



Thèse de doctorat

Mention Sciences et Techniques de l'Environnement

# Devenir des micropolluants dans un filtre planté de roseaux traitant les eaux de ruissellement de voirie – Importance des communautés microbiennes

Présentée par **Julia ROUX**

Sous la direction de :

**Nouredine Bousserhine** (LEESU)

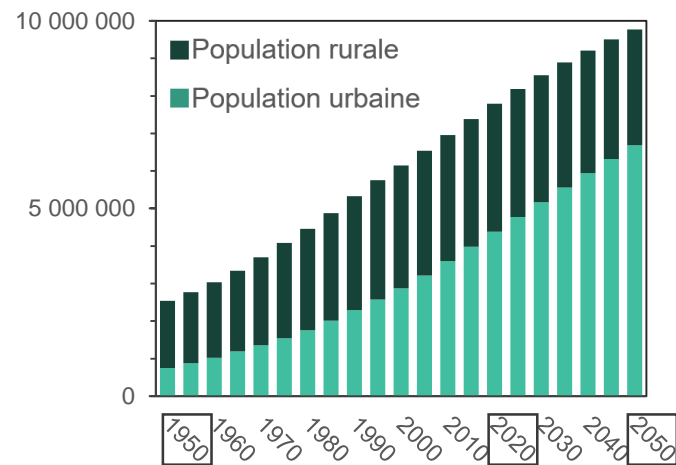
**Martin SEIDL** (LEESU)

**Pascale NEVEU** (DPE, Ville de Paris)



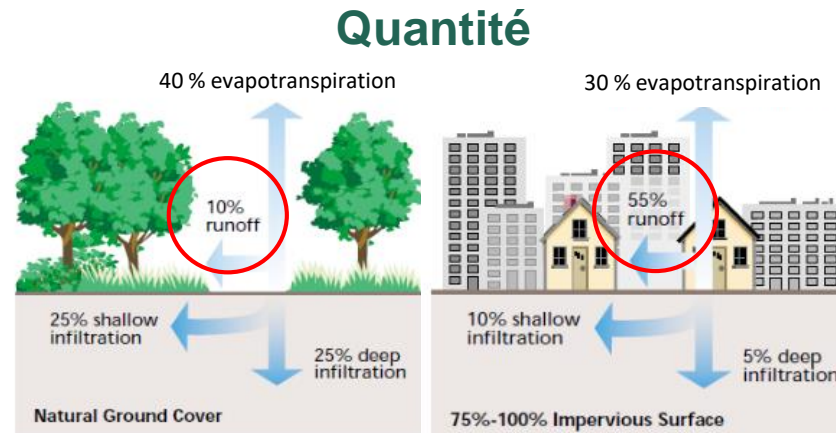
# Introduction

## • Contexte : Urbanisation et eaux pluviales

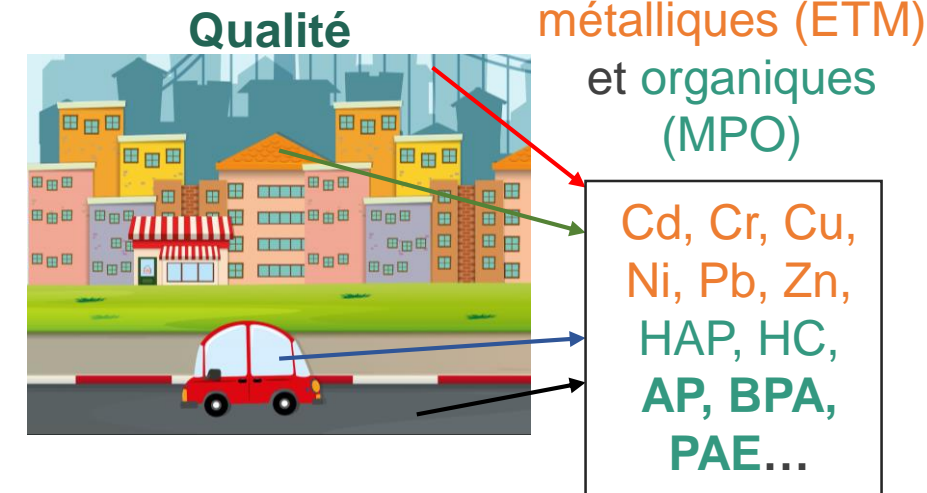


Urbaine 30 % 56 % 68 %

Nombre d'habitants dans le monde  
- Données issues des Nations Unies



Relation entre la couverture imperméable  
et le ruissellement - FISRWG, 1998



Atmosphère ; Bâtiments ; Véhicules ; Chaussées.

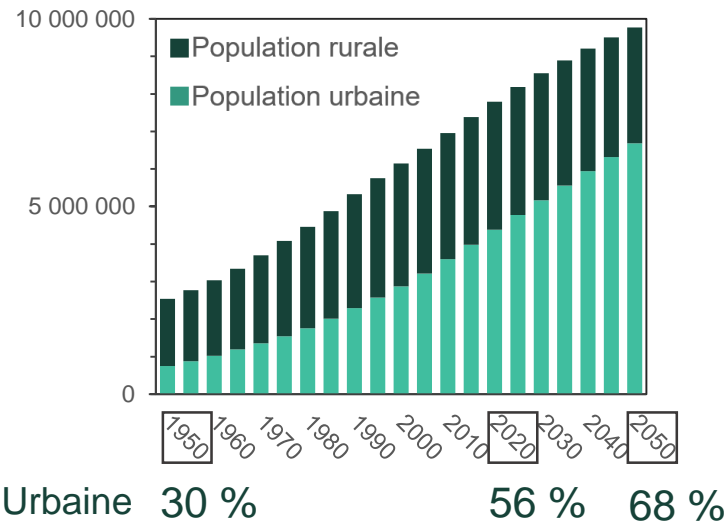
Sources de micropolluants par les voiries urbaines -  
Lamprea et al., 2017, Markiewicz et al., 2017 ; Revitt et al., 2014

Population urbaine **croissante** → Accroissement de l'urbanisation → **Conséquences** sur les **eaux pluviales**

- **Quantité** : accroissement des volumes ruisselés au profit de ceux infiltrés
- **Qualité** : contamination des eaux de ruissellement : dépôts secs et humides, lessivage des surfaces

## • Contexte : Urbanisation et eaux pluviales

### Quantité

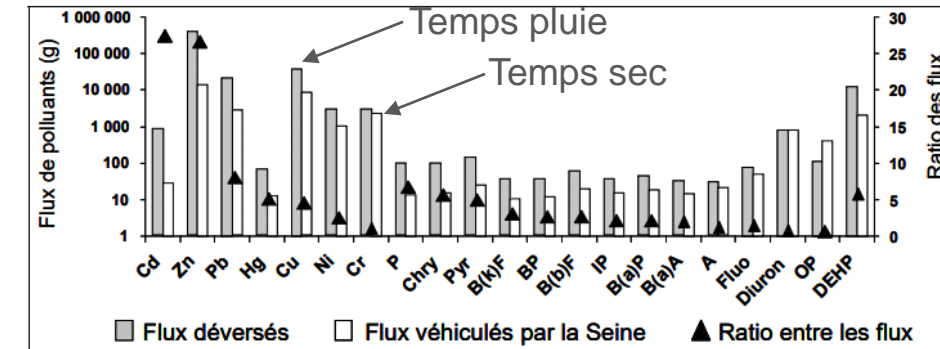


Nombre d'habitants dans le monde  
- Données issues des Nations Unies



Inondations à Paris en 2021- Image : Radio France

### Qualité



Comparaison des flux de polluants déversés par temps de pluie à ceux véhiculés par la Seine par temps sec  
- Gasperi et al., 2010

Une population urbaine **croissante** → Accroissement de l'urbanisation → **Conséquences** sur les **eaux pluviales**

### Impacts :

- **Quantité** : **Surcharge** des stations d'épurations et risques **d'inondations**
- **Qualité** : **Dégradation** de la qualité des milieux récepteurs

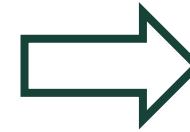
Une **gestion** nécessaire  
des eaux de ruissellement  
contaminées (IPPC, 2022)



- Contexte : Gestion des eaux de ruissellement

**Objectifs : Fin XX<sup>e</sup> siècle à aujourd'hui** (*Chocat, 2008*)

- Désaturer les réseaux d'assainissement traditionnels
- Réintégrer l'eau et les espaces verts en ville
- Améliorer la qualité de l'eau



Développement d'Ouvrages de  
Gestion des Eaux Pluviales

(*Maigne, 2006*)

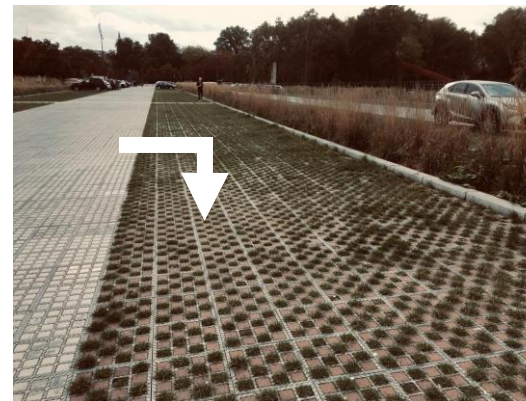
Un nombre **croissant** d'ouvrages (*Fletcher et al., 2015*) : stockage et/ou traitement des eaux



*Bassin d'infiltration*  
- *Tedoldi, 2017*



*Noue*  
- *Roux, 2019*



*Revêtement perméable –*  
*Guide bâtiment durable, 2019*

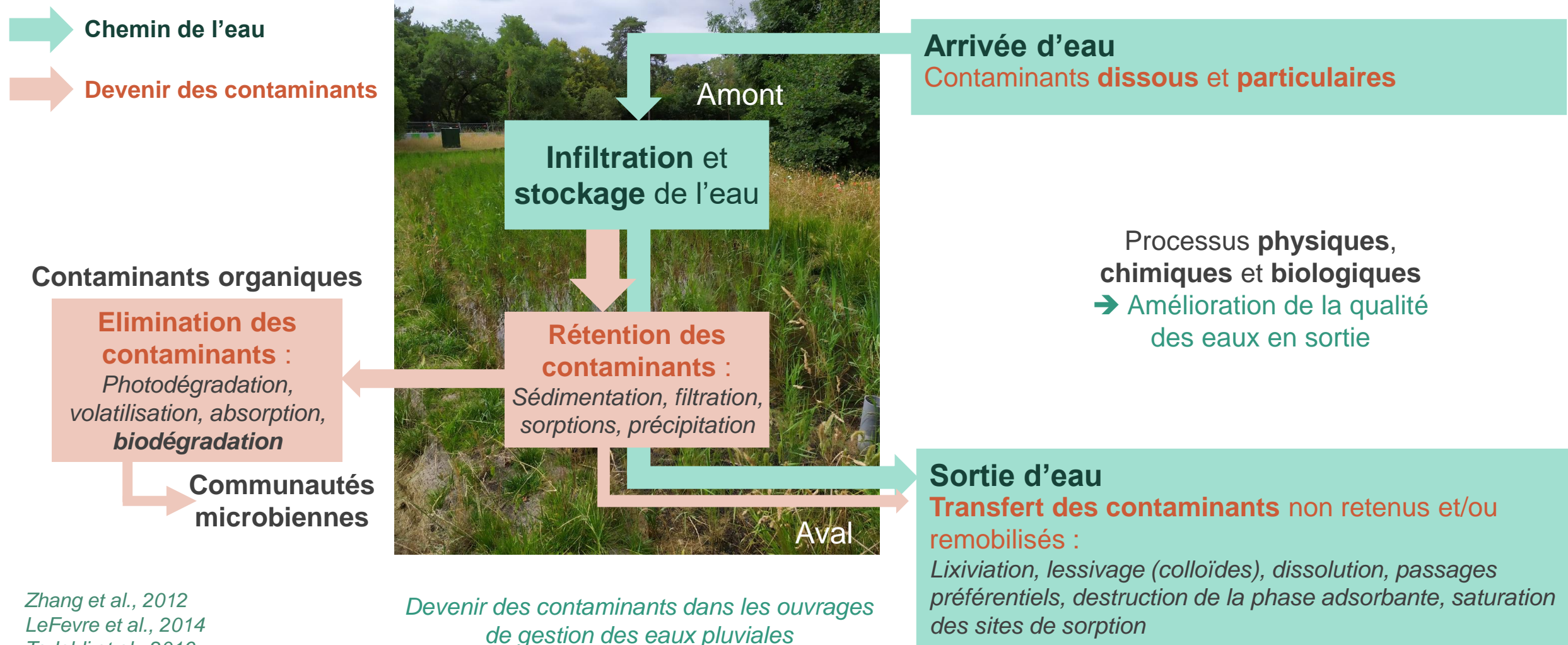


*Filtre planté de roseaux (FPR)*  
– *Gill et al., 2017*

Les **FPR** : type de zone humide artificielle d'intérêt croissant

- Contexte : Gestion des eaux de ruissellement

Processus en jeux lors de l'infiltration des eaux de ruissellement :







# Contexte : Gestion des eaux de ruissellement

Processus en jeux lors de l'infiltration des eaux de ruissellement : **Connaissances sur les FPR**

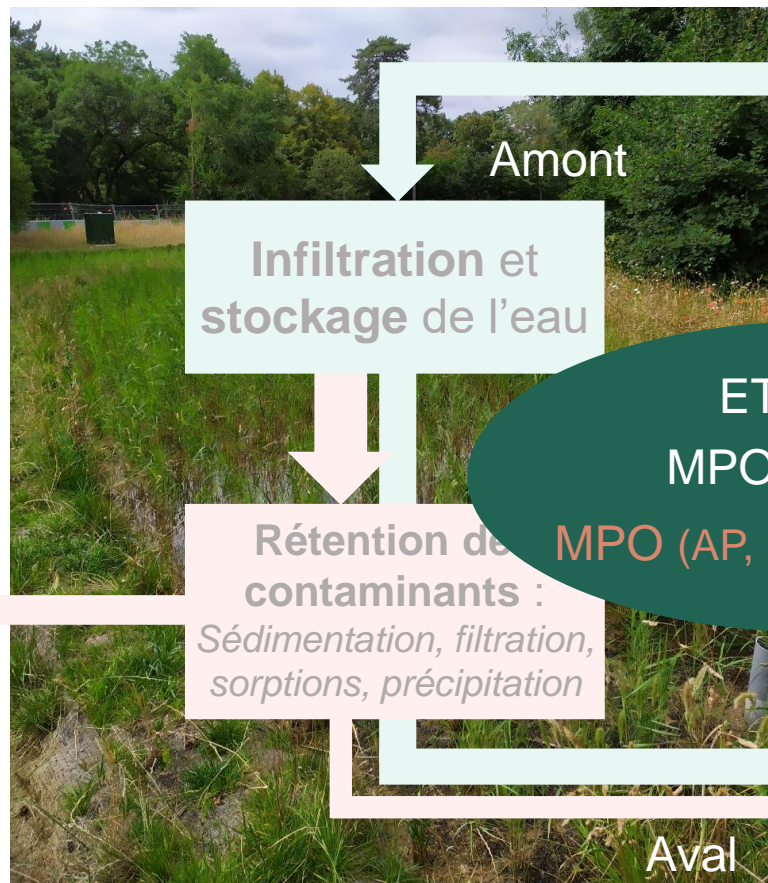
*Flanagan et al., 2018 ; Gasperi et al., 2022 ; Leroy et al., 2016 ; Stachel, 2010...*



 **Chemin de l'eau**

 **Devenir des contaminants**

**Arrivée d'eau**  
Contaminants **dissous** et **particulaires**



*Gill et al. 2014 ; Lenormand et al., 2022 ;*

*Leroy et al. 2015 ; Walaszek et al. 2018*

**Aucune donnée**  
→ **Quelques données dans d'autres ouvrages**

**Contaminants organiques**

**Elimination des contaminants :**  
*Photodégradation, volatilisation, absorption, biodégradation*

**Communautés microbiennes**

**Aucune donnée**  
→ **Quelques données dans d'autres ouvrages (HAP)**

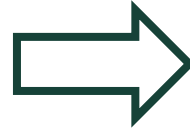
*Devenir des contaminants dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales*

**Sortie d'eau**  
**Transfert des contaminants** non retenus et/ou remobilisés :  
*Lixiviation, lessivage (colloïdes), dissolution, passages préférentiels, destruction de la phase adsorbante, saturation des sites de sorption*

*Walaszek et al. 2018 ; Mangangka et al. 2015*



- Le projet européen Life Adsorb



Mise en place d'un **FPR innovant** pour le traitement des eaux de ruissellement de voiries urbaines  
+ Un FPR conventionnel pour comparer

Phase dissoute  
*LeFevre et al. 2015 ; Flanagan et al. 2018*

**Objectifs** du projet :

- **Suivre** le fonctionnement et l'efficacité des FPR
- **Modéliser** le fonctionnement global des FPR
- **Améliorer les connaissances** sur les processus entrant en jeu lors du traitement des eaux
- **Développer un outil opérationnel** pour améliorer la conception des FPR pour les eaux de ruissellement

- Objectif de la thèse**

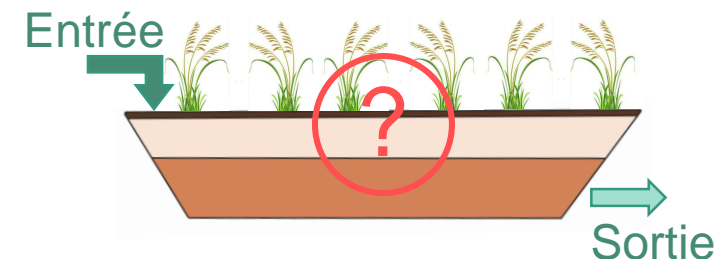
Identifier et caractériser les principaux processus biogéochimiques de **réten**tion et d'**élimination** des **MPO** et **ETM** ayant lieu dans les **FPR**

- **Objectif de la thèse : axes d'étude**

Identifier et caractériser les principaux processus biogéochimiques de **réten**tion et d'**élimination** des **MPO** et **ETM** ayant lieu dans les **FPR**

## I - Caractérisation des FPR dans le temps et l'espace depuis leur mise en service – SUIVI IN SITU

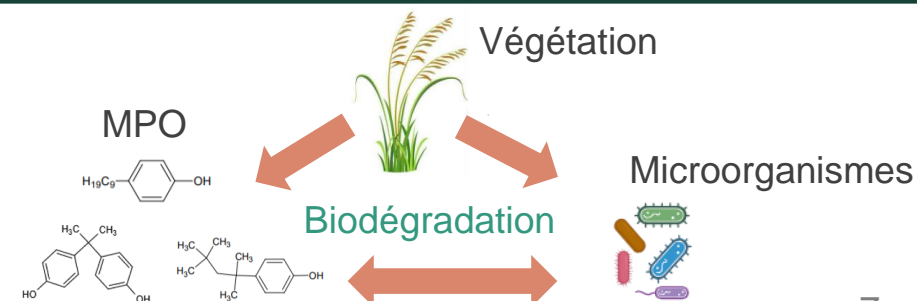
- Evolution des propriétés physico-chimiques des substrats
- Accumulation des ETM et MPO dans les substrats → Le FPR innovant en stocke-t-il plus ?
- Contribution de la végétation à l'accumulation
- Gestion des solides
- Identification des communautés microbiennes et leurs activités



## II – Evaluation de la biodégradation de MPO émergents dans les différents substrats des FPR – ETUDE AU LABORATOIRE

- Suivi des cinétiques et vitesses de biodégradation selon les substrats
- Impacts de la végétation et des substrats sur les communautés bactériennes

Processus peu quantifiable *in situ*

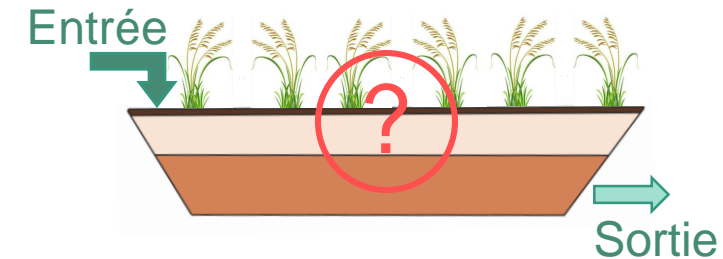


- **Objectif de la thèse : axes d'étude**

Identifier et caractériser les principaux processus biogéochimiques de **réten**tion et d'**élimination** des **MPO** et **ETM** ayant lieu dans les **FPR**

## I - Caractérisation des FPR dans le temps et l'espace depuis leur mise en service – SUIVI IN SITU

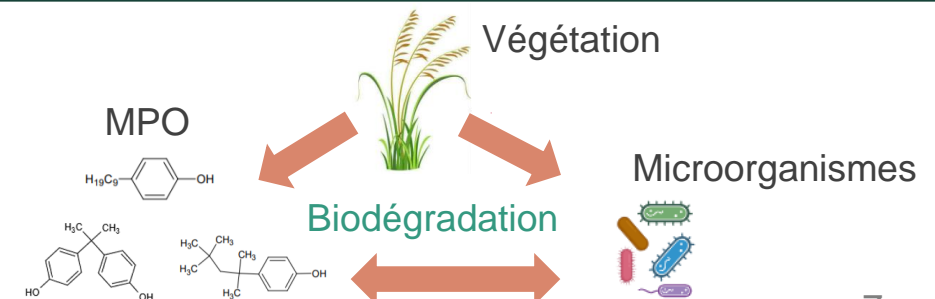
- Evolution des propriétés physico-chimiques des substrats
- **Accumulation** des **ETM** et **MPO** dans les substrats → Le FPR innovant en stocke-t-il plus ?
- Contribution de la végétation à l'accumulation
- Gestion des solides
- Identification des **communautés microbiennes** et leurs **activités**



## II – Evaluation de la biodégradation de MPO émergents dans les différents substrats des FPR – ETUDE AU LABORATOIRE

- Suivi des **cinétiques** et **vitesse**s de biodégradation selon les **substrats**
- Impacts de la **végétation** et des **substrats** sur les communautés bactériennes

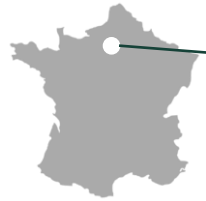
Processus peu quantifiable *in situ*





# Matériel et méthodes

- Site d'étude : L'ouvrage semi-centralisé

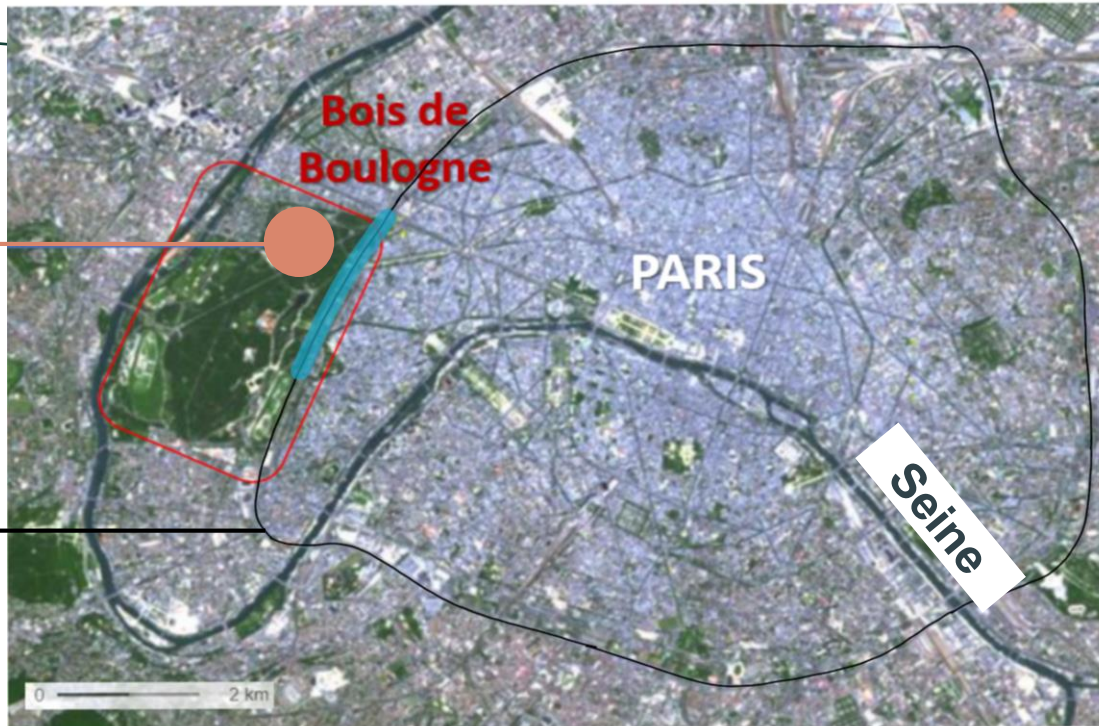


### Les FPR

Zone captée  
par l'ouvrage

Périphérique  
parisien

3 % des  
déplacements  
quotidiens en IdF



Localisation du site d'étude

### Localisation :

Ouest de Paris : Bois de Boulogne

### Bassin versant capté par temps de pluie :

2,6 km du boulevard périphérique = 21,1 ha  
Voiries denses

+ **Temps sec** : eaux de nappe non  
contaminées

~56 % des eaux alimentant les FPR

➔ **Fonctionnement hydraulique particulier**

Périphérique

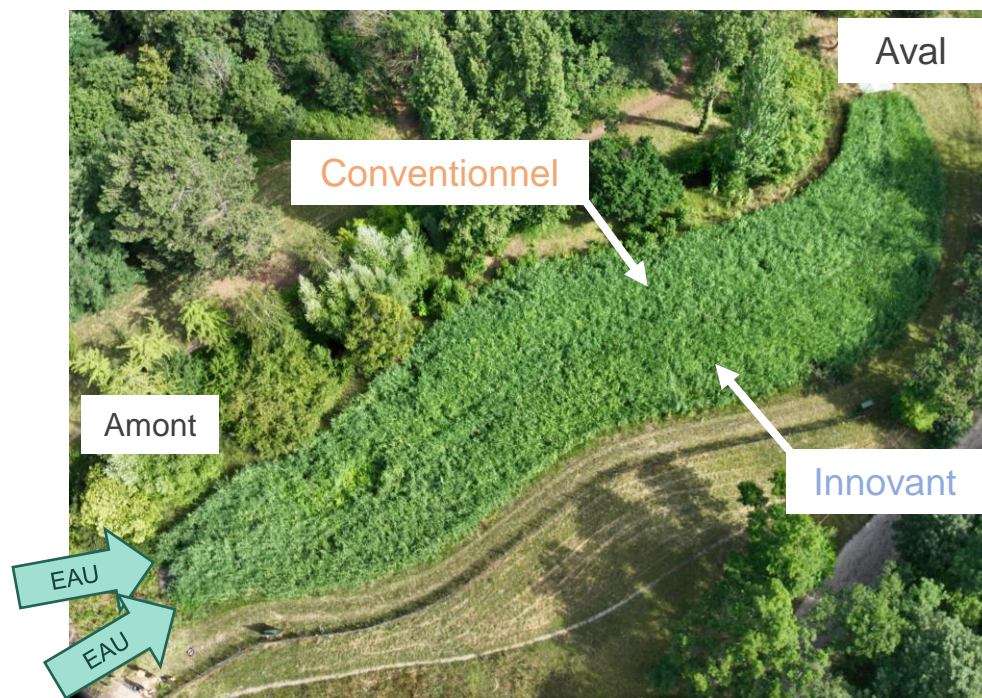
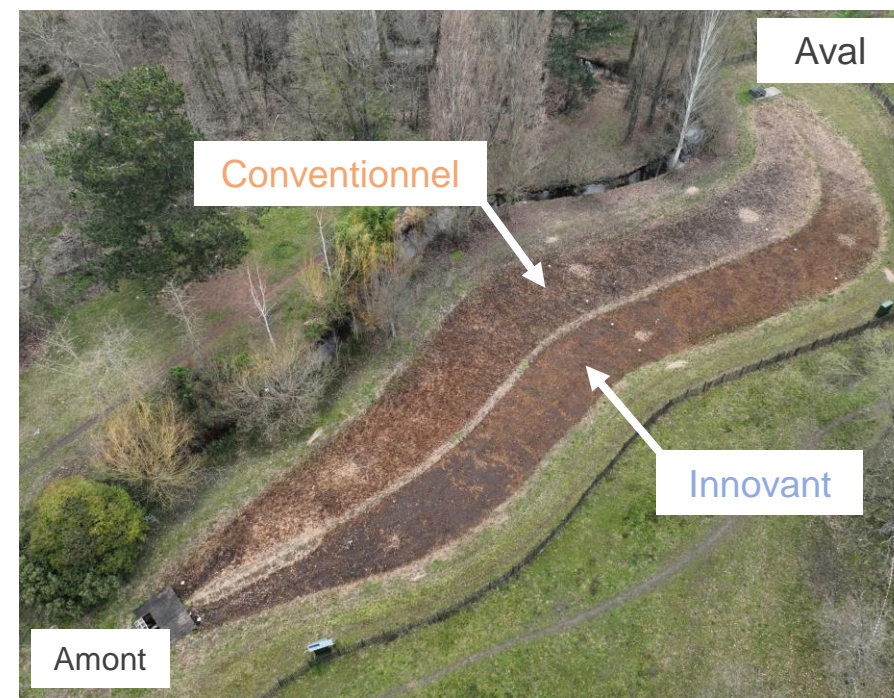


FPR



Seine

- Site d'étude : Les deux FPR

*Eté**Hiver*

### Deux FPR

**Conventionnel** : 680 m<sup>2</sup>

**Innovant** : 610 m<sup>2</sup>

→ Alimentation via une **canalisation** en **amont**

→ Alimentation en **alternance** : chaque mois, un FPR prioritaire (temps pluie/sec)



- Site d'étude : Les deux FPR

**Conception similaire :**Couche filtrante : **40 cm**

Couche de transition : 10 cm

Couche de drainage : 50 cm

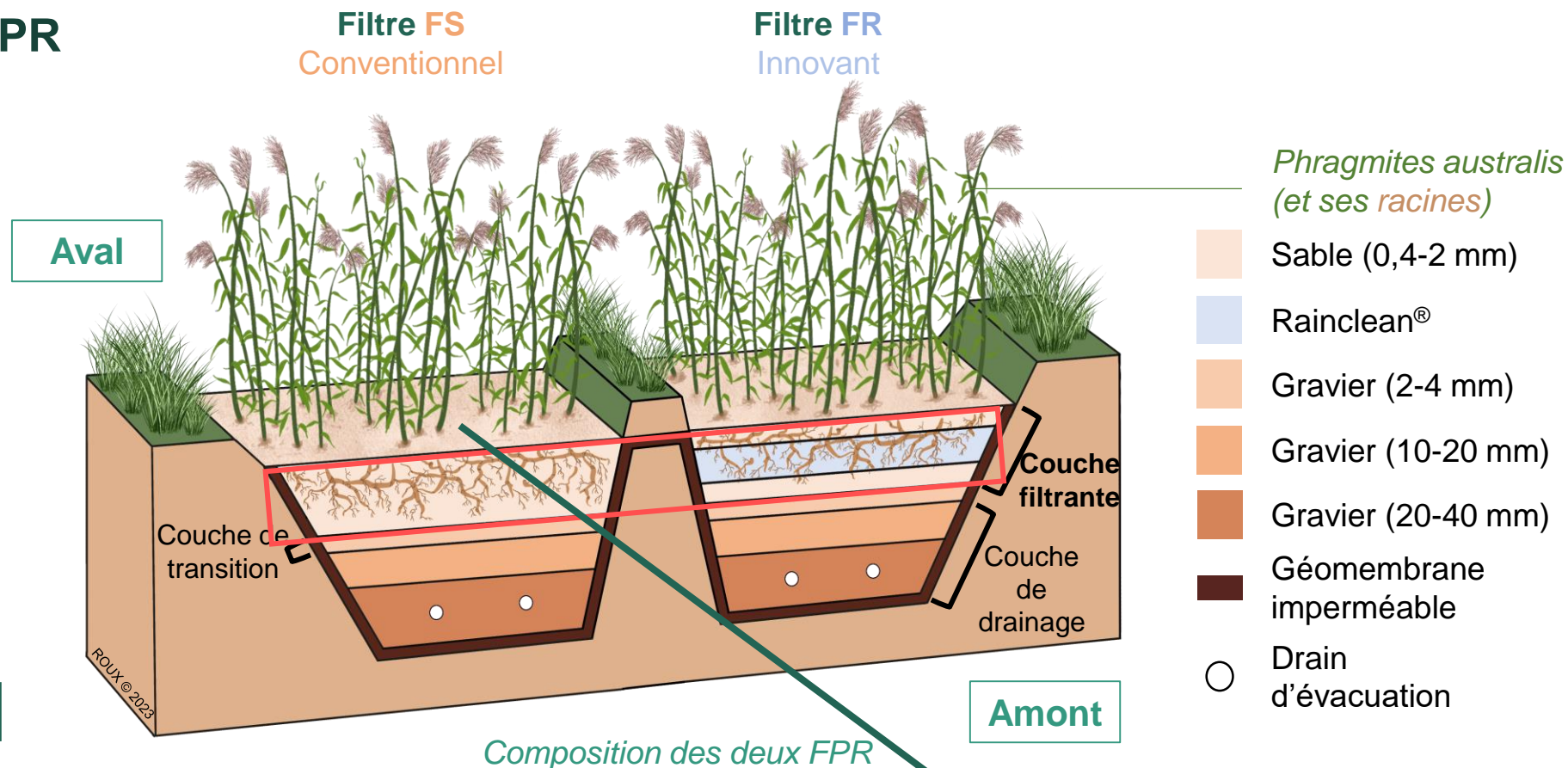
Planté de *P. australis***Composition différente :****FS** : Sable (40 cm)**FR** : Sable (10 cm)**Rainclean® (Rc)** (20 cm)

Sable (10 cm)

**Substrat industriel adsorbant**

Mélange de grains (organique/minéral) : carbonates, fibres de coco, pierres ponce, zéolithes, charbon activé...

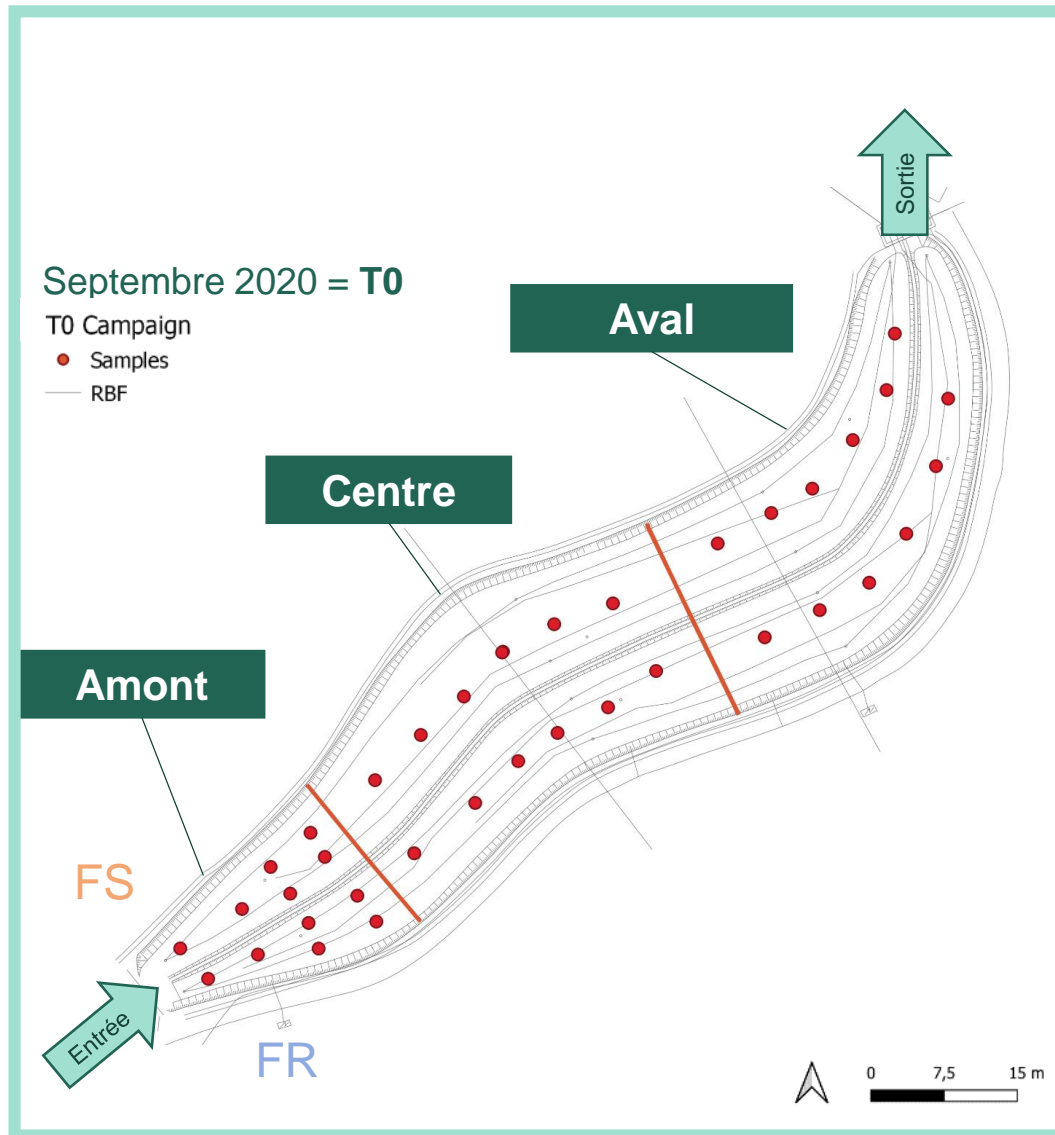
➔ **3 substrats étudiés** : sable, Rainclean et sédiment



+ Avec le temps :  
accumulation de  
**sédiment** à la  
surface

# I – Evolution des FPR : Campagnes de prélèvement

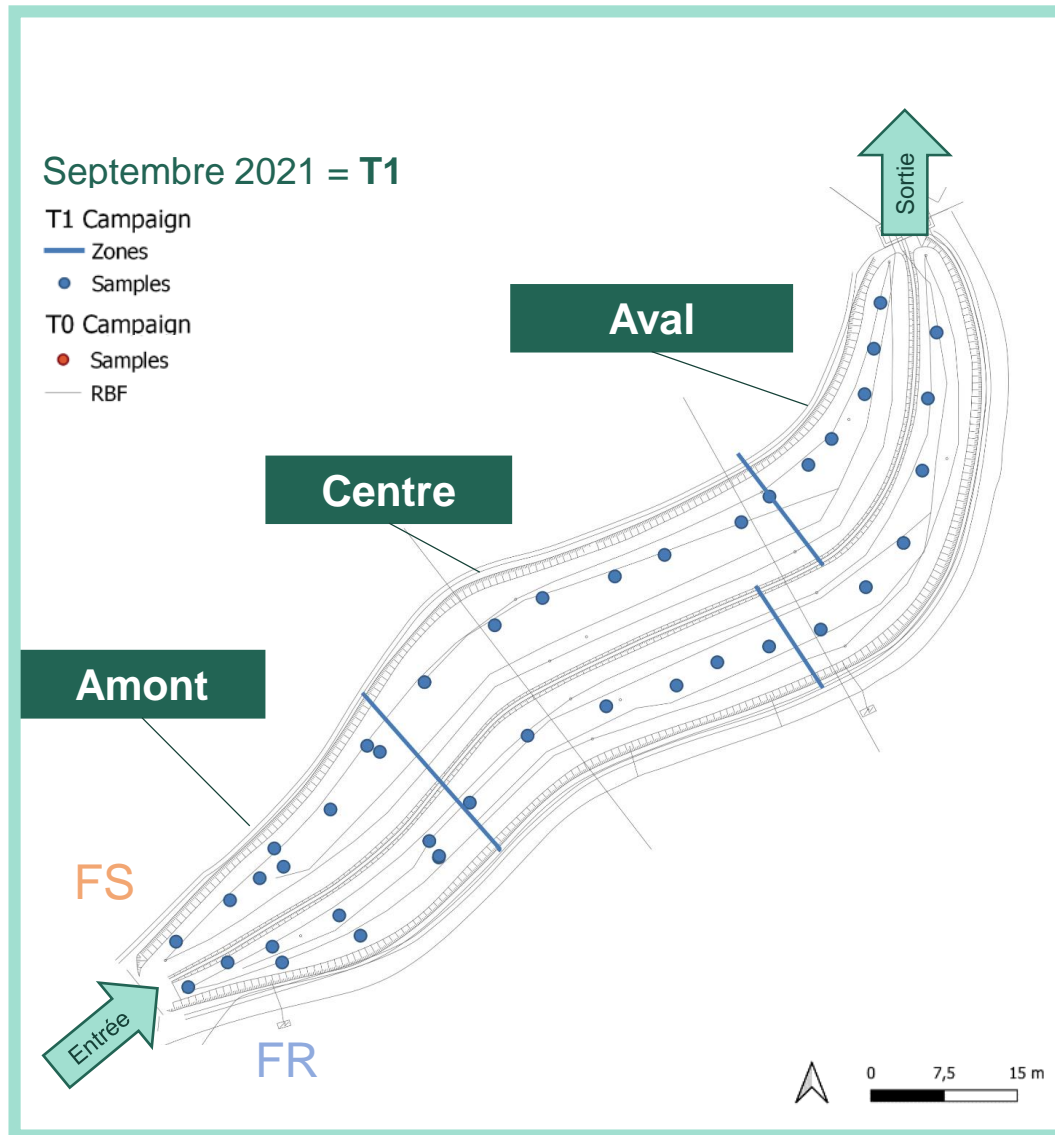
3 campagnes : 2020 (sept-oct)



Campagnes de prélèvement (T0)

# I – Evolution des FPR : Campagnes de prélèvement

3 campagnes : 2020, 2021 (sept-oct)

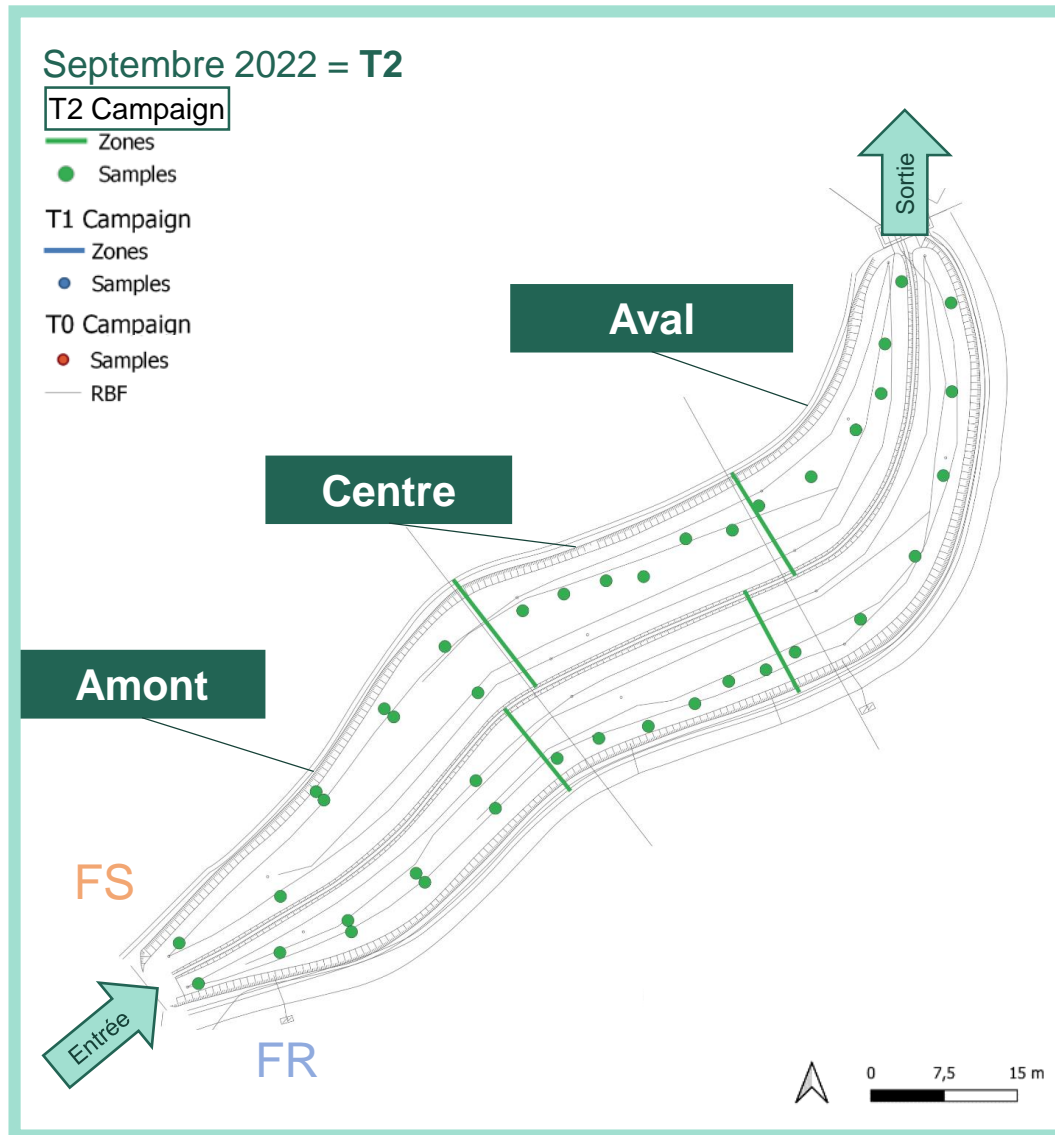


Campagnes de prélèvement (T1)



# I – Evolution des FPR : Campagnes de prélèvement

3 campagnes : 2020, 2021, 2022 (sept-oct)

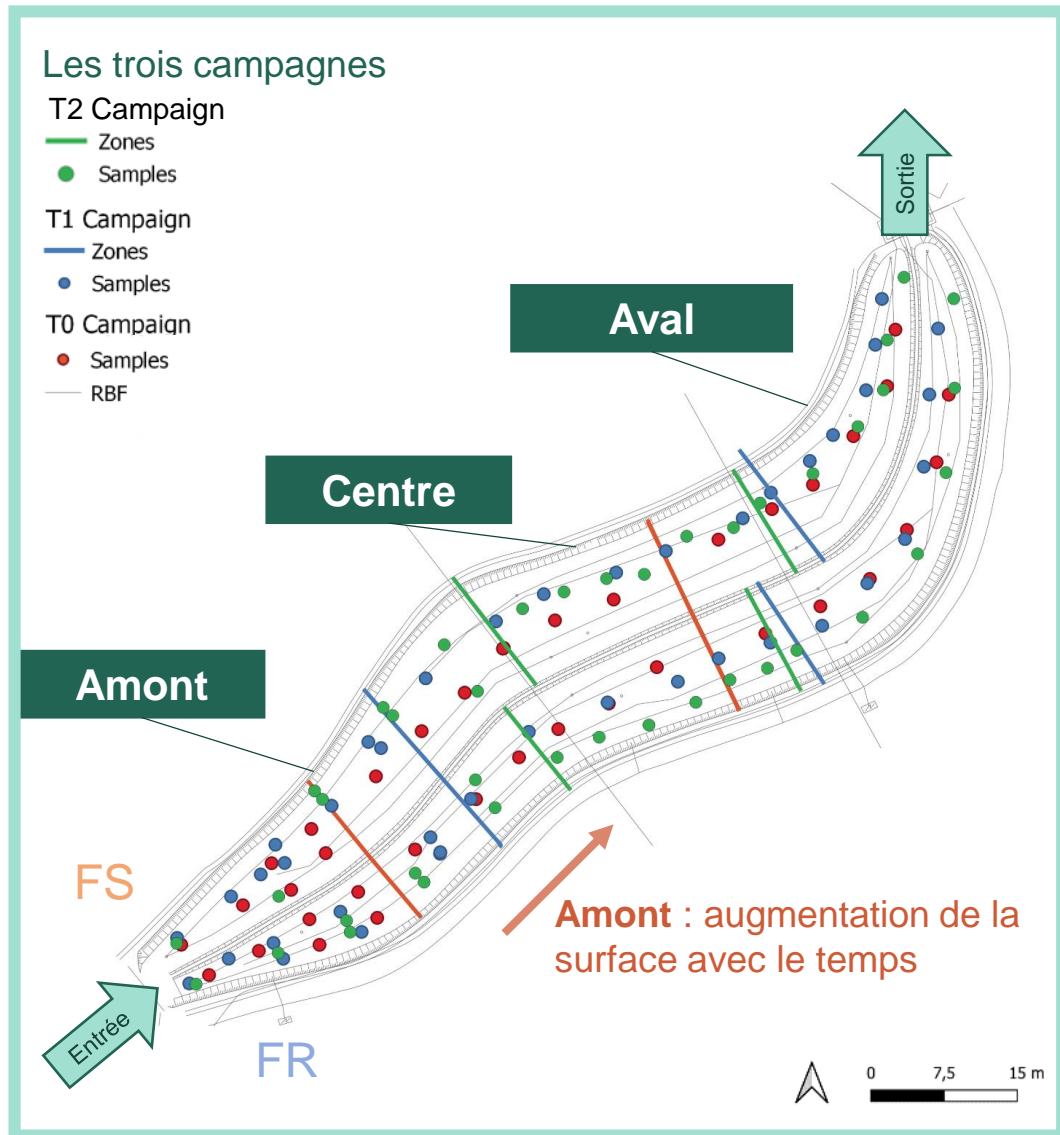


Campagnes de prélèvement (T2)

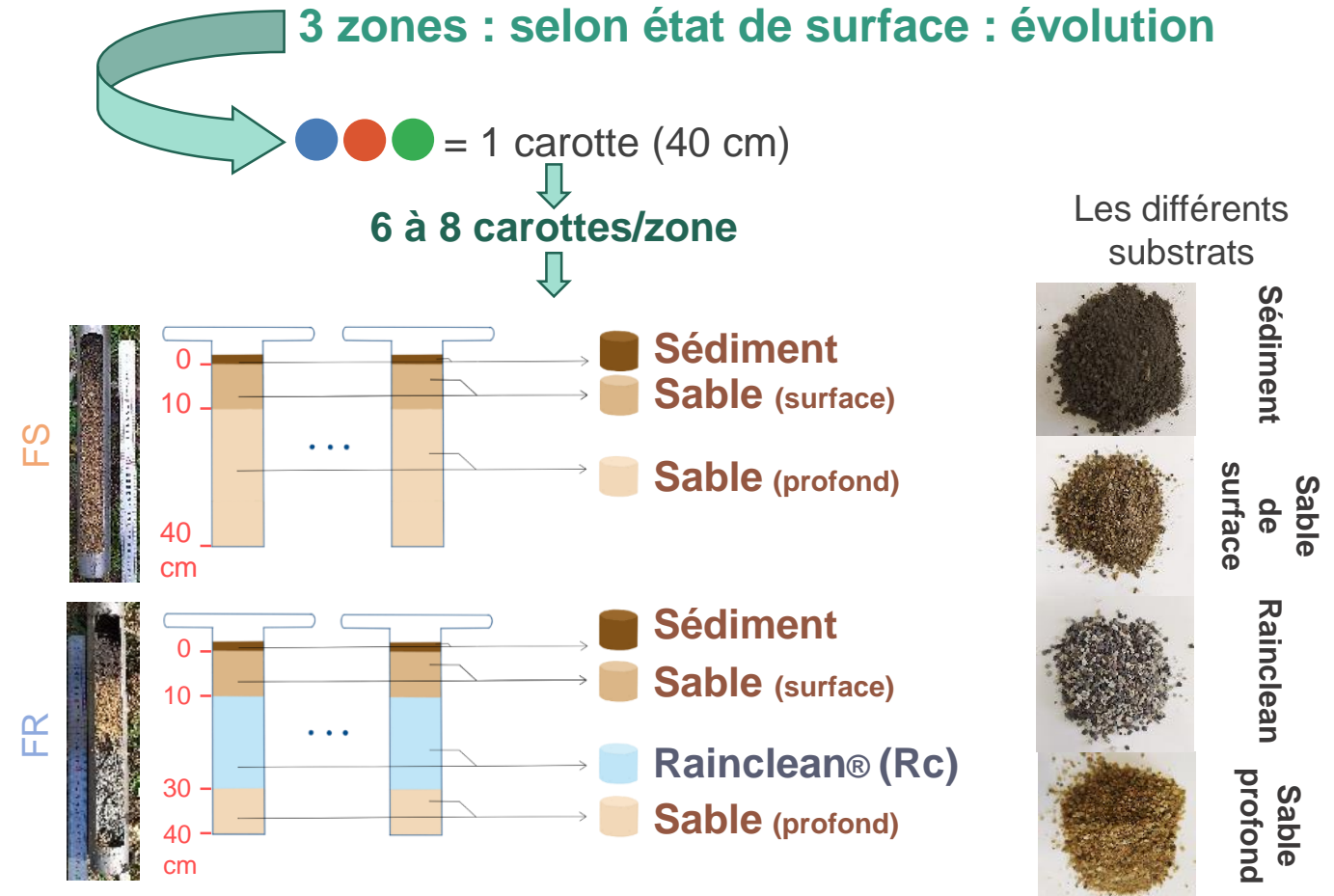
# I – Evolution des FPR : Campagnes de prélèvement

3 campagnes : 2020, 2021, 2022 (sept-oct)

3 zones : selon état de surface : évolution



Campagnes de prélèvement (superposées)



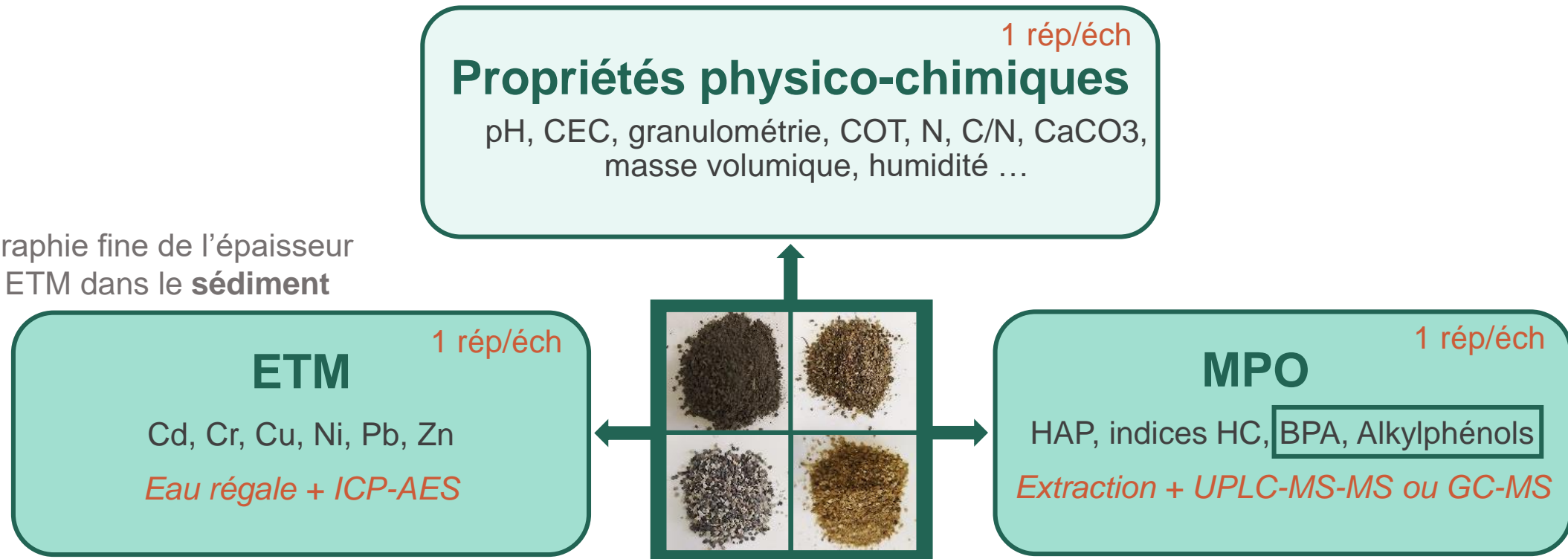
Echantillons composites : 43 éch

- Campagne (T0, T1, T2)
- Filtre (FS, FR)
- Localisation horizontale (Am, C, Av)
- Localisation verticale (substrats)



## I – Evolution des FPR : Analyses réalisées

+ cartographie fine de l'épaisseur  
et des ETM dans le **sédiment**



**HAP** : 16 HAP prioritaires (US EPA, 1976)

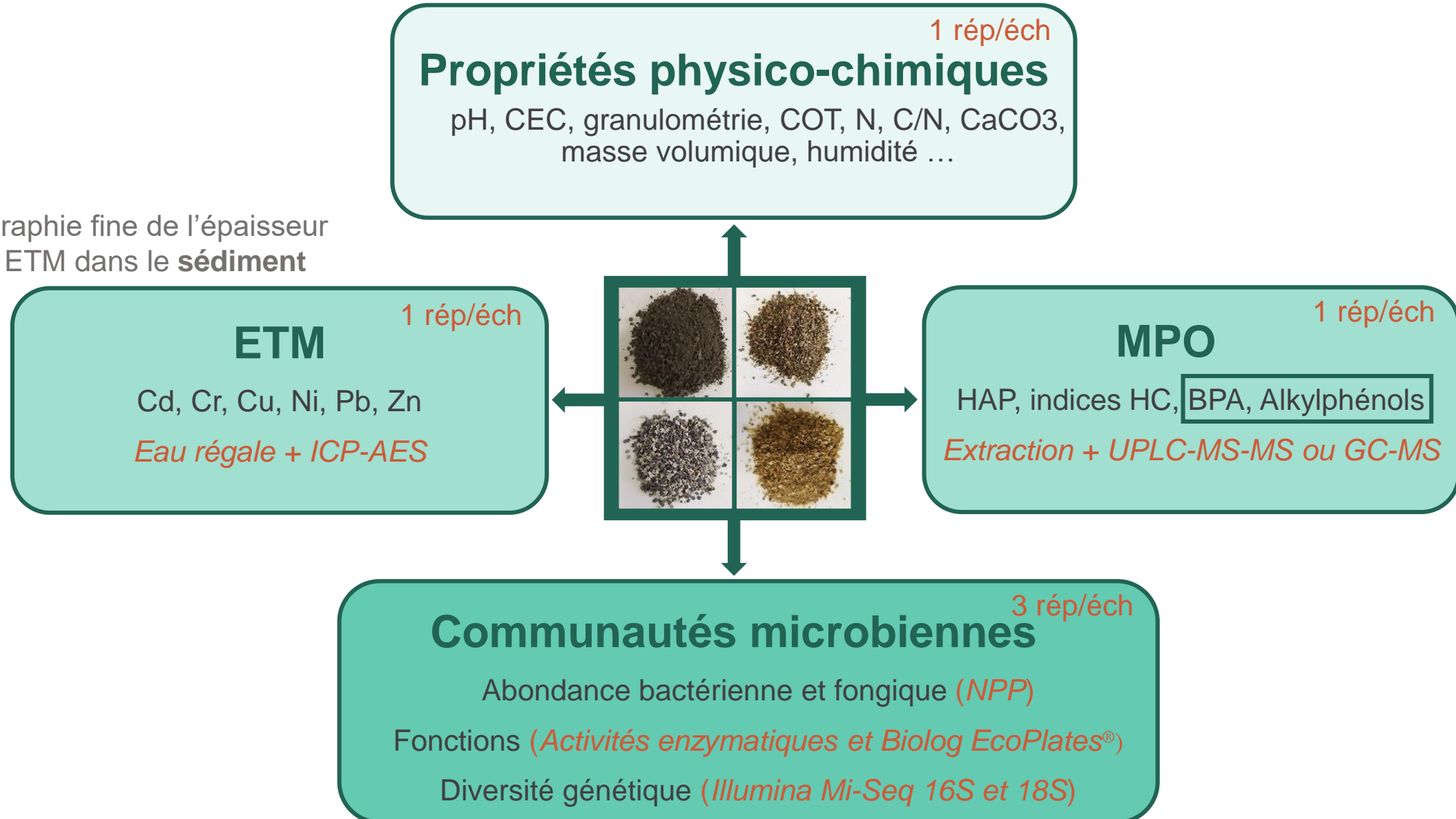
**Indices HC** : indices C10-C40 (C10-C11 ; C11-C12 ; C12-C16 ; C16-C21 ; C21-C35 ; C35-C40)

**BPA** : une seule molécule

**Alkylphénols** : 4-NP (4-nonylphénol), 4-OP (4-t-octylphénol), alkylphénols éthoxylés (NP1EO, NP2EO, OP1EO, OP2EO, NP1EC)

## I – Evolution des FPR : Analyses réalisées

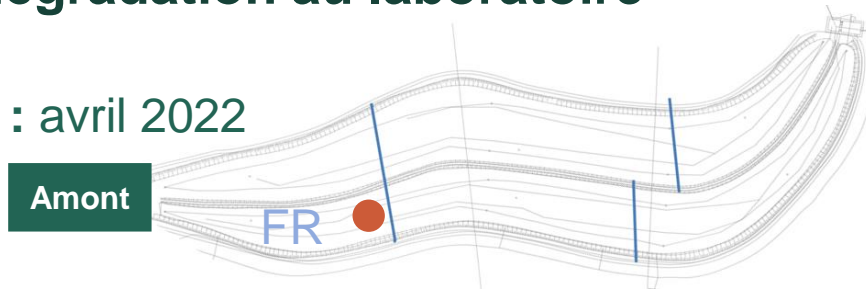
+ cartographie fine de l'épaisseur  
et des ETM dans le **sédiment**





## II – Essais de biodégradation au laboratoire

### ① Prélèvements ● : avril 2022



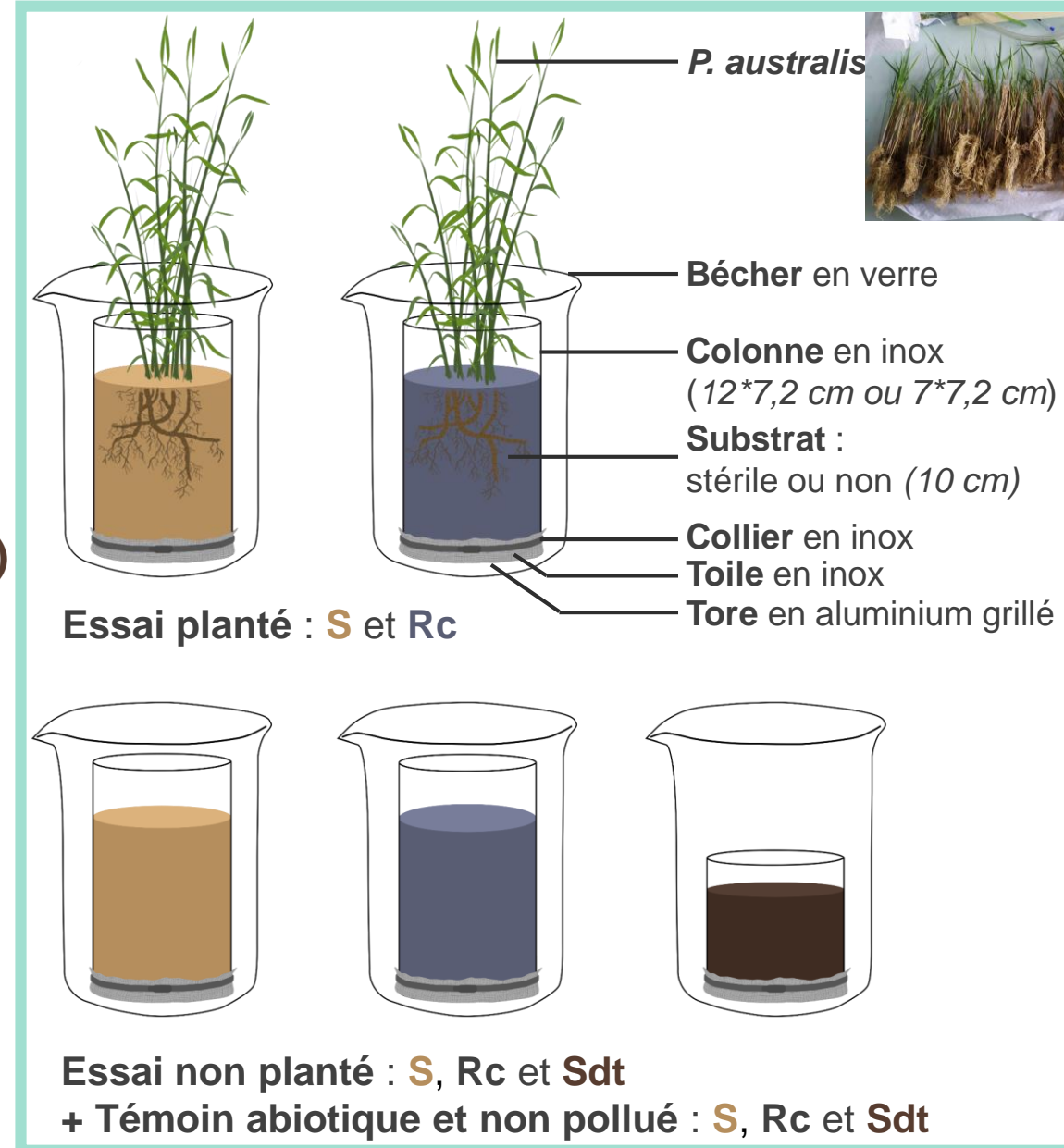
Amont

FR

→ Structure conservée + plantes

### ② Mise en place des colonnes

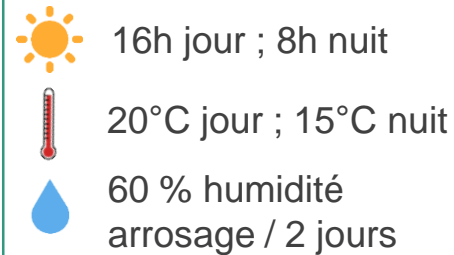
- 3 substrats :  
**sable surface (S)**, **Rainclean (Rc)** et **sédiment (Sdt)**
- 3 MPO étudiés en **mélange** :  
4-nonylphénol (**4-NP**)  
4-t-octylphénol (**4-OP**)  
Bisphénol-A (**BPA**)
- 2 essais exposés à des MPO :  
**planté** (*Phragmites australis*) et **non planté**.
- 2 témoins :  
**abiotique et non pollué** (non plantés)  
→ 3 cycles d'autoclave





## II – Essais de biodégradation au laboratoire

### 3 Préincubation de 2 semaines (*chambre climatique*)



*Chambre climatique et colonnes*

*Boesten et al., 2014  
NF EN ISO 11266  
OCDE, 2002*

### 4 Contamination des colonnes par saturation (4h), puis égouttage (1h)

Eau Volvic enrichie en 3 MPO (dissous)

→ Ratio retrouvé dans les eaux de ruissellement en IdF (*Gasperi et al., 2022*)

- ♦ 4-NP : 3,5 mg/L
- ♦ BPA : 2,57 mg/L
- ♦ 4-OP : 1 mg/L

→ **Teneurs** enrichies : 0,09-2,3 mg/kg



*Saturation des colonnes*

### 5 Incubation de 30 jours (*chambre climatique*)

Prélèvement, destruction et homogénéisation des colonnes  
à 0 ; 1 ; 4 ; 7 ; 14 ; 30 jours

Planté (36) + Non planté (54) + Abiotique (36) + non pollué (18)  
3 répétitions = **144 colonnes**



*Destruction et homogénéisation  
des colonnes*

## II – Essais de biodégradation au laboratoire

### 6 Analyses réalisées sur les substrats

Suivi de la dégradation

Dosage des  
MPO

Extraction + UPLC-  
MS/MS

Modélisation des **cinétiques**  
de (bio)dégradation des MPO

Package **Gmkin** (R)

3 modèles :

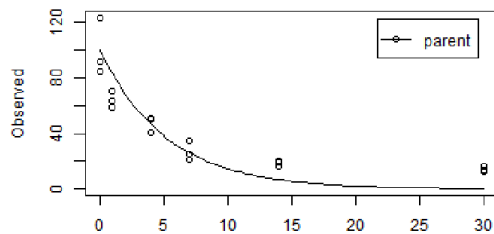
**SFO** : Single First-Order

**FOMC** : First-order multi-compartment

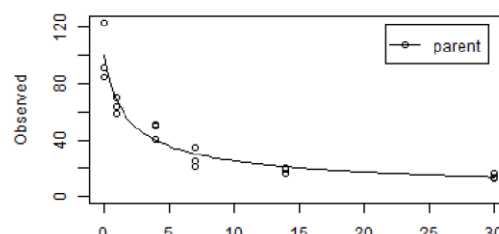
**HS (ou MHS)** Hockey-Stick ou modified Hockey-Stick

*Boesten et al., 2014*

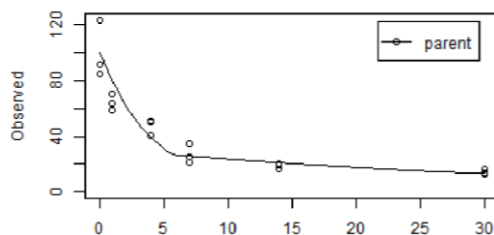
- ◆ Cinétiques
- ◆ Temps de demi-vie : **DT50** (jour)
- ◆ Constantes de dégradation : **k,  $\alpha$ ,  $\beta$**  (jour<sup>-1</sup>)



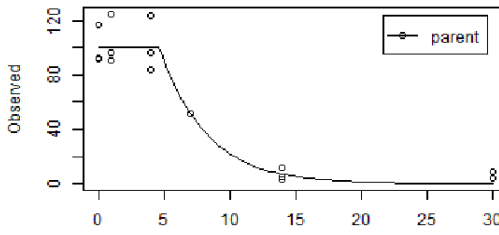
SFO



FOMC



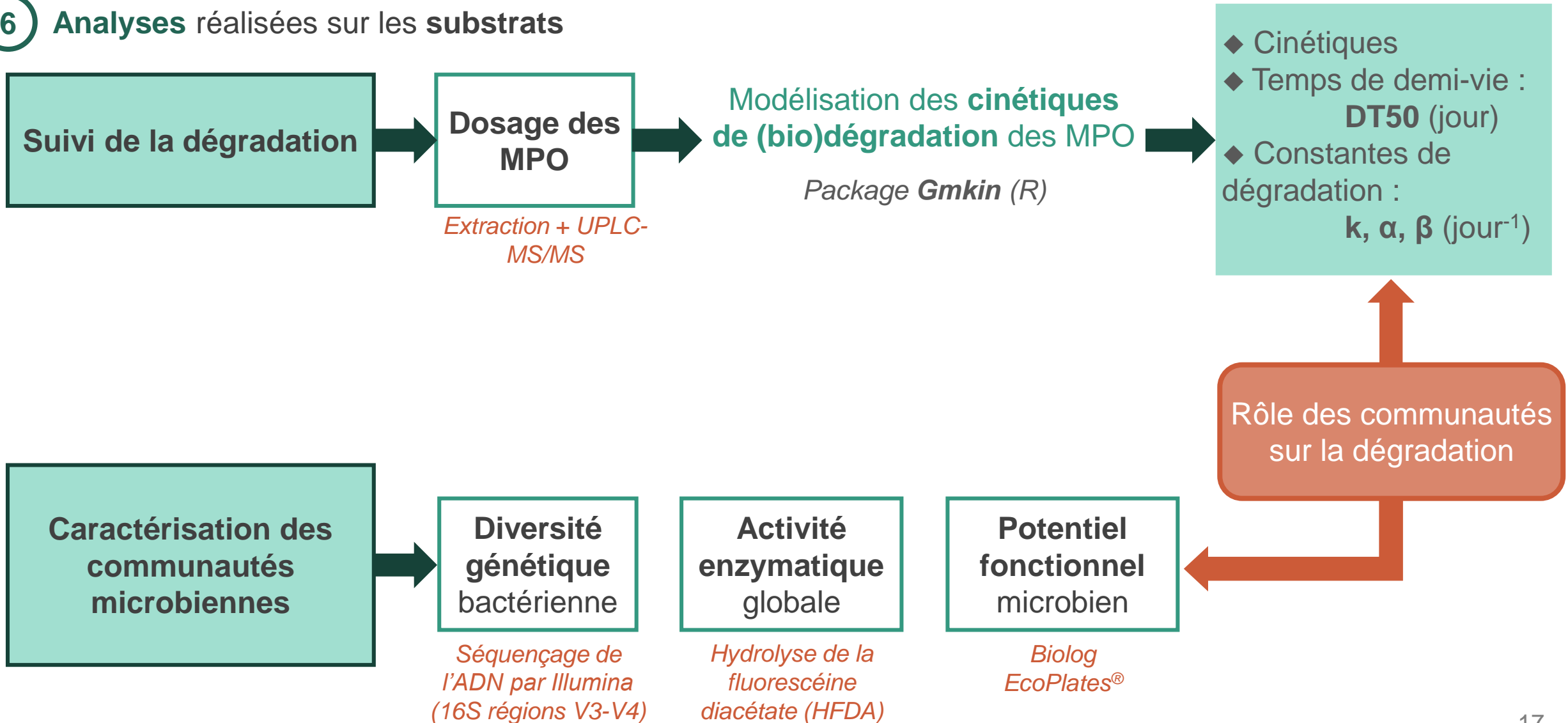
HS



MHS

## II – Essais de biodégradation au laboratoire

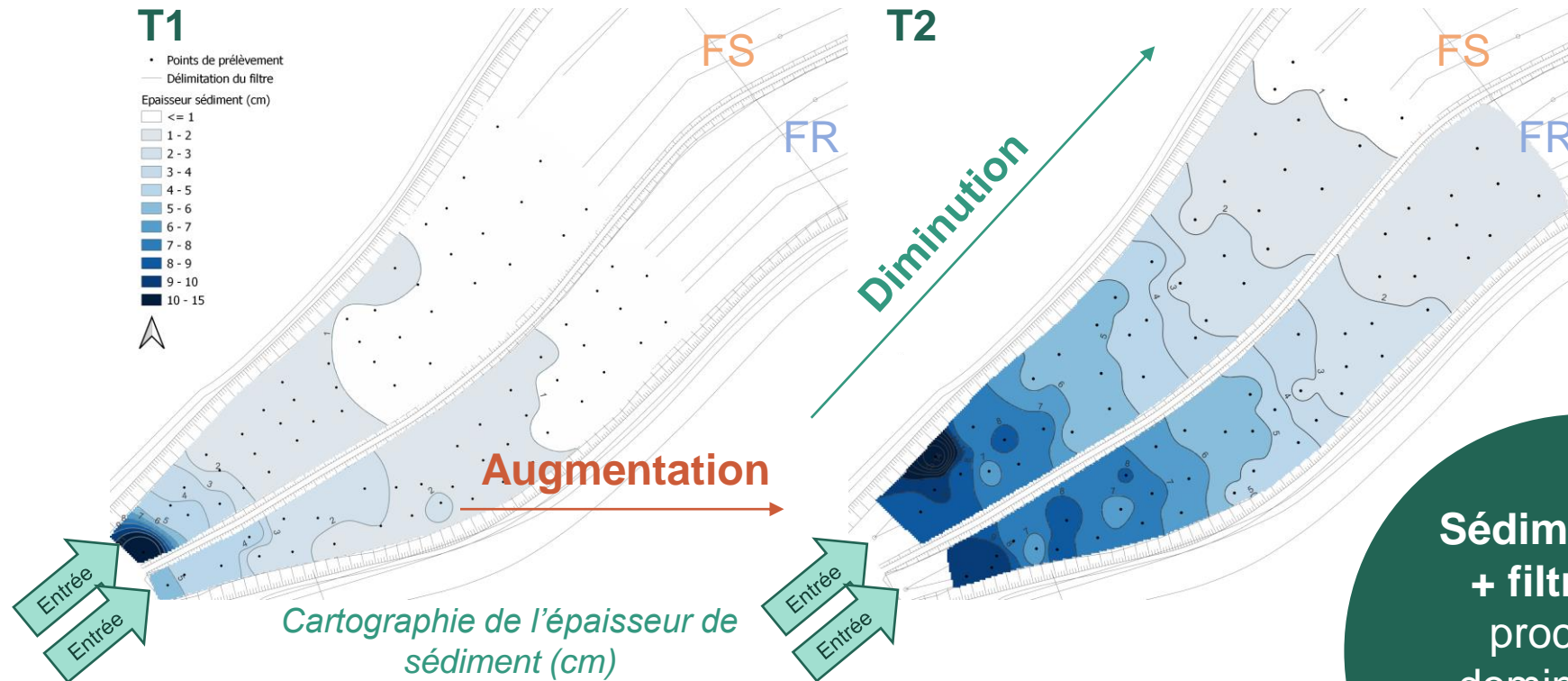
### 6 Analyses réalisées sur les substrats



# Résultats et discussion

## I – Suivi in situ de l'évolution spatio-temporelle des FPR

# I – Evolution des FPR : Accumulation de sédiment



**Sédimentation  
+ filtration :**  
processus  
dominants en  
**amont et  
surface**

→ **Diminution** avec l'éloignement : 12 à < 2 cm dès 30 m

→ **Augmentation** avec temps

→ **Sédiment en amont** : **32-42 %** de la surface totale au T2

→ Vitesse d'accumulation annuelle moyenne : **4,1 m<sup>3</sup>/an** ( $\pm 0,37$ )

# I – Evolution des FPR : Caractérisation physico-chimique après 2 ans de fonctionnement (T2)

T2	pH	Carbone organique (g/kg)	Azote (g/kg)	C/N	CEC (me/kg)	Limon (%)
Sédiment	7,9	147,0	5,5	26,7	214,0	59,4
Sable surface	8,3	10,9	0,4	24,5	20,2	6,0
Rainclean	8,7	21,4	0,4	57,0	348,7	16,2
Sable profond	8,4	1,6	0,1	13,3	16,5	3,0

Principales propriétés physico-chimiques des substrats au T2 (moyennes)

FE T0-T2	Amont	Aval
Sable surface	9,2-34	4,4-5,3
Rainclean	1,2	0,9
Sable profond	2,0-2,4	1,1-2,3

Carbone organique accumulé après 2 ans de fonctionnement  
Facteur d'enrichissement **FE** = Valeur T2 / Valeur T0

Trois substrats de **nature différente** → Propriétés physico-chimiques différentes (p-values < 0,05)

- **Sable** : inerte
- **Rainclean** : adsorbant
- **Sédiment** : le plus différencié, valeurs les plus élevées

→ Sable : évolution importante selon le temps et espace (vertical/horizontal)

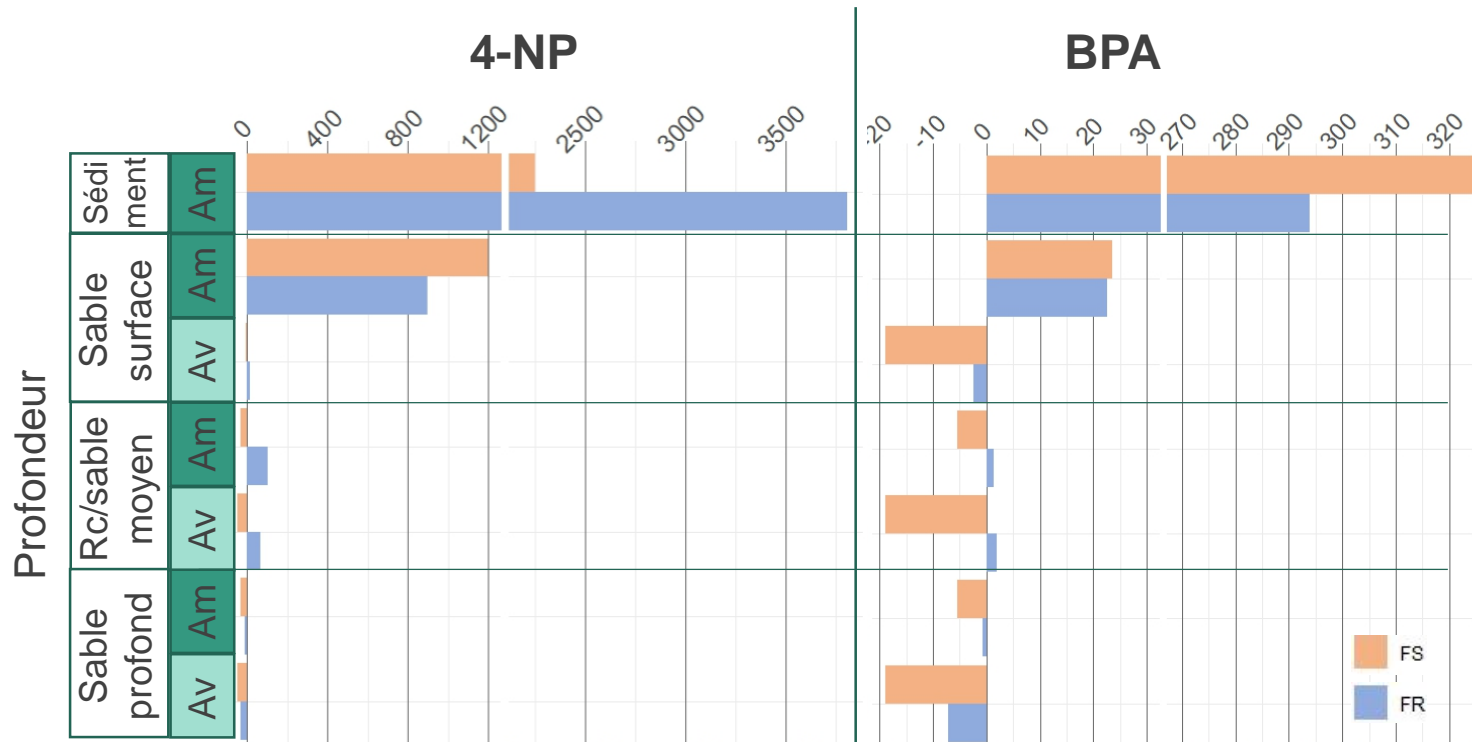
**Filtration** :  
processus  
dominant dans  
le **Sable surface**  
en **amont**



# I – Evolution des FPR : Accumulation de micropolluants après 2 ans de fonctionnement (T2)

## MPO : Exemple du 4-NP et BPA

Comparaison des substrats : rapporte aux **volumes**



**4-NP** : MPO le plus concentré (*Flanagan et al., 2018 ; Gasperi et al., 2022*)

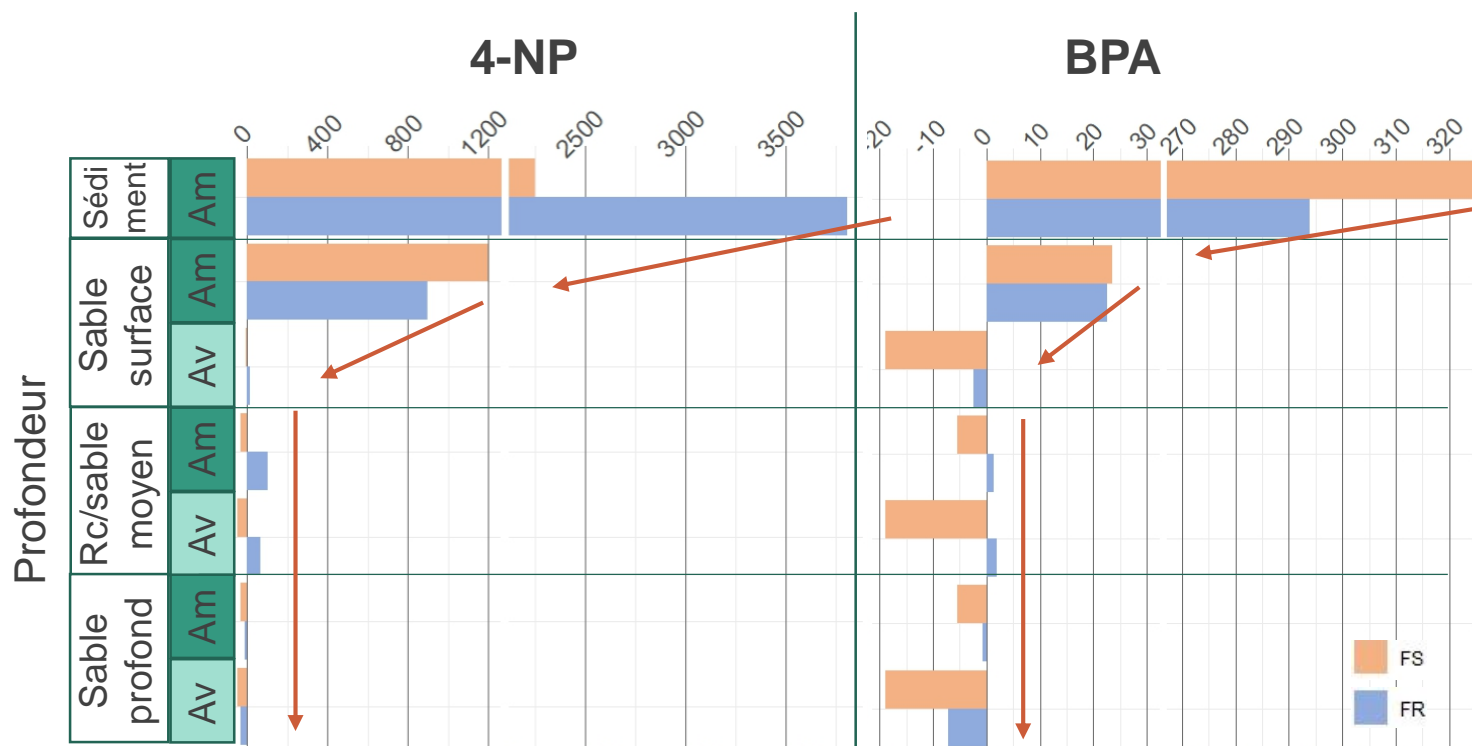
Une **accumulation** des MPO avec le temps hétérogène dans l'espace

Accumulation volumique (mg/m³/2ans) du 4-NP et BPA entre T0-T2

# I – Evolution des FPR : Accumulation de micropolluants après 2 ans de fonctionnement (T2)

## MPO : Exemple du 4-NP et BPA

Comparaison des substrats : rapporte aux **volumes**



Accumulation volumique ( $\text{mg/m}^3/2\text{ans}$ ) du 4-NP et BPA entre T0-T2

### Localisation verticale :

-**Sédiment** : concentre les MPO par son accumulation

**FE** : 26,5 (BPA) ; 6,5 (4-NP)

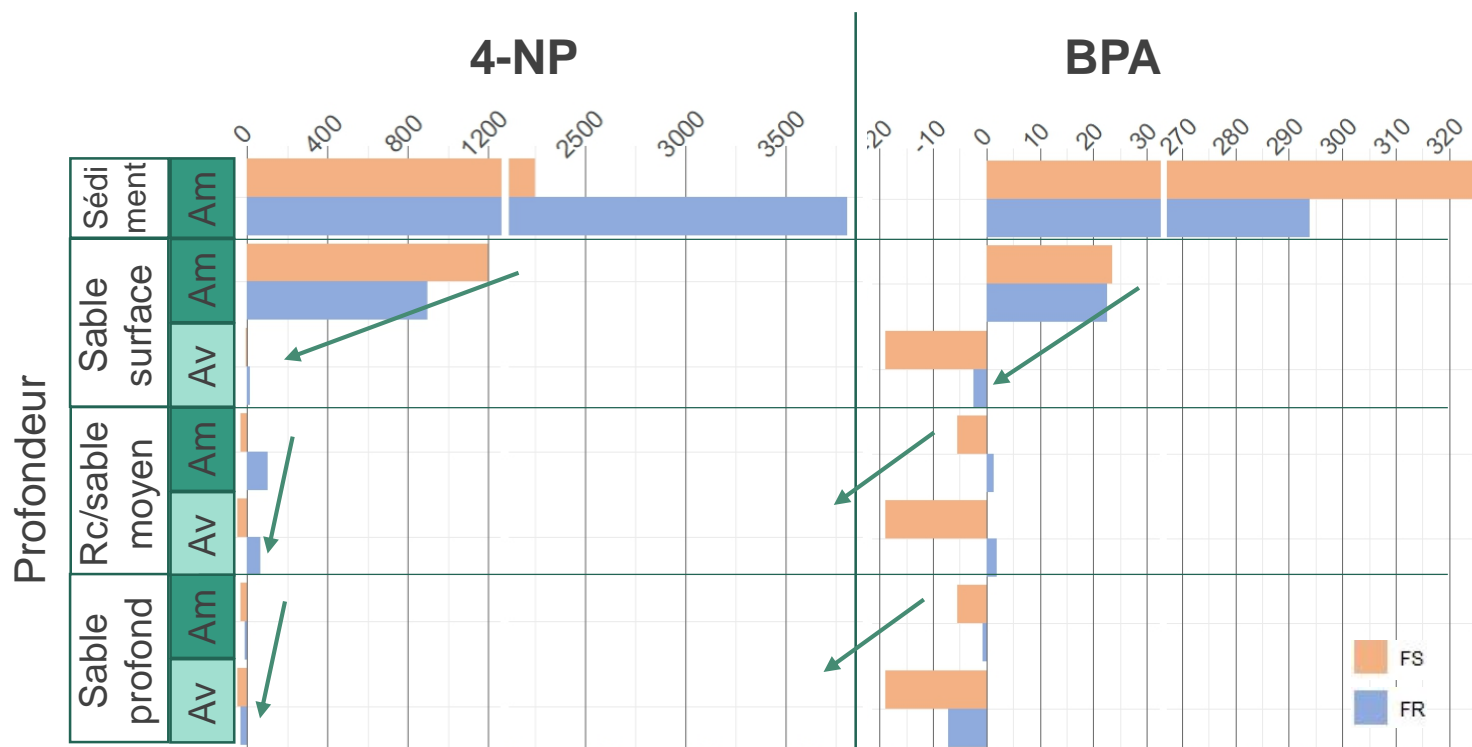
-**Diminution** rapide avec la profondeur  
→ Bilan **nul** ou **négatif** après 10 cm

-Accumulation dans le **Rc** légèrement supérieure à celle du sable moyen → Reste à confirmer

# I – Evolution des FPR : Accumulation de micropolluants après 2 ans de fonctionnement (T2)

## MPO : Exemple du 4-NP et BPA

Comparaison des substrats : rapporte aux **volumes**



Accumulation volumique ( $\text{mg}/\text{m}^3/2\text{ans}$ ) du 4-NP et BPA entre T0-T2

### Localisation verticale :

-**Sédiment** : concentre les MPO par son accumulation

**FE** : 26,5 (BPA) ; 6,5 (4-NP)

-**Diminution** rapide avec la profondeur  
→ Bilan **nul** ou **négatif** après 10 cm

-Accumulation dans le **Rc** légèrement supérieure à celle du sable moyen → Reste à confirmer

### Localisation horizontale :

Amont > Aval

→ **MPO rapidement piégés**

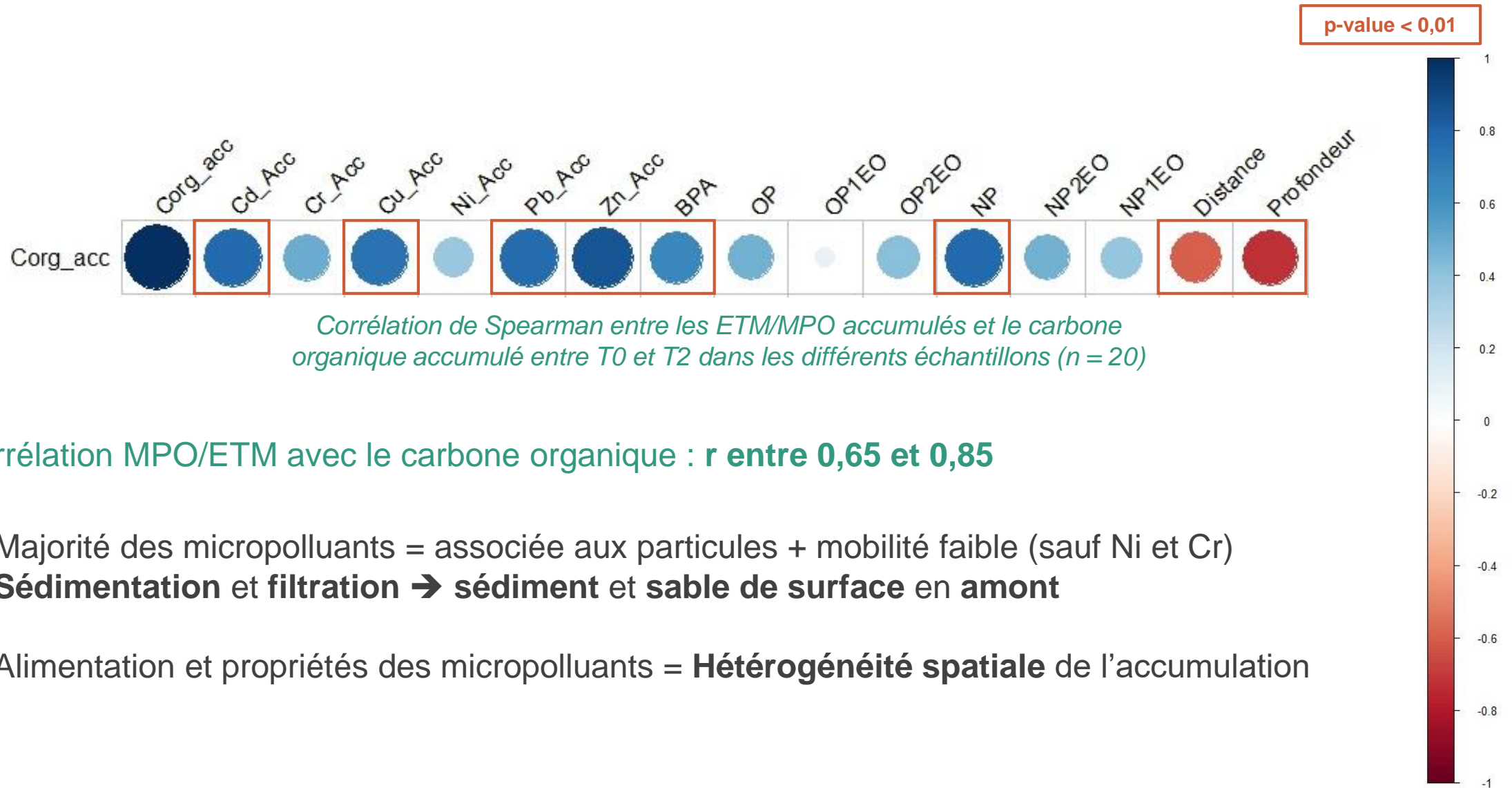
*HAP : Schmit et al., 2015, Tedoldi et al., 2017*

Des processus d'élimination entrent en jeu

**Apports > Pertes**  
en surface et en amont  
→ **12 %** du volume total des FPR

**Pertes ≥ Apports**  
en profondeur et au centre/aval

# I – Evolution des FPR : Accumulation de micropolluants après 2 ans de fonctionnement (T2)



Corrélation MPO/ETM avec le carbone organique : **r entre 0,65 et 0,85**

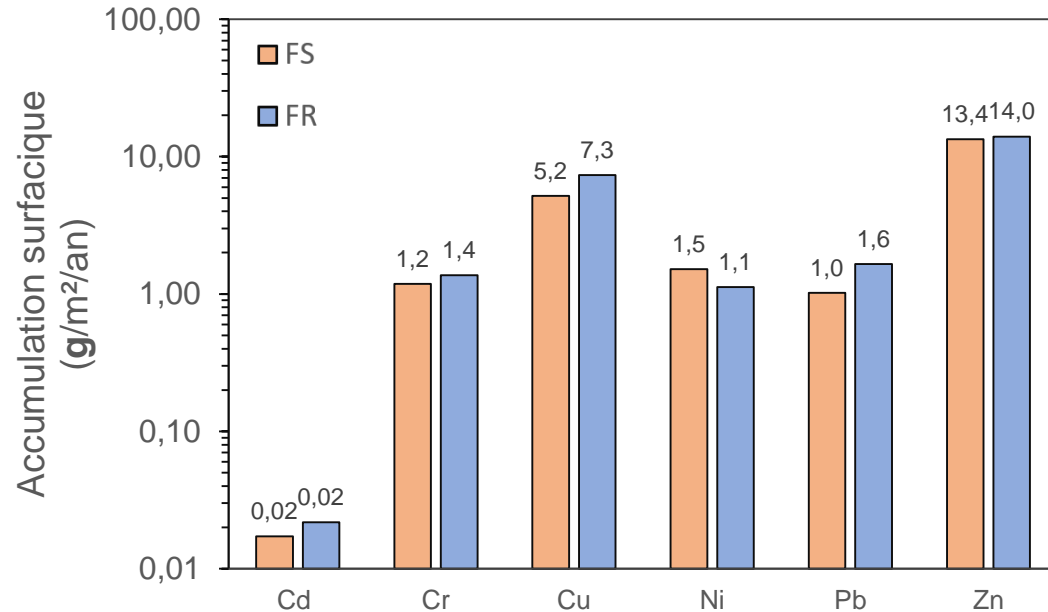
- ➔ Majorité des micropolluants = associée aux particules + mobilité faible (sauf Ni et Cr)
- ➔ **Sédimentation et filtration ➔ sédiment et sable de surface en amont**
- ➔ Alimentation et propriétés des micropolluants = **Hétérogénéité spatiale** de l'accumulation



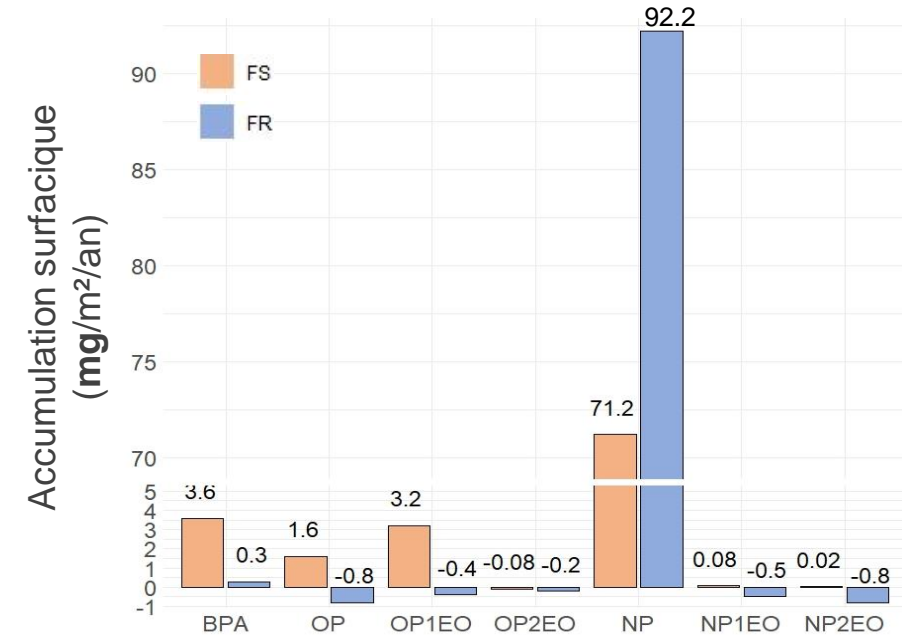
# I – Evolution des FPR : Accumulation annuelle à l'échelle des FPR

## Vitesses d'accumulation entre T1 et T2

Comparaison des FPR : rapporte aux **surfaces**



Accumulation surfacique (g/m²/an) des ETM à l'échelle des FPR



Accumulation surfacique (mg/m²/an) des MPO à l'échelle des FPR

**Accumulation ETM > MPO (4-NP) :** eaux de ruissellement (*Flanagan et al., 2018 ; Gasperi et al., 2022*)  
+ processus dissipatifs (*Lefevre et al., 2012*)

**ETM :** Différences faibles d'accumulation entre les 2 FPR

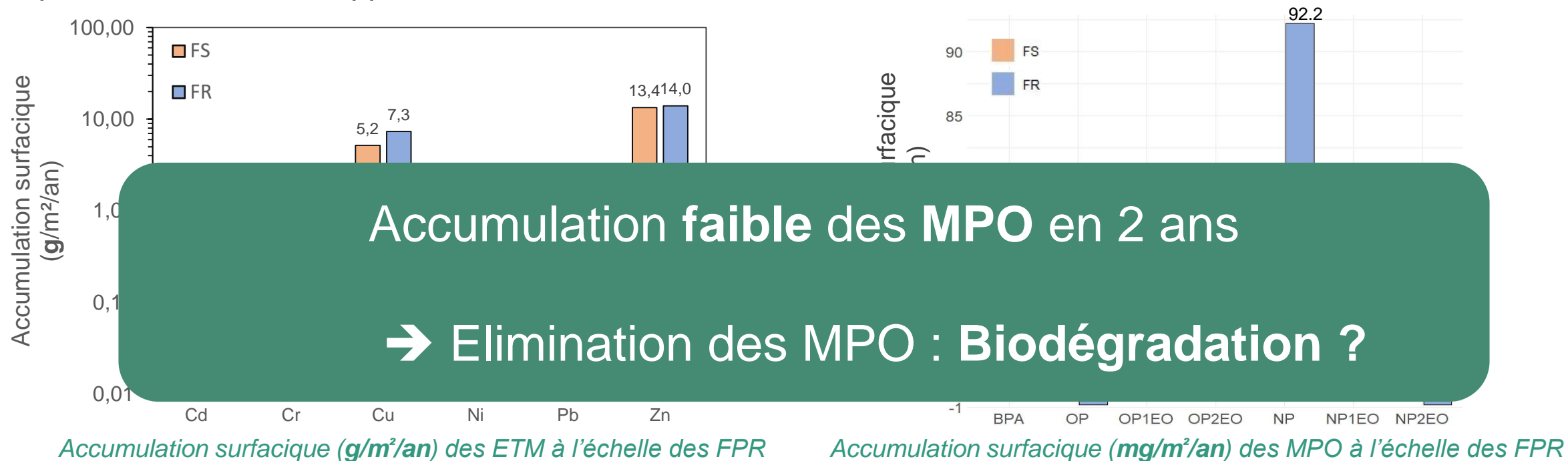
**FR vs FS :** Rôle limité du Rc après 2 ans

➔ Couche en profondeur + Eau déjà majoritairement traitée + **Données qualité d'eau en entrée**

# I – Evolution des FPR : Accumulation annuelle à l'échelle des FPR

## Vitesses d'accumulation entre T1 et T2

Comparaison des FPR : rapporte aux **surfaces**



**Accumulation ETM > MPO (4-NP) :** eaux de ruissellement (*Flanagan et al., 2018 ; Gasperi et al., 2022*)  
+ processus dissipatifs (*Lefevre et al., 2012*)

**ETM :** Différences faibles d'accumulation entre les 2 FPR

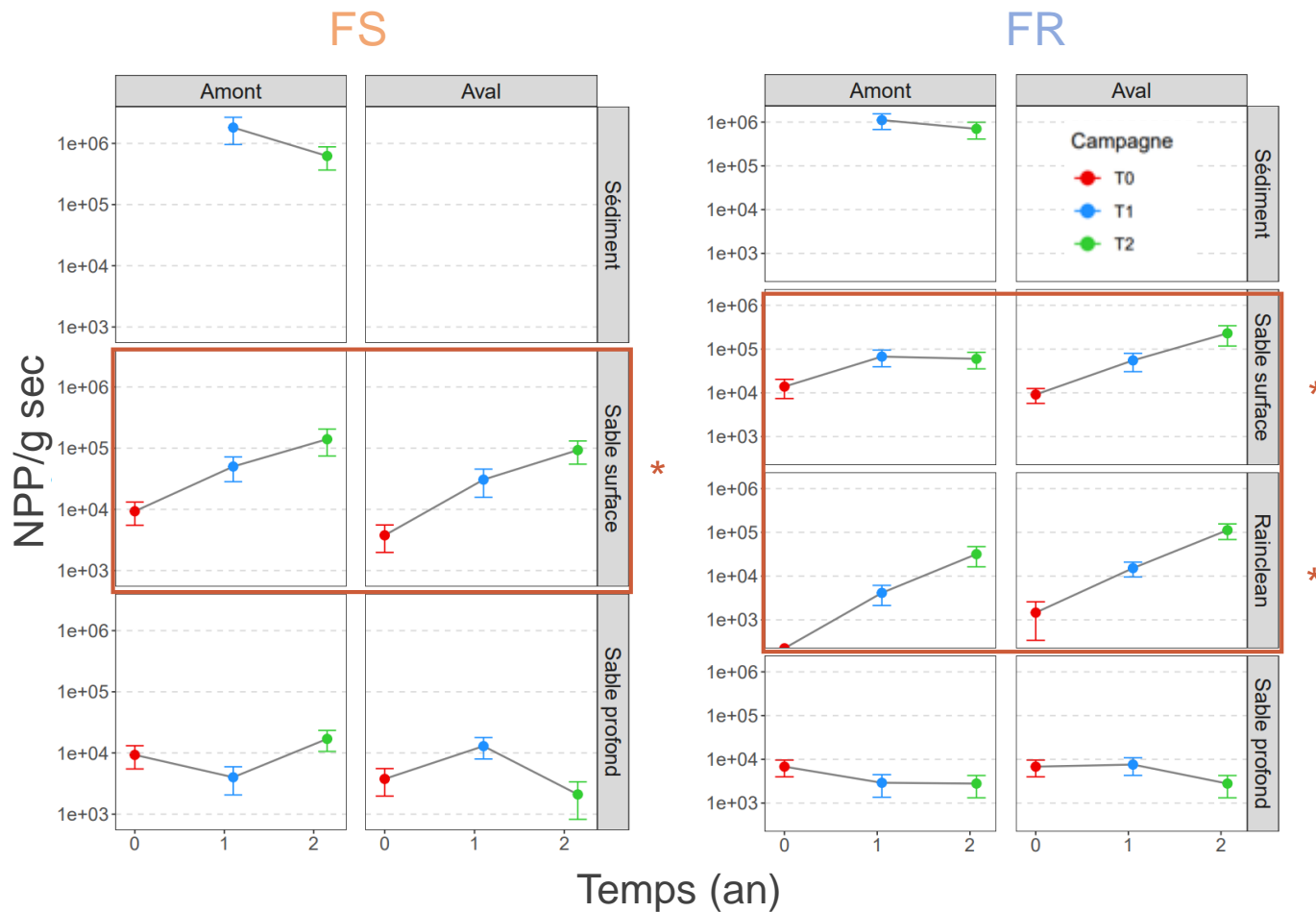
**FR vs FS :** Rôle limité du Rc après 2 ans

→ Couche en profondeur + Eau déjà majoritairement traitée + **Données qualité d'eau en entrée**

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

Abondance bactérienne : Nombre le Plus Probable (NPP)

\* : p-values < 0,05



**Augmentation avec le temps :**

Sable de surface et Rc (p-values < 0,05)

**FE (T0-T2) : 2,5 à 76,7**

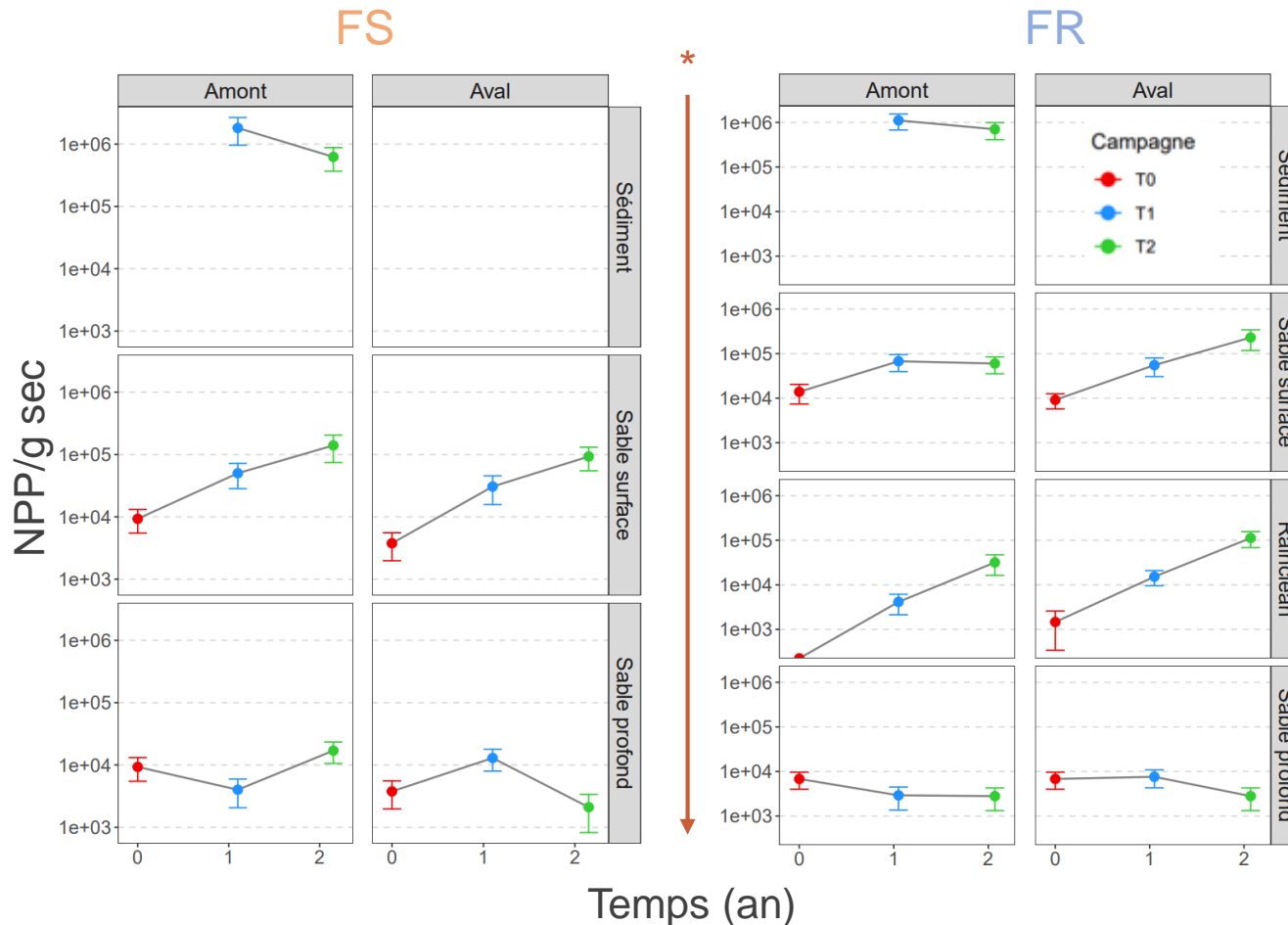
→ Colonisation avec l'alimentation en eau (+ végétation)  
(Fraser et al., 2018)

Evolution de l'abondance microbienne selon le temps et l'espace

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

Abondance bactérienne : Nombre le Plus Probable (NPP)

\* : p-values < 0,05



**Augmentation avec le temps :**

Sable de surface et Rc (p-values < 0,05)

**FE (T0-T2) : 2,5 à 76,7**

→ Colonisation avec l'alimentation en eau (+ végétation)  
(Fraser et al., 2018)

**Diminution avec la profondeur :**

Sédiment >> Sable surface = Rc > Sable profond

**R = -0,80 à -0,92 (p-values < 10<sup>-7</sup>)**

→ Carbone organique (MO et MPO) nutriments  
(Bourceret, 2016)

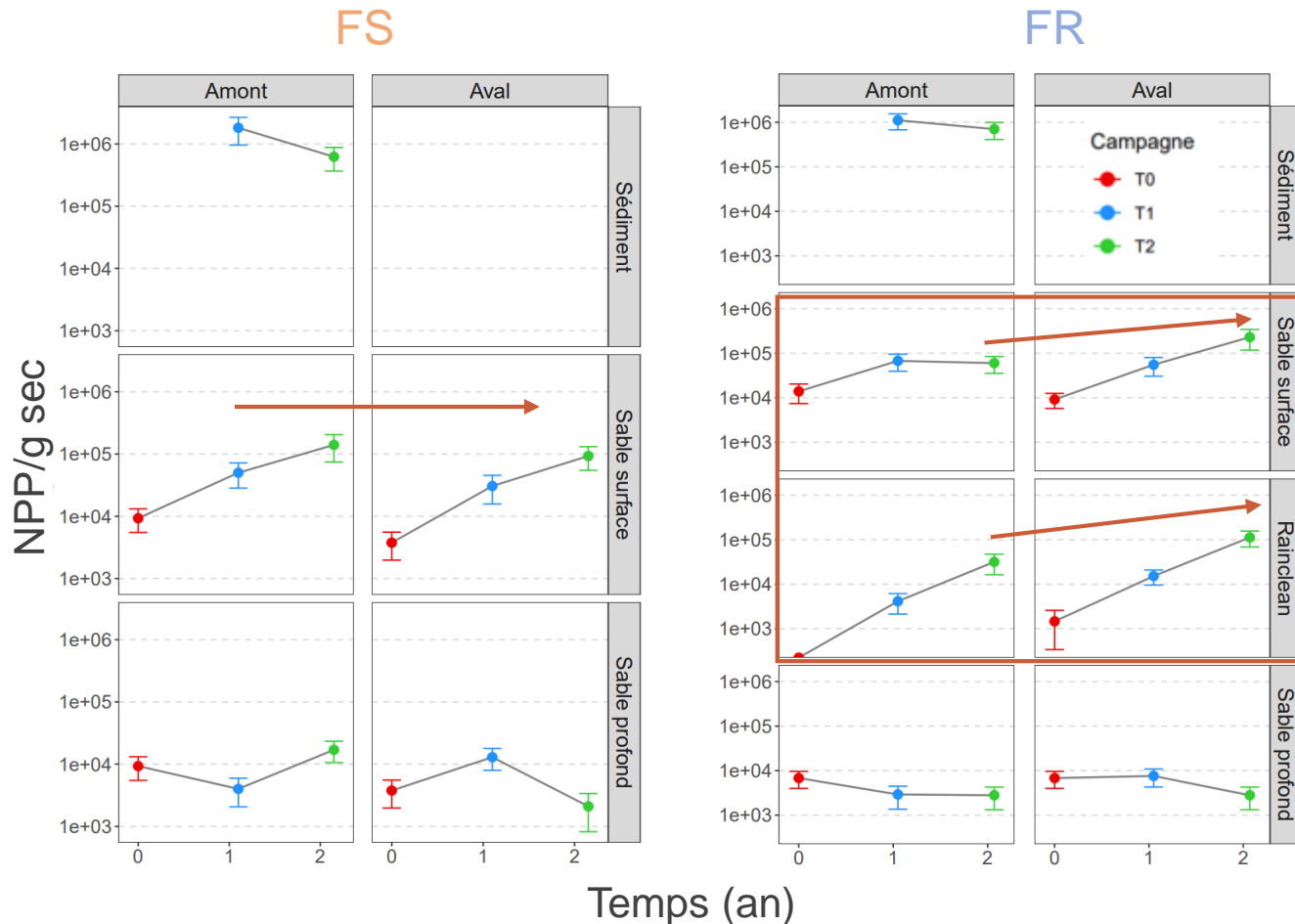
Evolution de l'abondance microbienne selon le temps et l'espace



# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

Abondance bactérienne : Nombre le Plus Probable (NPP)

\* : p-values < 0,05



**Augmentation avec le temps :**

Sable de surface et Rc (p-values < 0,05)

**FE (T0-T2) : 2,5 à 76,7**

→ Colonisation avec l'alimentation en eau (+ végétation)  
(Fraser et al., 2018)

**Diminution avec la profondeur :**

Sédiment >> Sable surface = Rc > Sable profond

**R = -0,80 à -0,92 (p-values < 10<sup>-7</sup>)**

→ Carbone organique (MO et MPO) nutriments  
(Bourceret, 2016)

**Augmentation d'amont en aval :**

Sable surface et Rc de **FR** (p-values < 0,045)

**FE (Av-Am) : 3,5-3,8**

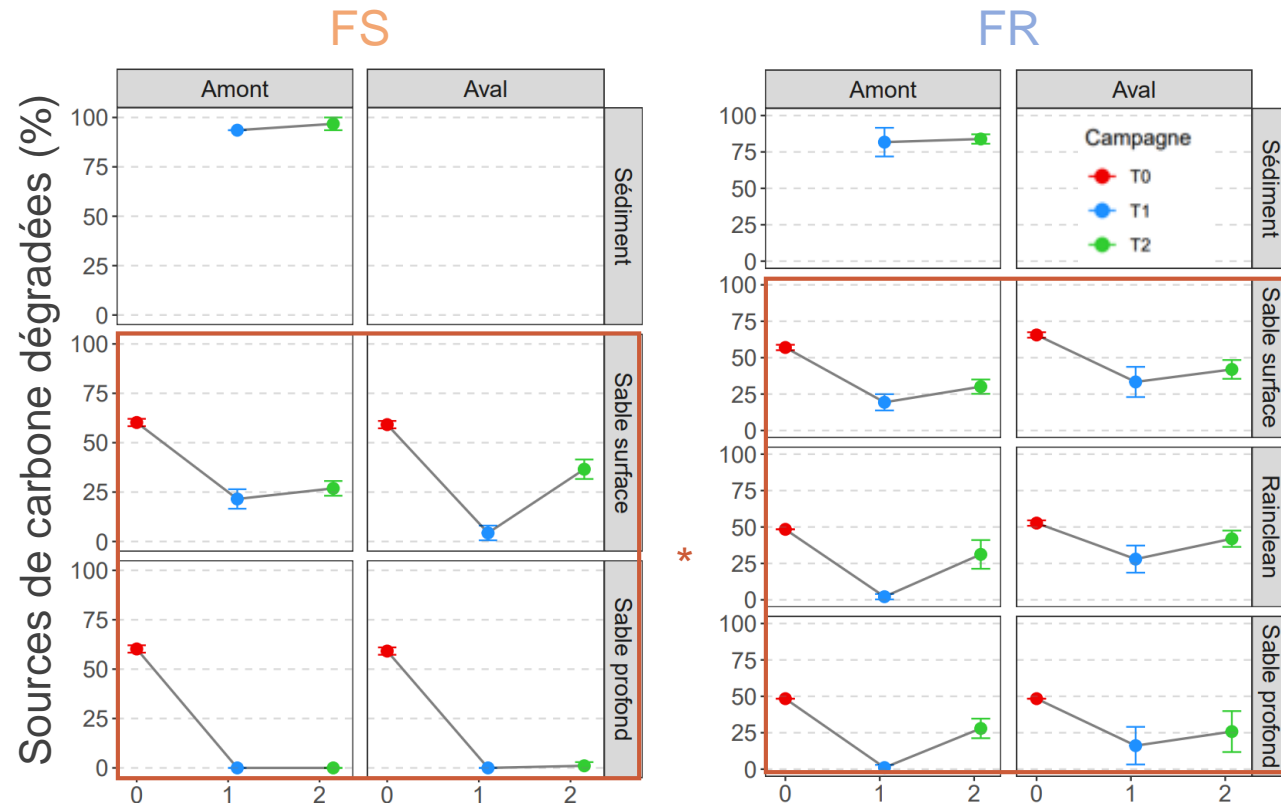
→ Contamination en ETM/MPO plus importante en amont  
(Brohon et al., 2001)

Evolution de l'abondance microbienne selon le temps et l'espace

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Potentiel fonctionnel : microplaques BIOLOG EcoPlates

\* : p-values < 0,05



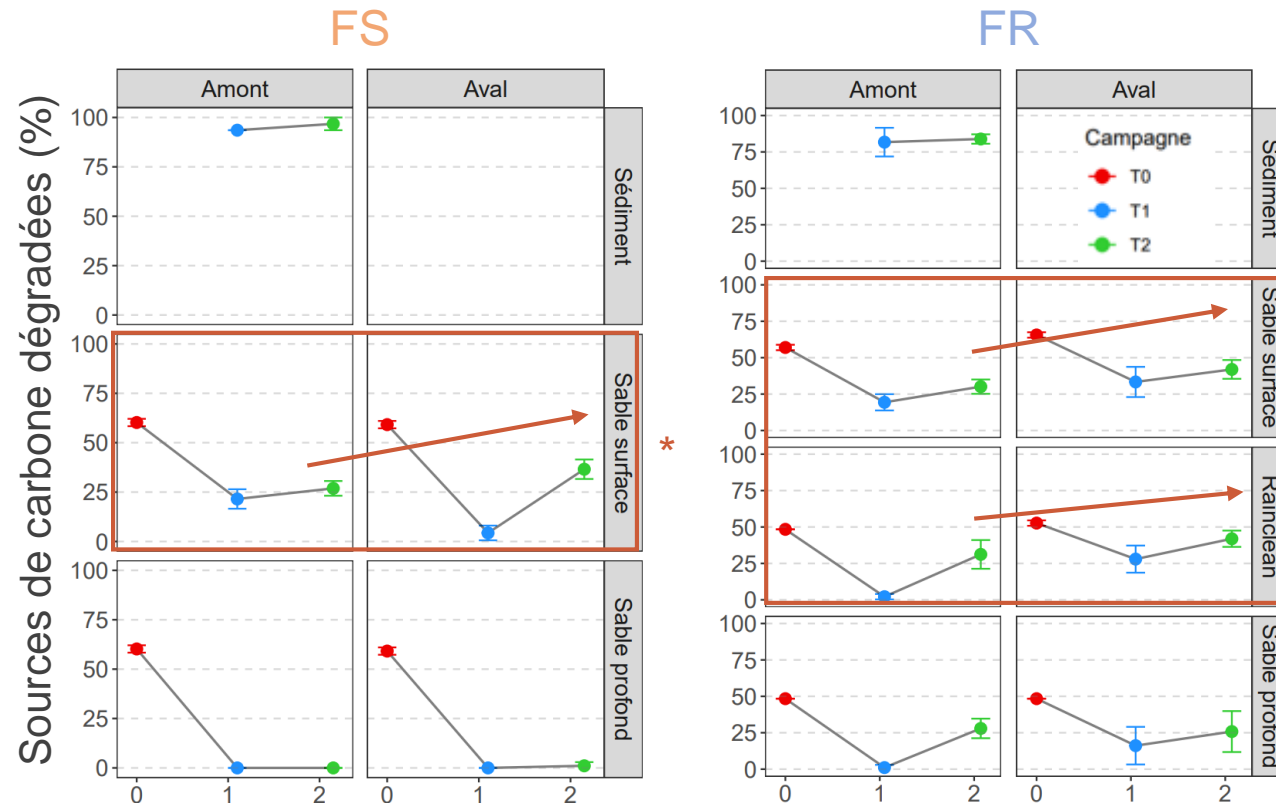
**Diminution avec le temps** : dès 1 an  
Sable de surface et profond, Rc (p-values < 0,04)  
➔ **Métabolisme moins diversifié**

*Evolution du potentiel fonctionnel selon le temps et l'espace*

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Potentiel fonctionnel : microplaques BIOLOG EcoPlates

\* : p-values < 0,05



**Diminution avec le temps** : dès 1 an  
Sable de surface et profond, Rc (p-values < 0,04)

➔ Métabolisme moins diversifié

\* **Augmentation d'amont en aval** :  
Sable surface et Rc (p-values < 0,05)  
~30 % dégradés en amont ; 40 % en aval  
➔ Contamination en ETM/MPO plus importante en amont  
➔ Métabolisme moins diversifié

*Evolution du potentiel fonctionnel selon le temps et l'espace*

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Activités enzymatiques : cycle du carbone ( $\beta$ -glucosidase)

\* : p-values < 0,05



### Augmentation avec le temps :

Sédiment, sable de surface (p-values < 0,01)

**FE (T0-T2) : 7,7 à 19,5 ; FE (T1-T2) : 3,9 à 4,4**

➔ Métabolisme plus actif avec l'alimentation en eau (+ végétation) (Mkhinini et al., 2022, Jiang et al., 2019b)

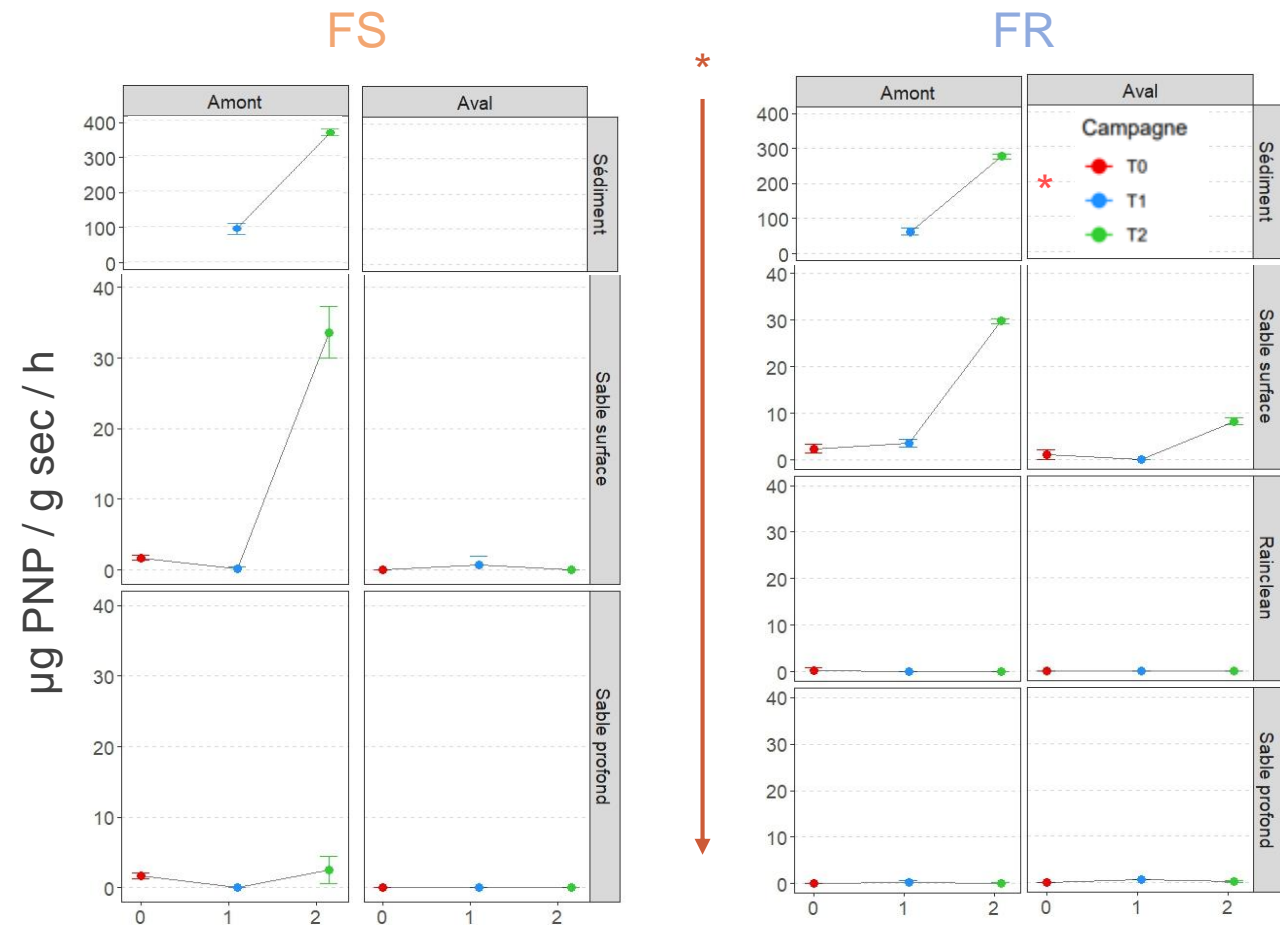
Evolution de l'activité enzymatique  $\beta$ -glucosidase selon le temps et l'espace



# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Activités enzymatiques : cycle du carbone ( $\beta$ -glucosidase)

\* : p-values < 0,05



### Augmentation avec le temps :

Sédiment, sable de surface (p-values < 0,01)

**FE (T0-T2) : 7,7 à 19,5 ; FE (T1-T2) : 3,9 à 4,4**

➔ Métabolisme plus actif avec l'alimentation en eau (+ végétation) (Mkhinini et al., 2022, Jiang et al., 2019b)

### Diminution avec la profondeur :

Sédiment >> Sable surface >> Rc = Sable profond

**R = -0,64 à -0,75 (p-values < 0,02)**

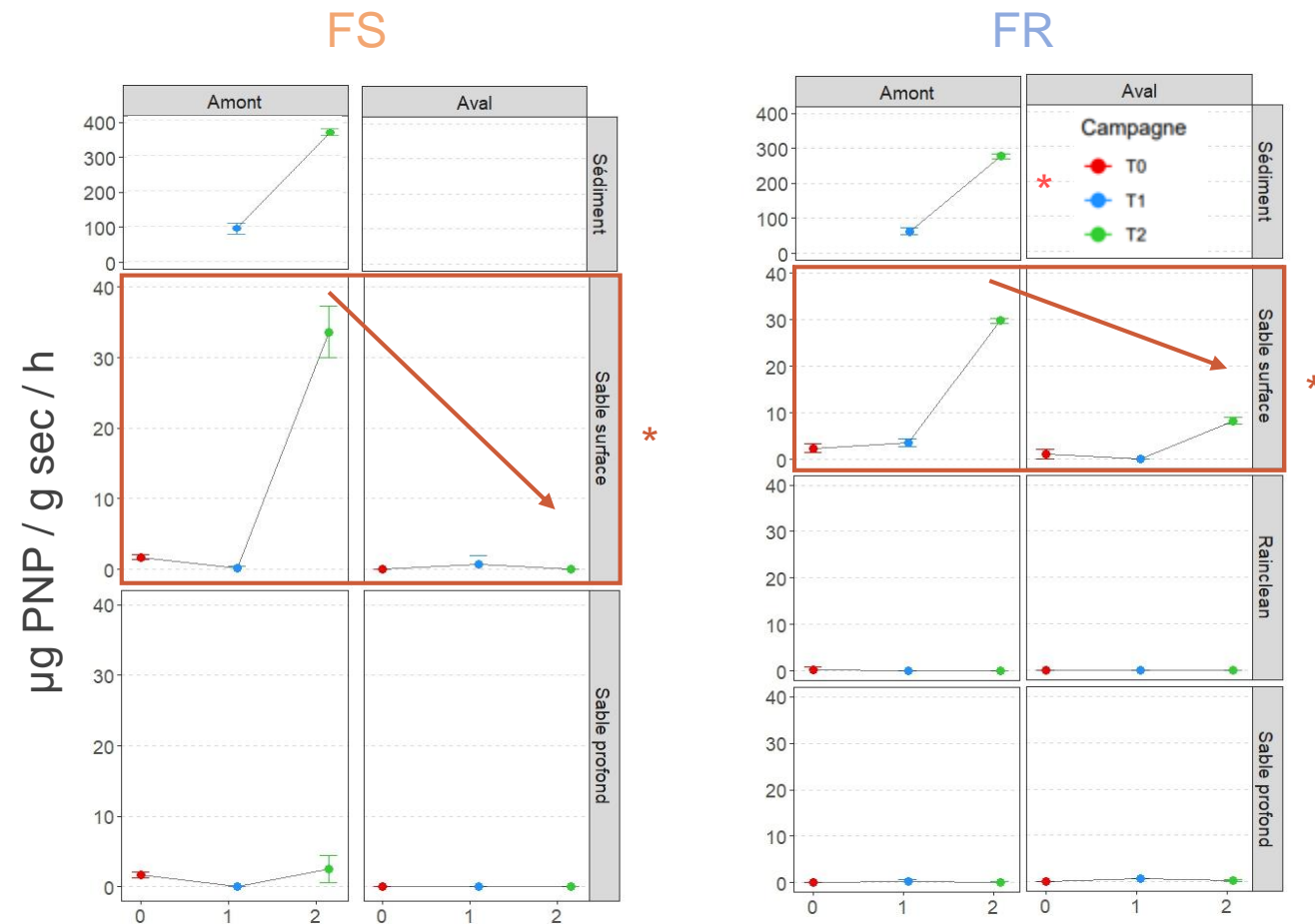
➔ Carbone organique (MO et MPO, nutriments) (El Mekdad et al., 2022)

Evolution de l'activité enzymatique  $\beta$ -glucosidase selon le temps et l'espace

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Activités enzymatiques : cycle du carbone ( $\beta$ -glucosidase)

\* : p-values < 0,05



### Augmentation avec le temps :

Sédiment, sable de surface (p-values < 0,01)

**FE (T0-T2) :** 7,7 à 19,5 ; **FE (T1-T2) :** 3,9 à 4,4

➔ Métabolisme plus actif avec l'alimentation en eau (+ végétation) (Mkhinini et al., 2022, Jiang et al., 2019b)

### Diminution avec la profondeur :

Sédiment >> Sable surface >> Rc = Sable profond

**R =** -0,64 à -0,75 (p-values < 0,02)

➔ Carbone organique (MO et MPO, nutriments) (El Mekdad et al., 2022)

### Diminution d'amont en aval :

Sable surface (p-values < 0,0003)

**FE (Am-av) :** 3,6-1682

➔ Carbone organique (MO et MPO, nutriments)

➔ Filtration des particules dans le sable (Guo et al., 2019)

Evolution de l'activité enzymatique  $\beta$ -glucosidase selon le temps et l'espace

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Activités enzymatiques : cycle du carbone ( $\beta$ -glucosidase)

\* : p-values < 0,05



### Augmentation avec le temps :

Sédiment, sable de surface (p-values < 0,01)

**FE** (T0-T2) : 7,7 à 19,5 ; **FE** (T1-T2) : 3,9 à 4,4

→ Métabolisme plus actif avec l'alimentation en eau (+ végétation) (M'hini et al., 2020; Liang et al., 2019b)

**Dynamique homogène des activités enzymatiques des cycles biogéochimiques**

+ Uréase, Déshydrogénase, Phosphatase augmentent dans le Rc

### Diminution d'amont en aval :

Sable surface (p-values < 0,0003)

**FE** (Am-av) : 3,6-1682

→ Carbone organique (MO et MPO, nutriments)

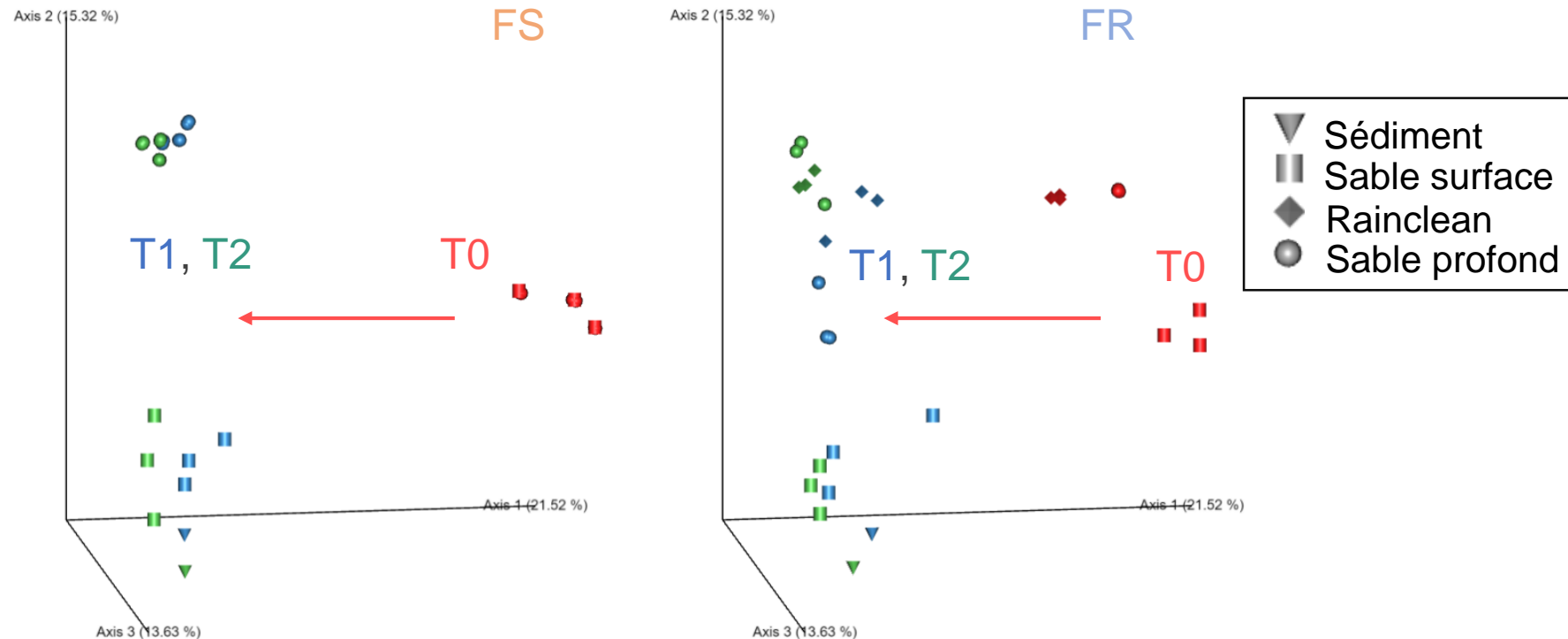
→ Filtration des particules dans le sable

(Guo et al., 2019)

Evolution de l'activité enzymatique  $\beta$ -glucosidase selon le temps et l'espace

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Diversité génétique : diversité beta bactérienne



Comparaison inter-  
échantillon de la  
structure des  
communautés

*PCoA de la diversité beta bactérienne dans le temps et l'espace selon l'indice Bray-Curtis*

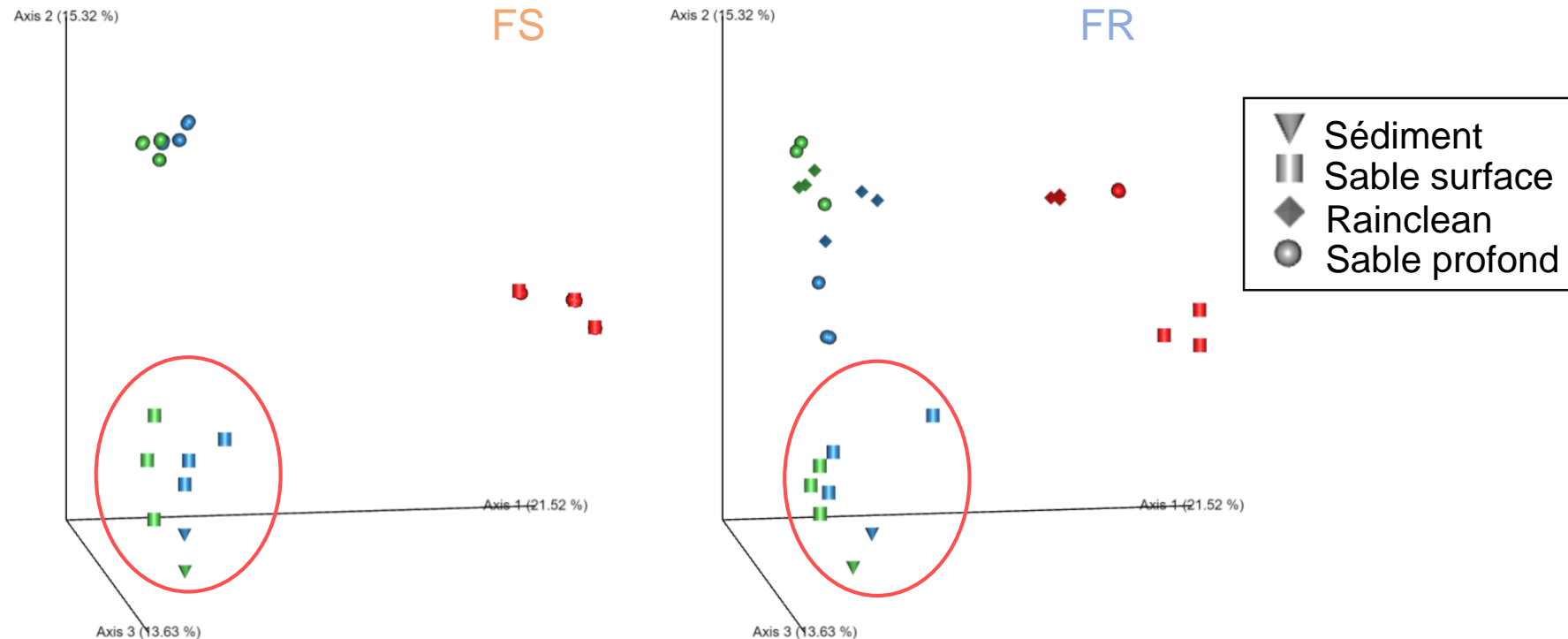
**Temps** : l'alimentation en eau a modifié la structure des communautés dès 1 an (p-values < 0,002)

➔ Evolution faible après 1 an



# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Diversité génétique : diversité beta bactérienne



Comparaison inter-échantillon de la structure des communautés

*PCoA de la diversité beta bactérienne dans le temps et l'espace selon l'indice Bray-Curtis*

**Temps** : l'alimentation en eau a modifié la structure des communautés dès 1 an (p-values < 0,002)

→ Evolution faible après 1 an

**Profondeur** : Sédiment et sable de surface VS Rainclean et sable profond

→ Hétérogénéité des apports liée au fonctionnement des FPR.

## I – Evolution des FPR : Conclusion sur la caractérisation des communautés microbiennes

- Alimentation en eau + croissance des plantes → **Développement** des communautés microbiennes dès 1 an
- **Sédiment** : biologiquement très active (*Deeb et al., 2018*) + plus contaminée → **Composante importante** des FPR
- **Sable surface** : développement **hétérogène** dans l'espace, lié à l'alimentation en eaux (filtration)

	Amont	Aval
Abondance	-	+
Potentiel fonctionnel	-	+
Activités enzymatiques	++	--

**Spécialisation** des communautés microbiennes : métabolisme moins diversifié mais plus actif en amont

- **Rainclean** : développement mais métabolisme moins actif et plus homogène
- **Sable profond** : développement faible et homogène → Rôle **mineur** dans les FPR

**Sédiment + Sable surface amont** = 12 % du volume total

→ Concentrent les ETM/MPO et l'activité microbienne

## I – Evolution des FPR : Conclusion sur la caractérisation des communautés microbiennes

- Alimentation en eau + croissance des plantes → **Développement** des communautés microbiennes dès 1 an

- **Sédiment** des FPR

- **Sable surface**

**Sédiment ≠ Sable surface ≠ Rc ≠ Sable profond**

Propriétés physico-chimiques, contamination,  
développement microbien

→ Quelle contribution à la biodégradation de MPO  
émergents ?

→ Différence selon les substrats ?

- **Rainclea**

- **Sable profond**

**Sédiment + Sable surface amont** = 12 % du volume total

→ Concentrent les ETM/MPO et l'activité microbienne

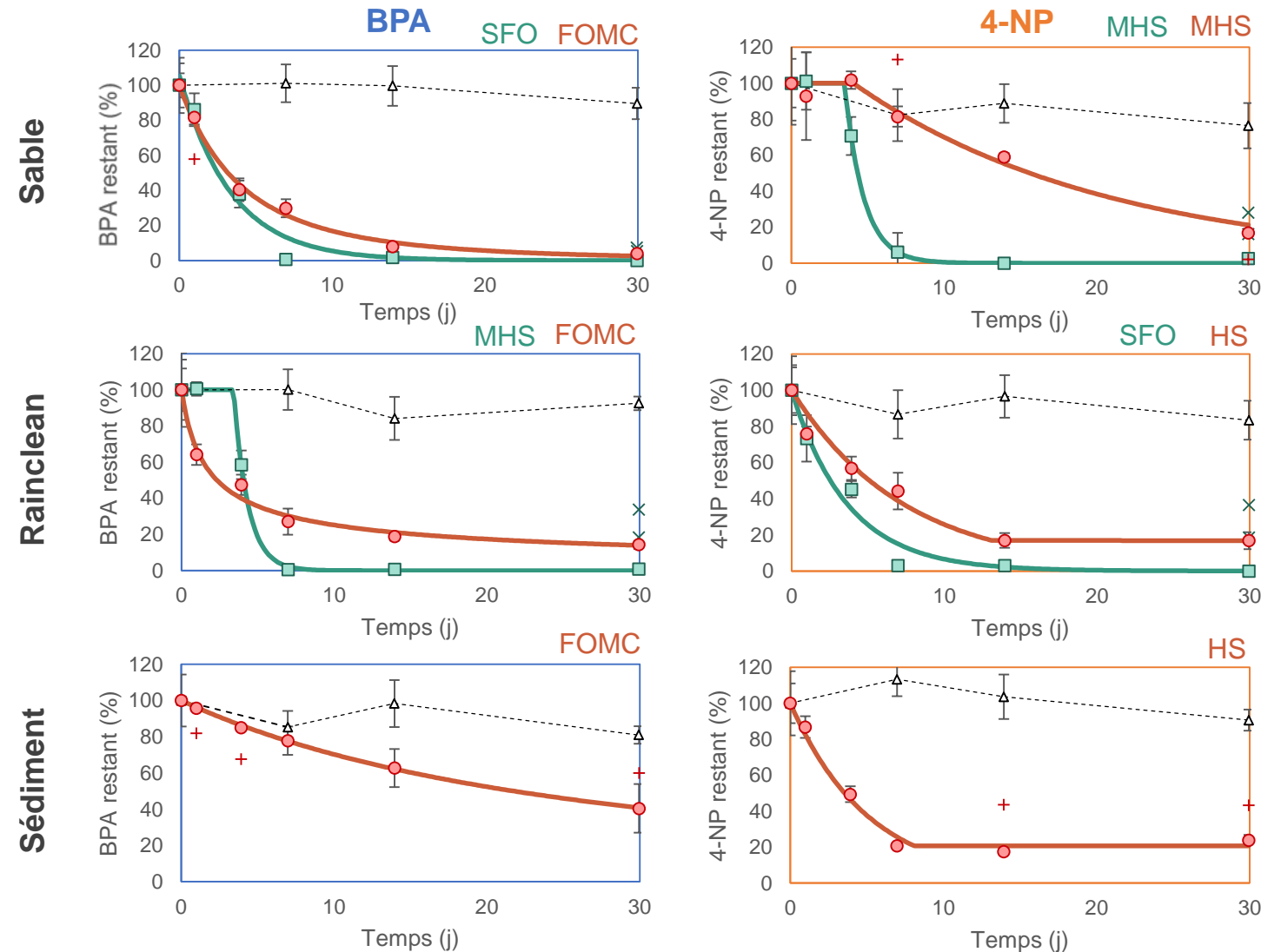
# Résultats et discussion

## II – Devenir des MPO : essais de biodégradation

BPA et 4-NP  
présentés

## II – Essais de biodégradation : Cinétiques de dégradation

Essais planté et non planté + témoin abiotique



### Légende

Essai Planté    Essai Non planté    Témoin abiotique

### Différents modèles

Une dégradation principalement **biotique**

-Dégradation **rapide** les 10 premiers jours

-Dégradation **plus lente à nulle**

### Impact du substrat

**Sable** : temps de latence pour le 4-NP (3-4 j)

**Rc non planté et sédiment** : Plateau de dégradation après 14 j

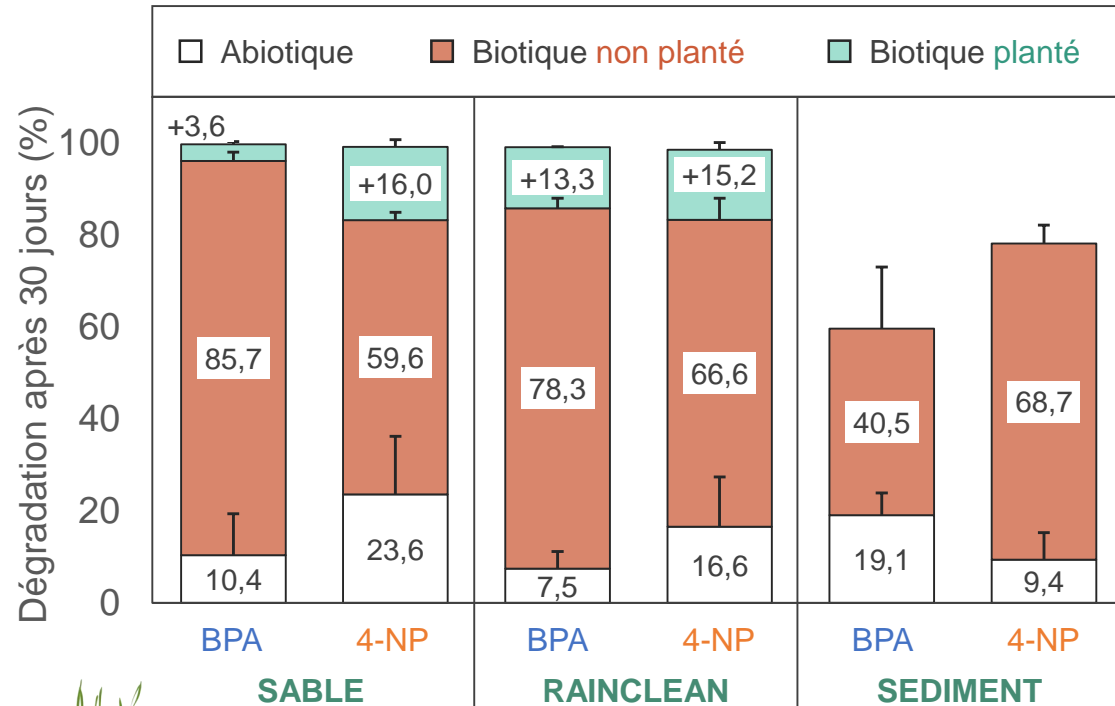
→ Phase résiduelle non dégradée (14-22 %)

→ Un risque d'**accumulation** au long terme des MPO : Rc non planté et sédiment

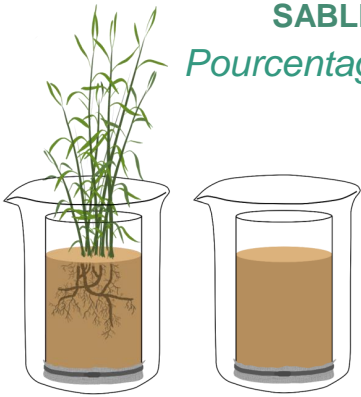


## II – Essais de biodégradation : Impact du biotique, du substrat et de *P. australis*

### Taux de dégradation après 30 j :



Pourcentages finaux de dégradation selon les conditions



- **60 à 99,6 %** dégradés

Abiotique : 9,4 à 24 % (p-values > 0,05 sauf BPA sédiment)

Biotique : **40 à 92 %** (p-values < 0,03)

Importance des **communautés microbiennes** sur l'élimination des MPO dans les FPR

- **Présence de *P. australis*** :

Dégradation plus poussée (p-values < 0,05)

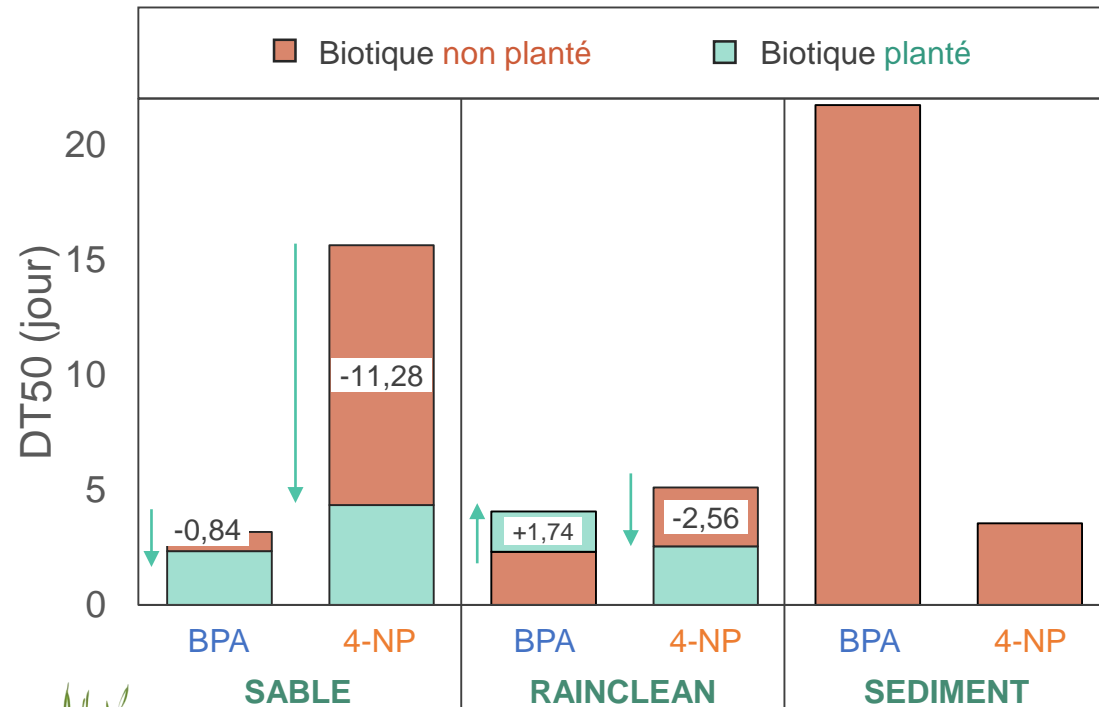
Rc planté : limitation de la phase résiduelle

Importance de la **végétation** sur la **biodisponibilité** des MPO dans le Rainclean

## II – Essais de biodégradation

Impact du biotique, du substrat et de *P. australis*

DT50 calculé :



Temps de demi-vie (DT50) en fonction de la présence ou absence de végétation



- **DT50 BPA** : 2,3 à 4,1 jours (21,7 jours avec sédiment)
- DT50 4-NP** : 2,5 à 15,6 jours

- ➔ Sable : BPA < 4-NP (*Langdon et al., 2011 ; Li et al., 2013*)
- ➔ Rainclean : plus régulier et DT50 faibles
- ➔ Sédiment : proche du Rainclean sauf BPA

### - Présence de *P. australis* :

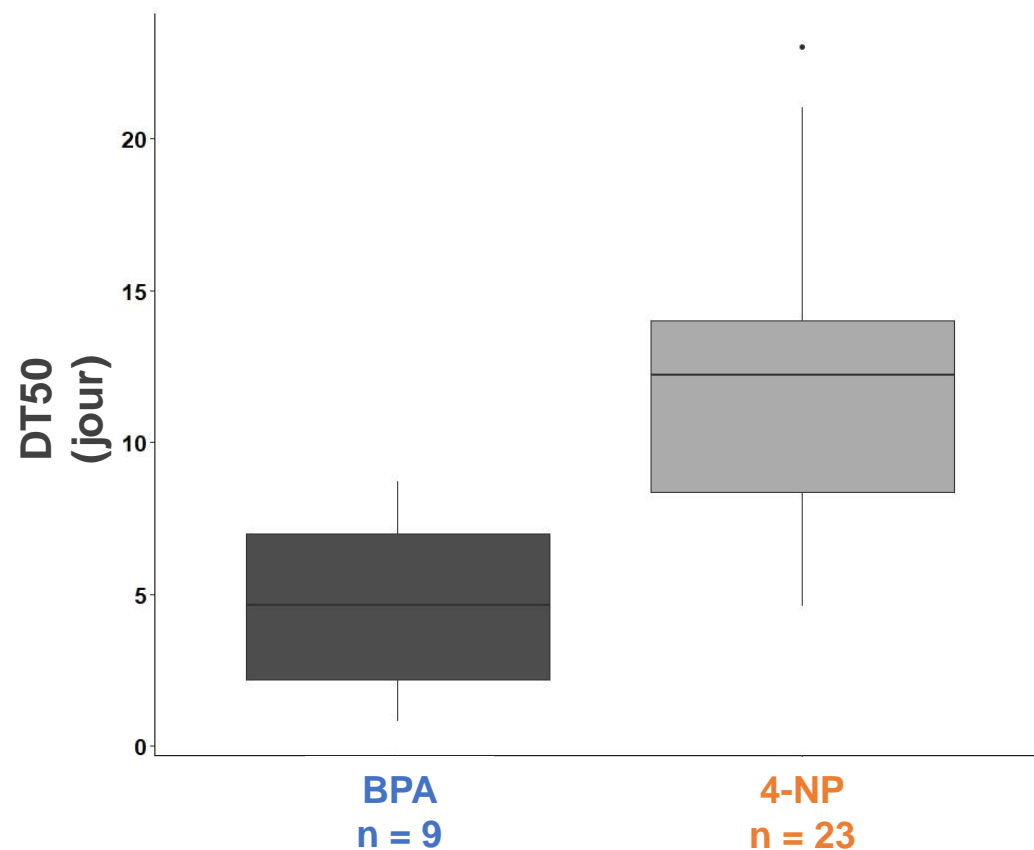
Sable : diminution des DT50, surtout le 4-NP  
Rainclean : Pas d'impact clair sur les DT50

➔ Importance de la **végétation** sur les vitesses de dégradation dans le **sable**  
(*Toyama et al., 2009 ; 2011 ; A et al., 2017*)

## II – Essais de biodégradation

Impact du biotique, du substrat et de *P. australis*

DT50 calculé :



### - Littérature :

BPA : moyenne de 4,6 j (0,81 à 8,7 j)

4-NP : moyenne de 12,3 j (4,6 à 25 j)

Temps de demi-vie (DT50) selon les publications et les valeurs des essais

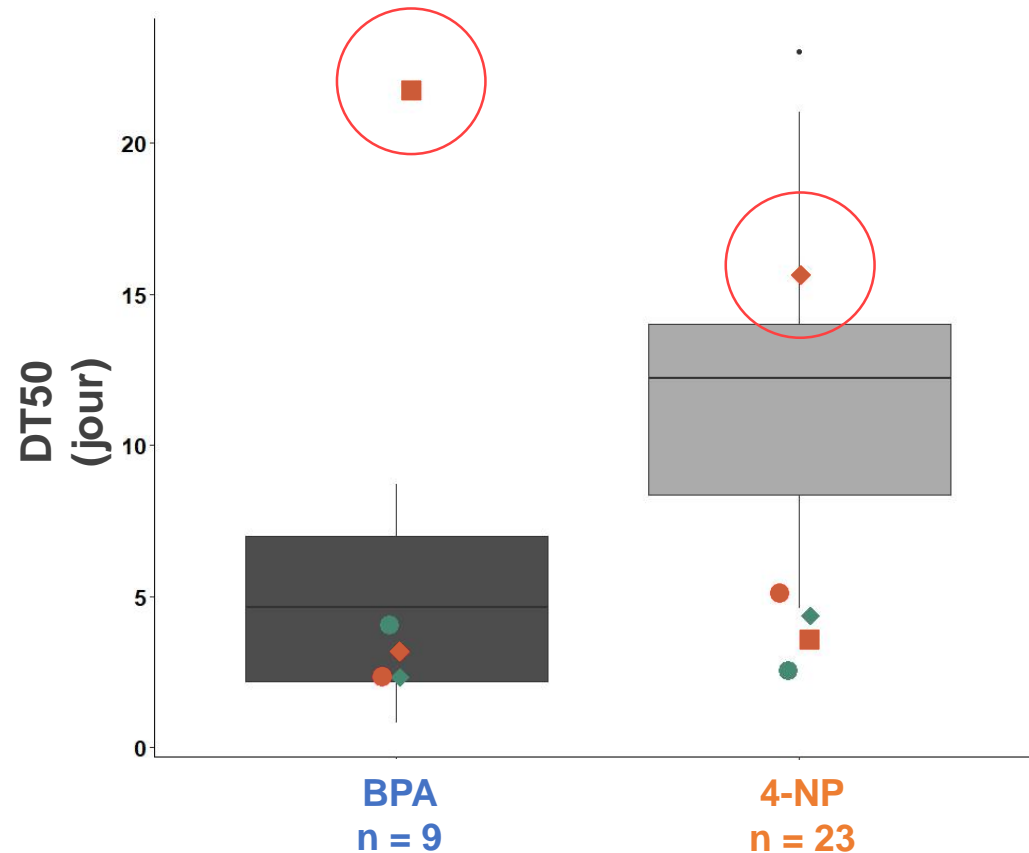
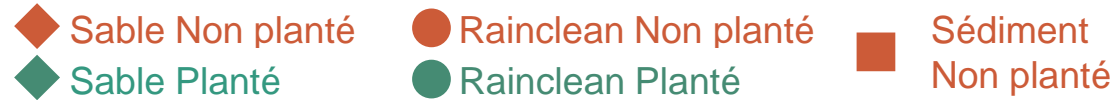
**BPA** : Xu et al., 2009 ; Ying and Kookana, 2005 ; Langdon et al., 2011 ; Li et al., 2013

**4-NP** : Ying and Kookana, 2005 ; Hseu 2006 ; Chang et al., 2007 ; Sjostrom et al., 2008 ; Brown et al., 2009 ; Langdon et al., 2011

## II – Essais de biodégradation

Impact du biotique, du substrat et de *P. australis*

DT50 calculé :



### - Littérature :

BPA : moyenne de 4,6 j (0,81 à 8,7 j)

4-NP : moyenne de 12,3 j (4,6 à 25 j)

➔ Essais : **tranche faible**

➔ Valeurs **homogènes** entre les substrats

Sauf sable non planté (4-NP)

Sauf sédiment (BPA)

Temps de demi-vie (DT50) selon les publications et les valeurs des essais

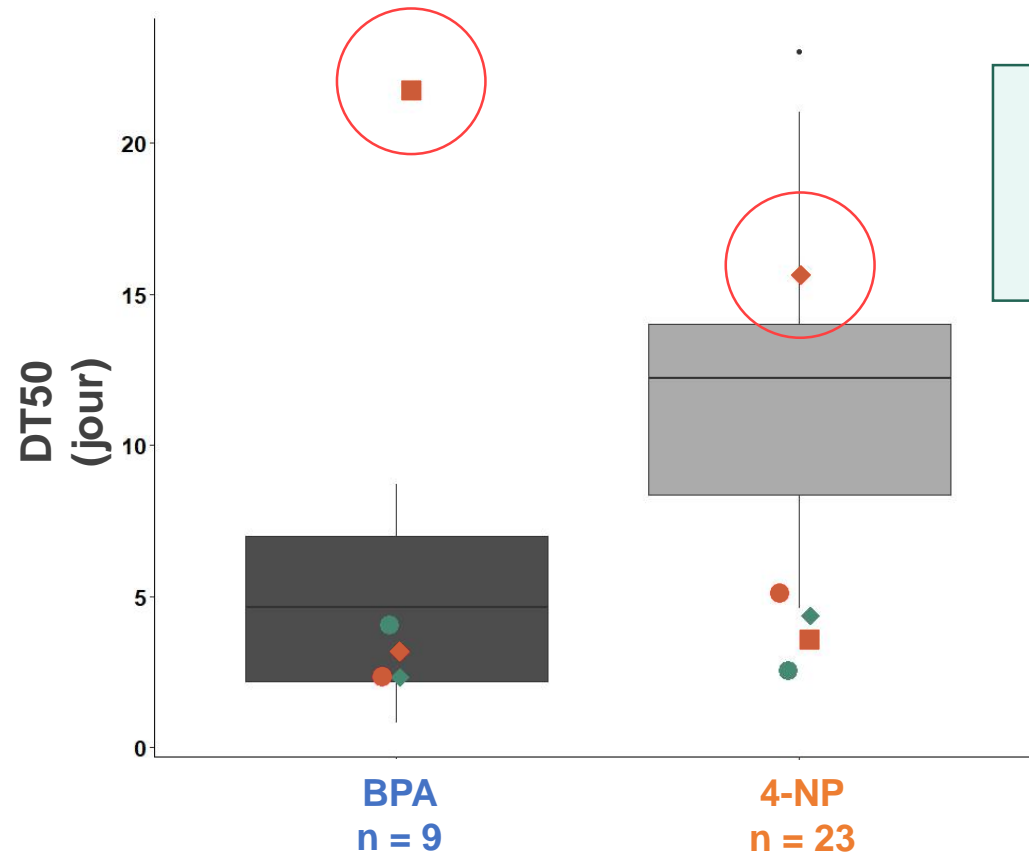
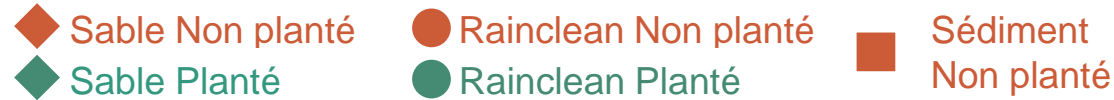
BPA : Xu et al., 2009 ; Ying and Kookana, 2005 ; Langdon et al., 2011 ; Li et al., 2013

4-NP : Ying and Kookana, 2005 ; Hseu 2006 ; Chang et al., 2007 ; Sjostrom et al., 2008 ; Brown et al., 2009 ; Langdon et al., 2011

## II – Essais de biodégradation

Impact du biotique, du substrat et de *P. australis*

DT50 calculé :



Temps de demi-vie (DT50) selon les publications et les valeurs des essais

Sable, Rc et  
sédiment :  
propriétés PC  
**distinctes**

Communautés  
microbiennes  
**distinctes** (p-  
values < 0,001)

Une **bonne**  
capacité de  
dégradation et  
assez **homogène**

→ Quelles populations  
bactériennes présentes ?

BPA : Xu et al., 2009 ; Ying and Kookana, 2005 ; Langdon et al., 2011 ; Li et al., 2013

4-NP : Ying and Kookana, 2005 ; Hseu 2006 ; Chang et al., 2007 ; Sjostrom et al., 2008 ; Brown et al., 2009 ; Langdon et al., 2011



## II – Essais de biodégradation

### Taxons bactériens > 1 %

	Sable	Rainclean	Sédiment
Familles (genre non identifié)	<i>Sphingomonadaceae</i> <i>Comamonadaceae</i> <i>Methylophilaceae</i> <i>Xanthomonadaceae</i> <i>Micrococcaceae</i> <i>Oxalobacteraceae</i>	<i>Sphingomonadaceae</i> <i>Comamonadaceae</i> <i>Methylophilaceae</i>	<i>Comamonadaceae</i> <i>Methylophilaceae</i> <i>Enterobacteriaceae</i> <i>Xanthomonadaceae</i> <i>Micrococcaceae</i> <i>Oxalobacteraceae</i>
Genre	<i>Hyphomicrobium</i> <i>Sphingomonas</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Arthrobacter</i> <i>Rhodococcus</i> <i>Methylibium</i>	<i>Hyphomicrobium</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Arthrobacter</i> <i>Rhodococcus</i> <i>Methylibium</i> <i>Methylothenella</i>	<i>Acinetobacter</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Bacillus</i>

Dès ~1 an : présence de taxons connus pour dégrader les MPO dans les différents substrats

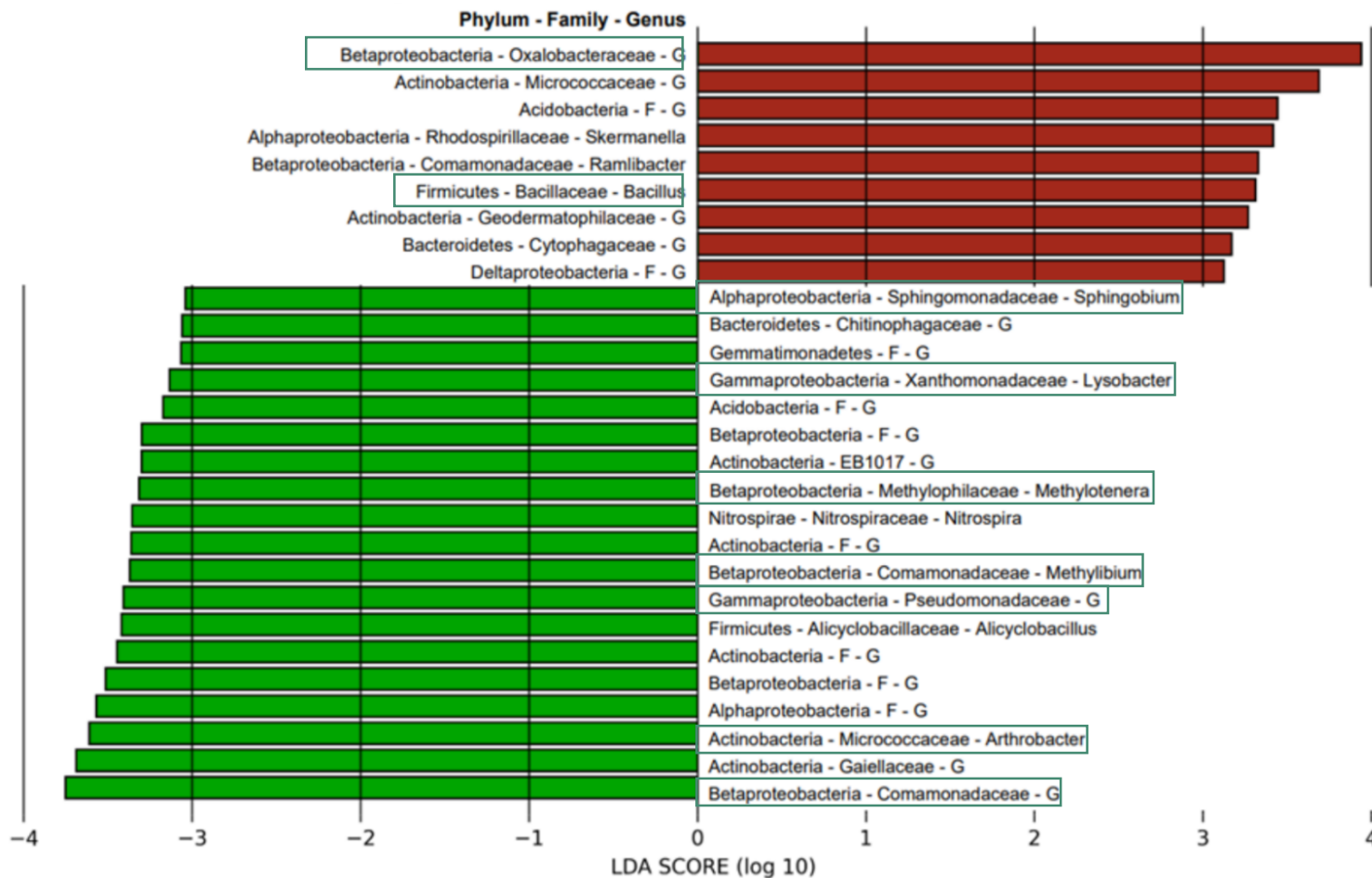
Taxons bactériens **connus** pour dégrader les MPO > 1 % dans les différents substrats (toutes les conditions) au temps final

Taxon aussi présent dans le **témoin non contaminé**

**Tous les substrats** : taxons connus pour dégrader les MPO retrouvés (abondance > 1 %)

## II – Essais de biodégradation *Taxons bactériens connus pour leur capacité à dégrader les MPO*

### Analyse Lefse : abondances différentielles



- Impact des MPO : non significatif

→ Impact **limité** des MPO

- Impact de *P. australis* : différences significatives (sable et Rainclean)

**Sable** : taxons connus : planté > non planté

→ Bactéries connues pour dégrader **favorisées** en présence de *P. australis*

Sélection de bactéries *par* *P. australis* → DT50 plus faible dans le sable

Score LDA > 3 issus de l'analyse LEfSE entre l'essais plantée et non plantée du **sable**

Sable Non planté

Sable Planté

Taxon connu pour dégrader les MPO

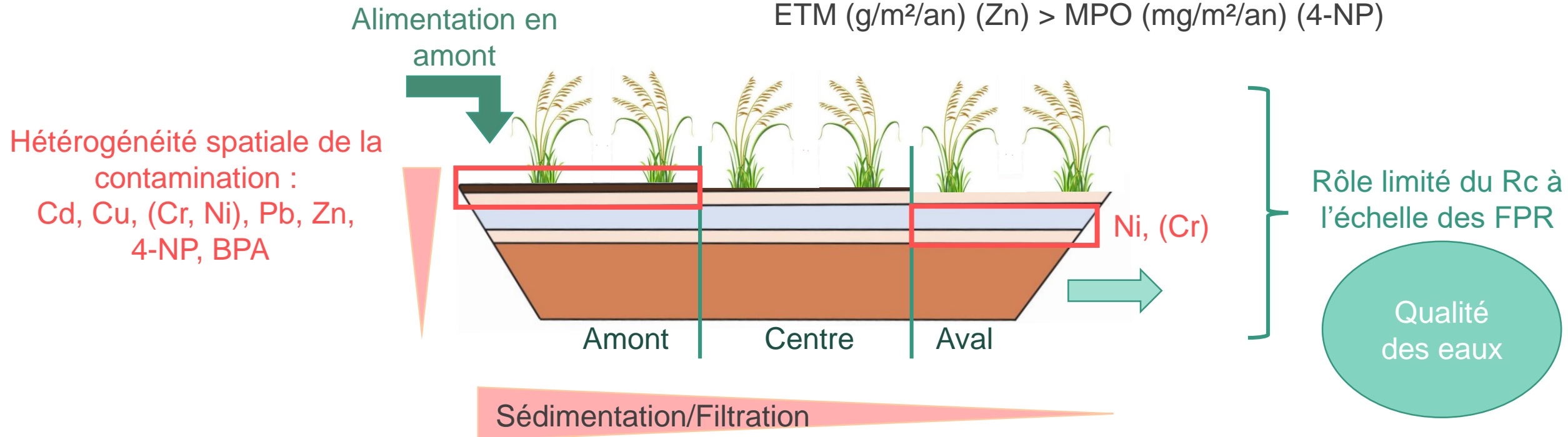
# Conclusion et perspectives

- **Conclusion générale :**

- **Processus de rétention des micropolluants**

**Sédimentation et filtration  
dominant  
+ Adsorption de MPO dans  
le sédiment**

ETM (g/m<sup>2</sup>/an) (Zn) > MPO (mg/m<sup>2</sup>/an) (4-NP)



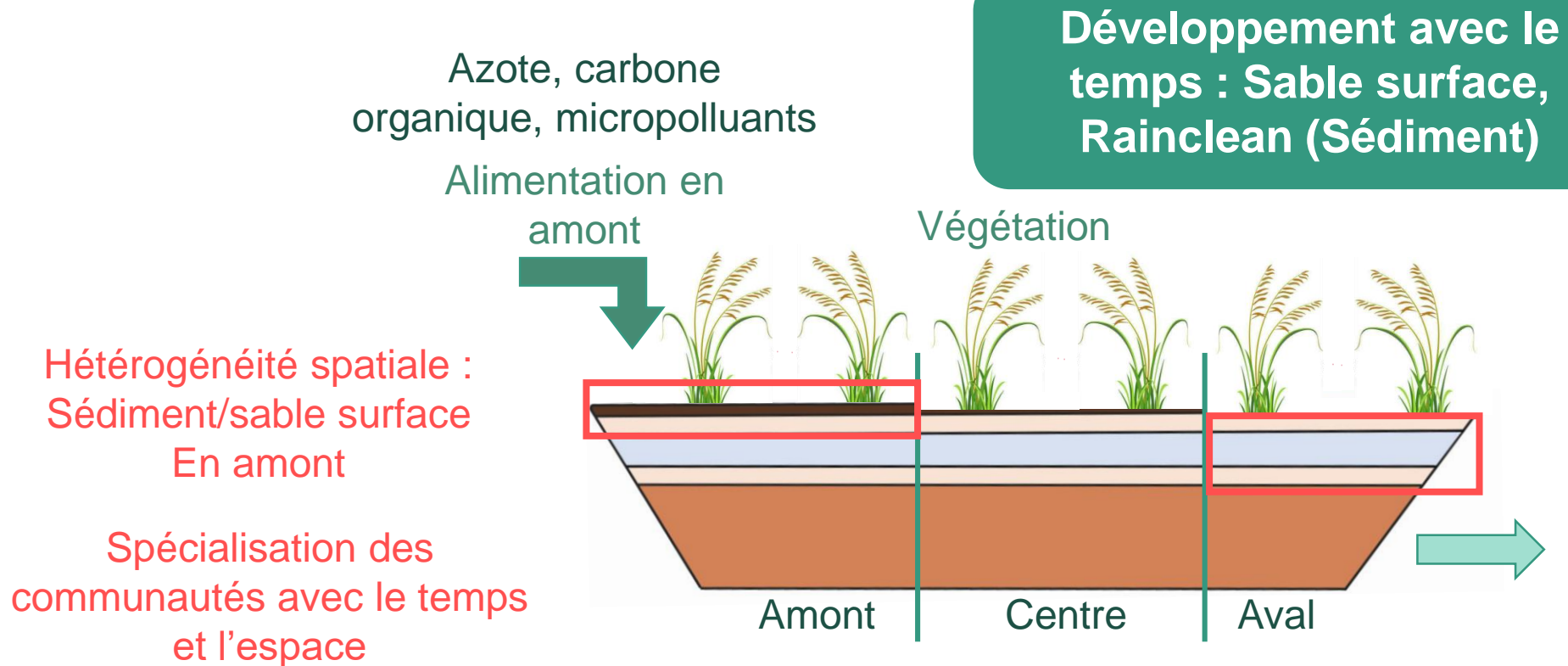
Après 2 ans : **Sédiment** seule couche considérée comme polluée

→ Surveillance du sable d'ici 3 à 6 ans (amont)

→ **Végétaux** peuvent être valorisés (déchets verts)

- **Conclusion générale :**

- **Développement des communautés microbiennes**



Abondance, diversité génétique, activités enzymatiques  
**AUGMENTENT**  
Potentiel fonctionnel  
**DIMINUE**

**Hétérogénéité biologique des FPR**  
→ Alimentation en eau et position du substrat



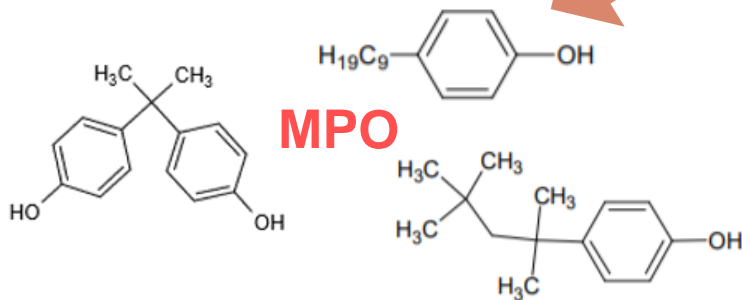
- **Conclusion générale :**

- **Processus d'élimination des MPO : biodégradation**  
**Végétation**

**Rc adsorbant :**  
Limitation de la  
phase résiduelle

**Sable inerte :**  
Diminution des  
DT50

**Microorganismes**



Dégradation  
élevée, rapide  
et homogène

Sable, Rc, Sédiment :  
Bactéries **connues** pour leur  
**capacité** à dégrader les MPO

1<sup>ère</sup> étude dans ce contexte

Processus microbiens **limitent**  
l'accumulation de MPO

La végétation améliore la  
biodégradation dans les FPR

Faible risque d'accumulation  
⚠ Rc non planté et sédiment  
→ Risque au long terme

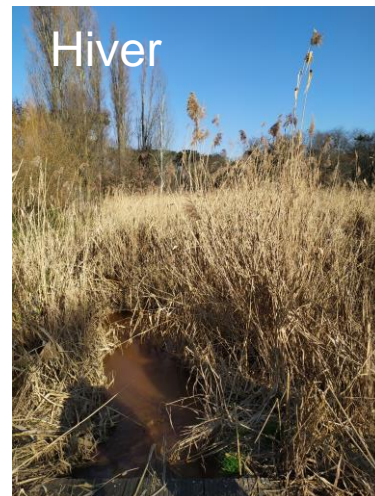
Communautés  
microbiennes  
différentes

Adaptées aux  
eaux reçues

**FR :** Biologiquement  
plus actif que FS  
→ Rc plus développé  
et bonne capacités de  
dégradation

- Perspectives :

- **Poursuivre l'étude du fonctionnement** (2 ans d'alimentation)
- **Bilan de masse global** (sédiment, substrats, végétation, eaux)
- **Mobilité et disponibilité des micropolluants** (eaux de nappe et phases porteuses)
- **Importance des microorganismes dans le traitement**
  - **Caractérisation *in situ*** (poursuite + diversité)
  - **Biodégradation** (processus, hétérogénéités)





## Membres du jury

Mathieu Gautier  
Thierry Lebeau  
Béatrice Bechet  
Thierry Heulin

## Encadrants

Noureddine Bousserhine  
Martin Seidl  
Pascale Neveu  
Paul Kennouche

## Stagiaires

Narimane Chibane  
Chloé Ranchoux

## Collaborateurs

LEESU :  
Régis Moilleron  
Marie-Christine Gromaire  
Cynthia Corroto  
Cerema :  
Philippe Branchu  
Cédric Payet  
David Ramier  
Ecobird :  
Ania Morvannou  
Stéphane Troesch  
INRAE :  
Giacomo Grassi  
Juliette Faburé  
CEA-Lemire :  
Wafa Achouak  
Mohamed Barakat

## Cellule technique

Vanessa Alphonse  
Alexandre Livet  
Lila Boudahmane  
Emilie Caupos  
Stéphanie Giusti-Miller  
Mohamed Saad  
Chandirane Partibane

Merci à tous les **membres**  
du **LEESU** et à tous ceux  
présents aujourd'hui



# Références

- A, D., D. Fujii, S. Soda, T. Machimura, et M. Ike. 2017. « Removal of Phenol, Bisphenol A, and 4-Tert-Butylphenol from Synthetic Landfill Leachate by Vertical Flow Constructed Wetlands ». *Science of The Total Environment* 578: 566-76. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.232>.
- Boesten, J. J. T. I., K. Aden, C. Beigel, M. Dust, J. S. Dyson, et G. Soulas. 2014. « Guidance document on estimating persistence and degradation kinetics from environmental fate studies on pesticides in EU registration. Report of the FOCUS Work Group on Degradation Kinetics, EC Doc. » [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/projects\\_data/focus/dk/docs/FOCUSkineticsvc1.1Dec2014.pdf](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/projects_data/focus/dk/docs/FOCUSkineticsvc1.1Dec2014.pdf).
- Brown, S., D. Devin-Clarke, M. Doubrava, et G. O'Connor. 2009. « Fate of 4-Nonylphenol in a Biosolids Amended Soil ». *Chemosphere* 75 (4): 549-54. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.12.001>.
- Brohon, B., C. Delolme, et R. Gourdon. 2001. « Complementarity of Bioassays and Microbial Activity Measurements for the Evaluation of Hydrocarbon-Contaminated Soils Quality ». *Soil Biology and Biochemistry* 33 (7): 883-91. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00234-0).
- Cai, W., Y. Li, P. Wang, L. Niu, W. Zhang, et C. Wang. 2016. « Effect of the Pollution Level on the Functional Bacterial Groups Aiming at Degrading Bisphenol A and Nonylphenol in Natural Biofilms of an Urban River ». *Environmental Science and Pollution Research* 23 (15): 15727-38. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6757-3>.
- Chang, B. V., B. W. Chiang, et S. Y. Yuan. 2007. « Biodegradation of Nonylphenol in Soil ». *Chemosphere* 66 (10): 1857-62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.029>.
- Chen, B., J. Xu, H. Lu, et L. Zhu. 2023. « Remediation of Benzo[a]Pyrene Contaminated Soils by Moderate Chemical Oxidation Coupled with Microbial Degradation ». *Science of The Total Environment* 871: 161801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161801>.
- Cheng, G., M. Sun, J. Lu, X. Ge, H. Zhang, X. Xu, L. Lou, et Q. Lin. 2017. « Role of Biochar in Biodegradation of Nonylphenol in Sediment: Increasing Microbial Activity versus Decreasing Bioavailability ». *Scientific Reports* 7 (1): 4726. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04787-2>.
- Chocat, B. 2008. « Etat de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation ». Office International de l'Eau.
- Corvini, P. F. X., A. Schäffer, et D. Schlosser. 2006. « Microbial degradation of nonylphenol and other alkylphenols—Our evolving view ». *Applied Microbiology and Biotechnology* 72 (2): 223-43. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0476-5>.
- European Union et Council of the European Union. 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128002b>.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). 1998. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. National Technical Info Svc. American Society of Civil Engineers. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40382%281998%2955>.
- Flanagan, K., P. Branchu, L. Boudahmane, E. Caupos, D. Demare, S. Deshayes, P. Dubois, et al. 2018. « Field Performance of Two Biofiltration Systems Treating Micropollutants from Road Runoff ». *Water Research* 145: 562-78. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.064>.
- Fletcher, T. D., W. Shuster, W. F. Hunt, R. Ashley, D. Butler, S. Arthur, S. Trowsdale, et al. 2015. « SUDS, LID, BMPs, WSUD and More – The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage ». *Urban Water Journal* 12 (7): 525-42. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>.
- Fraser, A., Y. Zhang, E. Sakowski, et S. Preheim. 2018. « Dynamics and Functional Potential of Stormwater Microorganisms Colonizing Sand Filters ». *Water* 10 (8): 1065. <https://doi.org/10.3390/w10081065>.
- Gasperi, J., S. Garnaud, V. Rocher, et R. Moilleron. 2010. « Polluants prioritaires dans les rejets urbains de temps de pluie : cas de la ville de Paris ». Paris, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01115309>.
- Gasperi, J., J. Le Roux, S. Deshayes, S. Ayrault, L. Bordier, L. Boudahmane, H. Budzinski, et al. 2022. « Micropollutants in Urban Runoff from Traffic Areas: Target and Non-Target Screening on Four Contrasted Sites ». *Water* 14 (3): 394. <https://doi.org/10.3390/w14030394>.
- Gill, L. W., P. Ring, B. Casey, N. M. P. Higgins, et P. M. Johnston. 2017. « Long Term Heavy Metal Removal by a Constructed Wetland Treating Rainfall Runoff from a Motorway ». *Science of The Total Environment* 601-602: 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.182>.
- Gill, L. W., P. Ring, N. M. P. Higgins, et P. M. Johnston. 2014. « Accumulation of Heavy Metals in a Constructed Wetland Treating Road Runoff ». *Ecological Engineering* 70: 133-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.056>.
- Griffiths, B. S., et L. Philippot. 2013. « Insights into the Resistance and Resilience of the Soil Microbial Community ». *FEMS Microbiology Reviews* 37 (2): 112-29. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2012.00343.x>.
- Hseu, Z-Y. 2006. « Response of Microbial Activities in Two Contrasting Soils to 4-Nonylphenol Treated with Biosolids ». *Chemosphere* 64 (10): 1769-76. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.042>.

# Références

- Im, J., et F. E. Löffler. 2016. « Fate of Bisphenol A in Terrestrial and Aquatic Environments ». *Environmental Science & Technology* 50 (16): 8403-16. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00877>.
- Jiang, C., J. Li, H. Li, et Y. Li. 2019b. « Nitrogen Retention and Purification Efficiency from Rainfall Runoff via Retrofitted Bioretention Cells ». *Separation and Purification Technology* 220: 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.036>.
- Kane, S. R., A. Y. Chakicherla, P. S. G. Chain, R. Schmidt, M. W. Shin, T. C. Legler, K. M. Scow, et al. 2007. « Whole-Genome Analysis of the Methyl Tert -Butyl Ether-Degrading Beta-Proteobacterium *Methylibium Petroleiphilum* PM1 ». *Journal of Bacteriology* 189 (5): 1931-45. <https://doi.org/10.1128/JB.01259-06>.
- Lamprea, K., C. Mirande-Bret, A. Bressy, et M-C. Gromaire. 2017. « Evaluation du potentiel d'émission d'alkylphénols et de bisphénol A par lessivage des matériaux de construction, des pièces et des consommables automobiles ». *Techniques Sciences Méthodes* 7/8 (7-8): 71-90. <https://doi.org/10.1051/tsm/201778071>.
- Langdon, K. A., M. St. J. Warne, R. J. Smernik, A. Shareef, et R. S. Kookana. 2011. « Degradation of 4-Nonylphenol, 4-t-Octylphenol, Bisphenol A and Triclosan Following Biosolids Addition to Soil under Laboratory Conditions ». *Chemosphere* 84 (11): 1556-62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.053>.
- LeFevre, G. H., R. M. Hozalski, et P. J. Novak. 2012. « The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils ». *Water Research*, Special Issue on Stormwater in urban areas, 46 (20): 6753-62. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.040>.
- LeFevre, G. H., K. H. Paus, P. Natarajan, et J. Gulliver. 2014. « Review of Dissolved Pollutants in Urban Storm Water and Their Removal and Fate in Bioretention Cells ». *Journal of Environmental Engineering* 141 (1): 04014050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000876](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000876).
- LeFevre, G. H., K. H. Paus, P. Natarajan, J. S. Gulliver, P. J. Novak, et R. M. Hozalski. 2015. « Review of Dissolved Pollutants in Urban Storm Water and Their Removal and Fate in Bioretention Cells ». *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING* 141 (1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000876](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000876).
- Lenormand, E., C. Kustner, I. Combroux, P. Bois, et A. Wanko. 2022b. « Diagnosing Trace Metals Contamination in Ageing Stormwater Constructed Wetlands by Portable X-Ray Fluorescence Analyzer (pXRF) ». *Science of The Total Environment* 844: 157097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157097>.
- Leroy, M-C., M. Legras, S. Marcotte, V. Moncond'huy, N. Machour, F. Le Derf, et F. Portet-Koltalo. 2015. « Assessment of PAH Dissipation Processes in Large-Scale Outdoor Mesocosms Simulating Vegetated Road-Side Swales ». *The Science of the Total Environment* 520: 146-53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.020>.
- Leroy, M-C., F. Portet-Koltalo, M. Legras, F. Lederf, V. Moncond'huy, I. Polaert, et S. Marcotte. 2016. « Performance of Vegetated Swales for Improving Road Runoff Quality in a Moderate Traffic Urban Area ». *Science of The Total Environment* 566-567: 113-21. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.027>.
- Li, J., L. Jiang, X. Liu, et J. Lv. 2013. « Adsorption and Aerobic Biodegradation of Four Selected Endocrine Disrupting Chemicals in Soil-Water System ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 76: 3-7. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.06.004>.
- Liu, Y., F. Wang, S. Xia, et J. Zhao. 2008. « Study of 4-t-Octylphenol Degradation and Microbial Community in Granular Sludge ». *Journal of Environmental Sciences* 20 (2): 167-71. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60026-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60026-1).
- Ma, W., Y. Yan, M. Ma, Y. Zhang, C. Nie, et X. Lun. 2016. « Effect of biochar on migration and biodegradation of 4-n-nonylphenol (NP) during river-based groundwater recharge with reclaimed water ». *Desalination and Water Treatment* 57 (60): 29316-27. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1167631>.
- Maigne, J. 2006. « La Gestion Durable des Techniques Alternatives en Assainissement pluvial ». <http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/maigne.pdf>.
- Mangangka, Isri R., An Liu, Prasanna Egodawatta, et Ashantha Goonetilleke. 2015. « Sectional Analysis of Stormwater Treatment Performance of a Constructed Wetland ». *Ecological Engineering* 77 (avril): 172-79. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.028>.
- Markiewicz, A., K. Björklund, E. Eriksson, Y. Kalmykova, A-M. Strömvall, et A. Siopi. 2017. « Emissions of Organic Pollutants from Traffic and Roads: Priority Pollutants Selection and Substance Flow Analysis ». *Science of The Total Environment* 580: 1162-74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.074>.
- Matsumura, Y., C. Hosokawa, M. Sasaki-Mori, A. Akahira, K. Fukunaga, T. Ikeuchi, K-I. Oshiman, et T. Tsuchido. 2009. « Isolation and Characterization of Novel Bisphenol - A-Degrading Bacteria from Soils ». *Biocontrol Science* 14 (4): 161-69. <https://doi.org/10.4265/bio.14.161>.
- Mkhinini, M., I. Boughattas, V. Alphonse, A. Livet, S. Giusti-Miller, M. Banni, et N. Bousserhine. 2020. « Heavy Metal Accumulation and Changes in Soil Enzymes Activities and Bacterial Functional Diversity under Long-Term Treated Wastewater Irrigation in East Central Region of Tunisia (Monastir Governorate) ». *Agricultural Water Management* 235: 106150. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106150>.
- Montenegro, I. P. F. M., A. P. Mucha, M. P. Tomasino, C. R. Gomes, et C. M. R. Almeida. 2021. « Alkylphenols and Chlorophenols Remediation in Vertical Flow Constructed Wetlands: Removal Efficiency and Microbial Community Response ». *Water* 13 (5): 715. <https://doi.org/10.3390/w13050715>.
- OECD. 2002. *Lignes Directrices de l'OCDE Pour Les Essais de Produits Chimiques. Transformation Aérobie et Anaérobie Dans Le Sol*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-301-ready-biodegradability\\_9789264070349-en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-301-ready-biodegradability_9789264070349-en).



# Références

- Oh, S., et D. Choi. 2019. « Microbial Community Enhances Biodegradation of Bisphenol A Through Selection of Sphingomonadaceae ». *Microbial Ecology* 77 (3): 631-39. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1263-4>.
- Revitt, D. M., L. Lundy, F. Coulon, et M. Fairley. 2014. « The Sources, Impact and Management of Car Park Runoff Pollution: A Review ». *Journal of Environmental Management* 146: 552-67. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.041>.
- Sarma, H., A. Nava, A. Manriquez, D. Dominguez, et W. Y. Lee. 2019. « Biodegradation of bisphenol A by bacterial consortia isolated directly from river sediments ». *Environmental Technology & Innovation* 14: 100314. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.008>.
- Schmitt, N., A. Wanko, J. Laurent, P. Bois, P. Molle, et R. Mosé. 2015. « Constructed Wetlands Treating Stormwater from Separate Sewer Networks in a Residential Strasbourg Urban Catchment Area: Micropollutant Removal and Fate ». *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3 (4, Part A): 2816-24. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.10.008>.
- Shi, G., J. Hu, Y. Cheng, W. Shi, et Y. Chen. 2022. « Pseudomonas Aeruginosa Improved the Phytoremediation Efficiency of Ryegrass on Nonylphenol-Cadmium Co-Contaminated Soil ». *Environmental Science and Pollution Research* 30 (10): 28247-58. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24224-w>.
- Sjöström, Å. E., C. D. Collins, S. R. Smith, et G. Shaw. 2008. « Degradation and Plant Uptake of Nonylphenol (NP) and Nonylphenol-12-Ethoxylate (NP12EO) in Four Contrasting Agricultural Soils ». *Environmental Pollution* 156 (3): 1284-89. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.03.005>.
- Soares, A., B. Guieysse, O. Delgado, et B. Mattiasson. 2003. « Aerobic Biodegradation of Nonylphenol by Cold-Adapted Bacteria ». <https://doi.org/10.1023/A:1023466916678>.
- Song, M., C. Luo, L. Jiang, D. Zhang, Y. Wang, et G. Zhang. 2015. « Identification of Benzo[ a ]Pyrene-Metabolizing Bacteria in Forest Soils by Using DNA-Based Stable-Isotope Probing ». Édité par H. Nojiri. *Applied and Environmental Microbiology* 81 (21): 7368-76. <https://doi.org/10.1128/AEM.01983-15>.
- Stachel, B., J-U. Holthuis, W. Schulz, W. Seitz, W. H. Weber, K-T. Tegge, et I. Dobner. 2010. « Treatment Techniques and Analysis of Stormwater Run-off from Roads in Hamburg, Germany ». In *Xenobiotics in the Urban Water Cycle: Mass Flows, Environmental Processes, Mitigation and Treatment Strategies*, édité par D. Fatta-Kassinos, K. Bester, et K. Kümmerer, 445-61. Environmental Pollution. Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3509-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3509-7_24).
- Tedoldi, D., G. Chebbo, D. Pierlot, Y. Kovacs, et M-C. Gromaire. 2016. « Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review ». *Science of The Total Environment* 569-570: 904-26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.215>.
- . 2017. « Assessment of Metal and PAH Profiles in SUDS Soil Based on an Improved Experimental Procedure ». *Journal of Environmental Management* 202: 151-66. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.063>.
- Tian, K., Y. Yu, Q. Qiu, X. Sun, F. Meng, Y. Bi, J. Gu, Y. Wang, F. Zhang, et H. Huo. 2022. « Mechanisms of BPA Degradation and Toxicity Resistance in Rhodococcus Equi ». *Microorganisms* 11 (1): 67. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010067>.
- Tong, T., R. Li, M. Chai, Q. Wang, Y. Yang, et S. Xie. 2021. « Metagenomic Analysis of Microbial Communities Continuously Exposed to Bisphenol A in Mangrove Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils ». *Science of The Total Environment* 792: 148486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148486>.
- Toyama, T., M. Murashita, K. Kobayashi, S. Kikuchi, K. Sei, Y. Tanaka, M. Ike, et K. Mori. 2011. « Acceleration of Nonylphenol and 4- Tert -Octylphenol Degradation in Sediment by *Phragmites Australis* and Associated Rhizosphere Bacteria ». *Environmental Science & Technology* 45 (15): 6524-30. <https://doi.org/10.1021/es201061a>.
- Toyama, T., Y. Sato, D. Inoue, K. Sei, Y-C. Chang, S. Kikuchi, et M. Ike. 2009. « Biodegradation of Bisphenol A and Bisphenol F in the Rhizosphere Sediment of *Phragmites Australis* ». *Journal of Bioscience and Bioengineering* 108 (2): 147-50. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.03.011>.
- US EPA. 1976. « Quality Criteria for Water ». <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/quality-criteria-water-1976.pdf>.
- Walaszek, M., P. Bois, J. Laurent, E. Lenormand, et A. Wanko. 2018. « Micropollutants Removal and Storage Efficiencies in Urban Stormwater Constructed Wetland ». *Science of The Total Environment* 645: 854-64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.156>.
- Wang, Z., Y. Yang, T. He, et S. Xie. 2015b. « Change of Microbial Community Structure and Functional Gene Abundance in Nonylphenol-Degrading Sediment ». *Applied Microbiology and Biotechnology* 99 (7): 3259-68. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6222-5>.
- Xu, P., C. Lai, G. Zeng, D. Huang, M. Chen, B. Song, X. Peng, et al. 2018. « Enhanced Bioremediation of 4-Nonylphenol and Cadmium Co-Contaminated Sediment by Composting with Phanerochaete Chrysosporium Inocula ». *Bioresource Technology* 250: 625-34. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.069>.
- Ying, G. G., et R. S. Kookana. 2005. « Sorption and Degradation of Estrogen-like-Endocrine Disrupting Chemicals in Soil ». *Environmental Toxicology and Chemistry* 24 (10): 2640-45. <https://doi.org/10.1897/05-074R.1>.
- Zhang, C., Y. Li, C. Wang, L. Niu, et W. Cai. 2016b. « Occurrence of endocrine disrupting compounds in aqueous environment and their bacterial degradation: A review ». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46 (1): 1-59. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1061881>.
- Zhang, Z., B. Cui, et X. Fan. 2012. « Removal Mechanisms of Heavy Metal Pollution from Urban Runoff in Wetlands ». *Frontiers of Earth Science* 6 (4): 433-44. <https://doi.org/10.1007/s11707-012-0201-7>.

- Volumes d'eau écoulés

<b>CAMPAGNE T1 2021</b>	<b>07-oct</b>	<b>21-sept</b>
	FS	FR
Volume d'eau écoulé depuis le début du suivi (m3) <b>(1)</b>	30 480	29 130
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%) (2)</i>	49	56
Volume d'eau passé sur le mois prioritaire (m3) <b>(3)</b>	8 000	10 230
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%) (2)</i>	83	64
Temps de reesuyage du filtre avant prélèvement (j) <b>(4)</b>	13	22
<b>CAMPAGNE T2 2022</b>	<b>27-oct</b>	<b>27-sept</b>
	FS	FR
Volume d'eau écoulé depuis le début du suivi (m3)	127 450	143 240
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%)</i>	55	66
Volume d'eau passé sur le mois prioritaire (m3)	9 340	9 200
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%)</i>	79	72
Temps de reesuyage du filtre avant prélèvement (j)	4	3
<b>Cartographie sédiment "T2" 2023</b>	<b>05-avr</b>	<b>05-avr</b>
	FS	FR
Volume d'eau écoulé depuis le début du suivi (m3)	155 720	172 990
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%)</i>	61	68
Volume d'eau passé sur le mois prioritaire (m3)	5 950	7 220
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%)</i>	100	100
Temps de reesuyage du filtre avant prélèvement (j)	en eau	20
<b>Essais de biodégradation 2022</b>		<b>19-avr</b>
		FR
Volume d'eau écoulé depuis le début du suivi (m3)		87 515
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%)</i>		56
Volume d'eau passé sur le mois prioritaire (m3)		15 020
<i>Pourcentage d'eaux par temps sec (eaux claires) (%)</i>		65
Temps de reesuyage du filtre avant prélèvement (j)		en eau

- (1) Volume d'eau ayant circulé dans chaque demi-filtre depuis le début du suivi (le 01/05/2021, soit 74 jours après le début de l'alimentation en EP du filtre, le 16/02/2021)
- (2) Volume d'eau ayant circulé dans chaque demi-filtre le mois précédant le prélèvement (prélèvement pendant le reesuyage du demi-filtre)
- (3) Temps écoulé entre la fin de l'alimentation en eau du demi-filtre et la campagne de prélèvement

- Campagnes de prélèvement

A



Amont,  
centre  
et aval

B



Photographies de l'évolution de l'état de surface du filtre selon la localisation horizontale (amont, centre et aval). A : lors de la campagne T0 ; B : lors des campagnes T1 et T2. L'échelle est représentée par les traits noirs, qui correspondent à 6 cm sur les photos (Crédit : J. Roux 2020, 2021, 2022).



- **Le Rainclean**

### Substrat industriel **adsorbant**

Mélange de grains (organique/minéral) de taille différente : carbonates, fibres de coco, pierres ponce, zéolithes, charbon activé...

→ Filtration + adsorption + pH élevé + rétention de l'eau



## Le substrat

Le substrat D-Rainclean® est constitué de différents composants sélectionnés remplissant chacun une ou plusieurs fonctions. C'est pourquoi le mélange du substrat ainsi obtenu présente une large palette de capacités, telles que la filtration, l'adsorption, l'échange d'ions, la liaison du phosphate et bien d'autres encore.

Durée de vie : 15 à 20 ans selon les charges

# I – Evolution des FPR : Qualité des eaux par temps de pluie

1 évènement pluvieux caractérisé à ce jour

**Filtre FS, Temps de pluie**

11/04/2023

	P115	Sortie bache	Sortie Filtre	Incertitude
MES (mg/L)	220		4	+/- 40 %
C10-C40 (mg/L)	1,4 / <0,05		0,07 / <0,05	+/- 39%
16 HAP (µg/L)	1,6 / <0,15		<0,15 / <0,15	(+/- 45%)
Cd	0,41 / <0,1		<0,4 / < 0,1	+/- 30%
Cr	38,28 / 0,55		2,9 / 1,03	+/- 16%
Cu	210,9 / 20,21		12,99 / 10,41	+/- 27%
Ni	13,23 / 2,58		5,29 / 4,05	+/- 24%
Pb	45,70 / 0,11		0,92 / <0,10	+/- 28%
Zn	496,1 / 72,81		33,24 / 30,60	+/- 30%
Total/Dissous				

**Entrée** : essentiellement particulaire

**Sortie** : essentiellement dissous

	Eau amont :	
	% dissous	% particulaire
Cr	1,4	98,6
Cu	9,6	90,4
Ni	19,5	80,5
Pb	0,2	99,8
Zn	14,7	85,3

Indice HC, 16HAP, Cd : dissous <LQ

# I – Evolution des FPR : Qualité des eaux par temps de pluie

2 temps secs caractérisés à ce jour

**Filtre FR, Temps sec**

21/09/2022

	P115	Sortie bâche	Sortie Filtre	Incertitude
MES (mg/L)	12	44	5	+/- 40 %
C10-C40 (mg/L)	< 0,05 / <0,05		< 0,05 / <0,05	+/- 39%
16 HAP (µg/L)	< 0,145 / <0,145		< 0,145 / <0,145	(+/- 45%)
Cd	<0,4 / <0,1	<0,4 / <0,1	<0,4 / <0,1	+/- 30%
Cr	1,63 / < 0,5	3,88 / 0,5	1,20 / <0,5	+/- 16%
Cu	32,39 / 5,56	46,97 / 5,31	21,85 / 4,98	+/- 27%
Ni	1,88 / 1,31	3,60 / 1,58	3,04 / 2,48	+/- 24%
Pb	2,72 / <0,1	12,29 / <0,1	<0,4 / <0,1	+/- 28%
Zn	28,22 / 16,43	70,54 / 11,48	11,20 / 4,26	+/- 30%

Total/Dissous

**Entrée** : moins particulaire que temps pluie

**Sortie** : plus particulaire

**Eau amont :**

	% dissous	% particulaire
Cu	17,2	82,8
Ni	69,7	30,3
Zn	58,2	41,8

Indice HC, 16 HAP, Cd, Cr, Pb :  
dissous <LQ



# I – Evolution des FPR : Qualité des eaux par temps de pluie

2 temps secs caractérisés à ce jour → Variabilités

**Filtre FS, Temps sec**

09/10/2022

	P115	Sortie bâche	Sortie Filtre	Incertitude
MES (mg/L)	8		3	+/- 40 %
C10-C40 (mg/L)	<0,05 / <0,05		<0,05 / <0,05	+/- 39%
16 HAP (µg/L)	<0,145 / <0,145		<0,145 / <0,145	(+/- 45%)
Cd	<0,4 / <0,1		<0,4 / <0,1	+/- 30%
Cr	0,87 / <0,5		0,90 / <0,5	+/- 16%
Cu	8,93 / 4,47		5,32 / 4,83	+/- 27%
Ni	1,57 / 1,20		1,88 / 1,36	+/- 24%
Pb	1,79 / <0,1		<0,4 / <0,1	+/- 28%
Zn	15,22 / 5,31		<5 / 4,38	+/- 30%

Total/Dissous

**Entrée** : moins particulaire que temps pluie

**Sortie** : plus dissous

**Eau amont :**

	% dissous	% particulaire
Cu	50,1	49,9
Ni	76,4	23,6
Zn	34,9	65,1

Indice HC, 16 HAP, Cd, Cr, Pb :  
dissous <LQ

## I – Evolution des FPR : Qualité des eaux par temps de pluie

Comparaison de la qualité en sortie du filtre FS pour les temps secs et de pluie

### Filtre FS

	SEC	PLUIE
MES (mg/L)	5	4
C10-C40 (mg/L)	< 0,05 / < 0,05	0,07 / <0,05
16 HAP (µg/L)	< 0,145 / <0,145	<0,15 / <0,15
Cd	<0,4 / <0,1	<0,4 / < 0,1
Cr	1,20 / <0,5	2,9 / 1,03
Cu	21,85 / 4,98	12,99 / 10,41
Ni	3,04 / 2,48	5,29 / 4,05
Pb	<0,4 / <01	0,92 / <0,10
Zn	11,20 / 4,26	33,24 / 30,60

Plus de données nécessaires

## I – Evolution des FPR : Rendements d'extraction (%)

Moyenne, minimum et maximum pour les 3 substrats

		BPA-d6	NP1EO-d2	n-OP-d17
Sédiment (n=4)	Moy	<b>66</b>	<b>92</b>	<b>136</b>
	Min	44	24	98
	Max	88	193	180
Sable (n=30)	Moy	<b>77</b>	<b>80</b>	<b>88</b>
	Min	54	45	51
	Max	99	161	181
Rainclean (n=9)	Moy	<b>79</b>	<b>70</b>	<b>82</b>
	Min	58	26	67
	Max	97	102	100

Les teneurs sont ensuite corrigées à ces rendements d'extraction des étalons d'extraction

Moyenne selon les substrats et les temps

	BPA-d6	NP1EO-d2	n-OP-d17
Sdt-T1	49,3	135,2	132,7
Sdt-T2	83,4	48,8	139,3
S-T0	76,8	80,5	82,4
S-T1	70,0	77,4	84,2
S-T2	79,6	83,0	94,1
Rc-T0	77,0	89,0	82,0
Rc-T1	65,5	65,6	61,7
Rc-T2	93,9	22,3	91,6

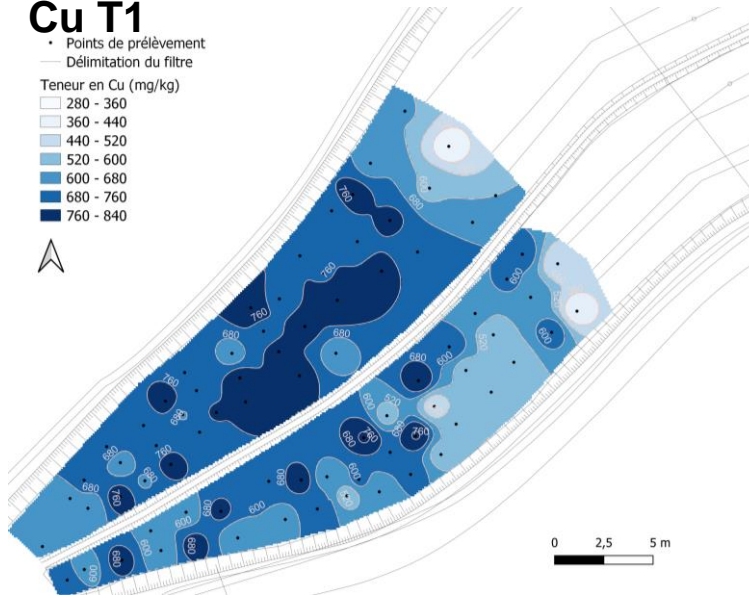
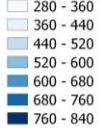
Essais de biodégradation : rendements d'extractions du sédiment parmi les plus faibles, mais rendements du BPA > aux AP

## I – Evolution des FPR : Cartographie des teneurs en ETM dans le sédiment au T1 et T2

**Cu T1**

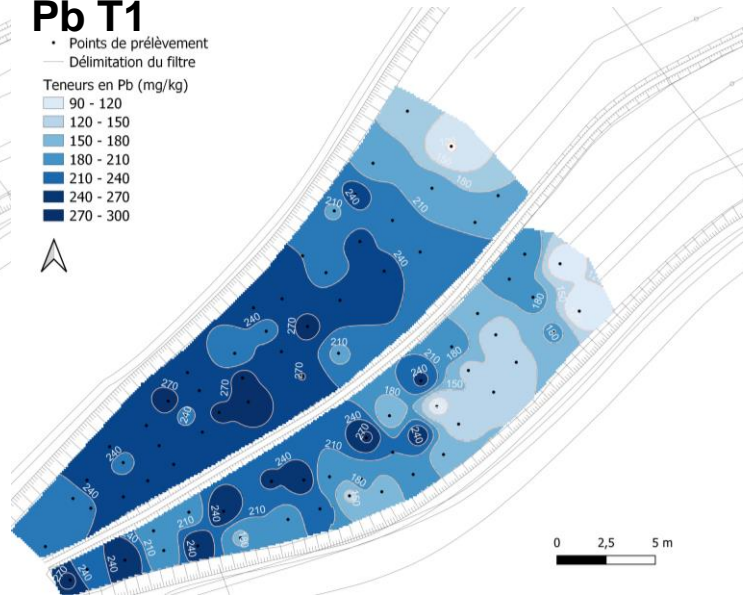
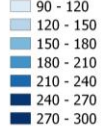
- Points de prélèvement
- Délimitation du filtre

Teneur en Cu (mg/kg)

**Pb T1**

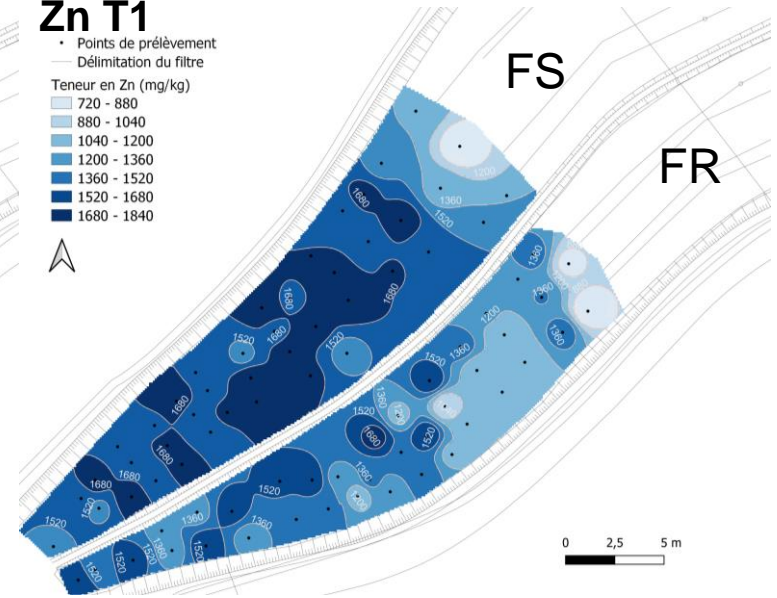
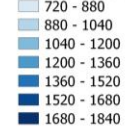
- Points de prélèvement
- Délimitation du filtre

Teneurs en Pb (mg/kg)

**Zn T1**

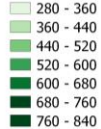
- Points de prélèvement
- Délimitation du filtre

Teneur en Zn (mg/kg)

**Cu T2**

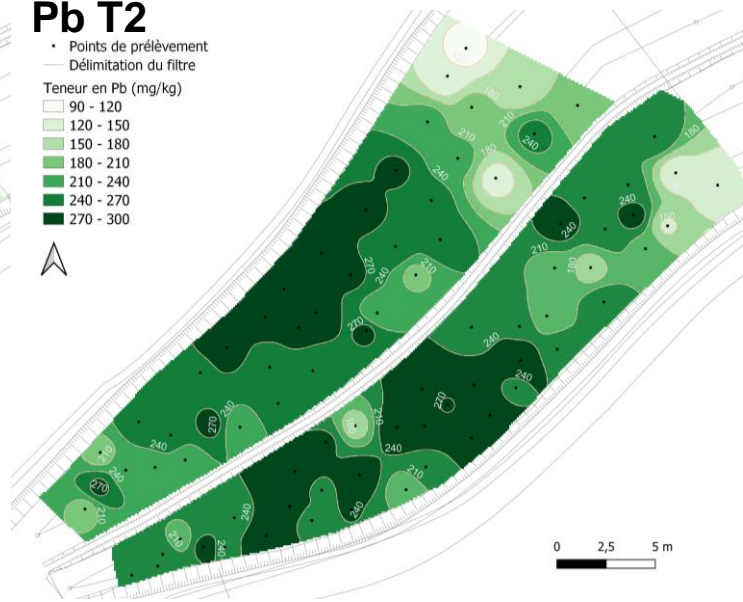
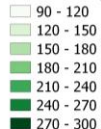
- Points de prélèvement
- Délimitation du filtre

Teneur en Cu (mg/kg)

**Pb T2**

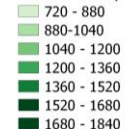
- Points de prélèvement
- Délimitation du filtre

Teneurs en Pb (mg/kg)

**Zn T2**

- Points de prélèvement
- Délimitation du filtre

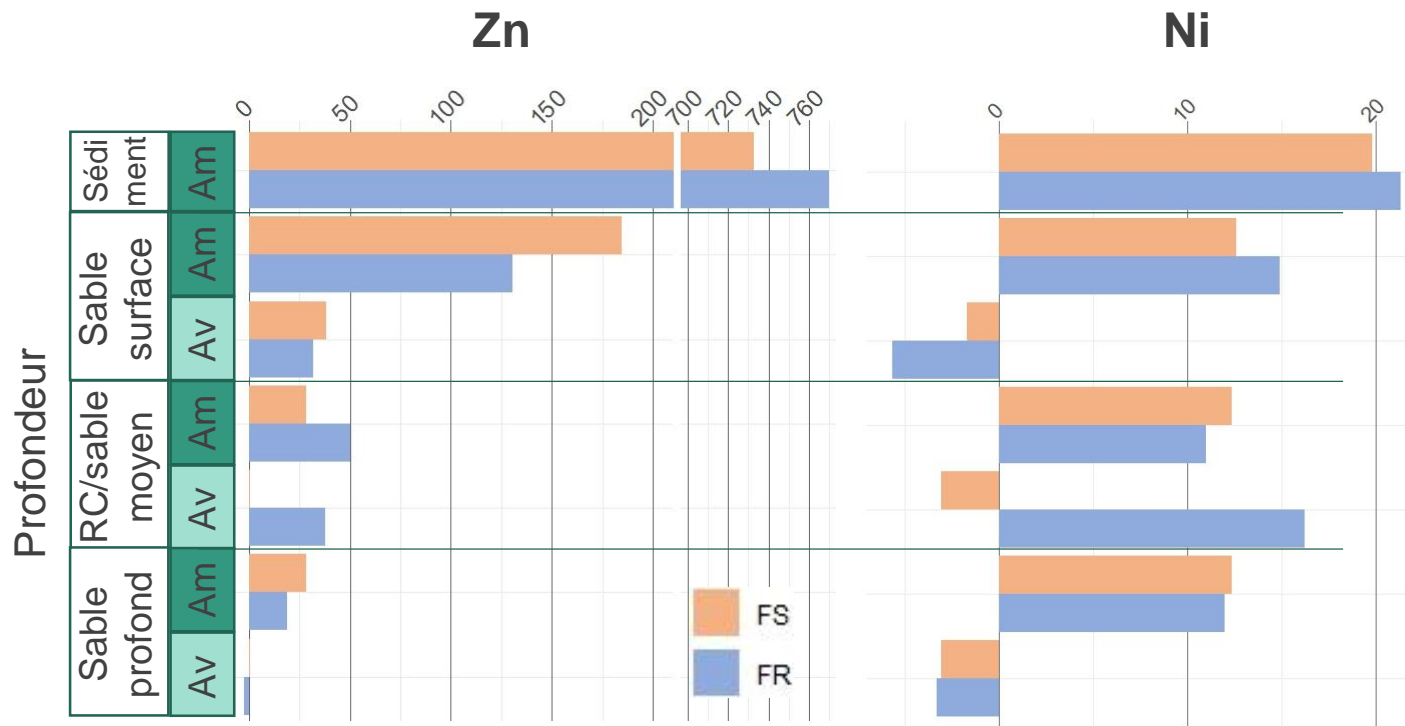
Teneurs en Zn (mg/kg)



# I – Evolution des FPR : Accumulation de micropolluants après 2 ans de fonctionnement

## ETM : Exemple du Zn et Ni

Comparaison des substrats : rapporte aux **volumes**



Accumulation volumique (g/m³/2ans) du Zn et Ni entre T0-T2

### Localisation verticale :

- **Sédiment** : concentre les ETM, différences plus faibles pour Ni (et Cr)

- Zn : Diminution rapide de l'accumulation avec la profondeur pour les deux FPR → Retenus en surface

- Ni : Diminution moins nette → Retenu en surface et en profondeur = plus mobile

- Une faible accumulation dans le sable profond → Le Rc ne retient pas tout

### Localisation horizontale :

- Zn : Diminution d'amont à aval

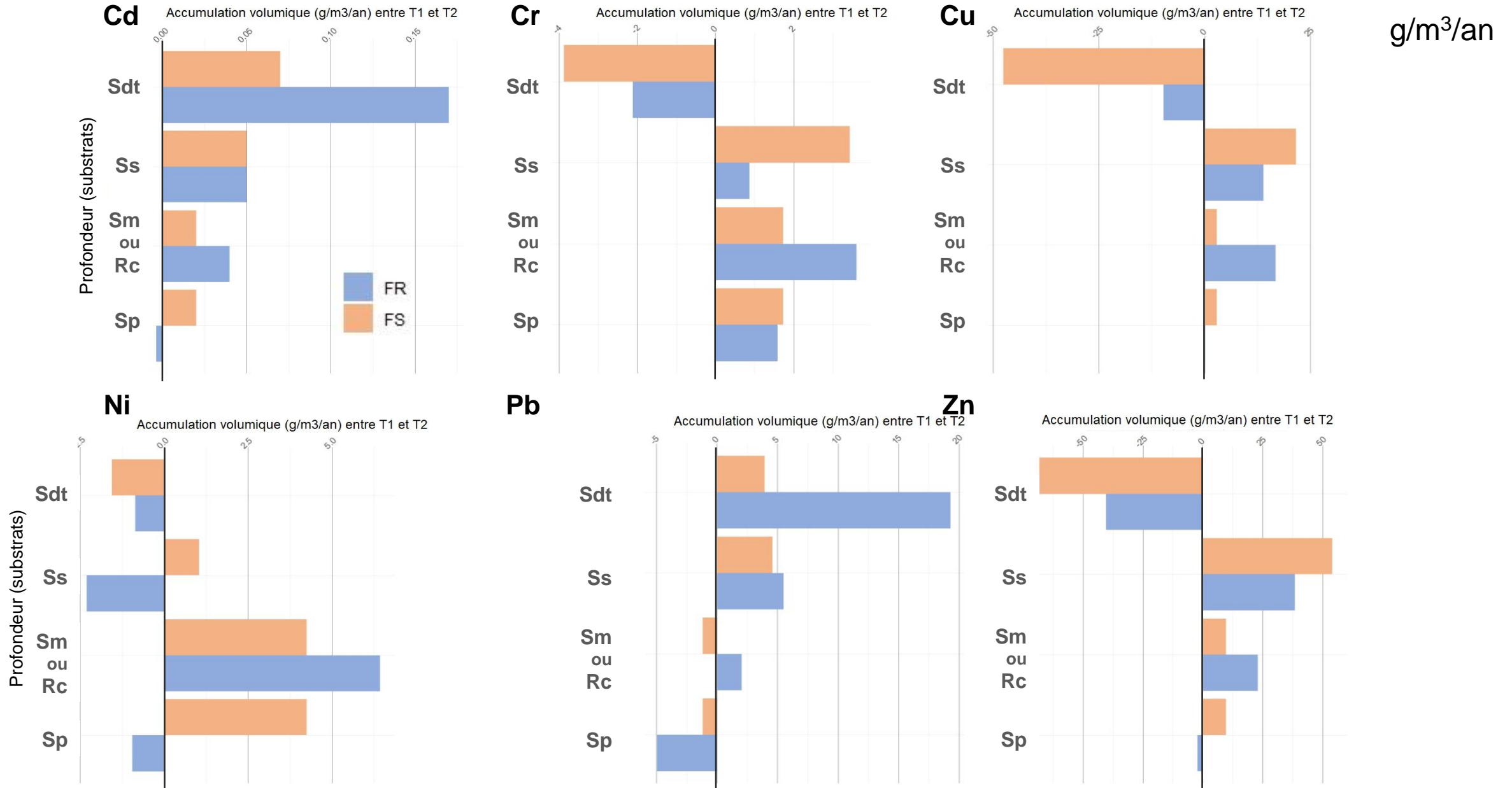
- Ni : Diminution d'amont à aval pour le sable  
Augmentation d'aval à amont pour le Rainclean

Zn, Pb, Cu, Cd (Cr, Ni) : **amont et surface (Sdt et Ss)**

Ni (Cr) : aussi en **profondeur et aval (Rc, Sm, Sp)** → ETM plus mobiles + eaux de nappe



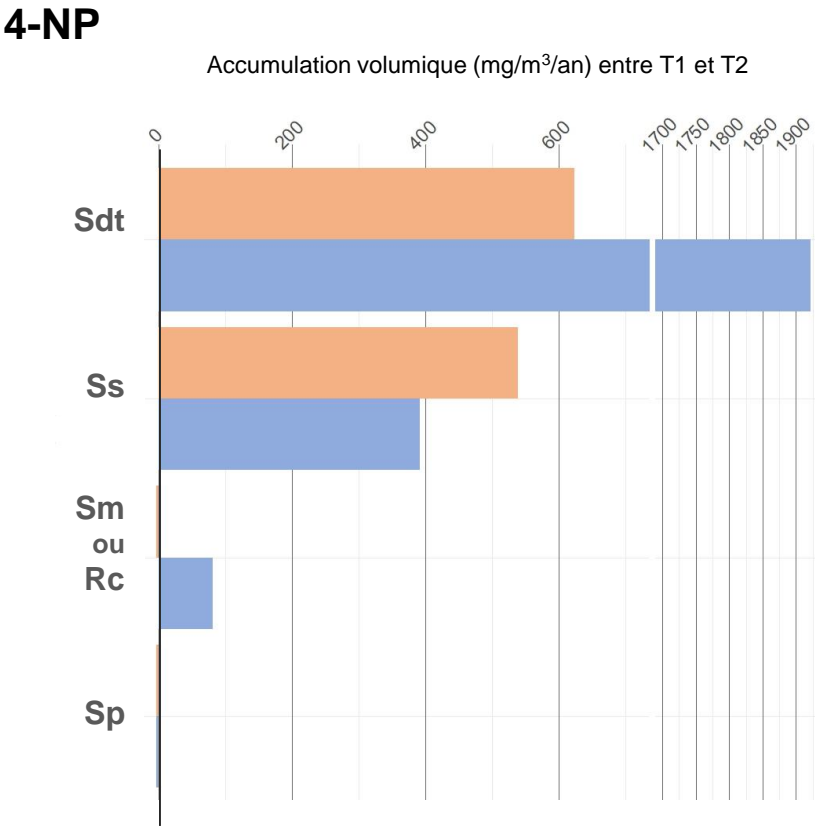
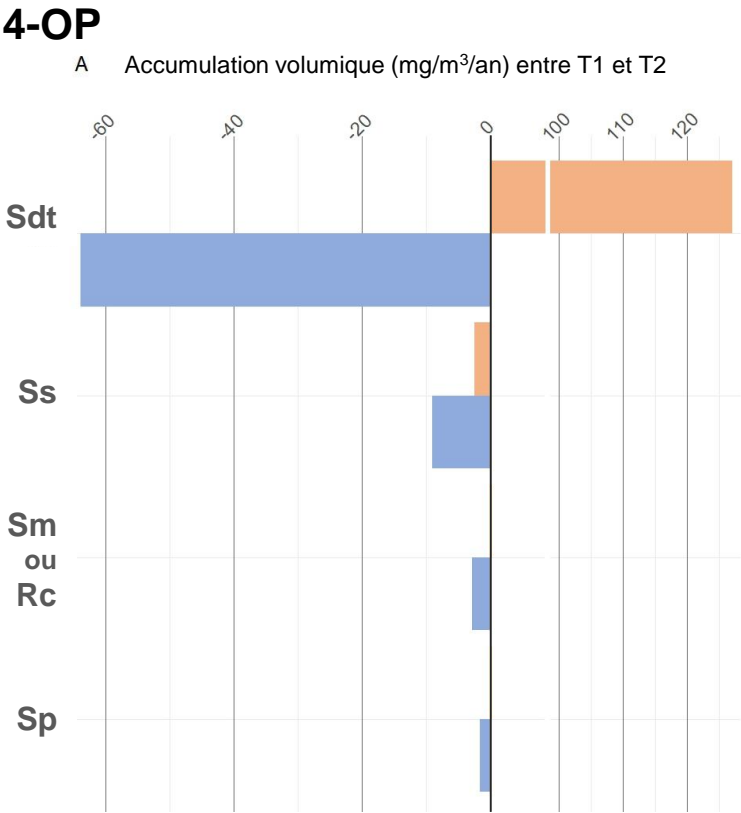
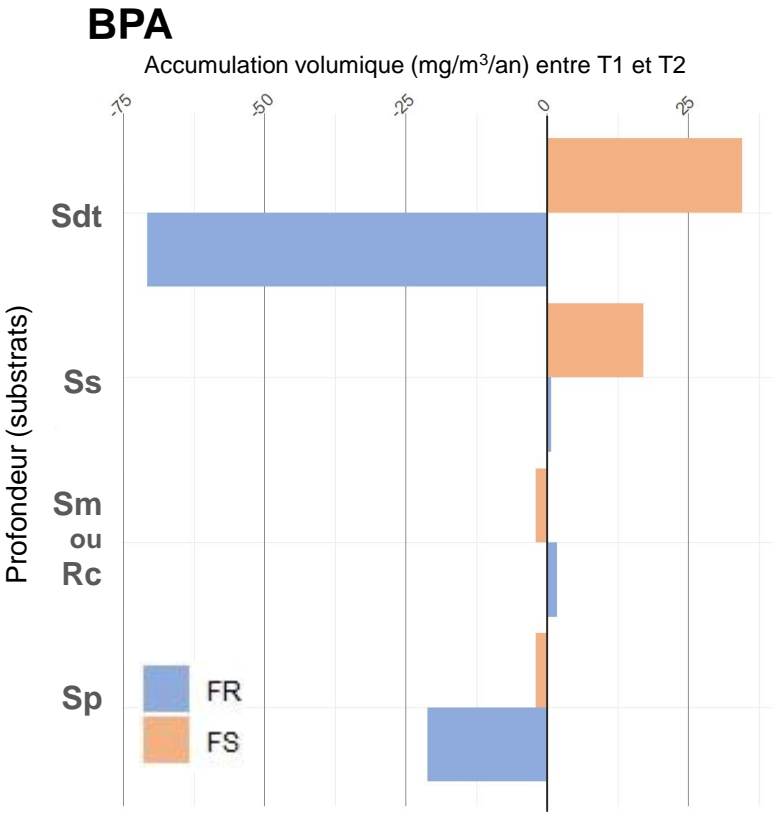
## I – Evolution des FPR : Vitesse d'accumulation de micropolluants dans les substrats (T1-T2)



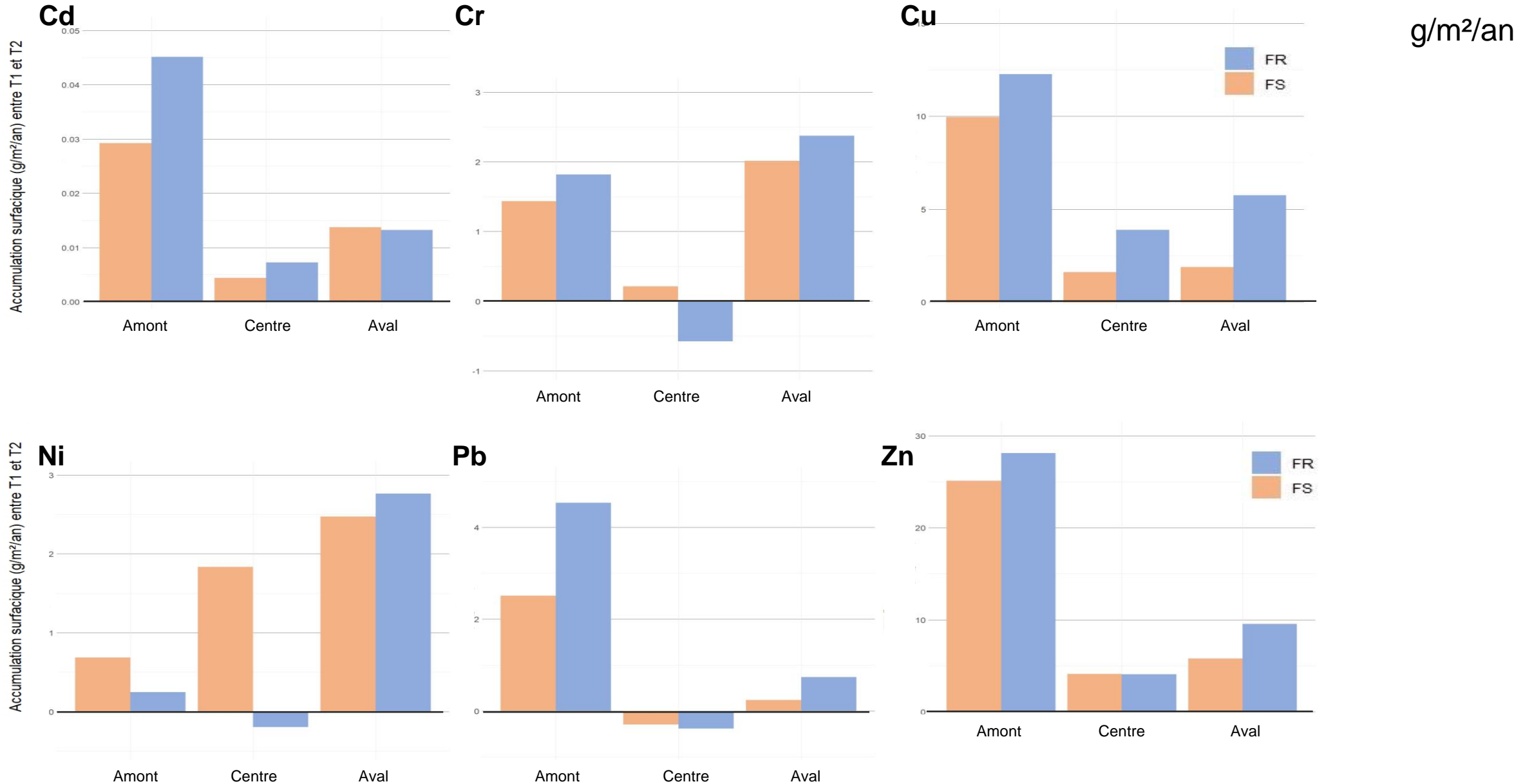


I – Evolution des FPR : Vitesse d’accumulation de micropolluants dans les substrats (T1-T2)

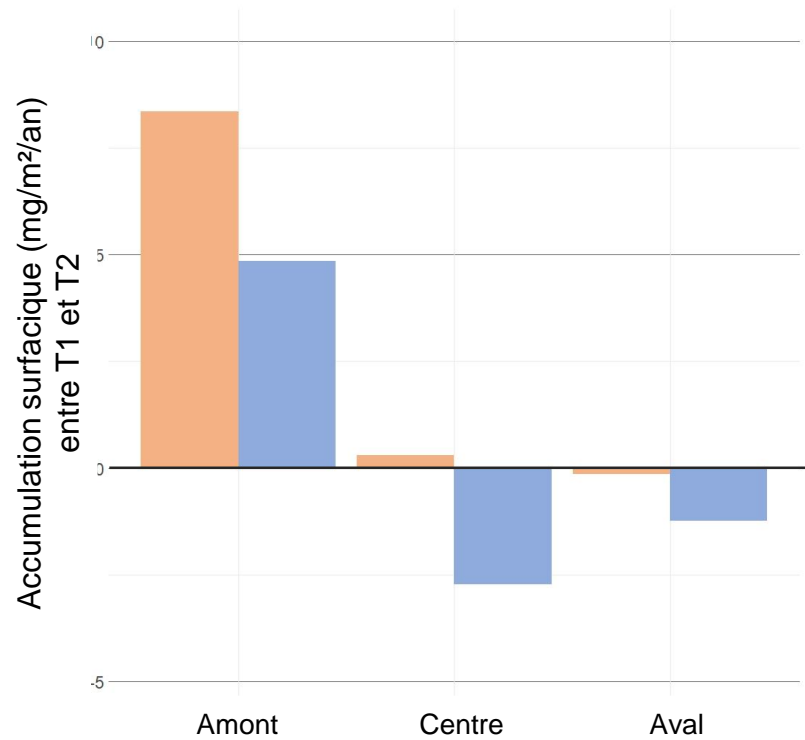
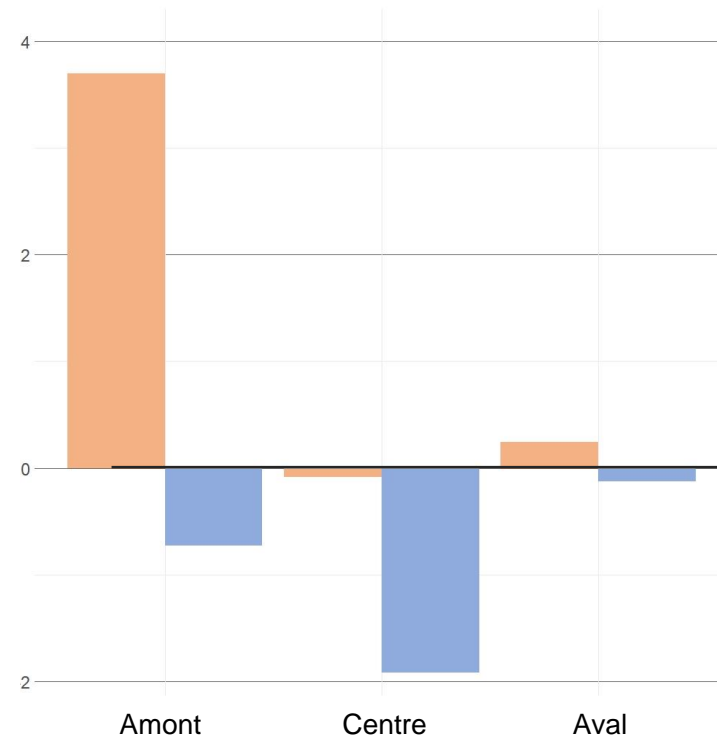
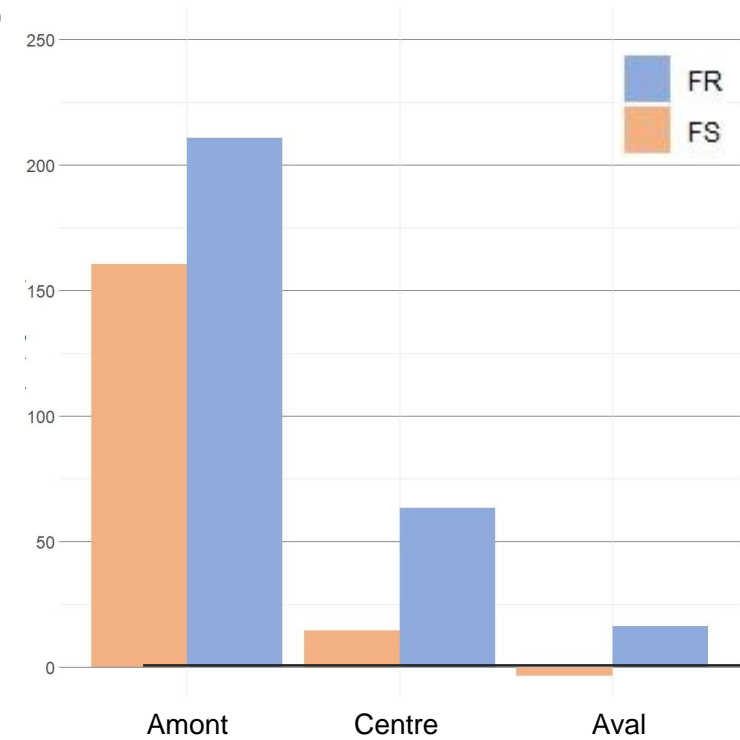
mg/m<sup>3</sup>/an



# I – Evolution des FPR : Vitesse d'accumulation de micropolluants dans les zones (T1-T2)



# I – Evolution des FPR : Vitesse d'accumulation de micropolluants dans les zones (T1-T2)

mg/m<sup>2</sup>/an**BPA****4-OP****4-NP**

## I – Evolution des FPR : Masse accumulée entre T1 et T2

mg/m<sup>2</sup>/an

	Masse accumulée entre T1-T2 (g/an)					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
FS	12	811	3 540	1 034	698	9 128
FR	13	834	4 471	684	1 006	8 543
<b>FS+FR</b>	<b>25</b>	<b>1 645</b>	<b>8 010</b>	<b>1 718</b>	<b>1 704</b>	<b>17 671</b>

	Masse accumulée entre T1-T2 (g/an)						
	BPA	4-OP	OP1EO	OP2EO	4-NP	NP2EO	NP1EO
FS	2,44	1,09	2,17	-0,06	48,61	0,01	0,05
FR	0,19	-0,50	-0,25	-0,14	56,24	-0,51	-0,28
<b>FS+FR</b>	<b>2,63</b>	<b>0,58</b>	<b>1,92</b>	<b>-0,20</b>	<b>104,85</b>	<b>-0,50</b>	<b>-0,23</b>

## I – Evolution des FPR : Niveaux de contamination

Comparaison des teneurs en ETM retrouvées au T2 dans les différents substrats des deux FPR regroupés (minimum et maximum) avec les teneurs seuils indiquées par d'autres pays.

Les seuils les plus stricts et moins stricts sont fournis. Les cellules en blanc sont les teneurs ne dépassant aucun seuil, celles en orange dépassent le seuil le plus strict et celles en rouges dépassent le seuil le moins strict.

Métal	Teneur au T2 (mg/kg) (min-max)				Teneur seuil (mg/kg) (min-max)
	Sédiment	Sable de surface	Rc	Sable profond	
Cd	1,65-1,77	0,06-0,16	0,18-0,20	0,04-0,05	0,8 - 40
Cr	83,1-87,5	9,2-15,8	28,9-48,2	10,0-13,4	80 - 520
Cu	559-574	12,2-50,8	60,8-114	4,7-6,7	80 - 290
Ni	35,1-35,2	8,6-14,7	36,2-57,1	12,0-17,2	40 - 300
Pb	222-236	6,5-21,7	11,8-18,9	4,0-6,3	50 - 700
Zn	1272-1300	37,7-134	113-142	15,5-24,0	250 - 720

Substrat	Temps (an) pour atteindre le seuil min - max défini par les Pays					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Sable amont	11 - 361	11 - 48	3 - 6	10 - 53	5 - 49	3 - 6
Sable centre	166 - 6464	-	19 - 53	-	57 - 664	28 - 62
Sable aval	29 - 2035	53 - 538	9 - 43	8 - 132	18 - 387	10 - 39
Rc amont	6 - 336	6 - 42	2 - 9	2 - 21	10 - 149	4 - 11
Rc centre	48 - 2885	-	2 - 15	-	-	-
Rc aval	8 - 492	4 - 32	1 - 7	1 - 13	6 - 93	3 - 12

 Temps les plus faibles

## I – Evolution des FPR : Micropolluants dans la biomasse aérienne des *P. australis*

Comparaisons des teneurs moyennes des deux FPR (mg/kg) avec des seuils définis (AFNOR, 2006 ; Commission Européenne, 2022) pour l'utilisation de végétaux comme amendement organique.

Composé	FPR moyenne	Norme NF U 44-051	Ecolabel européen
Cd (mg/kg)	0,025	3	1
Cr (mg/kg)	0,41	120	100
Cu (mg/kg)	4,63	300	200
Ni (mg/kg)	0,46	60	40
Pb (mg/kg)	0,69	180	100
Zn (mg/kg)	49,2	600	300
Fluoranthène (mg/kg)	0,1	-	4
Benzo(b)fluoranthène (mg/kg)	0,1	-	2,5
Benzo(a)pyrène (mg/kg)	0,1	-	1,5

➔ Valorisation possible des végétaux faucardés : amendements organiques pour le Bois de Boulogne



I – Evolution des FPR : Micropolluants dans la biomasse aérienne des *P. australis*

Exportation :

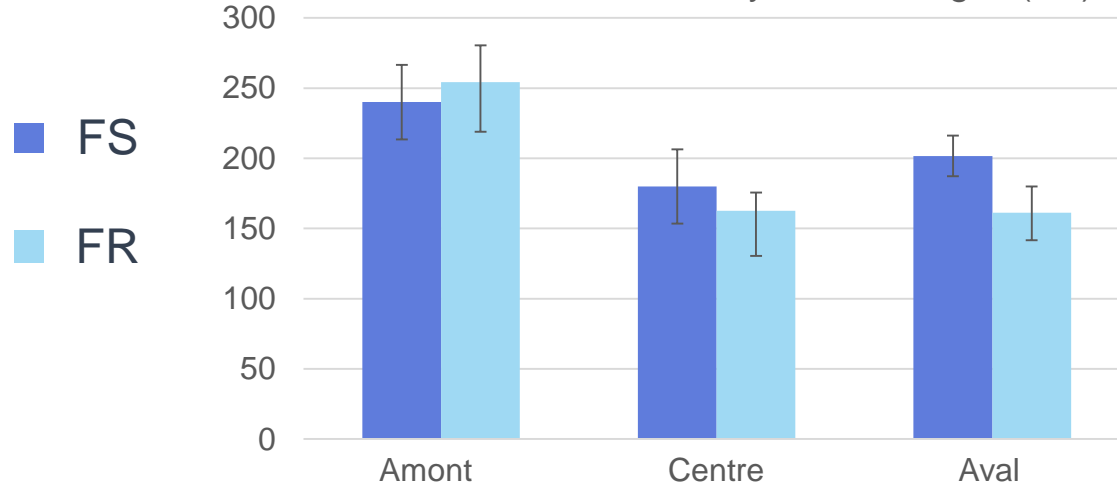
EXPORTATION FS + FR	P.au (mg/kg)	P.au (g)	P.au (mg/m <sup>2</sup> )	Substrats (g)	% P.au
Cd (max)	0,025	0,07	0,06	73,5	0,1
Cr (max)	0,41	1,19	0,92	10 689	0,01
Cu	4,63	13,4	10,3	20 010	0,07
Ni	0,46	1,32	1,02	11 979	0,01
Pb	0,69	1,99	1,54	8 085	0,02
Zn	49,2	141,9	109,7	46 813	0,30
BPA (max)	0,002	0,007	0,01	9,54	0,07
NP1EC (max)	0,001	0,003	0,002	-	-
4-OP	0,047	0,13	0,10	4,57	2,9
OP1EO	0,029	0,084	0,07	3,52	2,3
OP2EO	0,005	0,014	0,01	1,21	1,1
4-NP	0,221	0,638	0,49	139,5	0,46
NP2EO	0,011	0,031	0,02	0,84	3,6
NP1EO	0,021	0,061	0,05	1,19	4,8
Chaque HAP (max)	0,1	0,288	0,22	-	-
16 HAP (max)	8	4,6144	3,57	-	-

Exportation faible à l'échelle des FPR

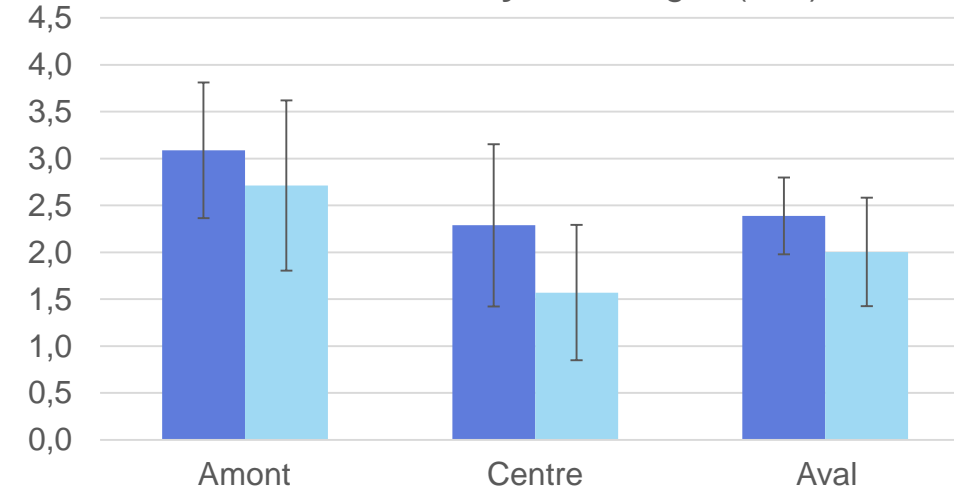
# I – Evolution des FPR : Développement de la végétation

Etude des *P. australis* au T1 :

Hauteur maximale moyenne des tiges (cm)



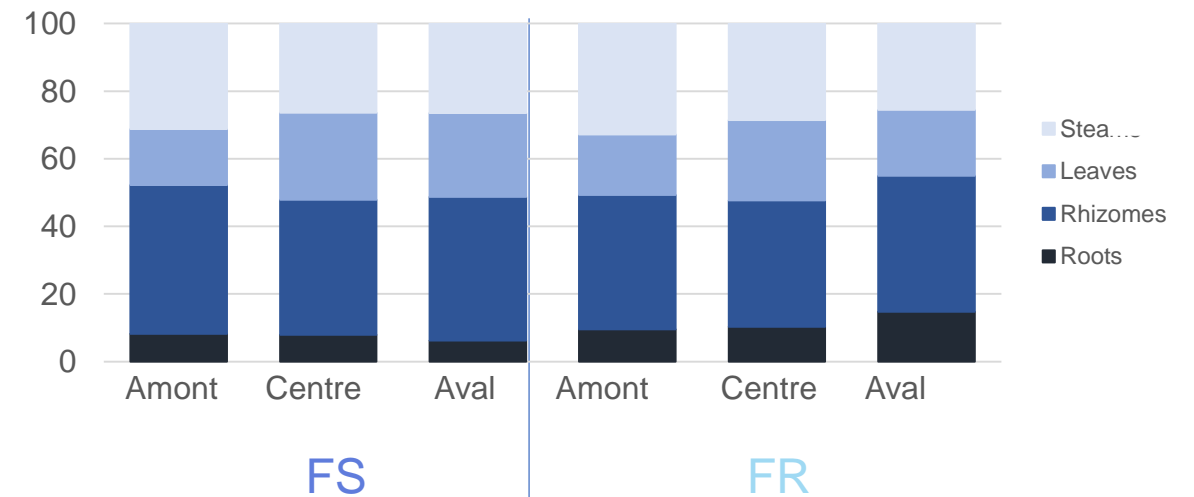
Diamètre moyen des tiges (mm)



Zone 1 > Zone 2 et 3

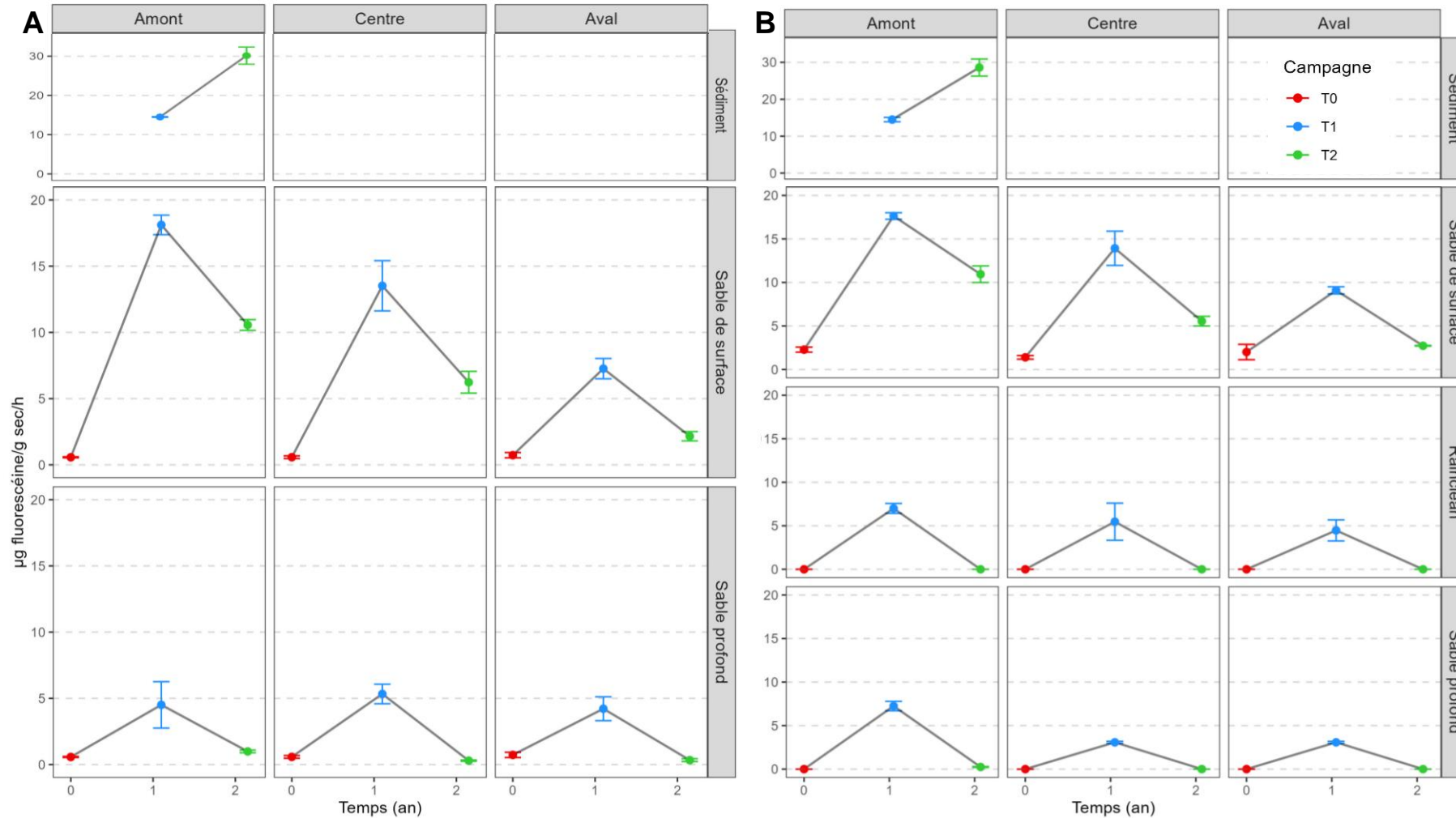
- Pourcentage constant des différentes parties
- Rhizomes : majorité de la biomasse
- Zone 1 : plus de tiges, moins de feuilles

Pourcentages des masses des **différentes parties** de la plante (%)



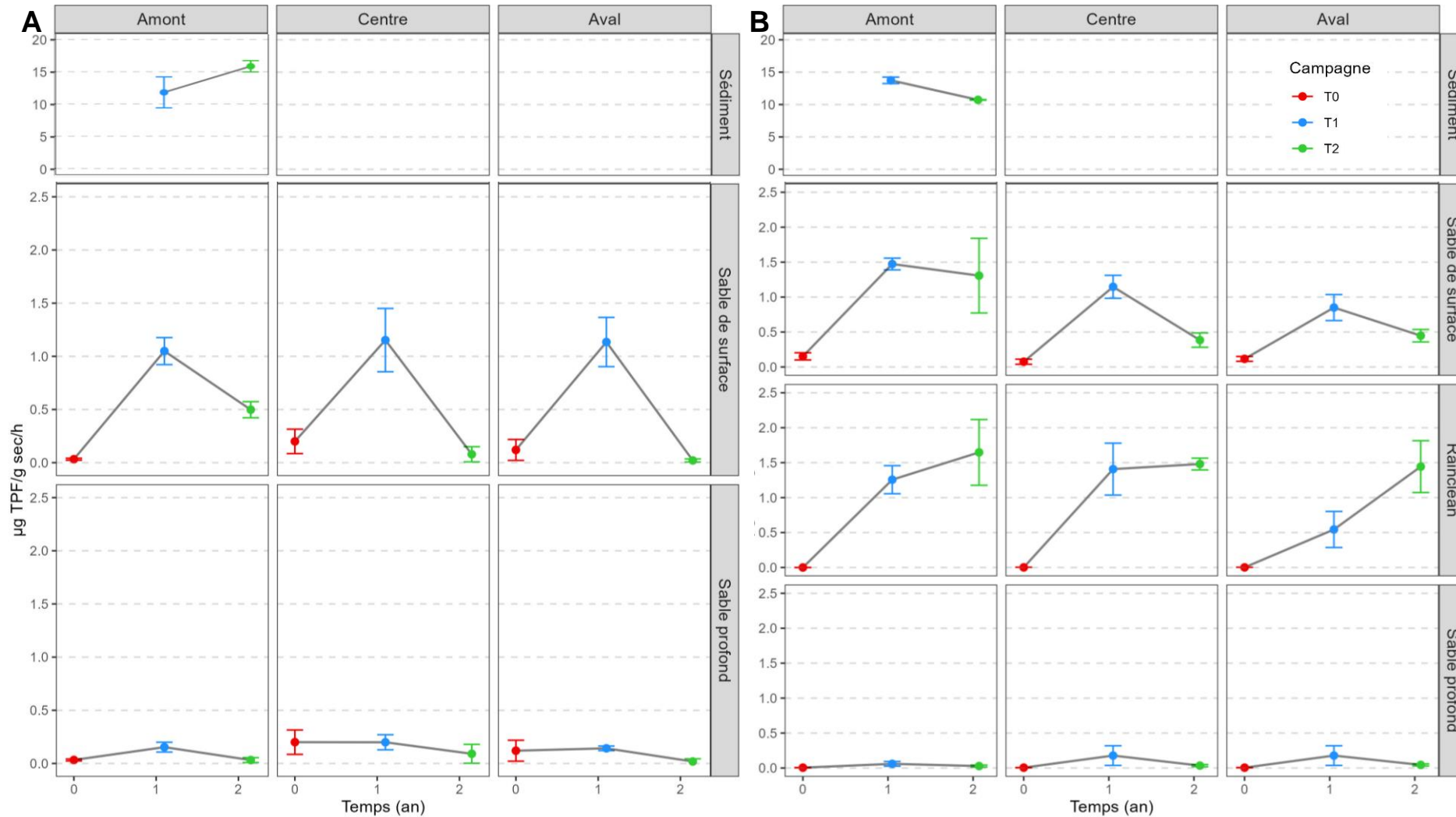
## I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

HFDA : activité enzymatique globale (A : FS ; B : FR)



# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

Déshydrogénase : activité enzymatique globale (A : FS ; B : FR)



# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Diversité génétique : diversité alpha

Echantillon		Indice de Shannon			Indice d'équitabilité			Nombre de taxons observés		
		T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2
FS	Sdt-Am		10,42	10,00		0,90	0,91		2961	2015
	Ss-Am	8,70	10,00	9,39	0,83	0,92	0,92	1382	1895	1191
	Ss-C	8,59	9,96	9,66	0,84	0,87	0,90	1243	2802	1749
	Ss-Av	9,83	9,91	9,77	0,91	0,86	0,90	1743	2833	1880
	Sp-Am	8,71	10,30	9,30	0,83	0,90	0,89	1395	2871	1418
	Sp-C	8,58	10,08	9,46	0,84	0,89	0,90	1235	2518	1474
	Sp-Av	9,83	9,90	9,56	0,91	0,87	0,90	1743	2666	1619
FR	Sdt-Am		10,20	9,83		0,90	0,90		2484	1985
	Ss-Amont	8,59	10,31	9,40	0,78	0,91	0,92	2153	2570	1166
	Ss-Centre	9,56	10,34	9,43	0,90	0,90	0,92	1634	2792	1242
	Ss-Aval	9,60	9,90	9,85	0,90	0,87	0,91	1640	2683	1778
	Rc-Am	7,67	10,15	9,77	0,76	0,89	0,89	1080	2625	2030
	Rc-C	7,34	9,79	9,61	0,82	0,88	0,91	494	2172	1498
	Rc-Av	7,62	9,94	9,61	0,79	0,89	0,90	795	2318	1637
	Sp-Amont	7,06	10,43	10,01	0,76	0,91	0,90	629	2738	2250
	Sp-Centre	7,07	10,30	9,49	0,76	0,91	0,90	628	2669	1493
	Sp-Aval	7,04	10,31	9,59	0,76	0,91	0,90	628	2680	1667

Sable surface, Rc, Sable profond :  
augmentation de la diversité avec le  
temps, et plus équitable

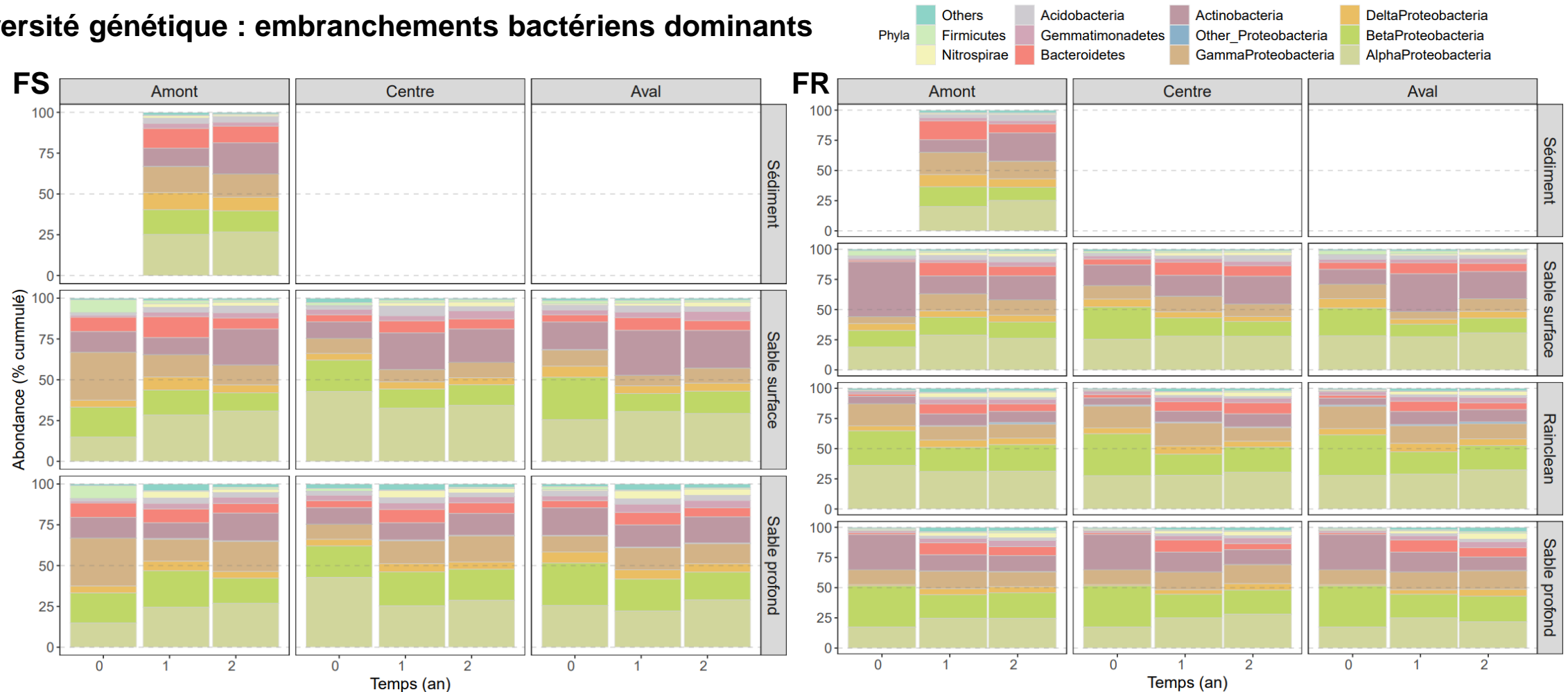
Ordres de grandeurs similaires

Aval > Amont pour le sable de surface



# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Diversité génétique : embranchements bactériens dominants



Proteobacteria (Alphaproteobacteria dominant) > Actinobacteria > Bacteroidetes

→ Rôle important dans le cycle du carbone (décomposition de MO plus ou moins complexes)

→ En contexte de sols contaminés en ETM, dégradation de composés organiques complexes

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

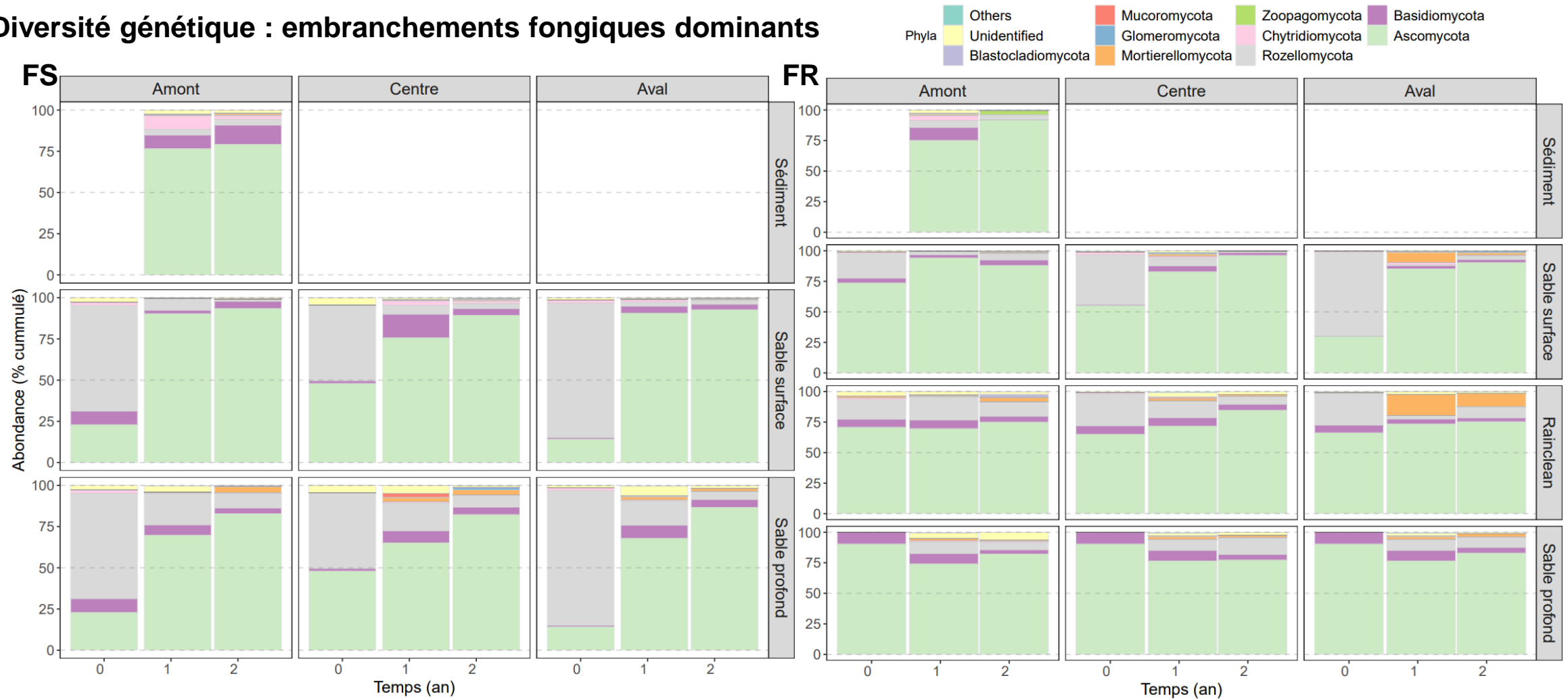
## Diversité génétique : embranchements bactériens dominants

Paramètre	FS Sable surface (T0- T1-T2) n = 9	FR Sable surface (T0- T1-T2) n = 9	FR Rc (T0-T1- T2) n = 9	FS Sable profond (T0- T1-T2) n = 9	FR Sable profond (T0- T1-T2) n = 9
	Temps	Temps	Temps	Temps	Temps
Alphaproteobacteria	0,32	0,37	0,42	0,32	0,65
Betaproteobacteria	<b>-0,69 *</b>	<b>-0,69 *</b>	-0,47	-0,53	-0,48
Deltaproteobacteria	0,26	-0,63	0,37	-0,05	<b>0,97 *</b>
Gammaproteobacteria	-0,21	0,11	<b>-0,69 *</b>	0,32	0,48
Other Proteobacteria	-0,26	-0,21	0,37	0,63	<b>0,97 *</b>
Proteobacteria	-0,63	-0,32	<b>-0,69 *</b>	-0,47	-0,22
Actinobacteria	0,58	0,26	<b>0,79 *</b>	0,37	<b>-0,97 *</b>
Bacteroidetes	0,05	0,47	0,63	0,00	0,48
Gemmatimonadetes	0,63	<b>0,84 *</b>	<b>0,84 *</b>	<b>0,69 *</b>	<b>0,97 *</b>
Acidobacteria	0,37	0,63	0,47	0,26	<b>0,97 *</b>
Nitrospirae	<b>0,95 *</b>	<b>0,95 *</b>	<b>0,90 *</b>	0,47	<b>0,97 *</b>
Firmicutes	<b>-0,84 *</b>	-0,58	0,47	-0,47	0,00
Others	-0,58	-0,26	0,47	0,16	<b>0,81 *</b>

Augmentation ou diminution d'embranchements avec le temps (\* : significatif)

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

Diversité génétique : embranchements fongiques dominants



Ascomycota (T2 : > 75 %) se développent au profit des Rozellomycota

➔ Rôle important dans le cycle du carbone : principaux décomposeurs et dégradeurs de polluants dans les sols

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Diversité génétique : embranchements fongiques dominants

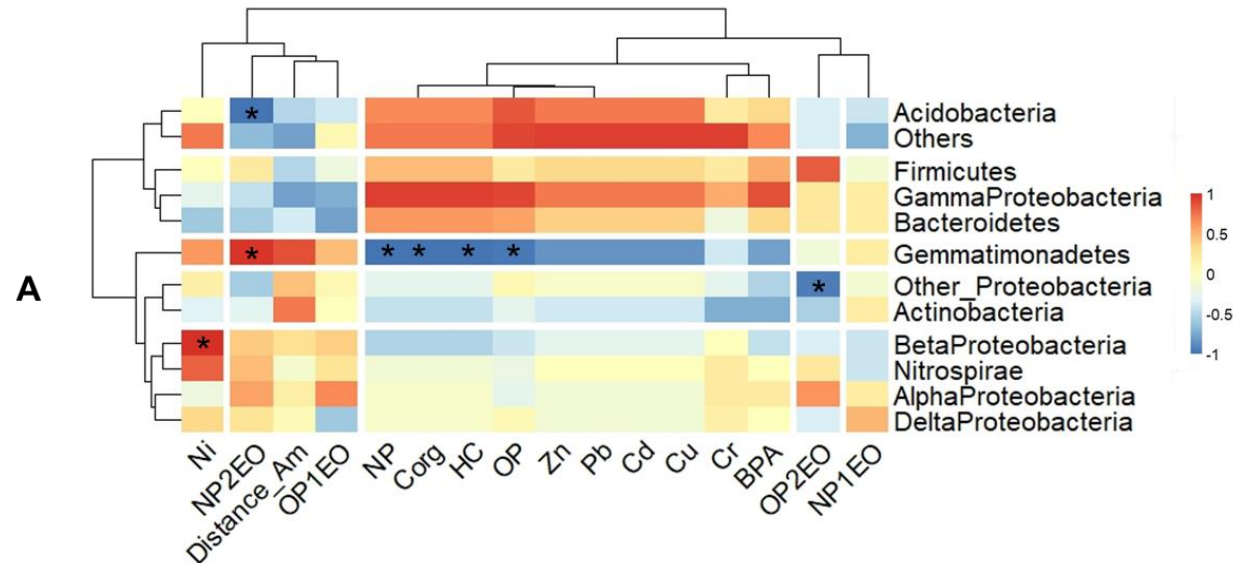
	FS Sable surface (T0- T1-T2) n = 9	FR Sable surface (T0- T1-T2) n = 9	FR Rc (T0- T1-T2) n = 9	FS Sable profond (T0- T1-T2) n = 9	FR Sable profond (T0- T1-T2) n = 9
Paramètre	Temps	Temps	Temps	Temps	Temps
Ascomycota	0,84 *	0,84 *	0,90 *	0,95 *	-0,48
Basidiomycota	0,26	0,26	-0,58	0,00	-0,97 *
Rozellomycota	-0,90 *	-0,69 *	-0,74 *	-0,95 *	0,65
Chytridiomycota	-0,37	-0,58	-0,47	-0,74 *	0,65
Zoopagomycota	0,85 *	0,60	0,29	0,29	0,00
Mortierellomycota	0,75 *	0,59	0,58	0,85 *	0,65
Glomeromycota	0,38	0,69 *	0,58	0,53	0,42
Mucoromycota	0,63	0,35	0,26	0,75 *	0,48
Blastocladiomycota	0,60	0,22	0,42	0,58	0,45
Unidentified	-0,74 *	-0,42	0,05	-0,42	0,75 *
Others	-0,39	-0,35	0,55	0,48	0,17

Augmentation ou diminution d'embranchements avec le temps (\* : significatif)

# I – Evolution des FPR : Développement des communautés microbiennes

## Diversité génétique : diversité alpha

Carte de chaleur des coefficients de corrélations de Spearman obtenues par la comparaison des phyla **bactériens (A)** ou **fongiques (B)** dominants et les teneurs en MPO et métalliques dans le sable de surface au T2. n = 6. Un \* indique une significativité de la corrélation = p-val < 0,05.



### Bactéries :

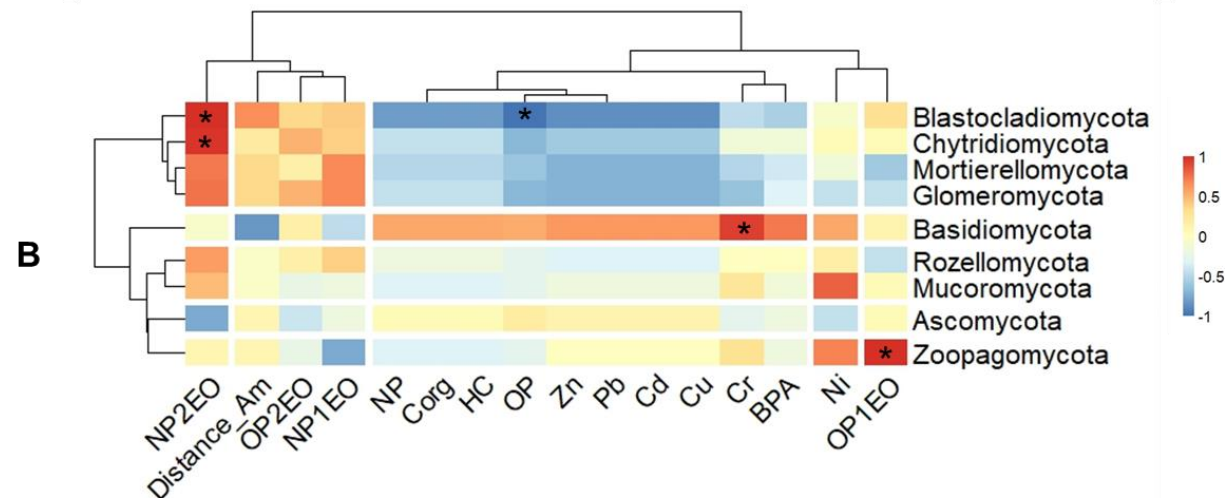
Amont : Acidobacteria, Others (< 1%)

Aval : Gemmatimonadetes

### Champignons :

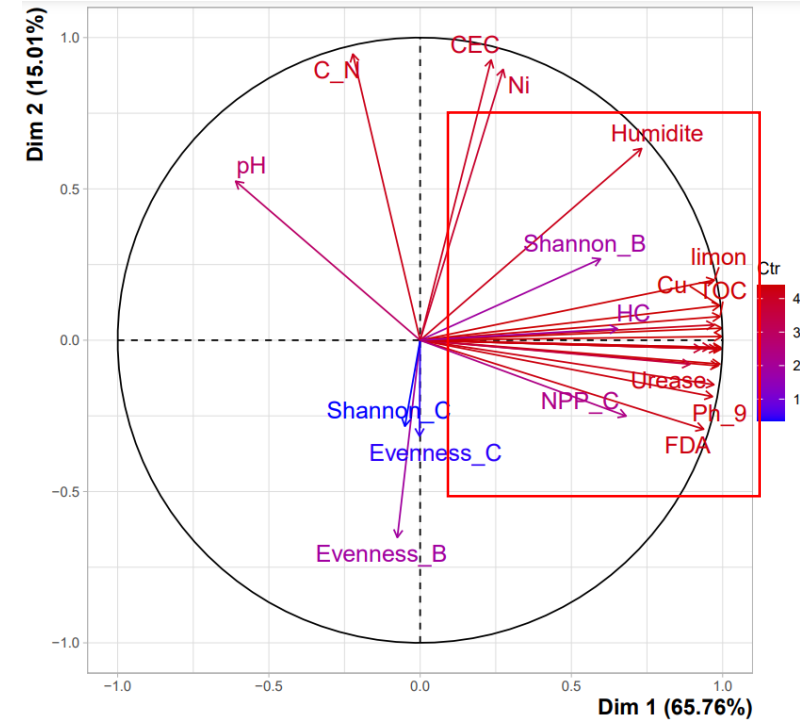
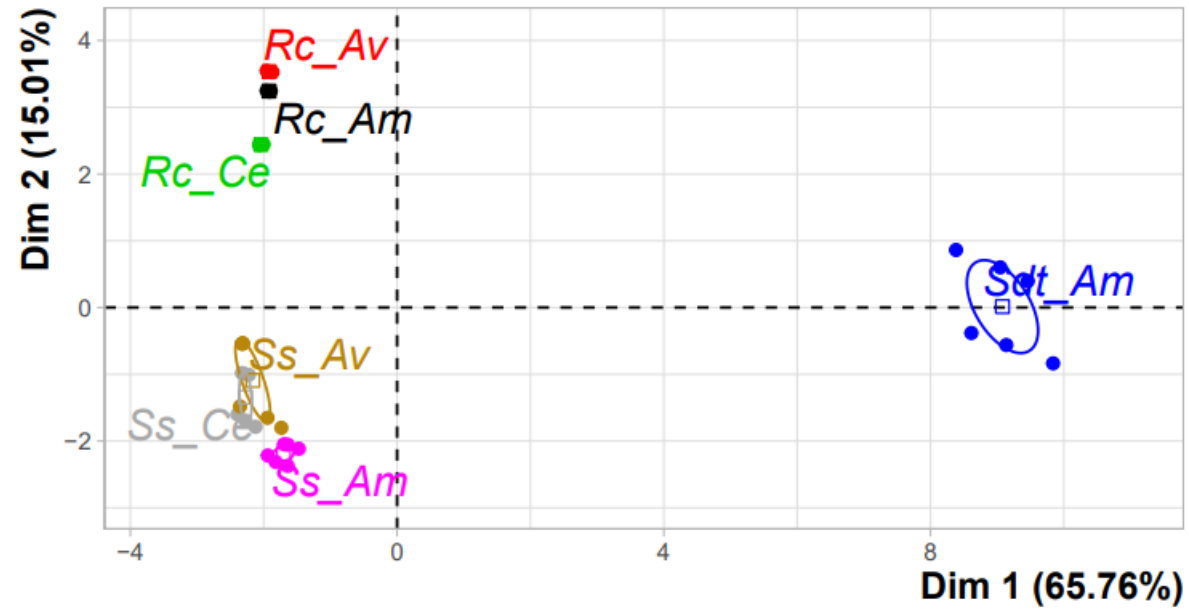
Amont : Basidiomycota

Aval : Blastocladiomycota



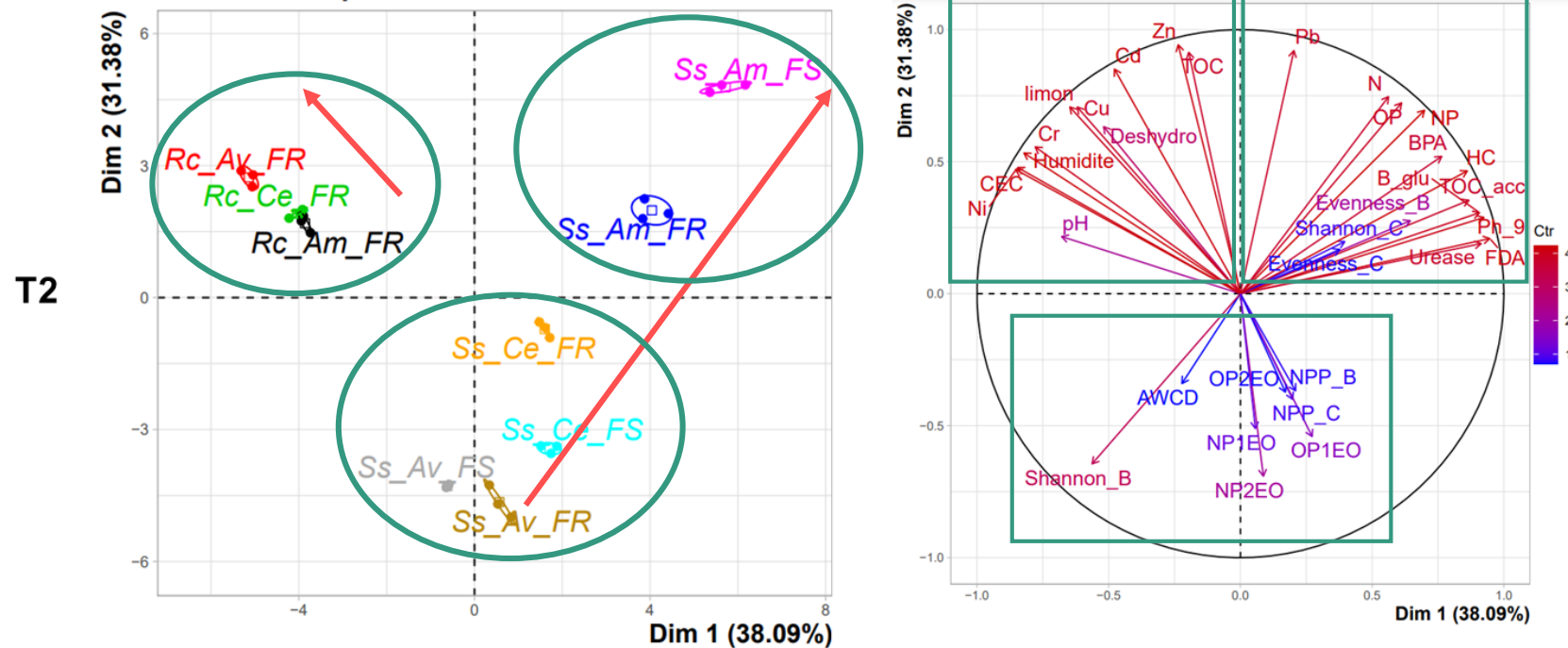


# I – Evolution des FPR : Discussion générale



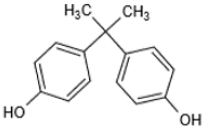
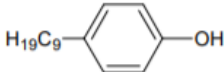
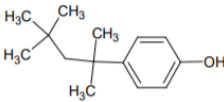
*ACP au T2 : propriétés PC, biologiques et teneurs en micropolluants  
Avec sable surface, Rc et sédiment*

## I – Evolution des FPR : Discussion générale



*ACP au T2 : propriétés PC, biologiques et teneurs en micropolluants  
Avec sable surface et Rc*

## II – Essais de biodégradation : Propriétés des MPO

Compound (IUPAC name)	Short form	Chemical formula	Structure	CAS	Molecular weight (g/mol)	Log K <sub>ow</sub> *	Solubility * (mg/L)
Bisphenol A (4-[2-(4-hydroxyphenyl)propan-2-yl]phenol)	BPA	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>		80-05-7	228.3	3.4	300
4-Nonylphenol (4-(7-methyloctyl)phenol)	4-NP	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O		84852-15-3	220.3	5.4	5.7
4-t-Octylphenol (4-(2,4,4-trimethylpentan-2-yl)phenol)	4-OP	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O		140-66-9	206.3	4.8	7

\* According to ECHA database (ECHA 2023)

## II – Essais de biodégradation : Les modèles utilisés

•**Single First-Order** (SFO). La SFO est une équation exponentielle simple qui suppose que le nombre de molécules composées est faible par rapport au nombre de micro-organismes de dégradation et de leurs enzymes

$$C_t = C_0 * e^{-k*t}$$

•**First-order multi-compartment** (FOMC). Le modèle FOMC est un modèle biphasique qui suppose que le sol est un milieu hétérogène et le divise ensuite en un petit nombre de sous-compartiments, chacun ayant une constante de vitesse de dégradation différente (Boesten et al., 2014).

$$C_t = \frac{C_0}{\left(\frac{t}{\beta} + 1\right)^\alpha}$$

•**Hockey-Stick** (HS) et **Modified Hockey-Stick** (MHS). Le modèle HS est également un modèle biphasique qui suppose deux courbes séquentielles du premier ordre avec un point de rupture à un certain moment. Pour le MHS, il s'agit du même modèle que HS mais aucune dégradation ne se produit avant le point de rupture en raison d'une phase de latence (Boesten et al., 2014).

Première équation du modèle HS et MHS :  $C_t = C_0 * e^{-k1*t}$  pour  $t \leq tb$

Deuxième équation du modèle HS et MHS :  $C_t = C_0 * e^{-k1*tb} * e^{-k2*(t-tb)}$  pour  $t > tb$

où **Ct** est la teneur en micropolluant organique (%) au pas de temps **t** (jour), **C0** est la teneur initiale en micropolluant organique (%), **k**, **k1** et **k2** sont les constantes de vitesse de dégradation (jour<sup>-1</sup>), **α** est un paramètre de forme déterminé par le coefficient de variation des valeurs de k (aucune unité), **β** est un paramètre de localisation (aucune unité) et **tb** est le temps (jour) où la constante de vitesse change (point d'inflexion). Pour le modèle MHS, **k1 = 0** (pas de dégradation, c'est à dire présence d'une phase de latence).

## II – Essais de biodégradation : Les modèles utilisés

**Le temps de demi-vie** (DT50), qui correspond au temps nécessaire pour que la teneur diminue de moitié par rapport à la valeur initiale, est calculé selon différentes équations définies pour chaque modèle

$$\text{SFO :} \quad DT_{50} = \frac{\ln 2}{k}$$

$$\text{FOMC :} \quad DT_{50} = \beta \left( 2^{\left(\frac{1}{\alpha}\right)} - 1 \right)$$

$$\text{HS et MHS si } DT_{50} \leq t_b : \quad DT_{50} = \frac{\ln 2}{k_1} \quad \text{if } DT_{50} \leq t_b$$

$$\text{HS et MHS si } DT_{50} > t_b : \quad DT_{50} = t_b + \frac{(\ln 2 - k_1 t_b)}{k_2} \quad \text{if } DT_{50} > t_b$$

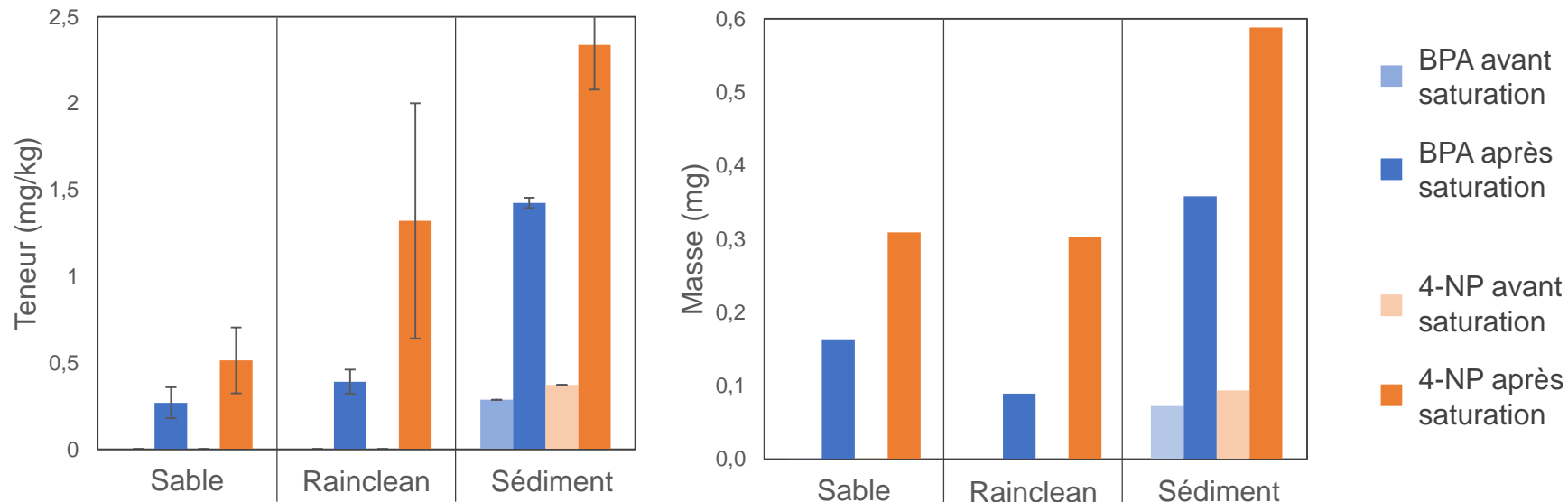
## II – Essais de biodégradation : Contamination des colonnes

**Teneurs** :  $Sdt > Rc > S \rightarrow$  Selon leurs propriétés physico-chimiques

Comparaison avec les **teneurs in situ** (campagne T2) :  
 Sable surface : 0,8 (4-NP) et 14 (BPA) fois plus concentré  
 Rainclean : 7 (4-NP) et 60 (BPA) fois plus concentré  
 Sédiment : 0,4 (4-NP) et 3 (BPA) fois plus concentré

$\rightarrow$  Des teneurs plus élevées (BPA, Rc) mais nécessaires pour le suivi des cinétiques

**Masses** :  $Sdt > S \geq Rc \rightarrow$  Masse volumique du Rc faible



*Teneurs et masses en BPA et 4-NP dans les différents substrats avant et après saturation des colonnes*



## II – Essais de biodégradation : Résumé des résultats des cinétiques

Modality	Best model	Estimated parameters (according to the model)					Degradation time		Degradation after 30 days		Goodness of fit		
		k or k1 (d-1)	k2 (d-1)	tb (d)	$\alpha$	$\beta$	DT50 (d)	Confidence intervals	Biotic system (%)	Abiotic control (%)	X <sup>2</sup> error level	R Pearson correlation	
		SFO/HS/MHS	HS/MHS			FOMC							
BPA (log Kow 3.4, water solubility 300 mg/l)													
Planted-sand	SFO	0.296	-	-	-	-	2.34	1.89-2.89	99.6 (0.7)	10.4 (9)	14.12	0.9791	
Planted-RC	MHS	0	1.054	3.4	-	-	4.06	3.94-4.20	99.0 (0.1)	7.5 (3.7)	2.22	0.9932	
Unplanted-sand	FOMC	-	-	-	2.892	11.753	3.18	2.87-3.56	96.1 (1.9)	10.4 (9)	6.69	0.9823	
Unplanted-RC	FOMC	-	-	-	0.57	0.978	2.32	2.12-3.27	85.8 (2.2)	7.5 (3.7)	9.49	0.9601	
Unplanted-sediment	FOMC	-	-	-	1.748	44.655	21.73	20.96-68.0	59.6 (13.4)	19.1 (4.8)	0.77	0.9557	
4-NP (log Kow 5.4, water solubility 5.7 mg/l)													
Planted-sand	MHS	0	0.798	3.48	-	-	4.35	3.84-5.59	99.1 (1.5)	23.6 (12.6)	2.89	0.9726	
Planted-RC	SFO	0.272	-	-	-	-	2.55	1.96-3.31	98.5 (1.6)	16.6 (10.8)	14.32	0.9678	
Unplanted-sand	MHS	0	0.0599	4.06	-	-	15.63	11.35-22.42	83.2 (1.8)	23.6 (12.6)	4.9	0.9343	
Unplanted-RC	HS	0.136	5.2E-04	13.09			5.11	4.13-6.31	83.2 (4.7)	16.6 (10.8)	12.66	0.9678	
Unplanted-sediment	HS	0.195	1.1E-11	8.07	-	-	3.55	3.09-4.08	78.1 (4.0)	9.4 (5.9)	8.67	0.9851	
4-OP (log Kow 4.8, water solubility 7 mg/l)													
Planted-sand	MHS	0	0.218	3.62	-	-	6.81	5.88-8.10	94.5 (2.9)	9.0 (13.3)	5.68	0.9774	
Planted-RC	HS	0.144	4.6E-10	12.15			4.83	3.62-6.44	82.6 (14.1)	12.7 (10.3)	10.29	0.966	
Unplanted-sand	MHS	0	0.104	6.97	-	-	13.63	11.58-16.60	87.6 (2.1)	9.0 (13.3)	2.78	0.952	
Unplanted-RC	FOMC	-	-	-	0.456	0.491	1.75	1.56-2.36	78.8 (4.6)	12.7 (10.3)	8.03	0.971	
Unplanted sediment	Double MHS	0 then 0.509	5.5E-05	3.62 then 6.97	-	-	4.96	4.35-6.04	76.6 (3.6)	16.8 (11.3)	inf	0.994	

Paramètres ajustés des trois modèles cinétiques utilisés (SFO, FOMC et HS) pour la dégradation du BPA, du 4-NP et du 4-OP. Les DT50 sont indiqués avec leurs intervalles de confiance à 95 % (min-max). Les pourcentages de dégradation à la fin de l'incubation (30 jours) sont donnés pour les conditions biotiques et abiotiques. La qualité de l'ajustement est donnée par le niveau d'erreur X2 et le coefficient de corrélation de Pearson R (toutes les p- values du test de corrélation étaient inférieures à 10<sup>-7</sup>).

### % dégradé après 30 j

Sable	Non planté	Planté
BPA	96,1	99,6
4-NP	83,2	99,1

Rainclean	Non planté	Planté
BPA	85,8	99,0
4-NP	83,2	98,5

Sédiment	Non planté
BPA	59,6
4-NP	78,1

### DT50

Sable	Non planté	Planté
BPA	3,18	2,34
4-NP	15,63	4,35

Rainclean	Non planté	Planté
BPA	2,32	4,06
4-NP	5,11	2,55

Sédiment	Non planté
BPA	21,73
4-NP	3,55

## II – Essais de biodégradation : MPO restant

Sable	Non planté	Planté
BPA	3,9	0,38
4-NP	16,8	0,89

Rainclean	Non planté	Planté
BPA	14,2	0,96
4-NP	16,8	1,5

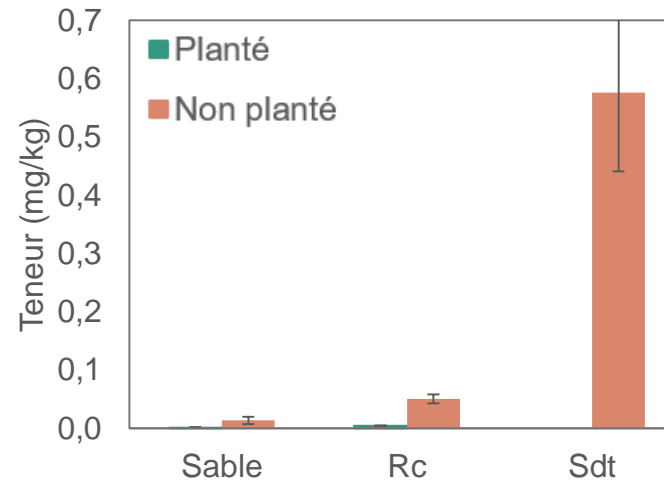
  

Sédiment	Non planté
BPA	40,4
4-NP	21,9

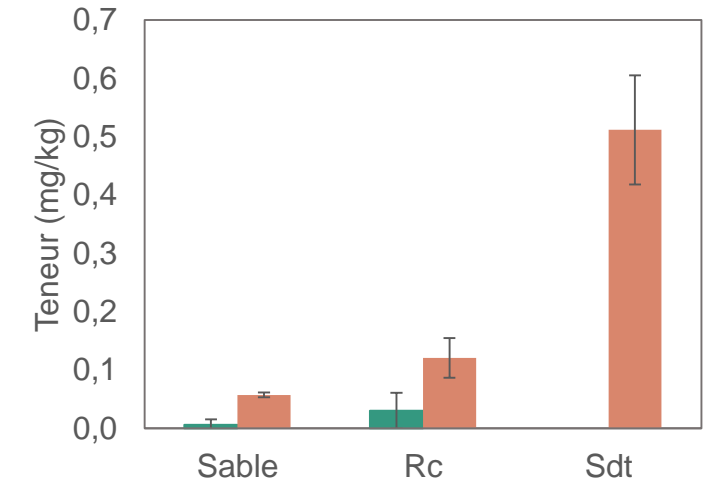
% restant après 30 j

Sable 4-NP : cinétique pas terminée  
donc ≠ de fraction résiduelle  
➔ Rc non planté et sédiment =  
fraction résiduelle

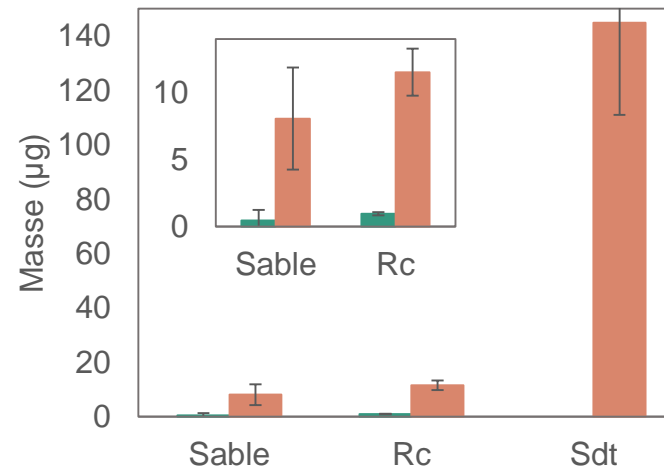
Teneurs restantes en BPA



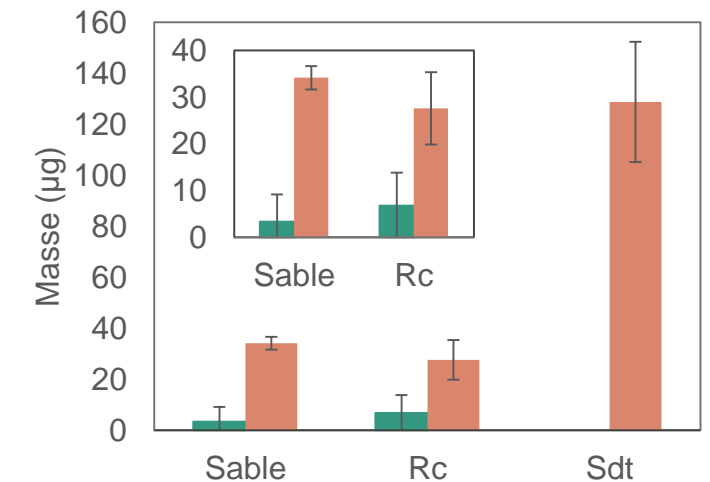
Teneurs restantes en 4-NP



Masses restantes en BPA



Masses restantes en 4-NP



## II – Essais de biodégradation : Potentiel fonctionnel : Biolog EcoPlates

Sample	AWCD		Catabolic richness (%)	
	Temps initial	Temps final	Temps initial	Temps final
Planted-S	1.12 (0.13) b	0.99 (0.13) b	82.8 (7.45) b	66.1 (2,28) a*
Unplanted-S	1.11 (0.23) b	0.72 (0.08) a*	82.8 (7.45) b	53.8 (3.72) b*
Control-S	0.62 (0.02) c	0.33 (0.17) d*	54.8 (4.56) c	30.1 (8.12) e*
Planted-RC	0.83 (0.13) a	0.68 (0.16) a	68.8 (7.45) a	57.0 (9.86) ab
Unplanted-RC	0.65 (0.19) c	0.49 (0.10) cd	56.5 (15.97) c	41.9 (9.12) c
Control-RC	0.69 (0.16) ac	0.51 (0.21) c	55.9 (8.12) c	39.8 (9.86) ce*
Unplanted-Sdt	2.16 (0.02) d	1.91 (0.08) e*	100 (0) d	96.8 (0.01) d*
Control-Sdt	2.10 (0.04) d	1.81 (0.03) e*	100 (0) d	97.8 (1.86) d*

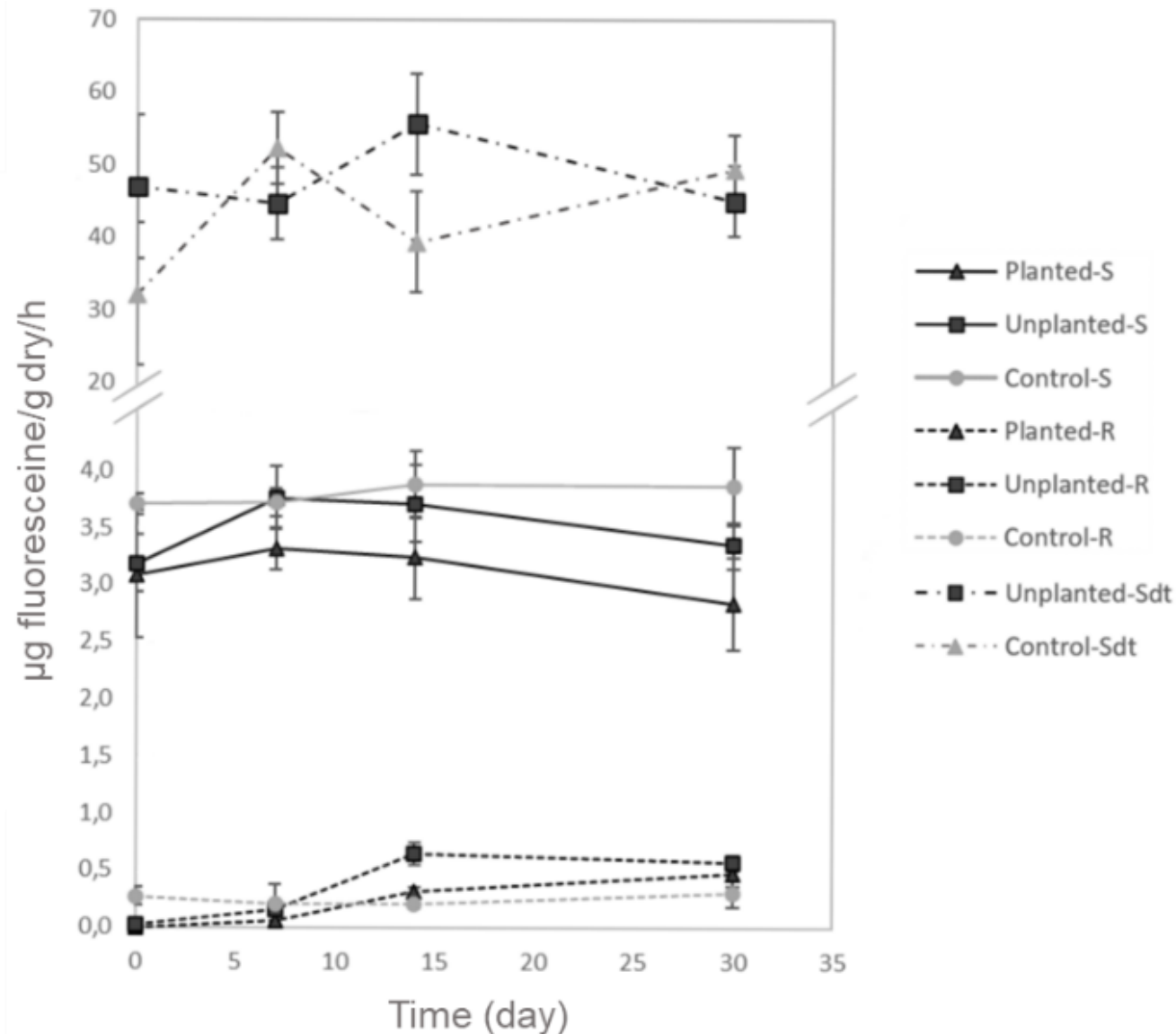
Sdt > sable > Rc (p-values KW < 0,04).

**Temps** : diminution légère, significative pour le sable non planté / contrôle sans MPO et pour le sédiment (p-values < 0,01).

**Présence de *P. australis*** : augmentation significative (p-values < 0,04) du potentiel fonctionnel au temps final pour sable et Rc de ~38 %.

**Présence de MPO** : pas d'impact dans le Rc et sédiment, potentiel fonctionnel significativement plus élevé dans le sable (p-value < 0,05).

## II – Essais de biodégradation : Activité enzymatique globale



Sdt >> sable > Rc (p-values <  $10^{-16}$ ).

**Temps** : Diminution dans le sable non planté (p-value < 0,04) ; augmentation dans le Rc planté et non planté (p-value <  $10^{-4}$ ) ; aucune différence pour le sédiment non planté

**Présence de *P. australis*** : activité planté < activité non planté pour le sable (7, 14, 30 j) et Rc (14 j) (p-values < 0,05)

**Présence de MPO** : activité contrôle > activité pollué pour le sable (0 et 30 j) et activité contrôle < activité pollué pour le Rc (14 j) et pour le sédiment (0 et 14 j) (p-values < 0,04).

## II – Essais de biodégradation : Bactéries connues pour leur capacité à dégrader les MPO

Micropolluant organique	Genres bactériens recensés	Genres fongiques recensés
<b>4-NP</b> <sup>(1,2,3,4,5,6,7,8,9)</sup>	Arthrobacter, Bacillus, Pseudomonas, Sphingobium, Sphingomonas, Stenotrophomonas, Acinetobacter, Corynebacterium, Cytophaga, Ochrobactrum, Rhizobium, Methylobacillus, Xanthomonas, Acidovorax, Lysobacter, Streptomyces, Hyphomicrobium	Aspergillus, Bjerkandera, Formitella, Glioscephalotrichum, Irpex, Phanerochaete, Pleurotus, Polyporellus, Schizophyllum et Trametes
<b>4-OP</b> <sup>(9,10)</sup>	Stenotrophomonas, Sphingobium, Bacillus	-
<b>OPnEO</b> <sup>(11,12)</sup>	Bradyrhizobium, Afipia, Pseudomonas	-
<b>NPnEO</b> <sup>(13)</sup>	Pseudomonas, Sphingomonas, Sphingobium, Cupriavidus, Ralstonia, Achromobacter, Staphylococcus	-
<b>BPA</b> <sup>(8,14,15,16,17,18)</sup>	Sphingomonas, Novosphingobium, Alcaligenes, Bordetella, Nitrosomonas, Pandoraea, Variovorax, Serratia, Enterobacter, Klebsiella, Aeromonas, Pseudomonas, Bacillus, Arthrobacter, Sphingobium, Sphingopyxis, Sinorhizobium, Cupriavidus, Rhodococcus	Pleurotus, Phanerochaete, Trametes, Irpex, Coprinus, Bjerkandera, Coriolopsis, Paraconiothyrium, Grifola, Phlebia, Aspergillus, Cunninghamella
<b>PAE</b> <sup>(19,20,21,22,23)</sup> (non différenciés)	Sphingomonas, Pseudomonas, Moraxella, Acinetobacter, Xanthomonas, Mycobacterium, Corynebacterium, Aureobacterium, Gordonia, Brevibacterium, Micrococcus, Arthrobacter, Rhodococcus, Bacillus, Flavobacterium	Aspergillus, Penicillium, Sclerotium, Fusarium, Polyporus, Phanerochaete, Trametes, et Daldinia

(1) Soares et al., 2003 ; (2) Chang et al., 2007 ; (3) Watanabe et al., 2012 ; (4) Wang et al., 2015b ; (5) Ma et al., 2016 ; (6) Shi et al., 2022 ; (7) Corvini et al., 2006 ; (8) Zhang et al., 2016b ; (9) Toyama et al., 2011 ; (10) Liu et al., 2008 ; (11) Chen et al., 2005 ; (12) Rulianti et al., 2007 ; (13) Gu et al., 2010 ; (14) Im et Löffler, 2016 ; (15) Matsumura et al., 2009 ; (16) Oh et Choi, 2019 ; (17) Tian et al., 2022 ; (18) Sarma et al., 2019 ; (19) Liang et al., 2008 ; (20) Gao et Wen, 2016 ; (21) Cheng et al., 2018 ; (22) Zhu et al., 2018 ; (23) Wen et al., 2014.

- **Limites et besoins futurs**

- Incertitudes** associées au bilan de l'accumulation des micropolluants

- Données de **qualité des eaux** en entrée et sortie des deux FPR non disponibles au cours de la thèse → Essentielles pour confirmer ou infirmer les hypothèses émises

- Variations **inter-filtres** : comparaison complexe car un mois sépare les prélèvements

- Pouvoir subdiviser FS comme FR