

Les boues rouges de Provence : des résidus miniers au technosol ?



Séminaire de l'OHM- BMP

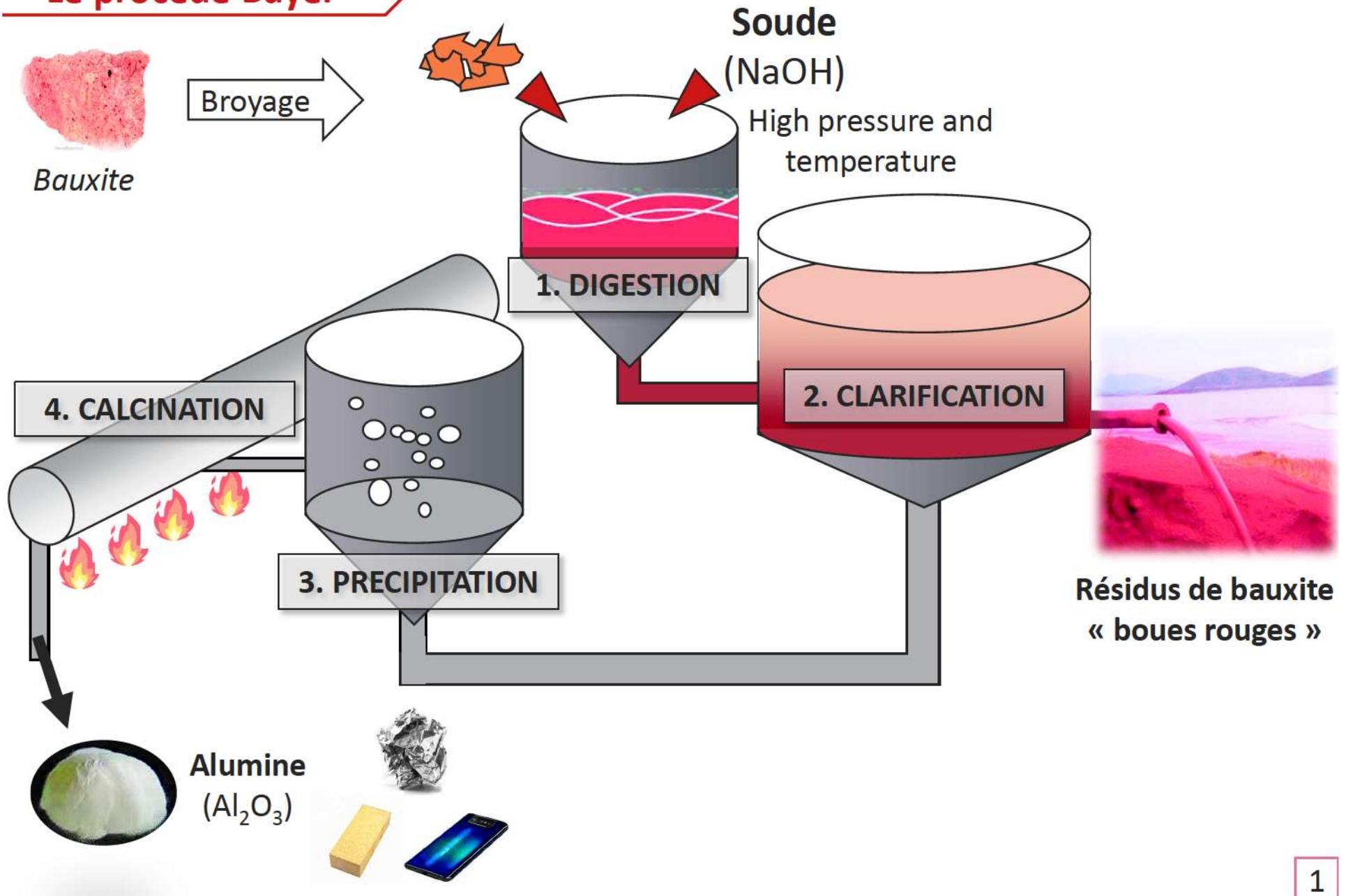
Camille Fourier

fourrier.camille@gmail.com

21 janvier 2021



Le procédé Bayer



Résidus de bauxite et environnement

- ❖ Les résidus de bauxite sont caractérisés par certaines caractéristiques physico-chimiques extrêmes

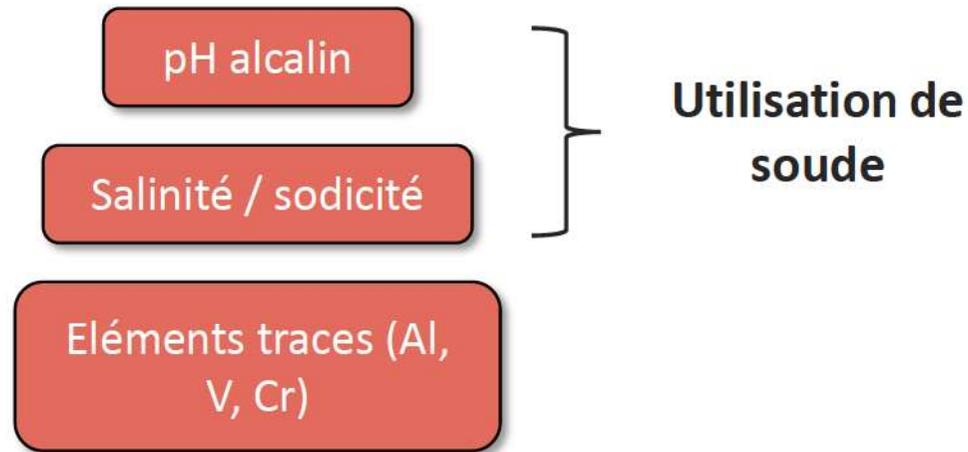
pH alcalin

Salinité / sodicité

} Utilisation de soude

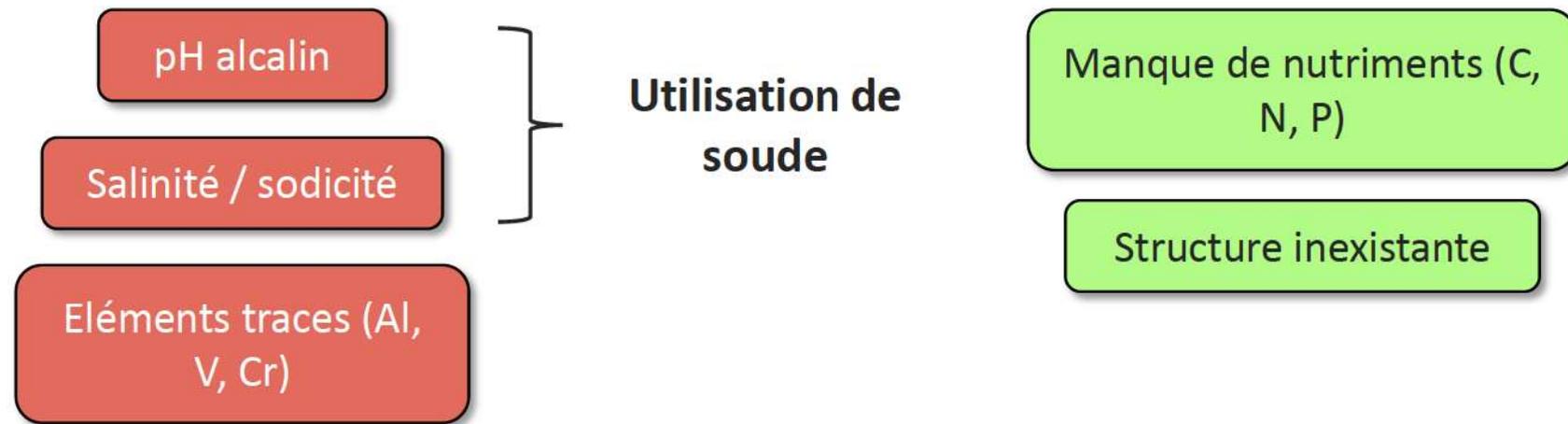
Résidus de bauxite et environnement

- ❖ Les résidus de bauxite sont caractérisés par certaines caractéristiques physico-chimiques extrêmes



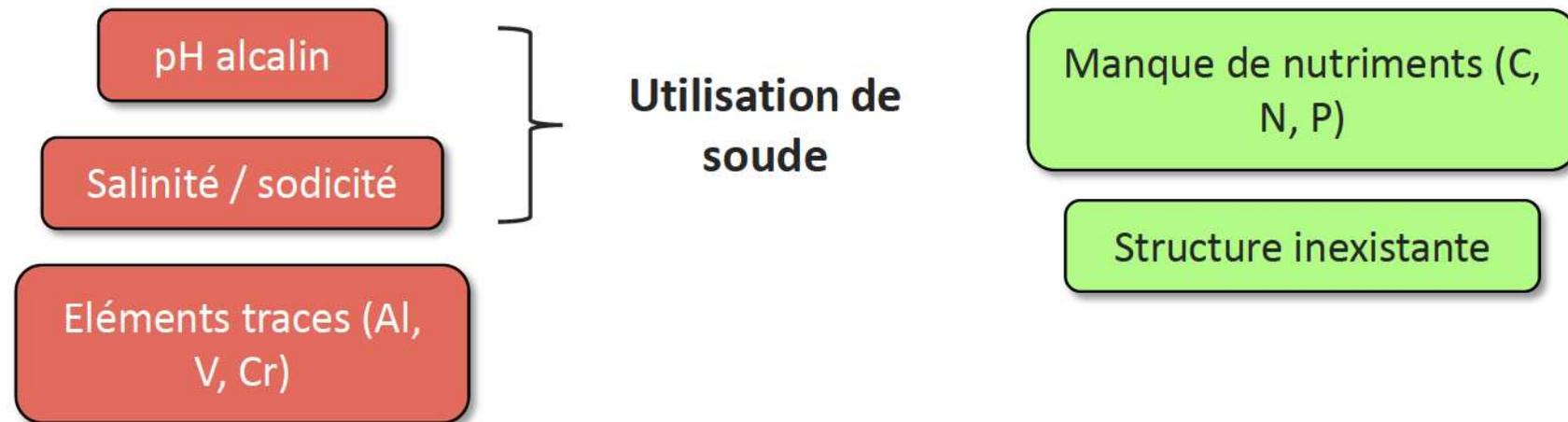
Résidus de bauxite et environnement

- ❖ Les résidus de bauxite sont caractérisés par certaines caractéristiques physico-chimiques extrêmes



Résidus de bauxite et environnement

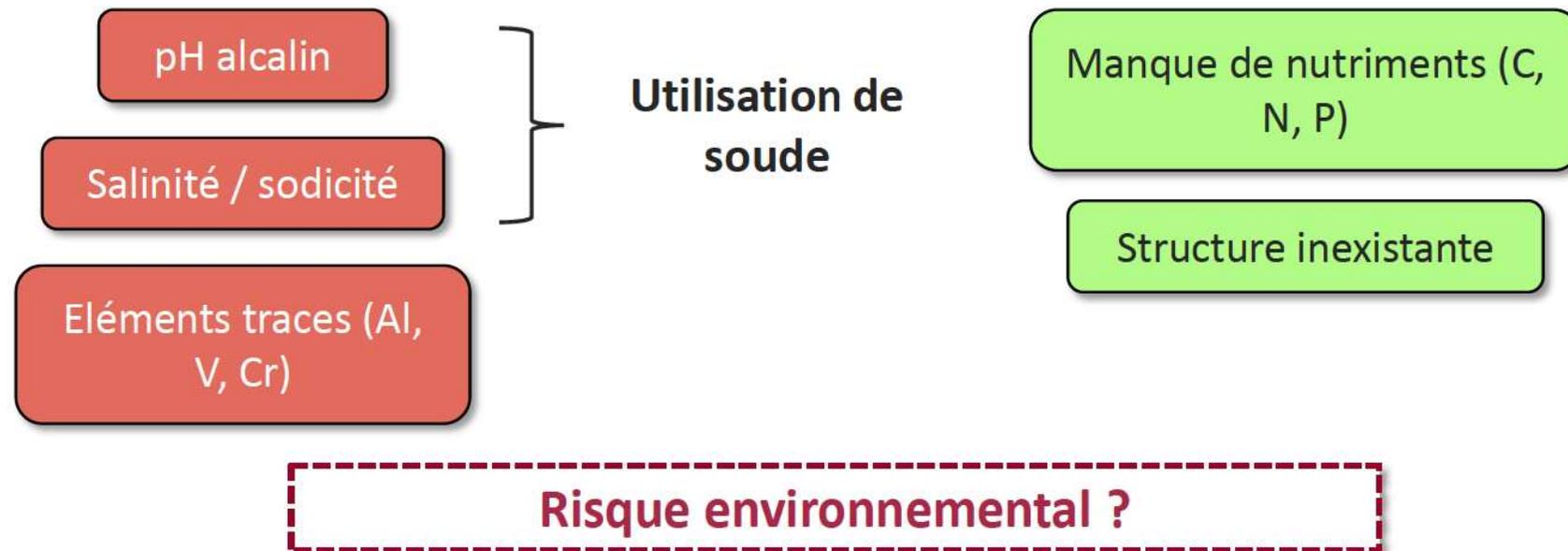
- ❖ Les résidus de bauxite sont caractérisés par certaines caractéristiques physico-chimiques extrêmes



Risque environnemental ?

Résidus de bauxite et environnement

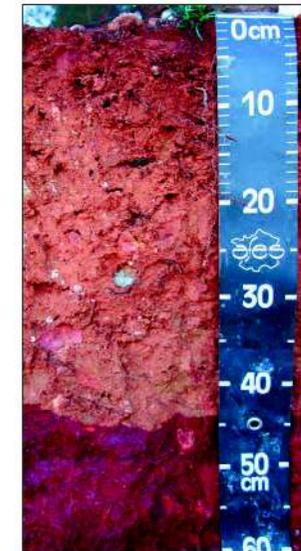
- ❖ Les résidus de bauxite sont caractérisés par certaines caractéristiques physico-chimiques extrêmes



- ❖ Les caractéristiques des résidus de bauxite sont dépendantes de :
 - **L'origine du minerai de bauxite**
 - **Le procédé industriel appliqué** (càd l'usine dans laquelle ils ont été produits)
 - **Le traitement appliqué avant le stockage** (déshydratation ou non)

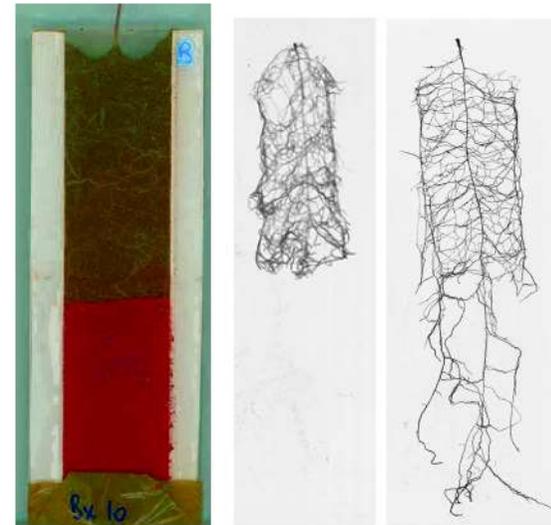
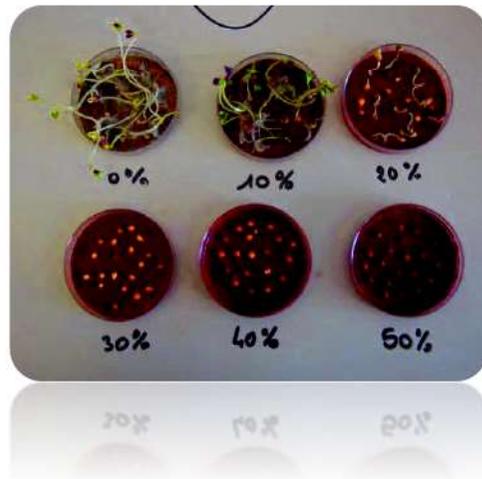
Objectifs de la thèse

1. Comprendre l'influence des résidus sur le fonctionnement des sols



Objectifs de la thèse

1. Comprendre l'influence des résidus sur le fonctionnement des sols
2. Mesurer les impacts de différents résidus sur **les microorganismes et les plantes**



Objectifs de la thèse

1. Comprendre l'influence des résidus sur le fonctionnement des sols
2. Mesurer les impacts de différents résidus sur les microorganismes et les plantes
3. Tester une méthode pour transformer ces résidus en **technosol fonctionnel**



Technosol

Sol dont les propriétés sont issues pour tout ou partie de **l'activité humaine** et dont les **matériaux** sont **d'origine technogéniques**

Objectifs de la thèse

1. Comprendre l'influence des résidus sur le fonctionnement des sols
2. Mesurer les impacts de différents résidus sur les microorganismes et les plantes
3. Tester une méthode pour transformer ces résidus en technosol fonctionnel

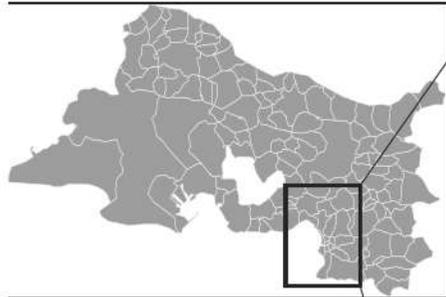


Technosol

Sol dont les propriétés sont issues

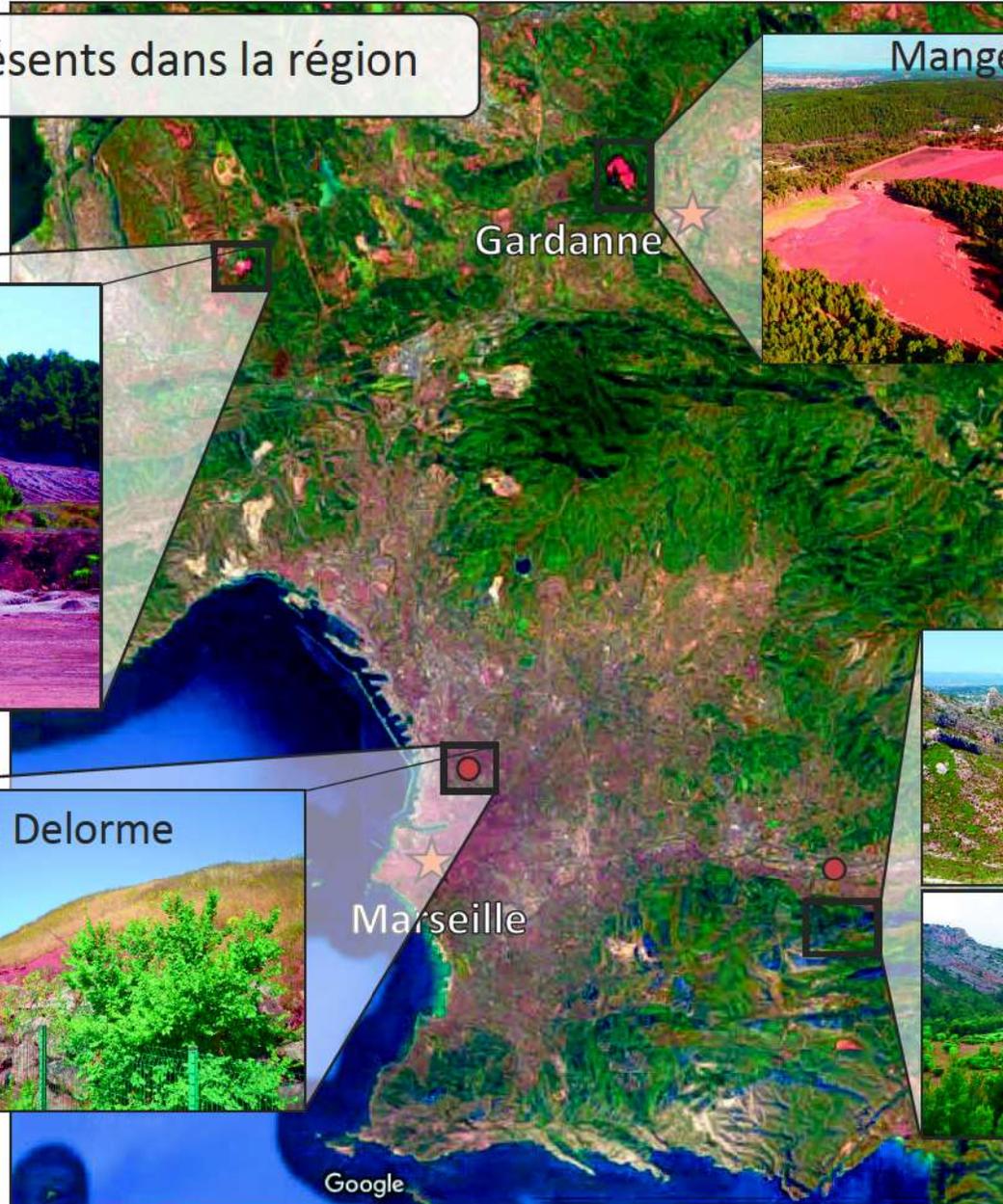
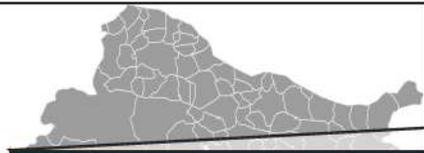
- ❖ Effet des résidus de bauxite sur une plante (expérience en rhizotrons)
- ❖ Possibilité de transformation d'un résidu en technosol à l'aide de gypse et d'intrants organiques (expérience en lysimètres)

En Provence : du passé au présent

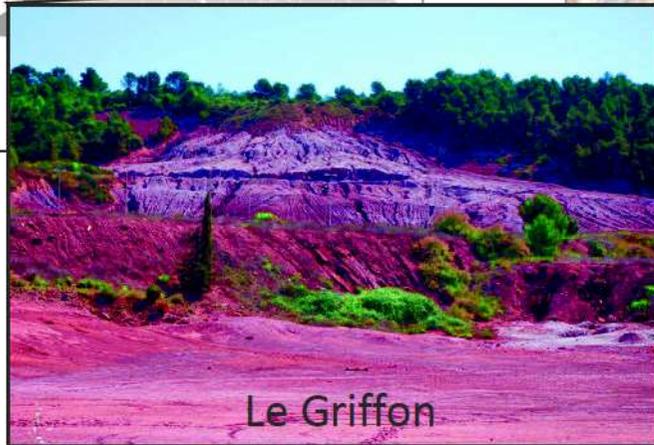


En Provence : du passé au présent

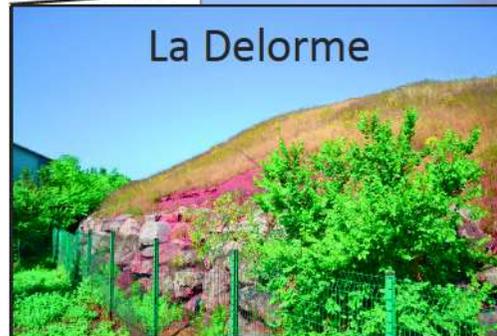
Cinq crassiers sont présents dans la région



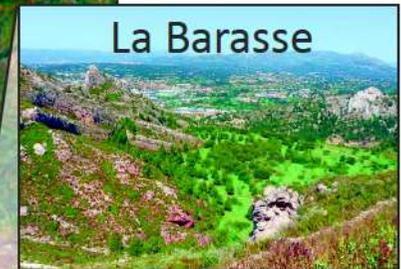
Mange-Garri



Le Griffon



La Delorme

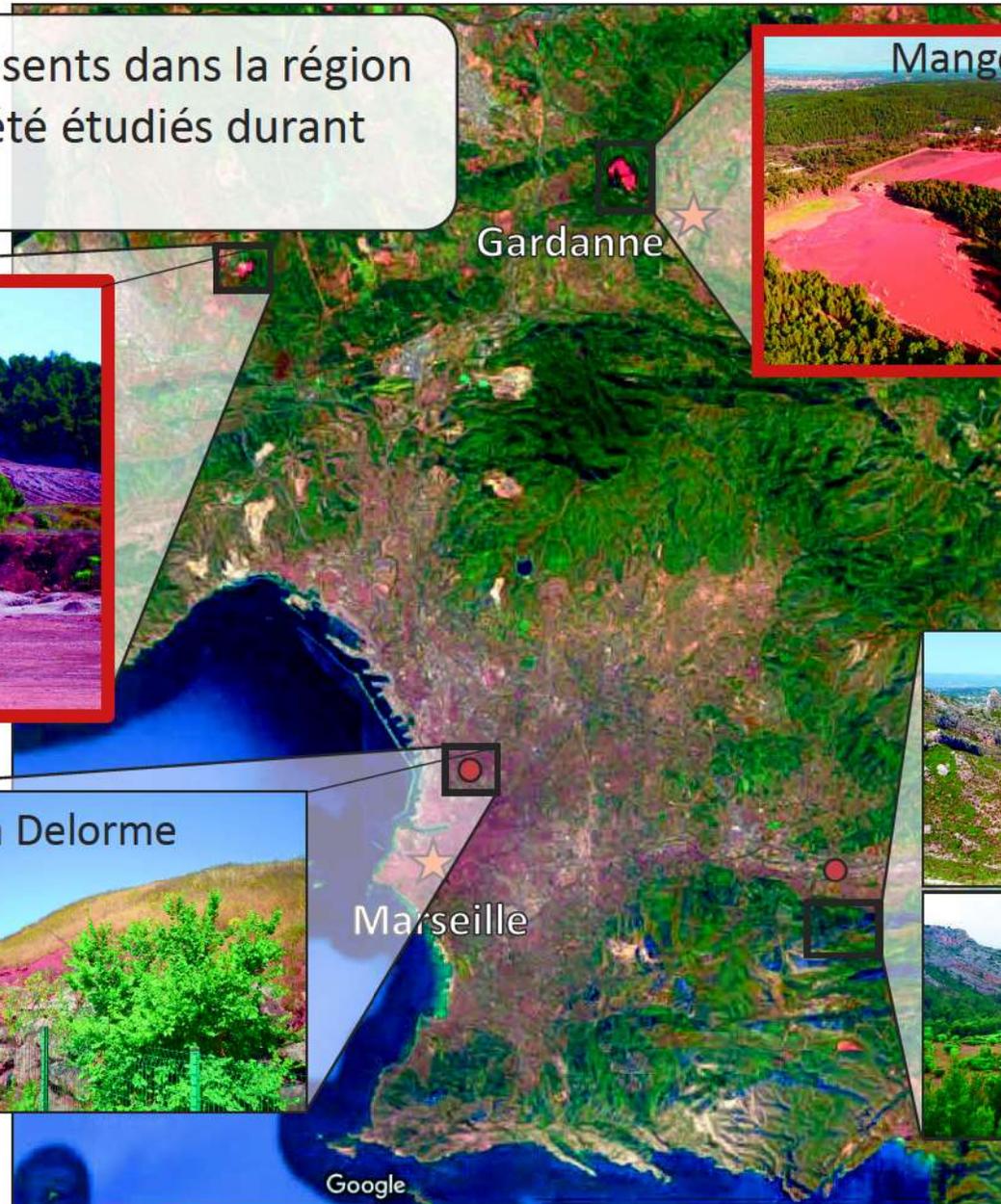
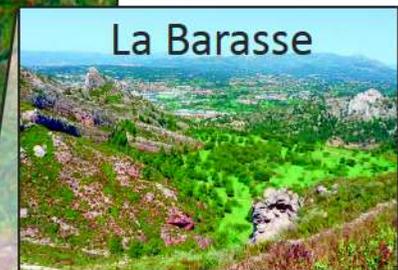
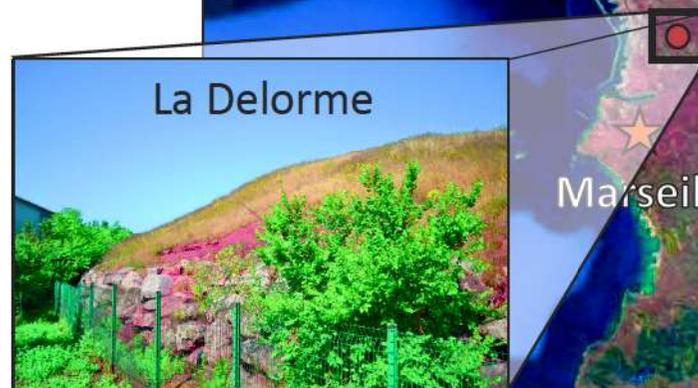


La Barasse



En Provence : du passé au présent

Cinq crassiers sont présents dans la région
Deux d'entre eux ont été étudiés durant
ces travaux



Résidus de bauxite utilisés

- ❖ L'impact de deux résidus différents ont été testés sur la moutarde blanche (*Sinapis alba*)



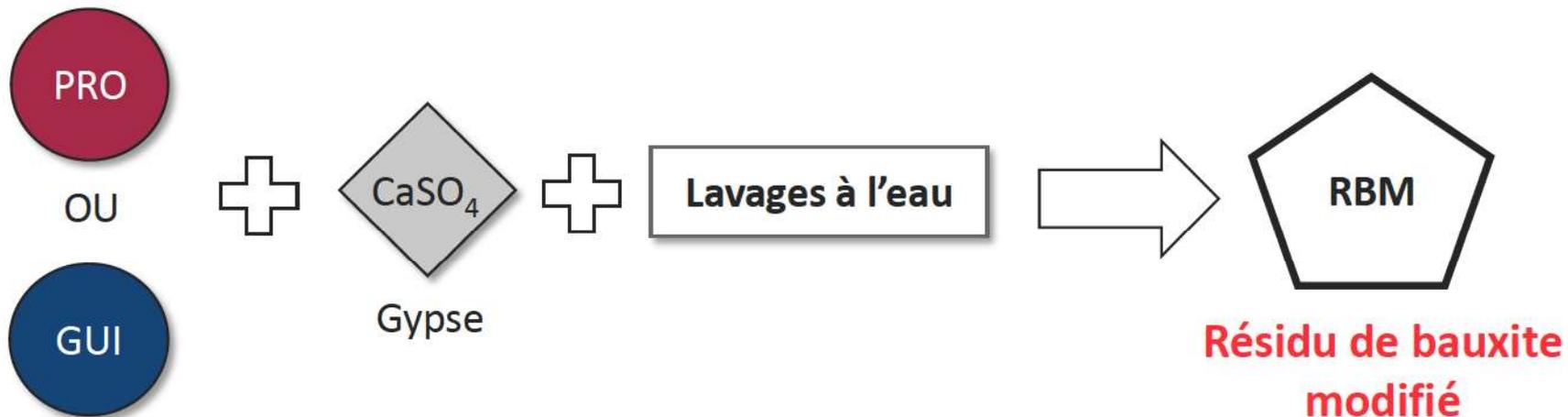
- ⇒ Résidu issu du crassier du Griffon (Vitrolles)
 - Produit à partir de **bauxite de Provence (= PRO)**
 - Résidu historique
 - **Aucun traitement** avant dépôt



- ⇒ Résidu actuellement produit à l'usine de Gardanne
 - Produit à partir de **bauxite de Guinée (= GUI)**
 - Produit actuellement
 - **Déshydraté par filtre presse** avant dépôt

Résidus de bauxite utilisés

- ❖ Pour réduire le pH, la conductivité électrique et le pourcentage de sodium échangeable, les deux résidus ont été amendés avec du gypse (CaSO_4) (Di Carlo et al., 2019)



➤ Lessivage du sodium (Na)

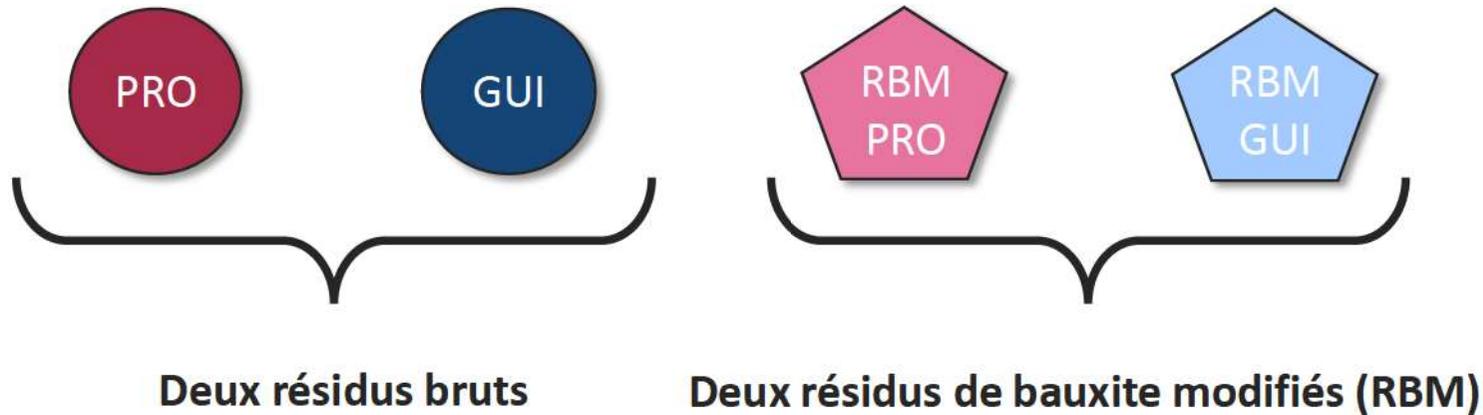
Echange des ions sodium (Na^+) par des ions calcium (Ca^{2+}) sur les particules
(Gräfe and Klauber, 2011)

➤ Neutralisation du pH

Réaction des ions calcium (Ca^{2+}) avec les carbonates (CO_3^{2-})
→ Précipitation de calcite (CaCO_3)
(Burke et al., 2013)

Résidus de bauxite utilisés

❖ Ainsi, quatre résidus différents ont été testés sur la moutarde blanche

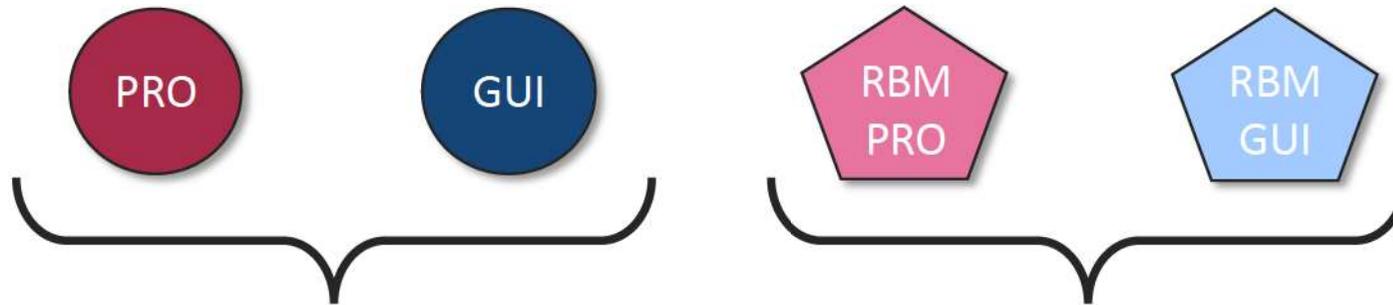


❖ Chacun d'entre eux a été caractérisé physico-chimiquement

| | | PRO | RBM-PRO | GUI | RBM-GUI |
|-----|-----------------------|-------|---------|-------|---------|
| pH | | 10.7 | 9.1 | 8.8 | 8.6 |
| EC | $\mu\text{S.cm}^{-1}$ | 1 800 | 1 400 | 1 300 | 900 |
| ESP | % | 94.1 | 33.5 | 26.9 | 8.9 |

Résidus de bauxite utilisés

❖ Ainsi, quatre résidus différents ont été testés sur la moutarde blanche



Deux résidus bruts

Deux résidus de bauxite modifiés (RBM)

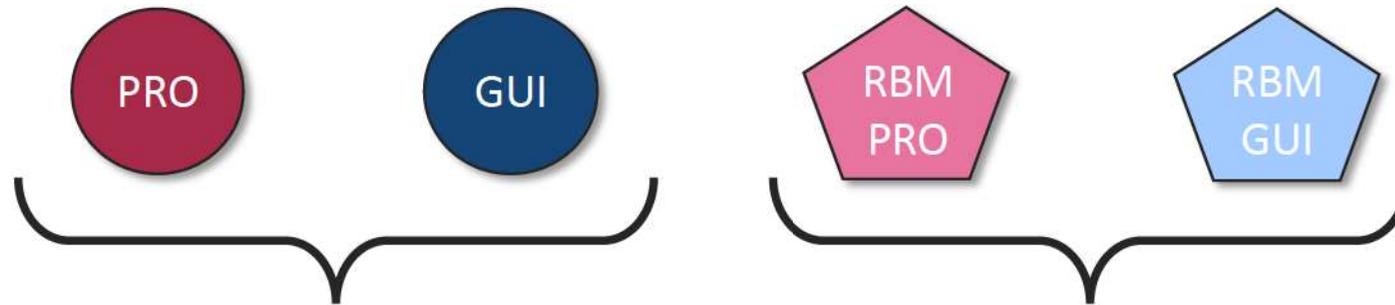
❖ Chacun d'entre eux a été caractérisé physico-chimiquement

- 1) De fortes différences sont observées entre PRO et GUI, en particulier pour le % de sodium échangeable

| | | PRO | RBM-PRO | GUI | RBM-GUI |
|-----|-----------------------|-------|---------|-------|---------|
| pH | | 10.7 | 9.1 | 8.8 | 8.6 |
| EC | $\mu\text{S.cm}^{-1}$ | 1 800 | 1 400 | 1 300 | 900 |
| ESP | % | 94.1 | 33.5 | 26.9 | 8.9 |

Résidus de bauxite utilisés

❖ Ainsi, quatre résidus différents ont été testés sur la moutarde blanche



Deux résidus bruts

Deux résidus de bauxite modifiés (RBM)

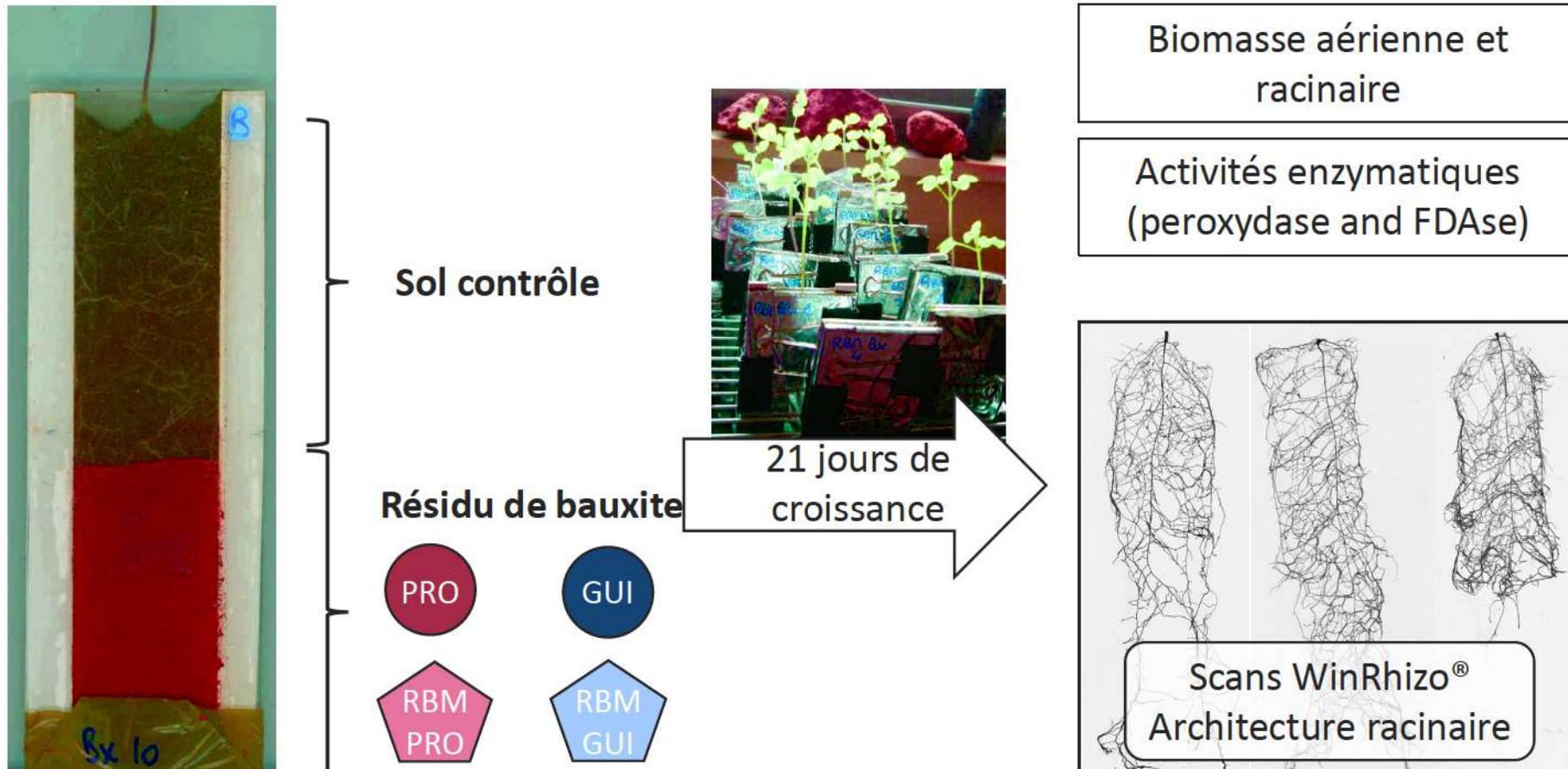
❖ Chacun d'entre eux a été caractérisé physico-chimiquement

- 1) De fortes différences sont observées entre PRO et GUI, en particulier pour le % de sodium échangeable
- 2) Le traitement au gypse a efficacement réduit l'EC et l'ESP dans les 2 résidus

| | | PRO | | RBM-PRO | GUI | | RBM-GUI |
|-----|-----------------------|-------|---|---------|-------|---|---------|
| pH | | 10.7 | ↓ | 9.1 | 8.8 | = | 8.6 |
| EC | $\mu\text{S.cm}^{-1}$ | 1 800 | ↓ | 1 400 | 1 300 | ↓ | 900 |
| ESP | % | 94.1 | ↓ | 33.5 | 26.9 | ↓ | 8.9 |

Rhizotrons

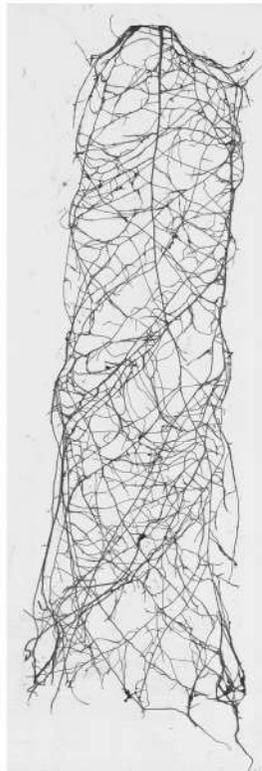
- ❖ Une expérience en rhizotron a été réalisée pour évaluer l'impact de ces 4 résidus sur la productivité végétale et le développement racinaire
- ❖ La moutarde blanche (*Sinapis alba*) a été utilisée, et a été semée dans un rhizotron vertical composé d'une couche de résidu surmontée d'une couche de sol



Rhizotrons

- ❖ Le type de résidu a eu une influence très forte sur le développement de *Sinapis alba*

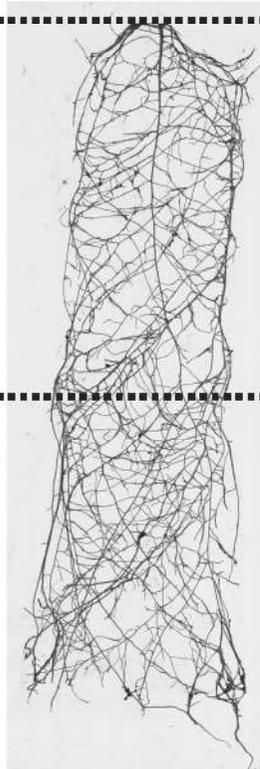
CONTRÔLE



Rhizotrons

- ❖ Le type de résidu a eu une influence très forte sur le développement de *Sinapis alba*

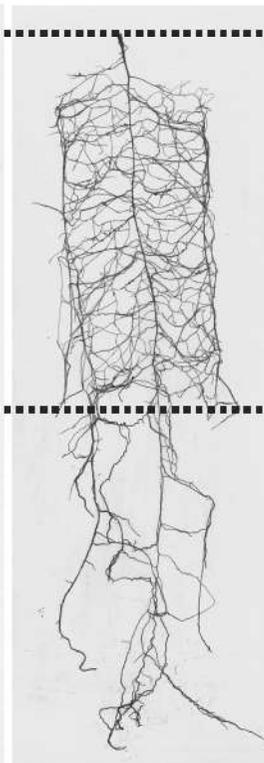
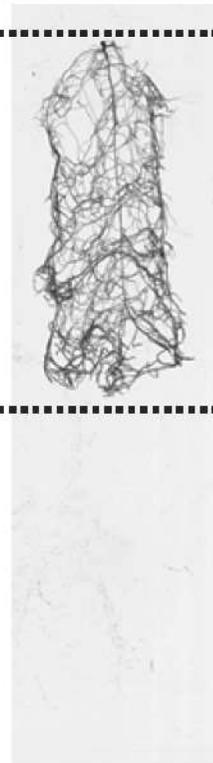
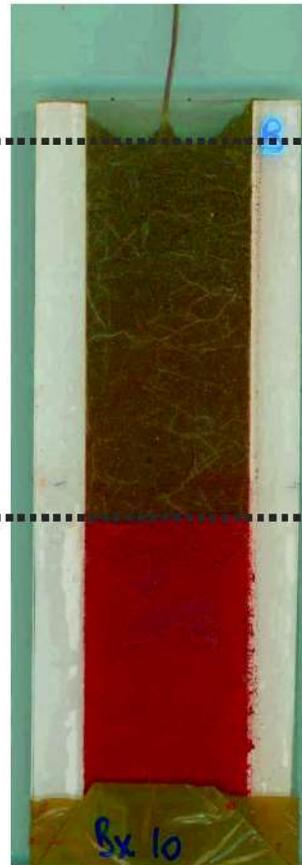
CONTRÔLE



TESTS

PRO

GUI

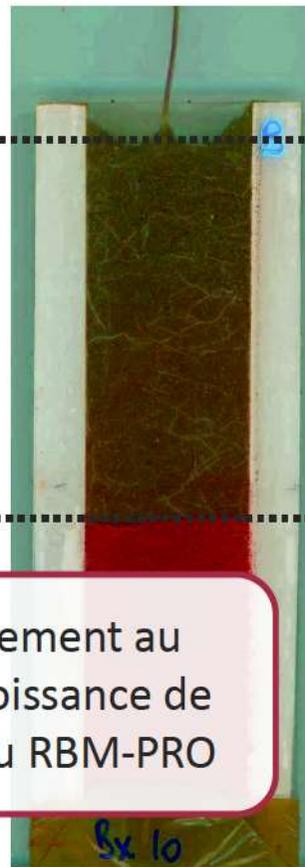


Le résidu PRO (Vitrolles) a eu un impact **beaucoup plus important** que GUI (Gardanne). C'était **le seul** résidu où aucune racine n'a pu se développer.

Rhizotrons

- ❖ Le type de résidu a eu une influence très forte sur le développement de *Sinapis alba*

CONTRÔLE



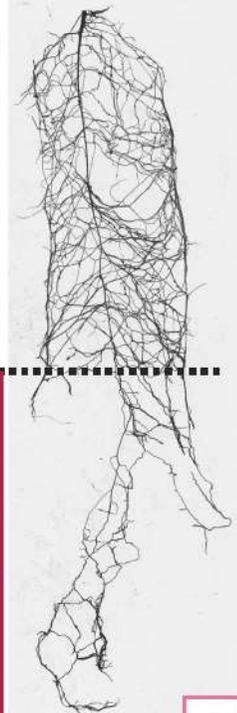
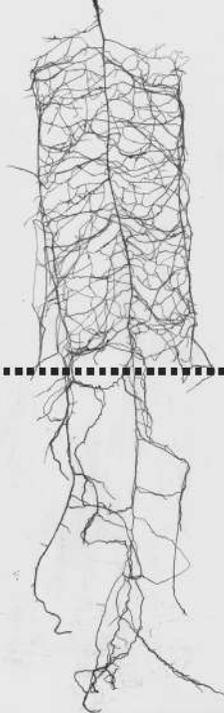
TESTS

PRO

GUI

RBM
PRO

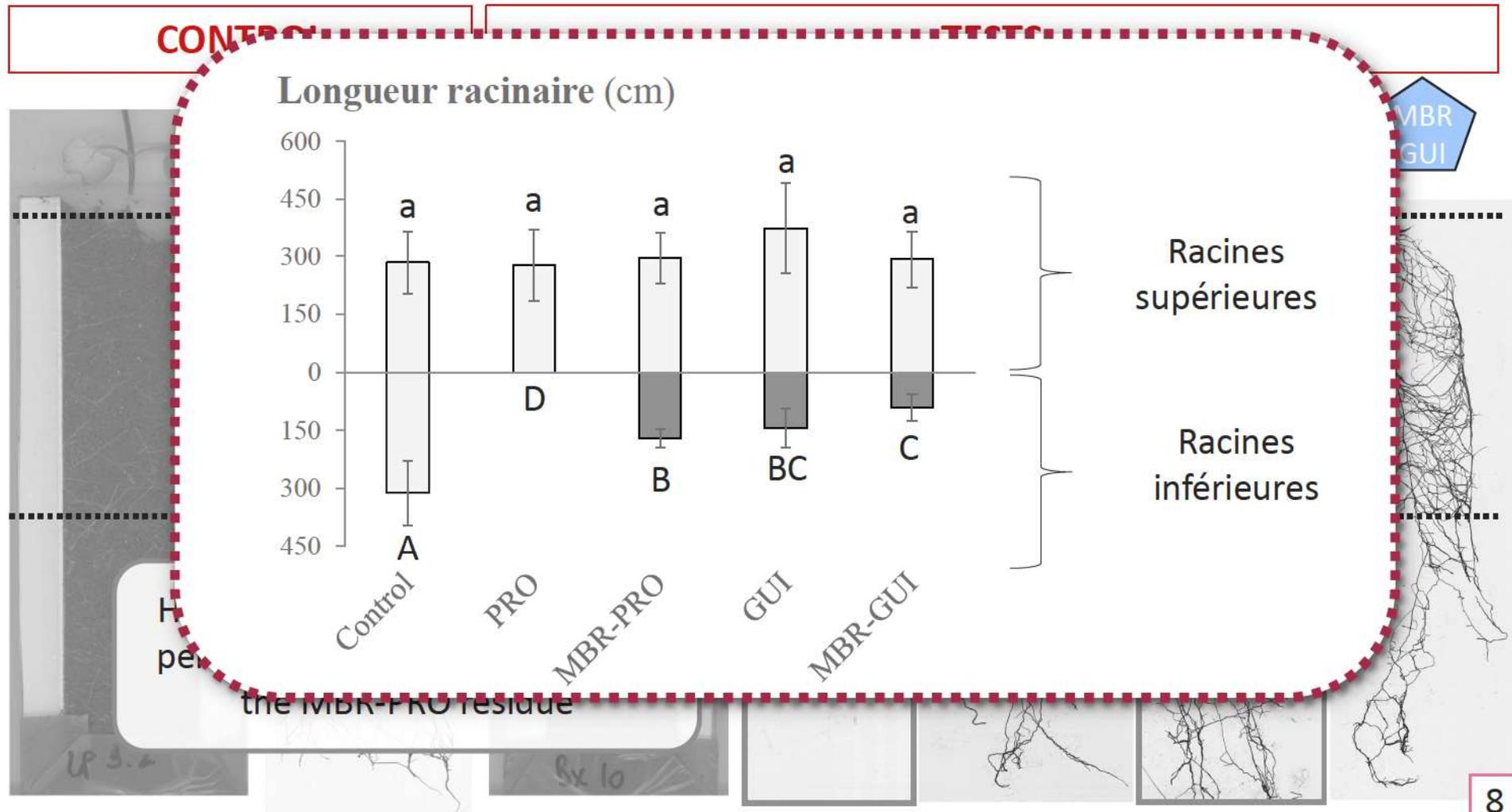
RBM
GUI



Cependant, le traitement au gypse a permis la croissance de racines dans le résidu RBM-PRO

Rhizotrons

- ❖ Le type de résidu a eu une influence très forte sur le développement de *Sinapis alba*



Protocole expérimental

- ❖ 1) Le résidu de Gardanne a été modifié avec du gypse et des lavages répétés
- ❖ 2) Quatre types d'amendements organiques ont été mélangés avec ce RBM



Compost
(Comp)



Boues de STEP
déchaydratées (STEP)



Substrat de culture de
champignon usagé
(Champost, CH)



Champost + margions /
margines
(MARCH)

Protocole expérimental

- ❖ 1) Le résidu de Gardanne a été modifié avec du gypse et des lavages répétés
- ❖ 2) Quatre types d'amendements organiques ont été mélangés avec ce RBM



Compost
(Comp)



Boues de STEP
déchaydratées (STEP)



Substrat de culture de
champignon usagé
(Champost, CH)



Champost + margions /
margines
(MARCH)

- La quantité de chaque amendement a été choisie pour apporter approximativement **la même quantité d'azote total (N_{tot}) dans chaque modalité ($\sim 1.2 \text{ g.kg}^{-1}$)**

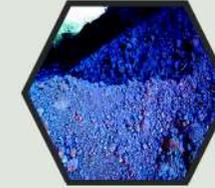
Protocole expérimental

- ❖ 1) Le résidu de Gardanne a été modifié avec **du gypse et des lavages répétés**
- ❖ 2) **Quatre types d'amendements organiques** ont été mélangés avec ce RBM

- ❖ Deux types de semis ont été utilisés
 - l'un composé de **sainfoin et de dactyle**
 - L'autre d'échantillons de sol issus du **crassier de Vitrolles**, contenant **la banque de graines des communautés végétales du crassier.**



Compost
(Comp)



Boues de STEP
déshydratées (STEP)



Substrat de culture de
champignon usagé
(Champost, CH)



Champost + margions /
margines
(MARCH)



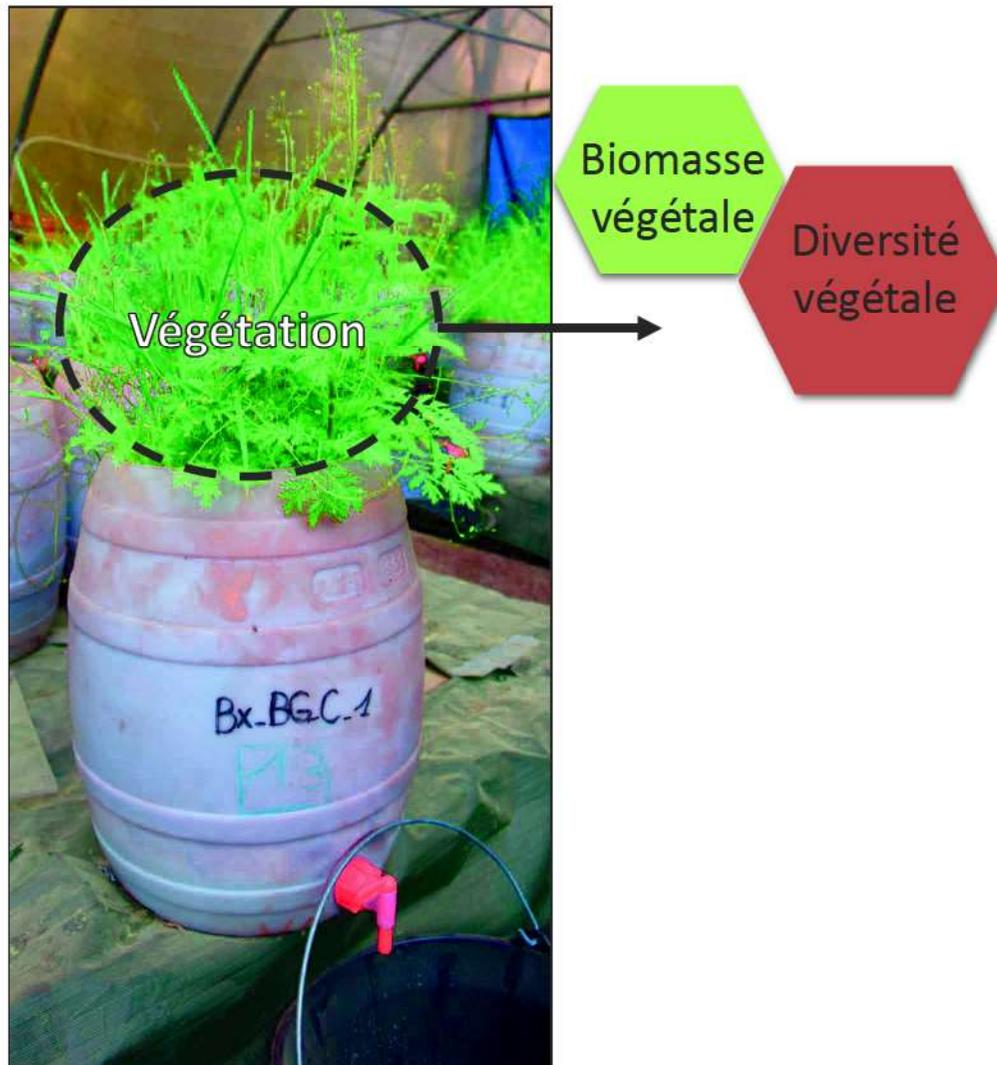
Protocole expérimental

- ❖ Les lysimètres ont été placés 6 mois sous une serre tunnel, avec un arrosage régulier



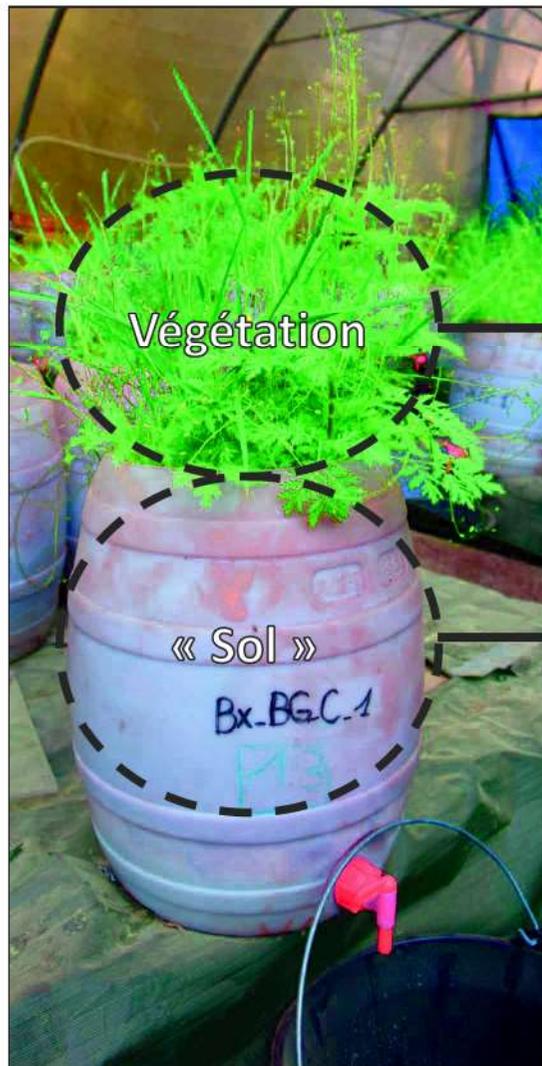
Protocole expérimental

- ❖ Les lysimètres ont été placés 6 mois sous une serre tunnel, avec un arrosage régulier



Protocole expérimental

- ❖ Lysimeters were disposed in a glasshouse during 6 months with regular watering



Biomasse végétale

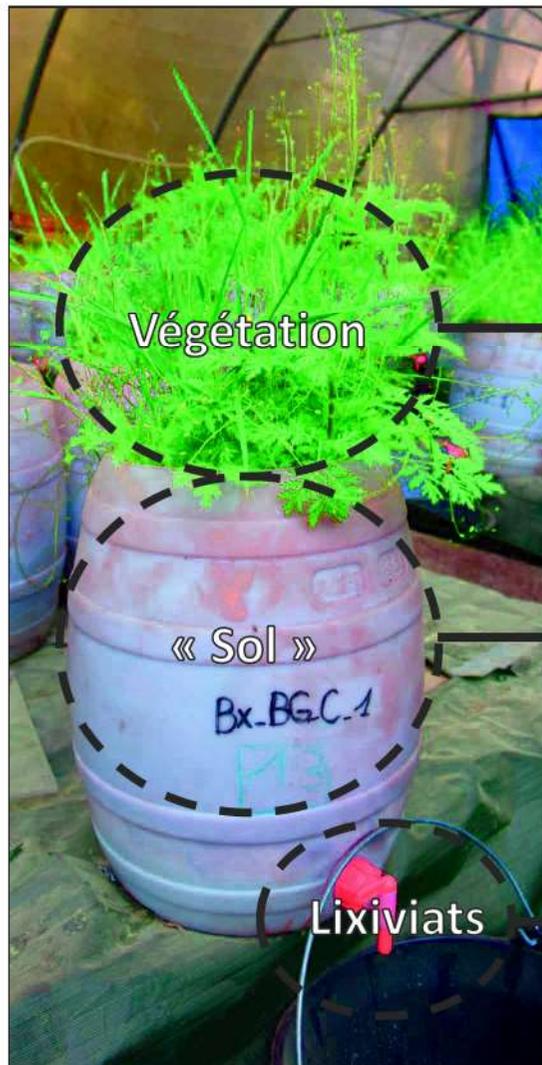
Diversité végétale

Éléments traces et physico-chimie

Activité microbienne

Protocole expérimental

- ❖ Lysimeters were disposed in a glasshouse during 6 months with regular watering



Biomasse végétale

Diversité végétale

Végétation

Activité microbienne

Éléments traces et physico-chimie

« Sol »

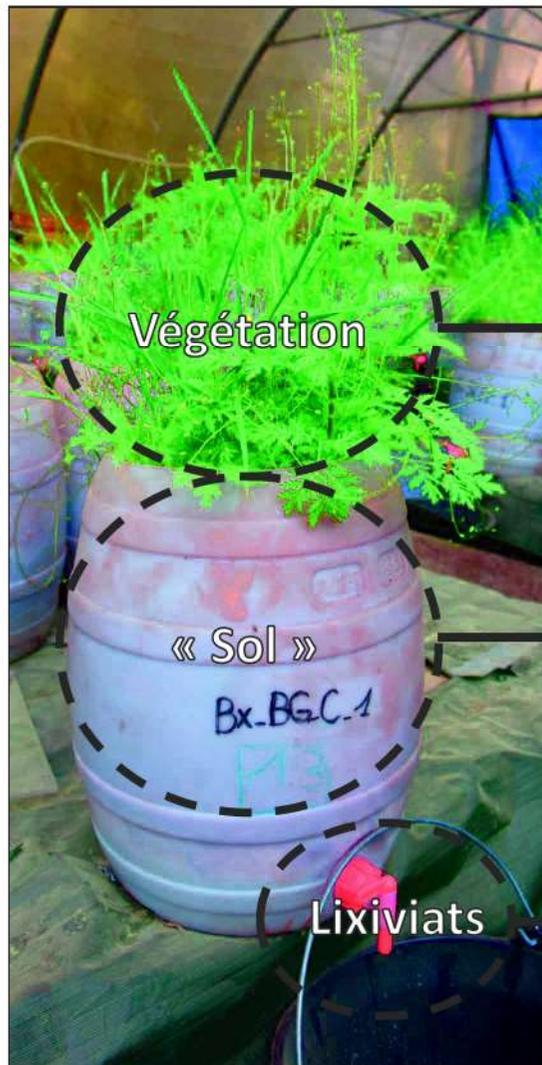
Bx-BGC-1

Lixiviats

Éléments traces et physico-chimie

Protocole expérimental

- ❖ Lysimeters were disposed in a glasshouse during 6 months with regular watering



Biomasse végétale

Diversité végétale

Végétation

Activité microbienne

Éléments traces et physico-chimie

« Sol »

Bx-BGC-1

Lixiviats

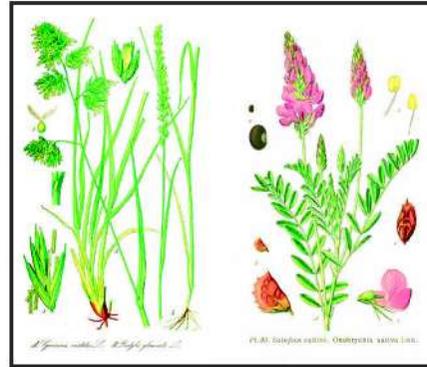
Éléments traces et physico-chimie

Toutes les analyses ont été réalisées au **début (T0)** et à **la fin (T1)** de l'expérience

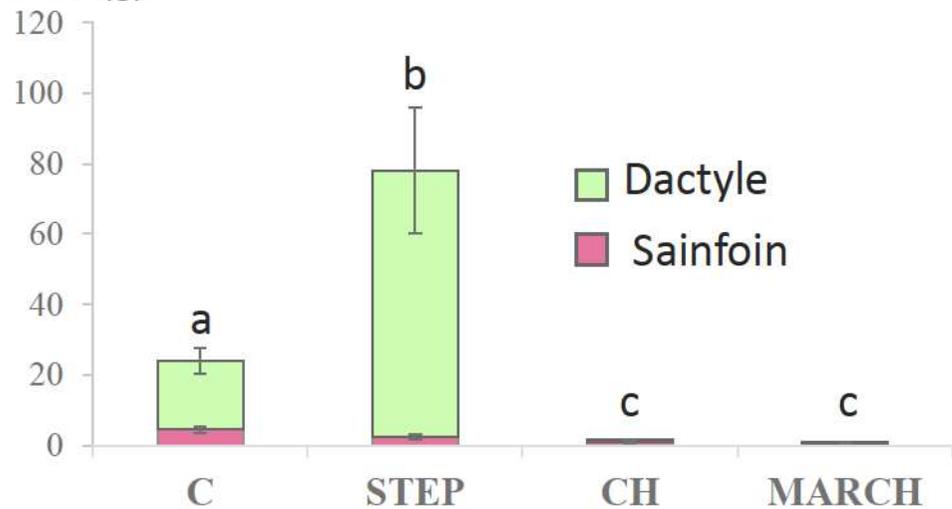
Végétation

- ❖ Après 6 mois, la productivité végétale était très différente selon l'amendement organique utilisé

Dactyle
+ sainfoin



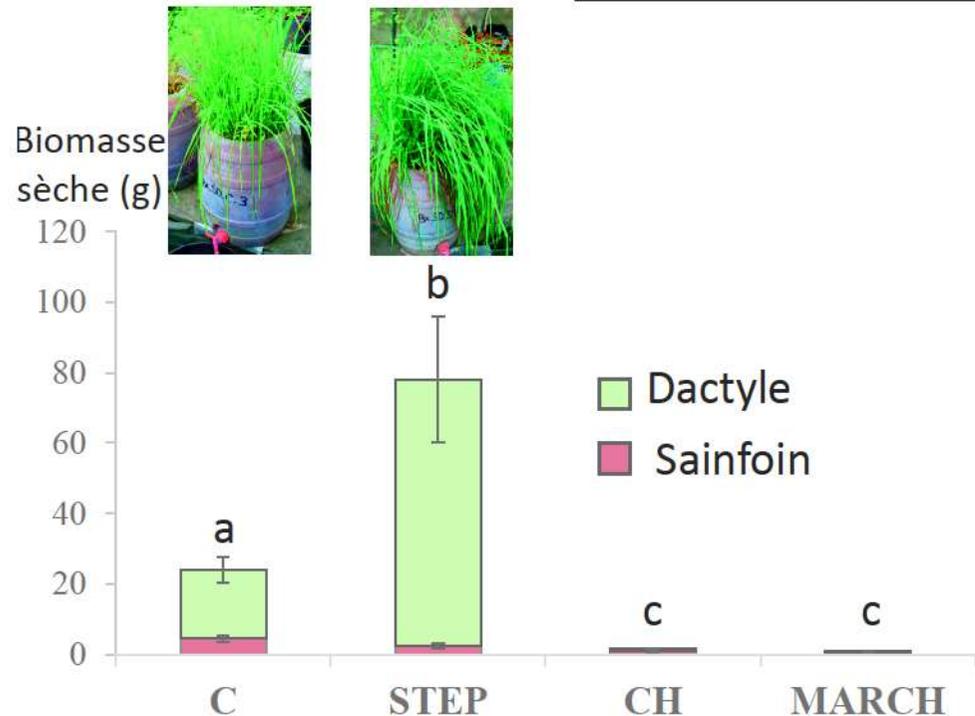
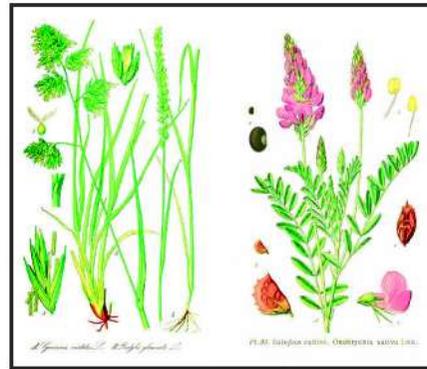
Biomasse
sèche (g)



Végétation

- ❖ Après 6 mois, la productivité végétale était très différente selon l'amendement organique utilisé

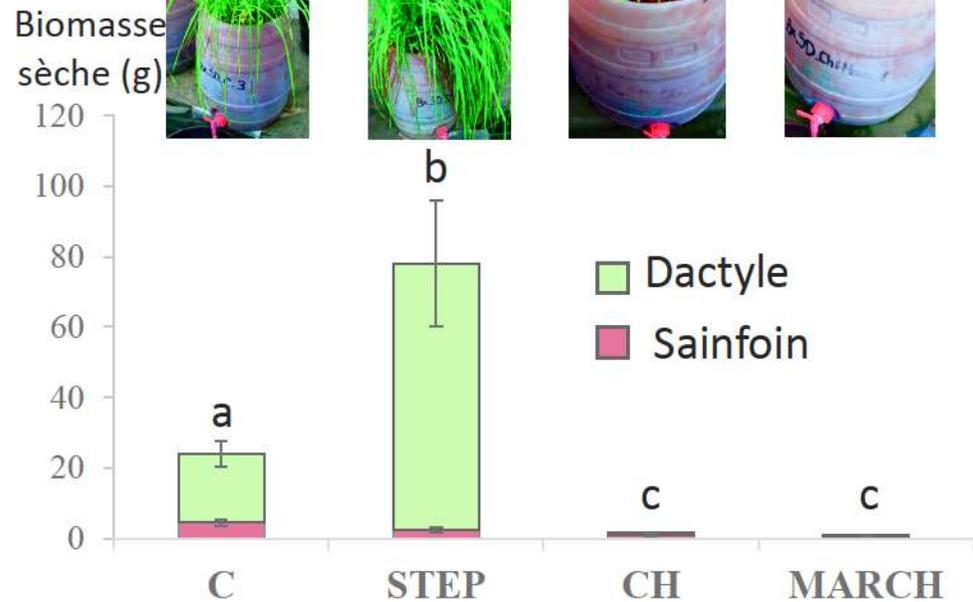
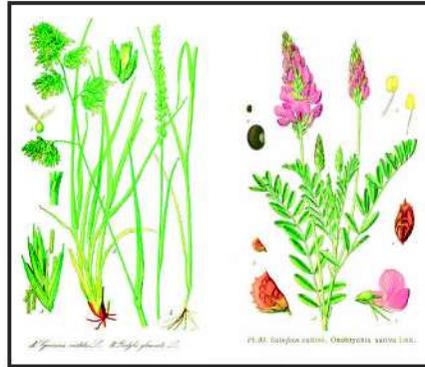
Dactyle
+ sainfoin



Végétation

- ❖ Après 6 mois, la productivité végétale était très différente selon l'amendement organique utilisé

Dactyle
+ sainfoin



Végétation

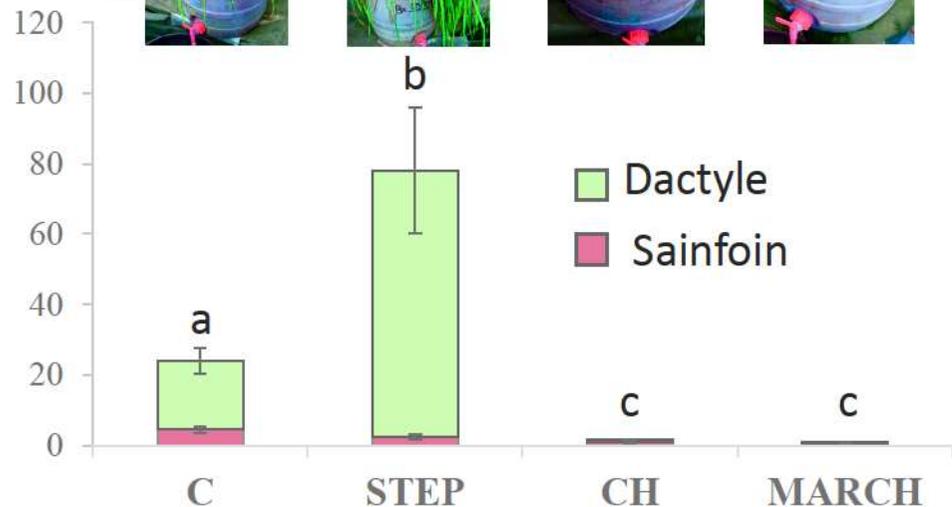
- ❖ Après 6 mois, la productivité végétale était très différente selon l'amendement organique utilisé

Dactyle
+ sainfoin

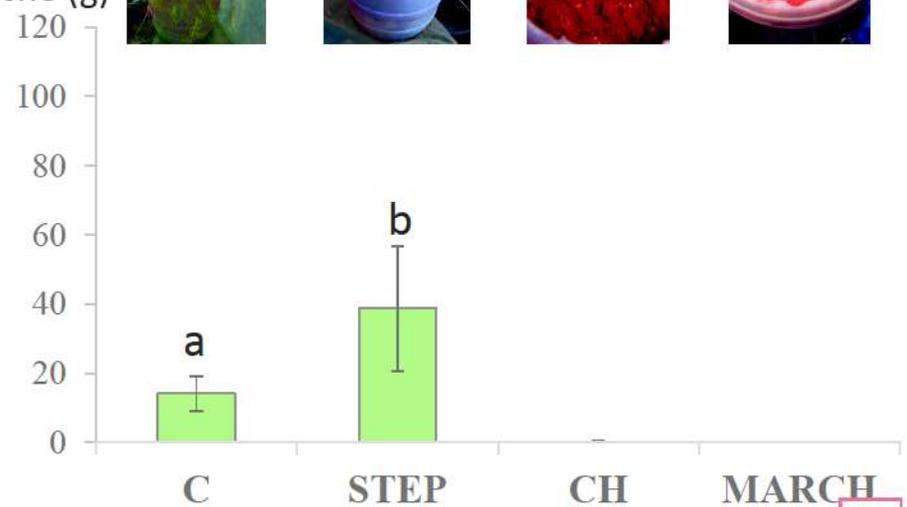


Banque de
graines

Biomasse
sèche (g)



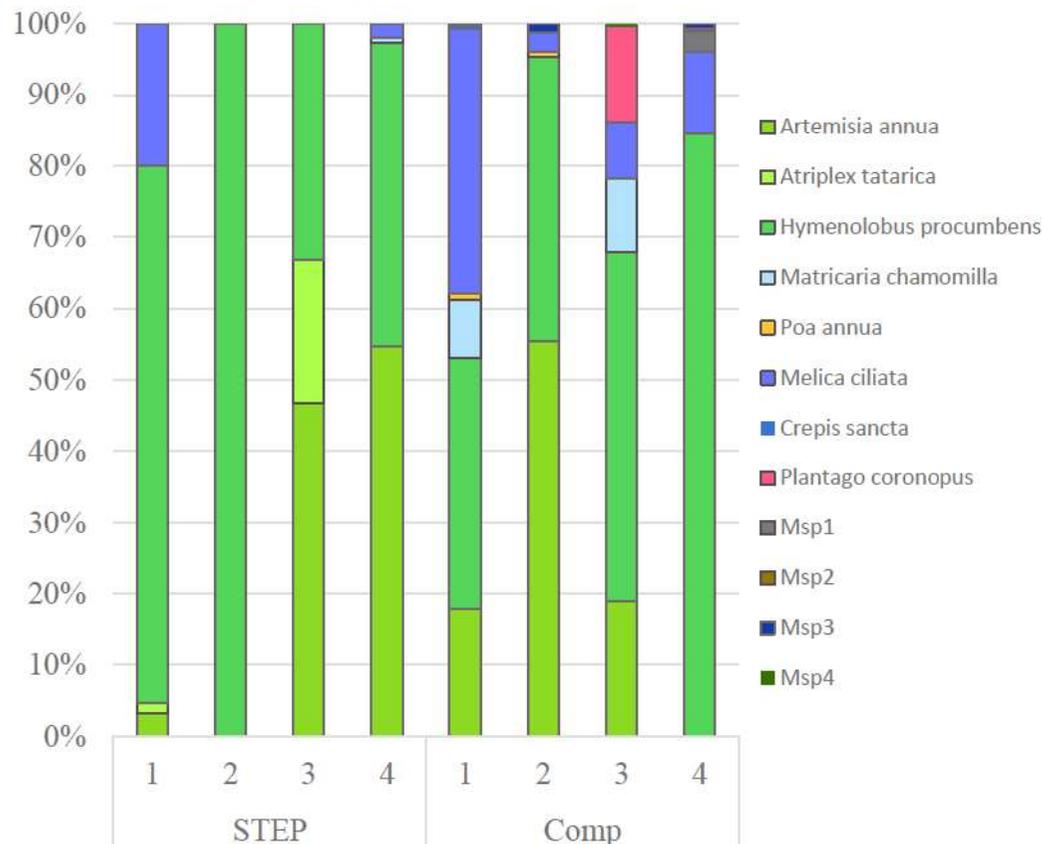
Biomasse
sèche (g)



Végétation

- ❖ Dans la modalité banque de graines, **13 espèces différentes ont été identifiées** dans les modalités Compost et STEP.
- ❖ Le nb d'espèces différentes était plus élevé dans la modalité Compost
- ❖ *Artemisia annua*, *Hymenolobus procumbens* et *Atriplex tatarica* étaient les espèces dominantes

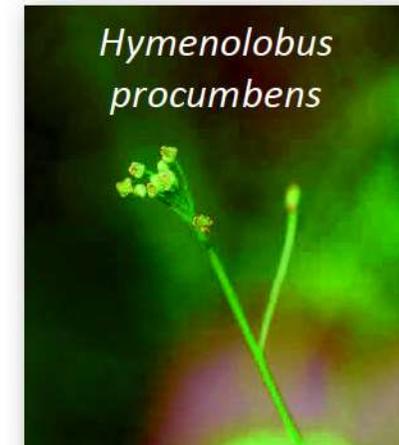
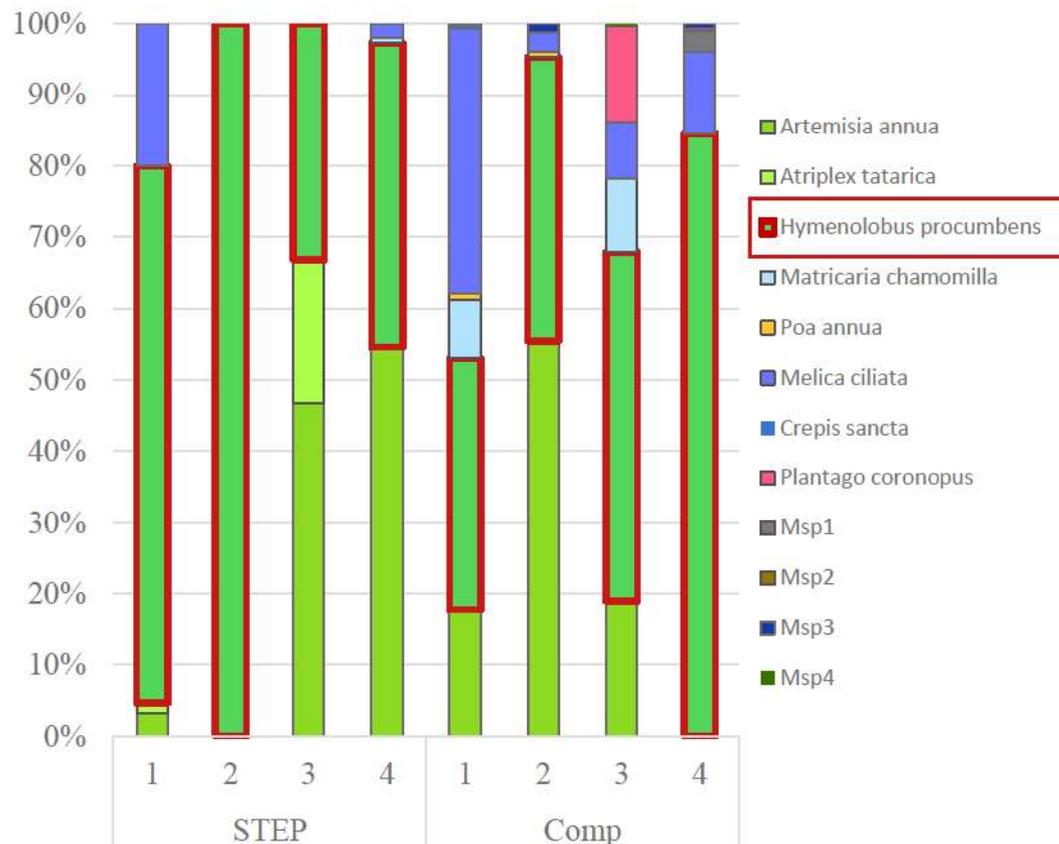
Biomasse relative (%)



Végétation

- ❖ Dans la modalité banque de graines, **13 espèces différentes ont été identifiées** dans les modalités Compost et STEP.
- ❖ Le nb d'espèces différentes était plus élevé dans la modalité Compost
- ❖ *Artemisia annua*, *Hymenolobus procumbens* et *Atriplex tatarica* étaient les espèces dominantes

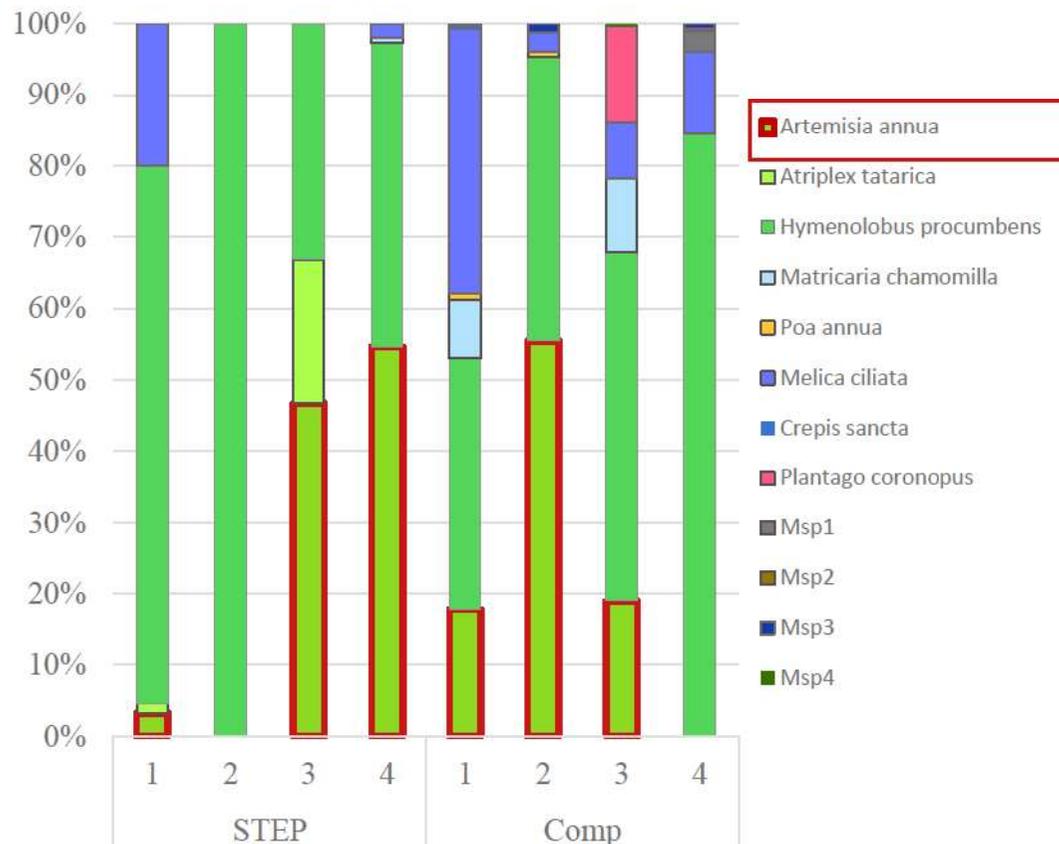
Biomasse relative (%)



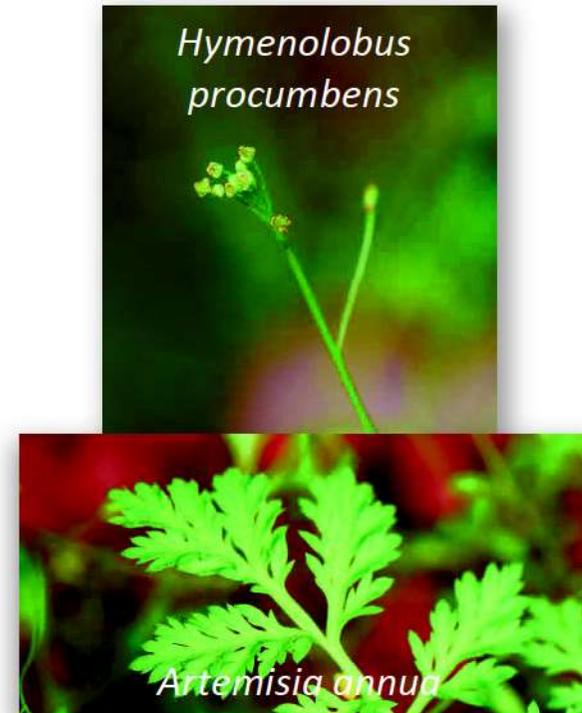
Végétation

- ❖ Dans la modalité banque de graines, **13 espèces différentes ont été identifiées** dans les modalités Compost et STEP.
- ❖ Le nb d'espèces différentes était plus élevé dans la modalité Compost
- ❖ *Artemisia annua*, *Hymenolobus procumbens* et *Atriplex tatarica* étaient les espèces dominantes

Biomasse relative (%)



Hymenolobus procumbens

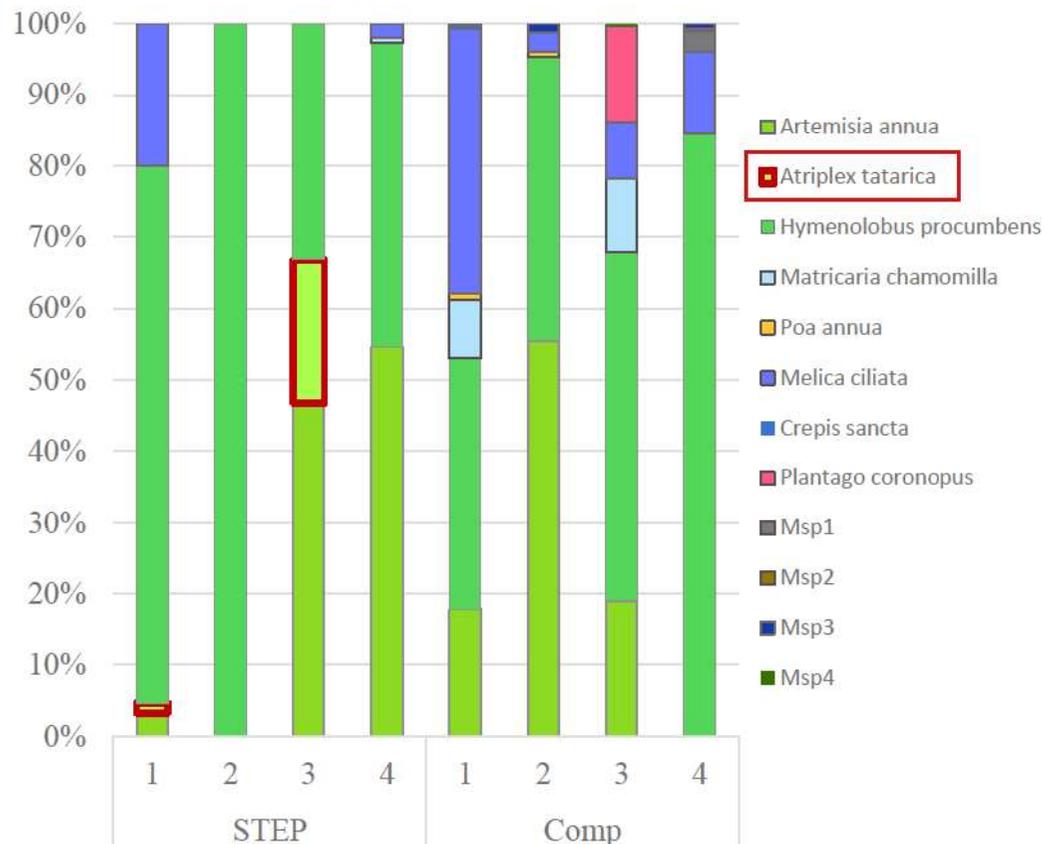


Artemisia annua

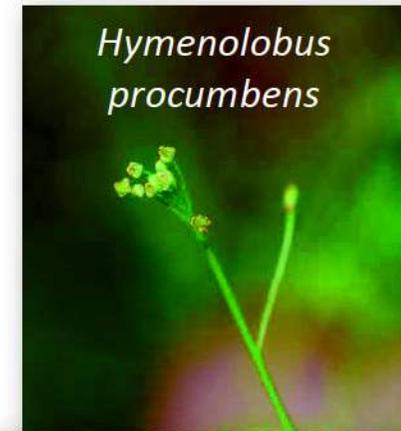
Végétation

- ❖ Dans la modalité banque de graines, **13 espèces différentes ont été identifiées** dans les modalités Compost et STEP.
- ❖ Le nb d'espèces différentes était plus élevé dans la modalité Compost
- ❖ *Artemisia annua*, *Hymenolobus procumbens* et *Atriplex tatarica* étaient les espèces dominantes

Biomasse relative (%)



Hymenolobus procumbens



Artemisia annua

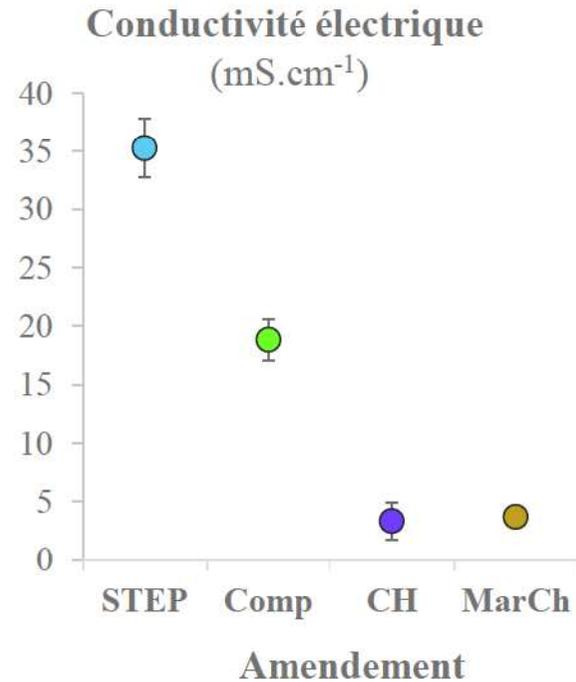
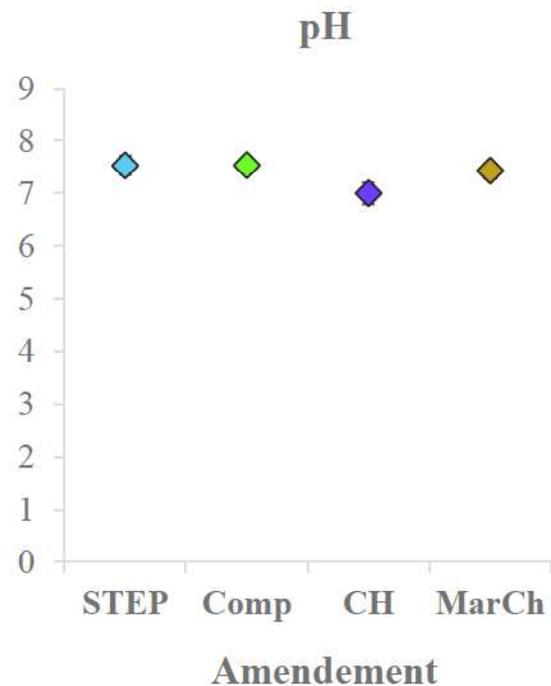


Atriplex tatarica



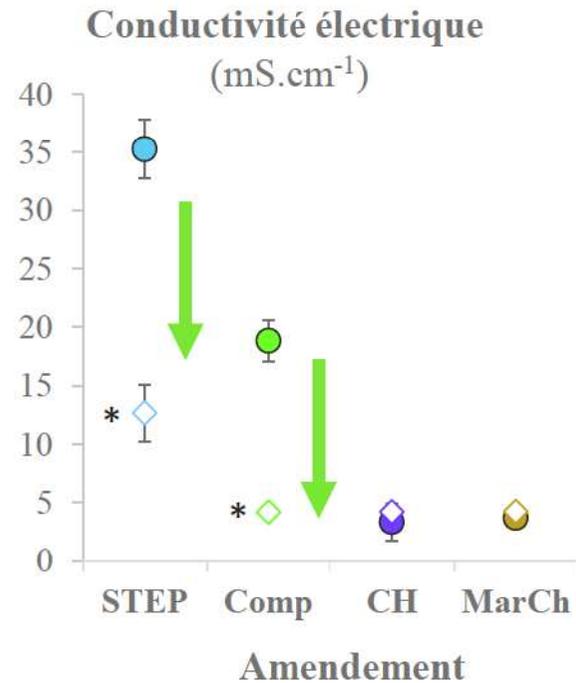
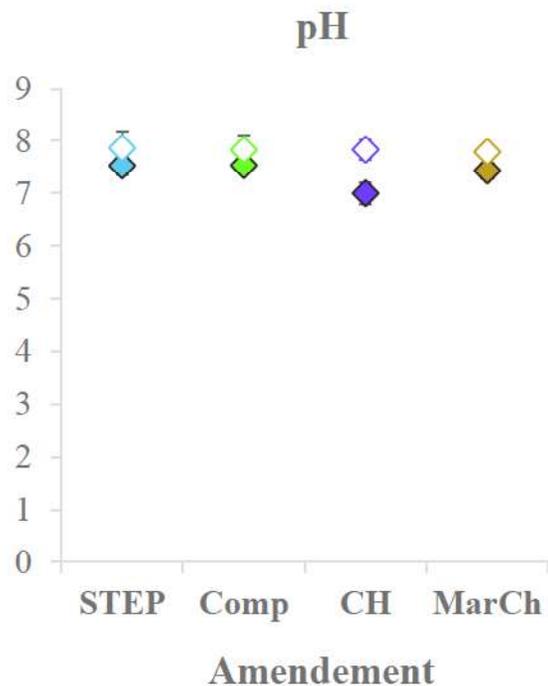
Lixiviats

- ❖ Entre le début et la fin de l'expérience, la qualité des lixiviats s'est améliorée
- ❖ Le pH n'a pas beaucoup varié, tandis que la conductivité électrique a été beaucoup réduite dans les modalités STEP et Compost.



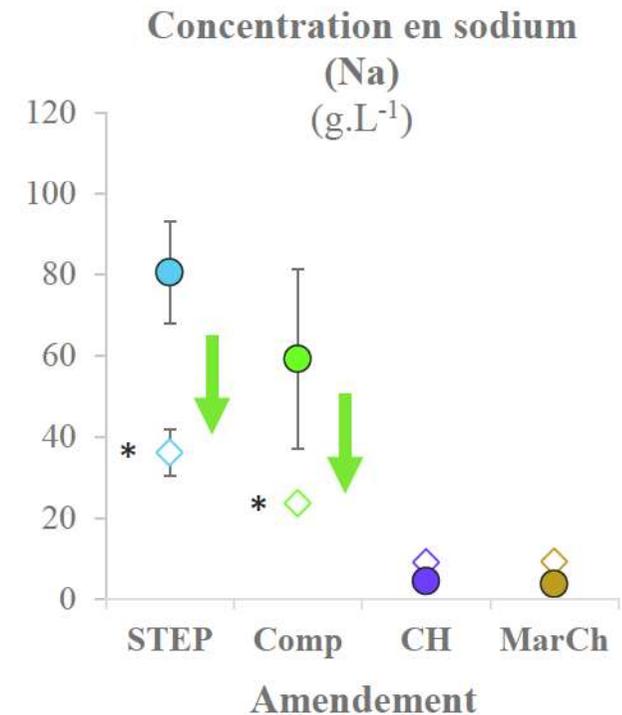
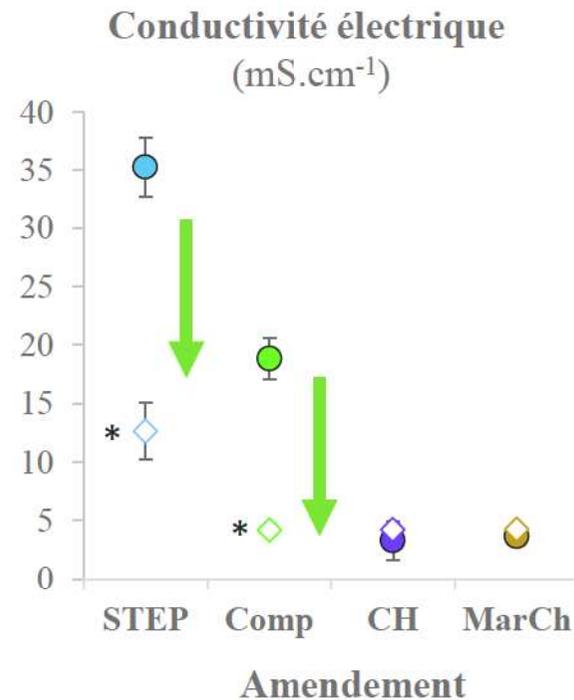
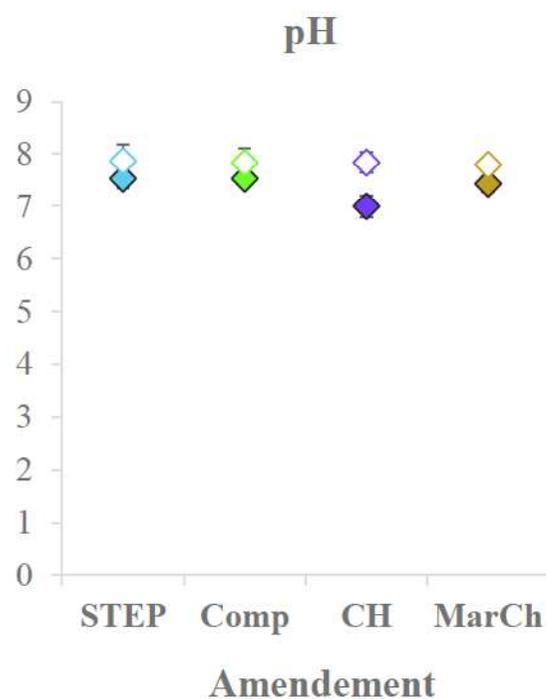
Lixiviats

- ❖ Entre le début et la fin de l'expérience, la qualité des lixiviats s'est améliorée
- ❖ Le pH n'a pas beaucoup varié, tandis que la conductivité électrique a été beaucoup réduite dans les modalités STEP et Compost.



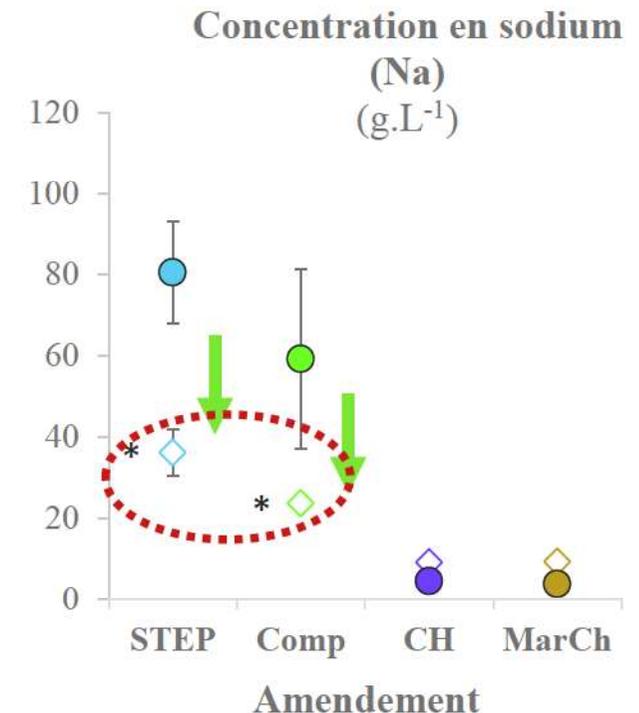
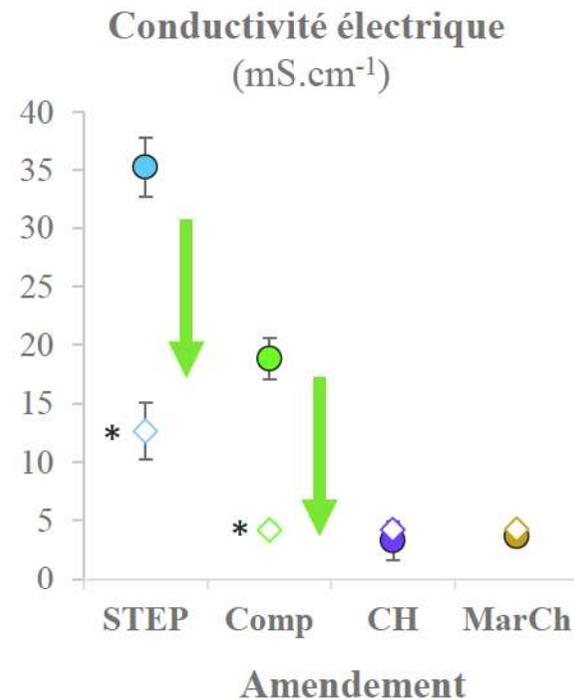
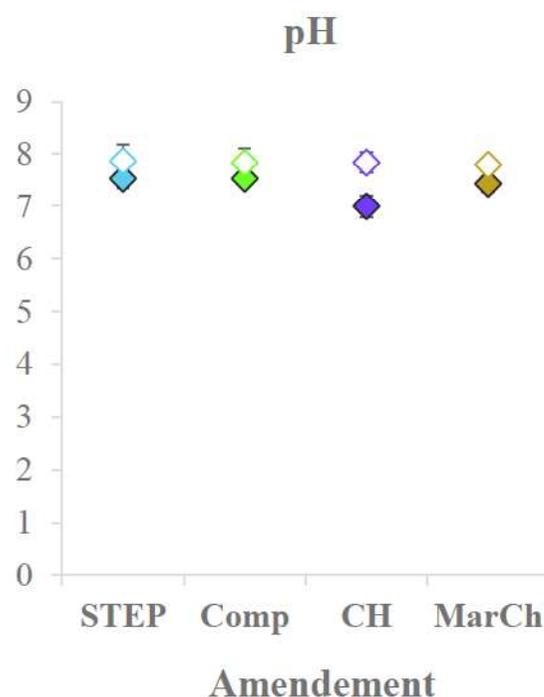
Lixiviats

- ❖ Entre le début et la fin de l'expérience, la qualité des lixiviats s'est améliorée
- ❖ Le pH n'a pas beaucoup varié, tandis que la conductivité électrique a été beaucoup réduite dans les modalités STEP et Compost.



Leachates

- ❖ Entre le début et la fin de l'expérience, la qualité des lixiviats s'est améliorée
- ❖ Le pH n'a pas beaucoup varié, tandis que la conductivité électrique a été beaucoup réduite dans les modalités STEP et Compost.



- ❖ **De fortes concentrations en Na ont été mesurées dans les lixiviats, même après 6 mois de drainage.**

Lixiviats

- ❖ Au début de l'expérience, la concentration en certains éléments étaient supérieures au seuils légaux (Article 32 – Arrêté du 2 février 1998, version 2018)

T0

T1

| | Cu | Cr | Mn | Fe+Al | Ni | Others | Cu | Cr | Mn | Fe+Al | Ni | Others |
|--------------------------|----|----|----|-------|----|--------|----|----|----|-------|----|--------|
| SD_STEP | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | | | | | | |
| SD_Compost | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | |
| SD_Champost | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | | | | | | |
| SD_Ch + olive mill waste | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | | | | | | |
| BG_STEP | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | | | | | | |
| BG_Compost | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | |

Lixiviats

- ❖ Au début de l'expérience, la concentration en certains éléments étaient supérieures au seuils légaux (Article 32 – Arrêté du 2 février 1998, version 2018)

| | T0 | | | | | | T1 | | | | | |
|--------------------------|----|----|----|-------|----|--------|----|----|----|-------|----|--------|
| | Cu | Cr | Mn | Fe+Al | Ni | Others | Cu | Cr | Mn | Fe+Al | Ni | Others |
| SD_STEP | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| SD_Compost | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| SD_Champost | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| SD_Ch + olive mill waste | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| BG_STEP | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| BG_Compost | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Lixiviats

❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviats ? → Tests de germination



Moutarde blanche



Dactyle



Sainfoin

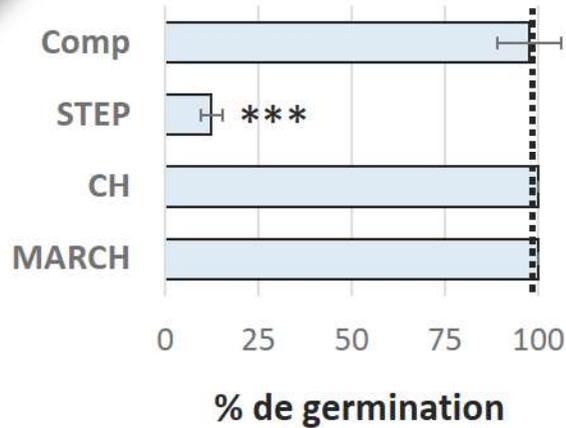
Lixiviats

❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviat ? → Tests de germination

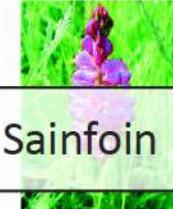
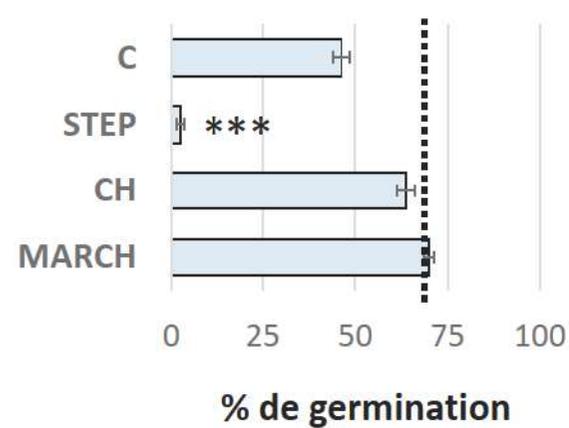
T0



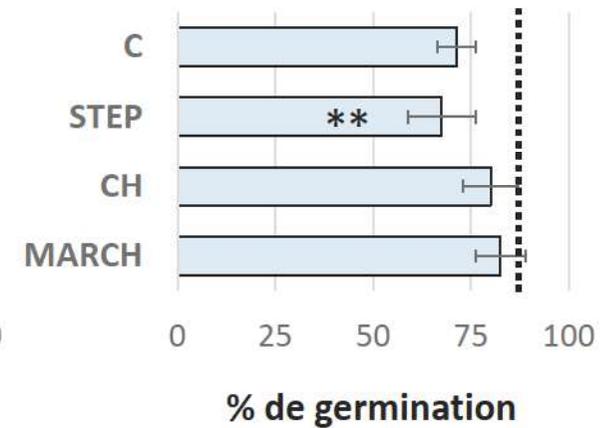
Moutarde blanche



Dactyle



Sainfoin



Lixiviats

❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviat ? → Tests de germination

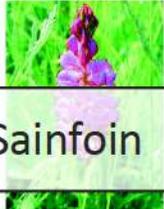
T0



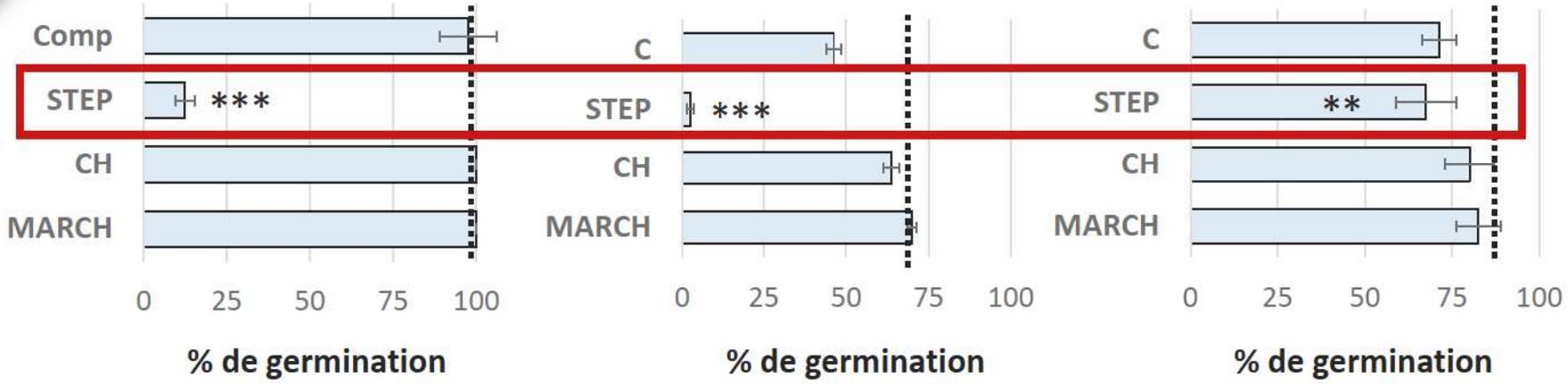
Moutarde blanche



Dactyle



Sainfoin



Lixiviats

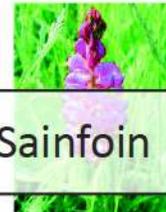
❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviat ? → Tests de germination



Moutarde blanche

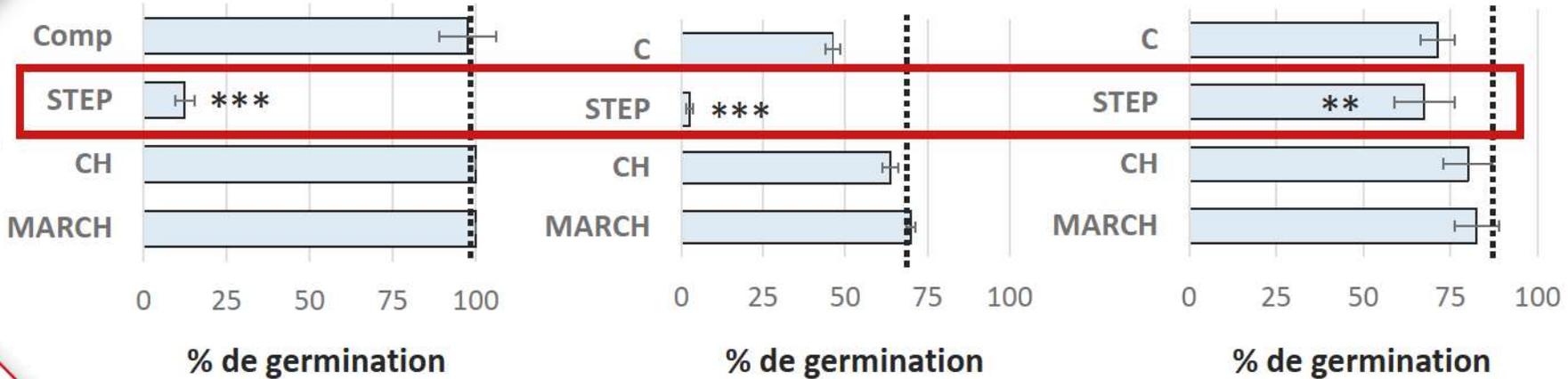


Dactyle

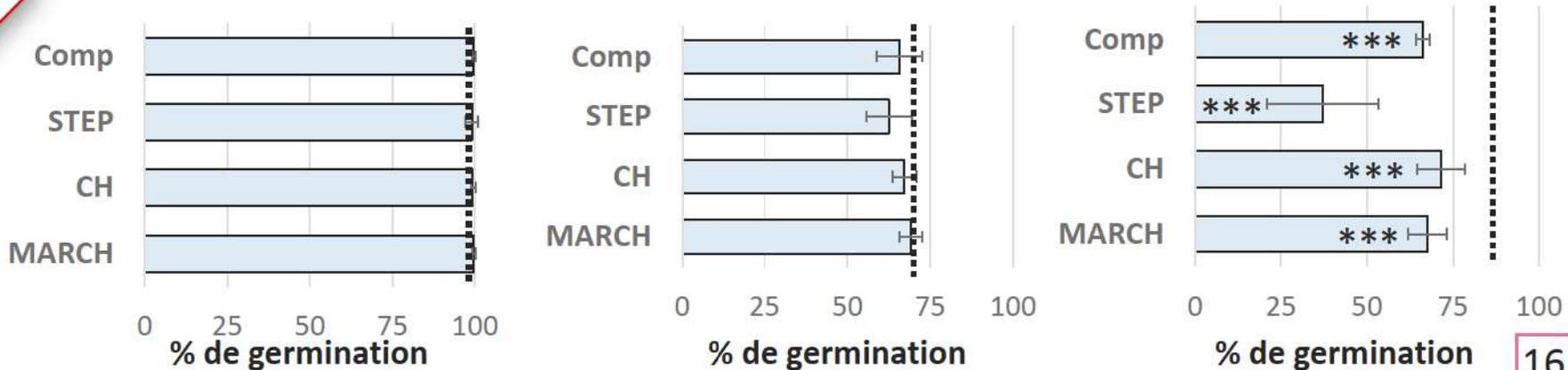


Sainfoin

T0



T1

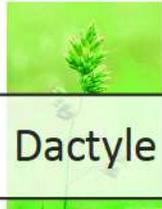


Lixiviats

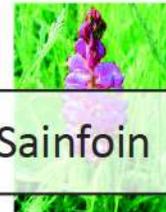
❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviat ? → Tests de germination



Moutarde blanche

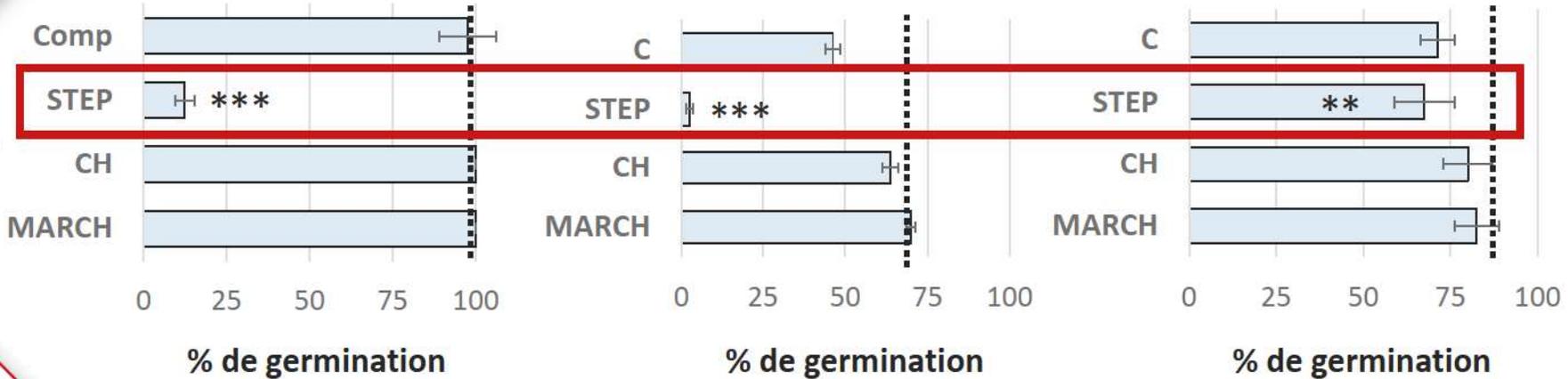


Dactyle

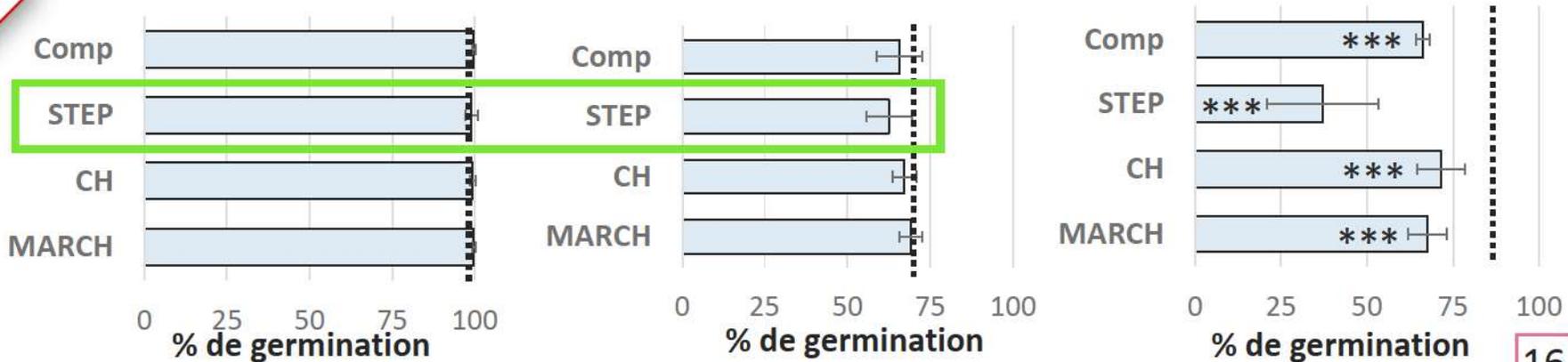


Sainfoin

T0



T1



Lixiviats

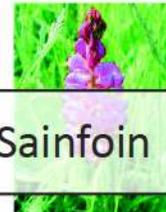
❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviat ? → Tests de germination



Moutarde blanche

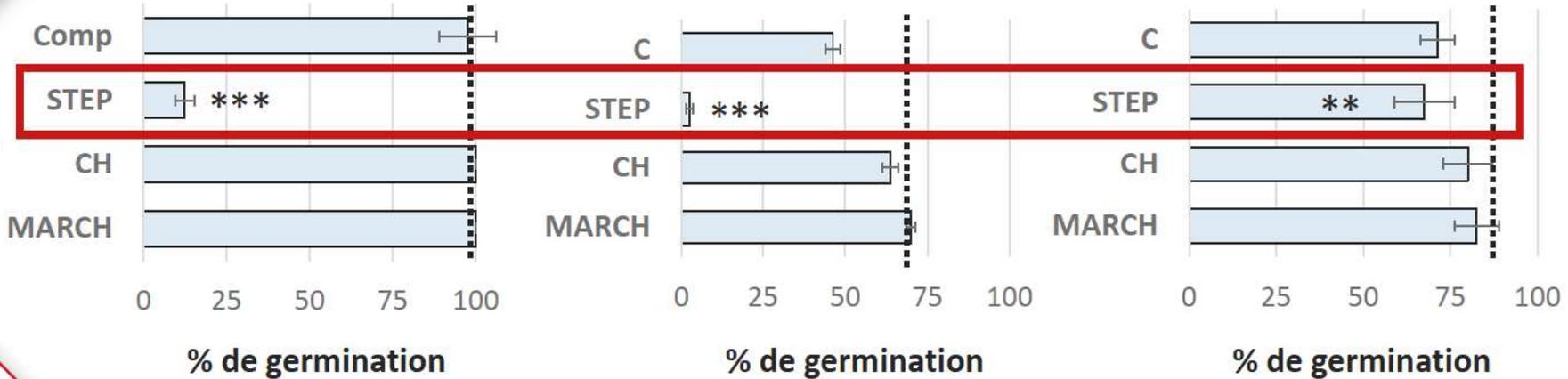


Dactyle

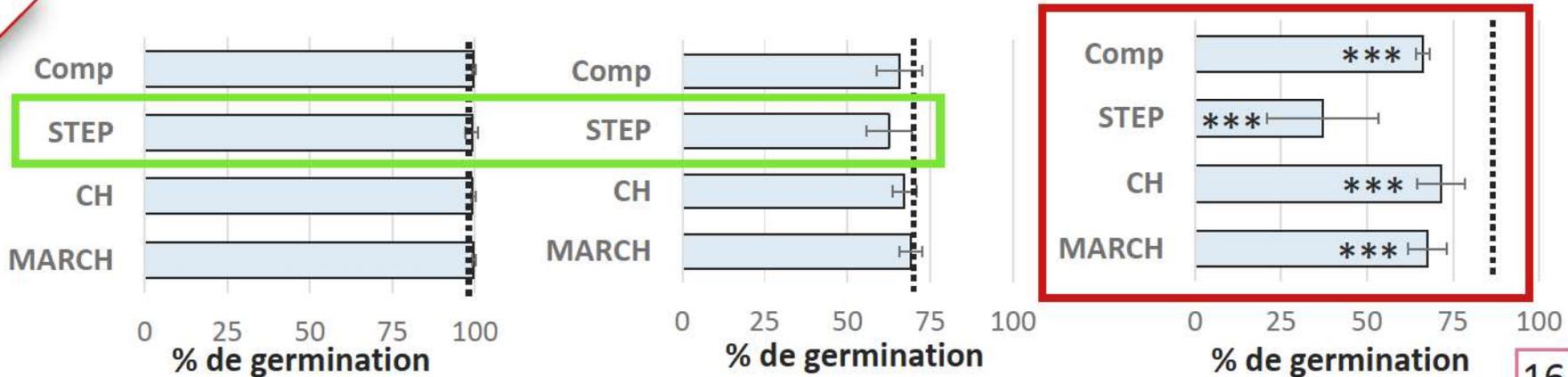


Sainfoin

T0



T1



Lixiviats

❖ Y-a-t-il une toxicité liée aux lixiviat ? → Tests de germination



Moutarde blanche

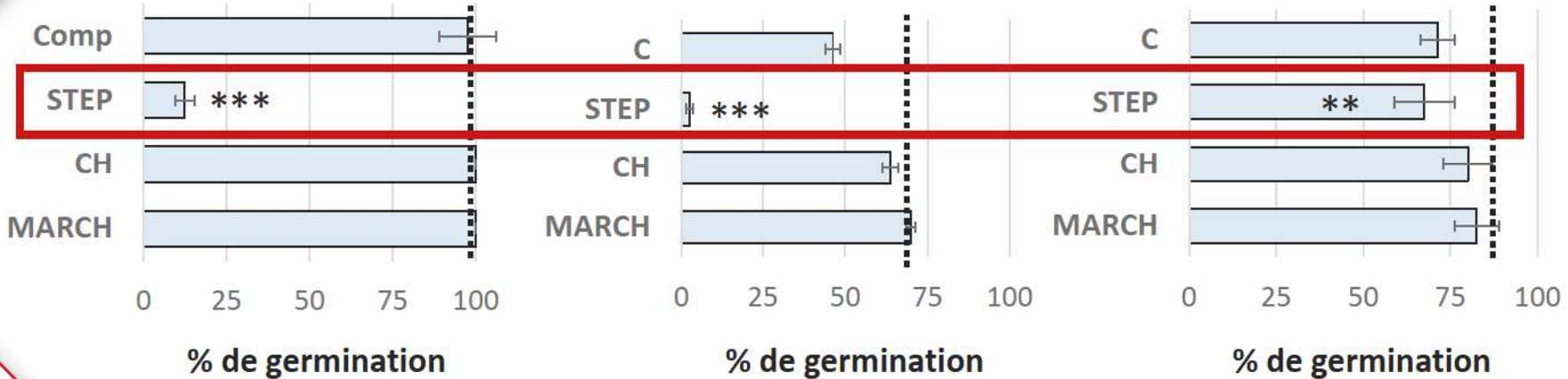


Dactyle

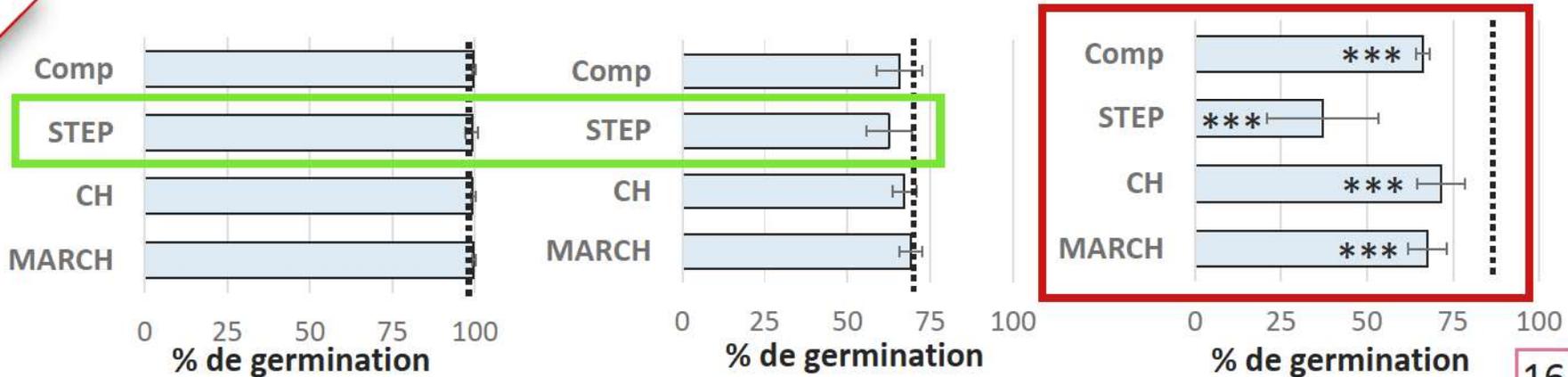


Sainfoin

T0



T1



Synthèse globale et perspectives de recherche

1. Étude de terrain et expériences en laboratoire

- **L'origine du résidu** module son impact
- **La conductivité électrique, la concentration en Na et en MO / nutriments** sont les principaux drivers des activités biologiques, plutôt que le pH.
- **Le traitement au gypse est efficace pour réduire la toxicité** des résidus de bauxite envers les plantes et les microorganismes.



Synthèse globale et perspectives de recherche

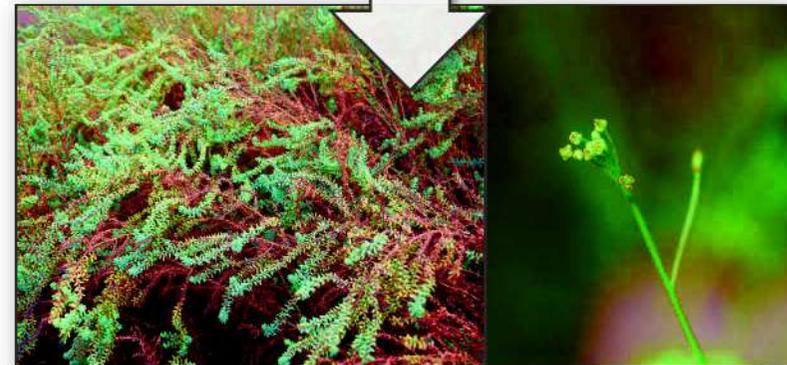
1. Étude de terrain et expériences en laboratoire

- **L'origine du résidu** module son impact
- **La conductivité électrique, la concentration en Na et en MO / nutriments** sont les principaux drivers des activités biologiques, plutôt que le pH.
- **Le traitement au gypse est efficace pour réduire la toxicité** des résidus de bauxite envers les plantes et les microorganismes.



- Une **biodiversité atypique** a été observée sur le Griffon

Espèces halophiles / alkalotolérantes



Phytoremediation ?
Phytoextraction ?
Phytostabilisation ?

Synthèse globale et perspectives de recherche

2. Expérience en lysimètres

- La modification d'un résidu par apport de gypse et d'amendements organiques permet le développement de plantes et d'une activité microbienne

Certains amendements étaient plus adaptés que d'autres



Synthèse globale et perspectives de recherche

2. Expérience en lysimètres

- La modification d'un résidu par apport de gypse et d'amendements organiques permet le développement de plantes et d'une activité microbienne

Certains amendements étaient plus adaptés que d'autres



Cependant, certaines questions doivent être résolues pour assurer le succès de cette méthode sur le long terme.

Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?

Fabaceae ?

Besoin de trouver
une meilleure
candidate.
Cycle de l'azote



Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?

Fabaceae ?

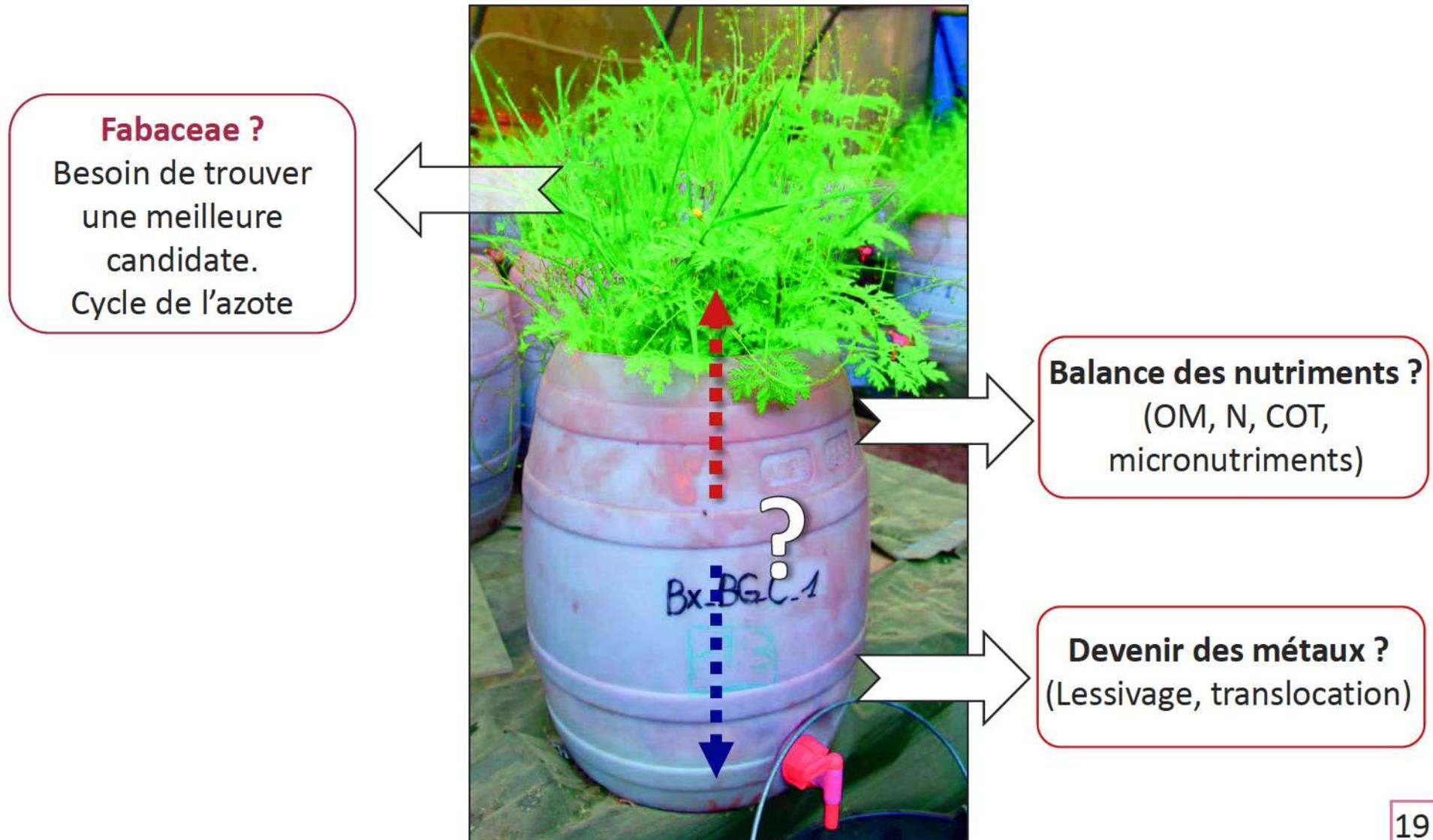
Besoin de trouver
une meilleure
candidate.
Cycle de l'azote



Balance des nutriments ?
(OM, N, COT,
micronutriments)

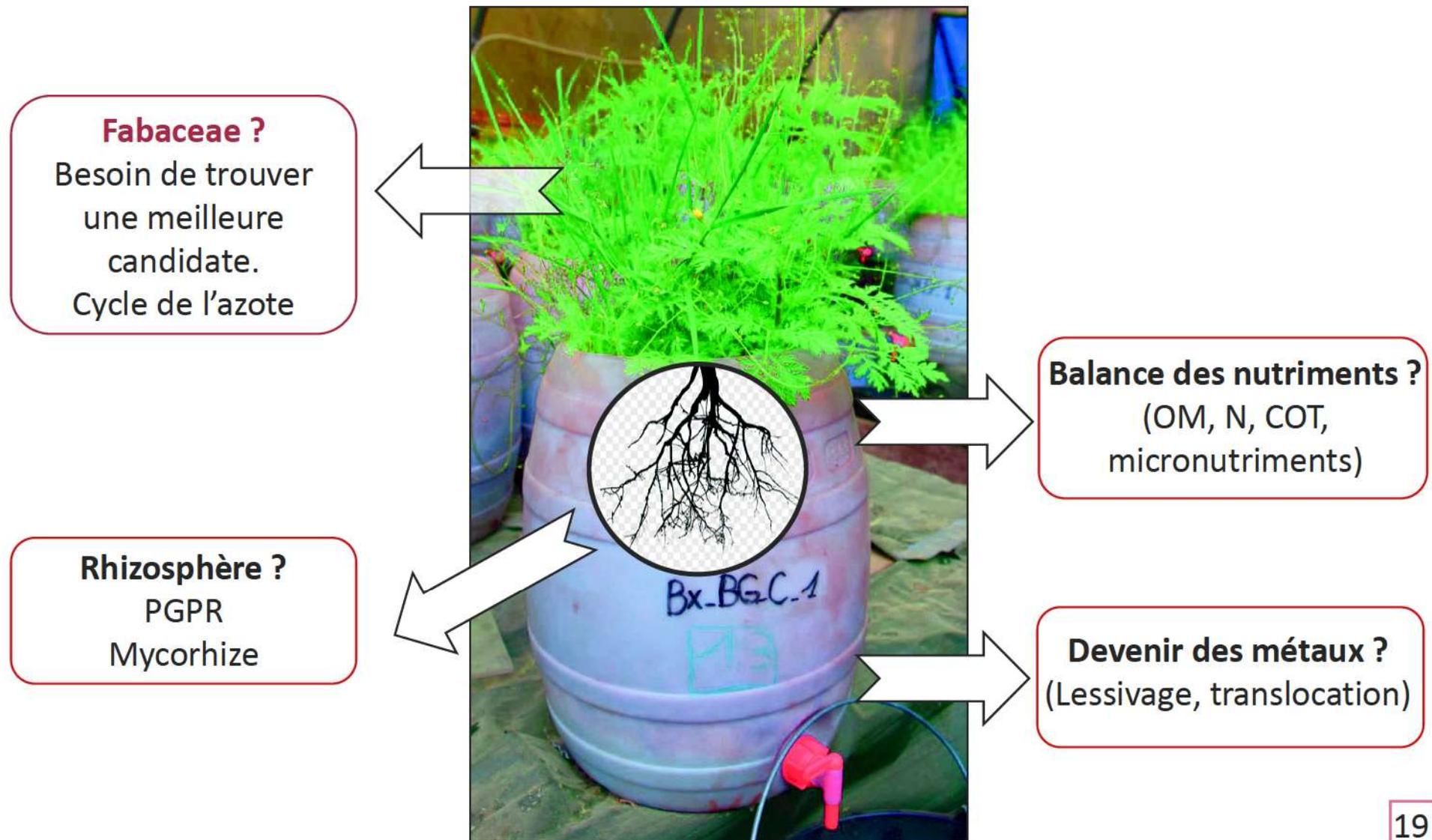
Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?



Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?



Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?

Fabaceae ?

Besoin de trouver
une meilleure
candidate.
Cycle de l'azote

Rhizosphère ?

PGPR
Mycorhize



Faune du sol ?

Identification
Utilisation ?

Balance des nutriments ?

(OM, N, COT,
micronutriments)

Devenir des métaux ?

(Lessivage, translocation)

Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?

Ces questions doivent être explorées à des échelles de temps et d'espace plus grandes



Lysimètres



Parcelle

Synthèse globale et perspectives de recherche

➤ Des résidus miniers au technosol ?

Ces questions doivent être explorées à des échelles de temps et d'espace plus grandes



Lysimètres



Parcelle

- Expérience en cours sur le site de stockage de Mange-Garri, qui est destinée à être suivie plusieurs années.

MERCI DE VOTRE ATTENTION



Aix*Marseille
université

imbe
Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie
marine et continentale

ohm
Observatoires
Hommes-Milieus

OHM
Bassin minier de Provence

Pour toutes questions : fourrier.camille@gmail.com