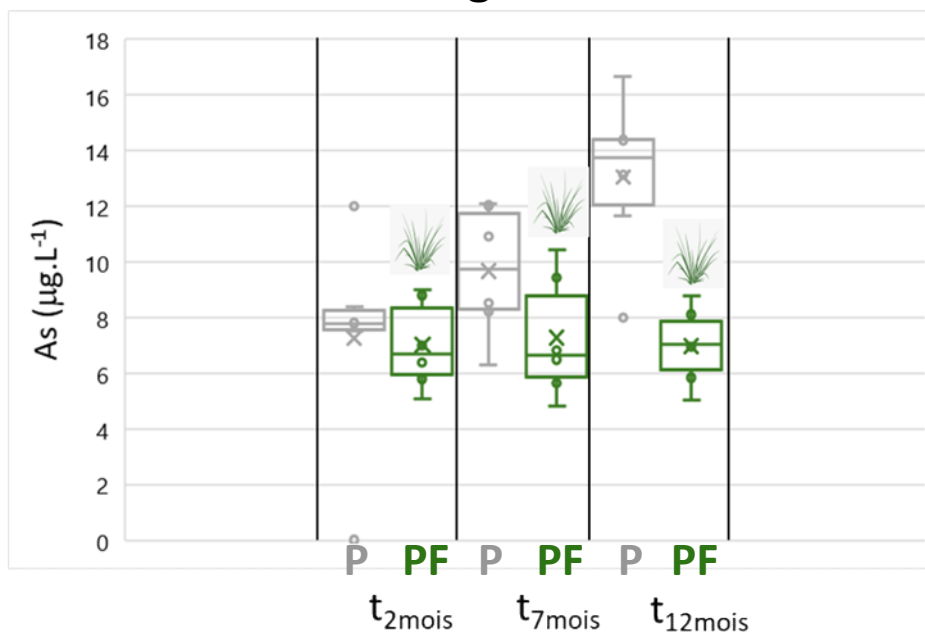
# ÉVOLUTION DE LA MOBILITÉ DE L'ARSENIC DANS LES RÉSIDUS AU FIL DU TEMPS

As mesuré dans les eaux porales

Abbaretz



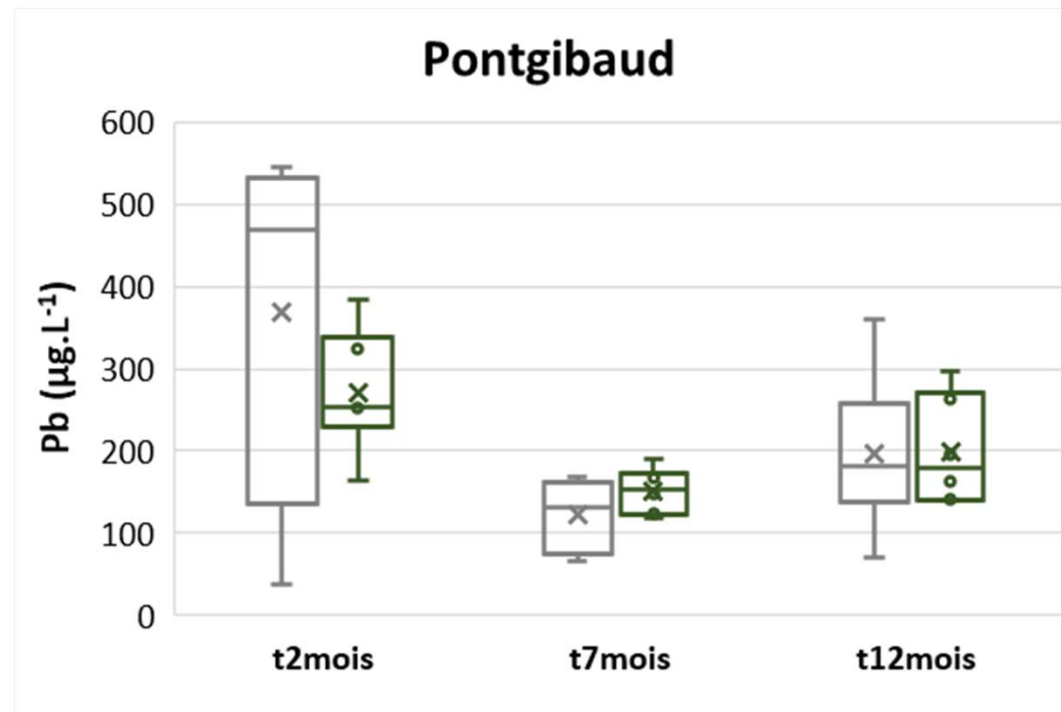
Pontgibaud



- Résidu A libère beaucoup plus d'As dans les eaux porales que résidu P.
- As pas mobile pour le résidu P
- La fétuque semble réduire la mobilité de l'As à T12 dans le résidu P, tandis que la fétuque tend à augmenter sa mobilité dans le résidu A.

# ÉVOLUTION DE LA MOBILITÉ DU PLOMB DANS LES RÉSIDUS AU FIL DU TEMPS

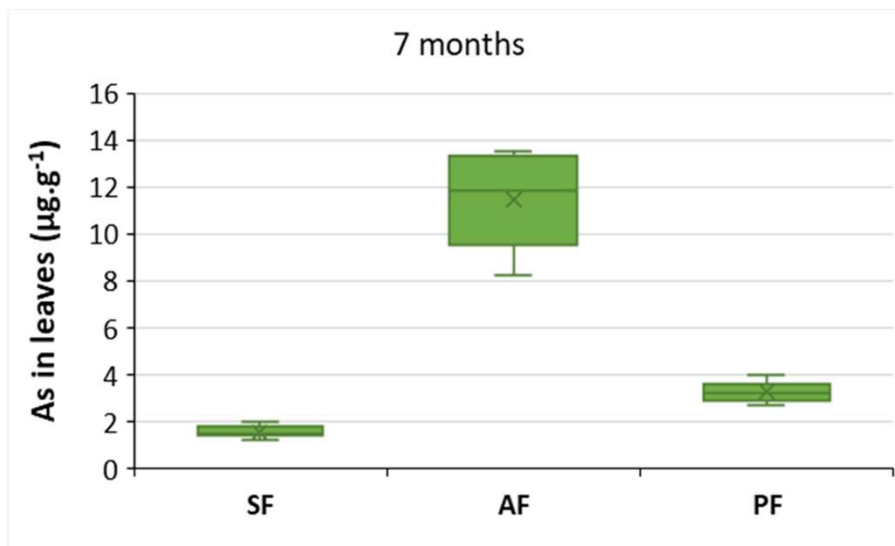
Pb mesuré dans les eaux porales



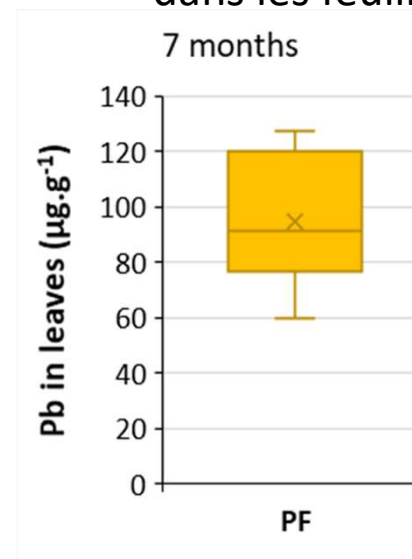
Pas de changement significatif dans la mobilité du Pb au fil du temps, ni avec la présence de fétuque.

# ACCUMULATION DE L'ARSENIC ET DU PLOMB DANS LES FEUILLES APRES 7 MOIS

Teneur en **As**  
dans les feuilles



Teneur en **Pb**  
dans les feuilles



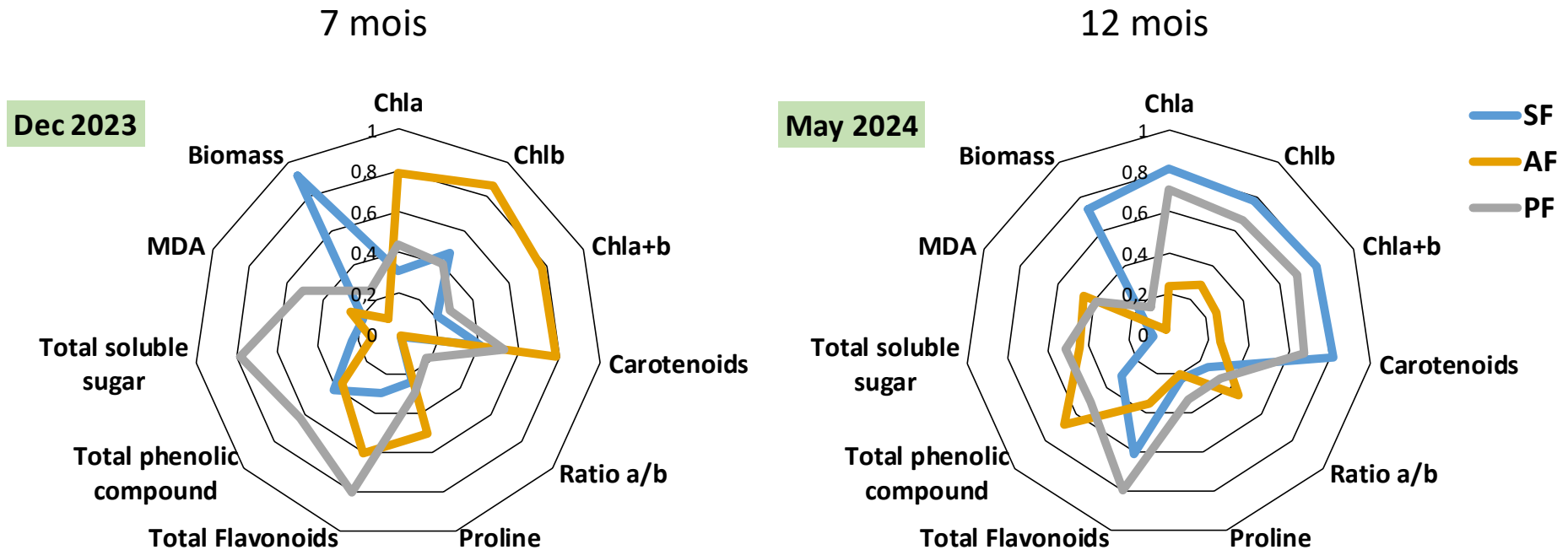
Les feuilles des plantes cultivées sur le résidu A ont accumulé plus d'As que celles des autres conditions

Les feuilles des plantes cultivées sur le résidu P ont accumulé du plomb



# COMMENT LES PLANTES RÉPONDENT A CETTE EXPOSITION ?

Mesures de différents paramètres physiologiques et biochimiques



Production de composés antioxydants chez les plantes cultivées sur les résidus

Les plantes activent différents mécanismes de défense selon les résidus et au fil du temps.

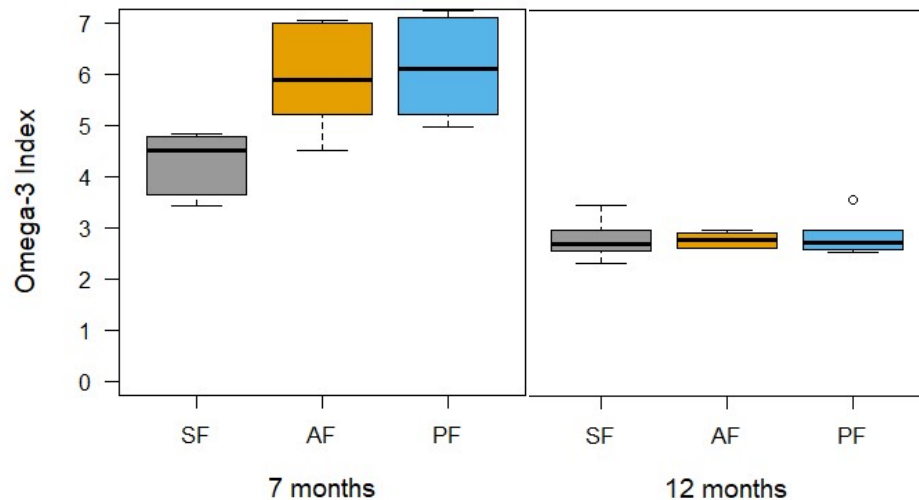
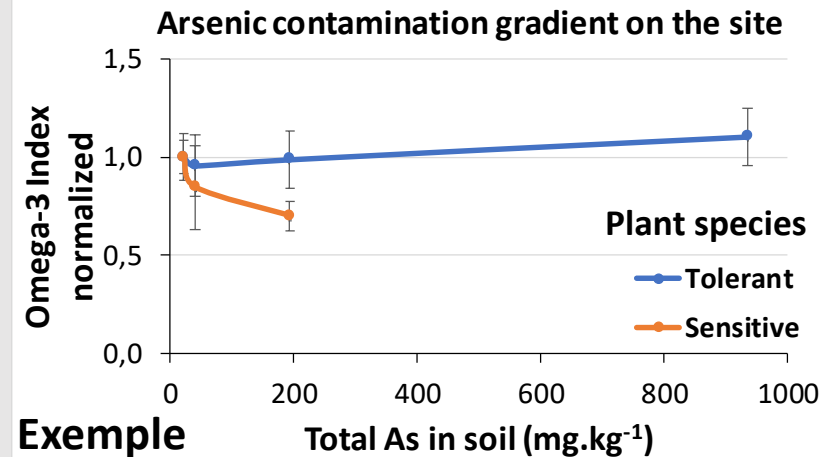
# QUEL EST L'EFFICACITE DES MECANISMES DE DEFENSE MIS EN JEU ?

**Indice Oméga-3** (Acides gras tri-insaturés)

= Stabilité et fluidité des membranes  
cellulaires



**Information sur la tolérance des  
plantes**



**Décembre 2023**  
≈ 5°C

**Mai 2024**  
≈ 20°C



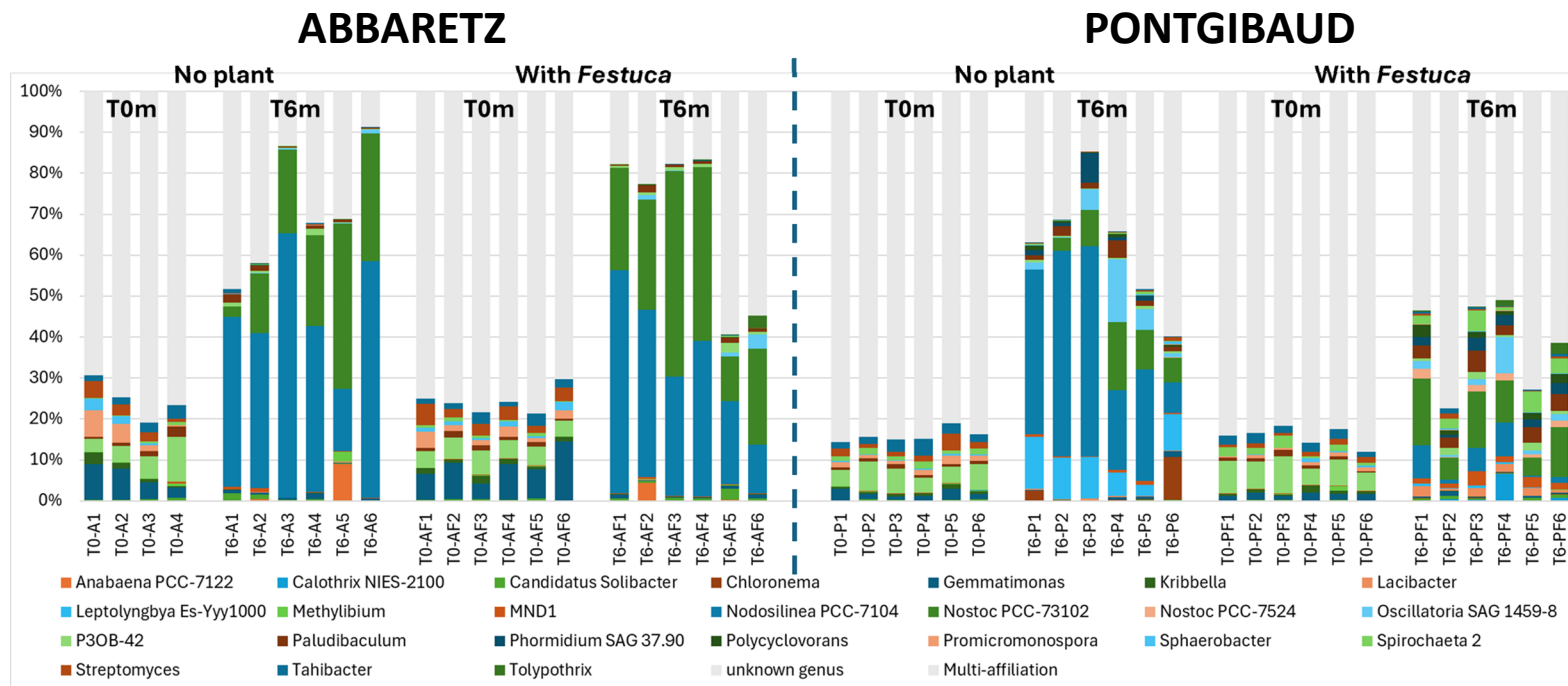
• Malgré la différence de mobilité de l'As entre les deux résidus, l'indice oméga-3 est **similaire pour les deux résidus**.

⇒ La mobilité de l'As n'influence pas significativement la stabilité ou la fluidité de la membrane = **Festuca semble tolérer l'As**

• L'augmentation de l'indice oméga-3 liée au temps est attribuée aux **variations de température**

# ÉVOLUTION DE LA COMMUNAUTÉ PROCARYOTE APRÈS 7 MOIS

Séquençage de l'ARNr 16S ⇒ Communautés microbiennes actives



Résidus non plantés : Développement significatif de cyanobactéries au cours des 7 premiers mois dans les communautés microbiennes actives

Abbaretz : Aucun impact de la présence de plantes, même évolution observée.

Pontgibaud : Festuca semble influencer l'évolution de la diversité des communautés microbiennes.

# PERSPECTIVES

---

- Compléter l'analyse de tous les paramètres étudiés à T7, T12 et T18
- Compléter avec les paramètres à étudier lors de la dernière campagne (T24 : juin 2025)
- Croiser l'ensemble des résultats obtenus afin de **déterminer les processus influençant la santé de la plante et son évolution**
- Comparer les résultats obtenus à ceux de l'expérience en mésocosme (WP2) menée avec le résidu d'Abbaretz (conditions contrôlées de température et de lumière)
- Fournir des données pour le modèle de transport réactif

# REMERCIEMENTS

---





# MERCI POUR VOTRE ATTENTION



©De Lary De Latour