



LA VALORISATION AGRICOLE DES PRODUITS ORGANIQUES :

UNE PRATIQUE TRADITIONNELLE
QUI RÉPOND À DE NOUVEAUX ENJEUX



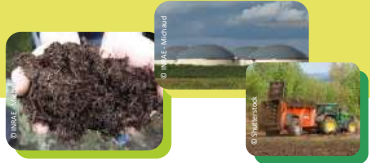
Risques associés aux composés per et polyfluorés en contexte de recyclage agricole des produits résiduaux organiques ?

Aurélia Michaud & Sébastien Sauvé

INRAE UMR SAS & Université de Montréal

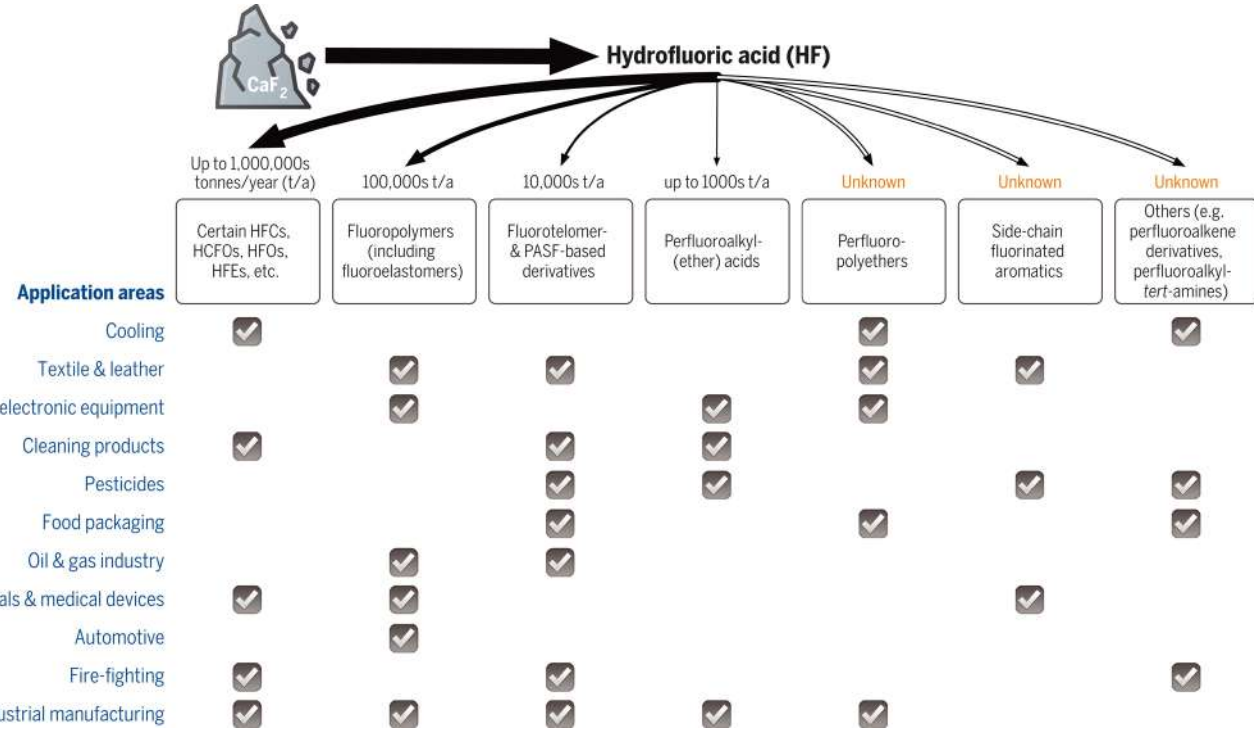
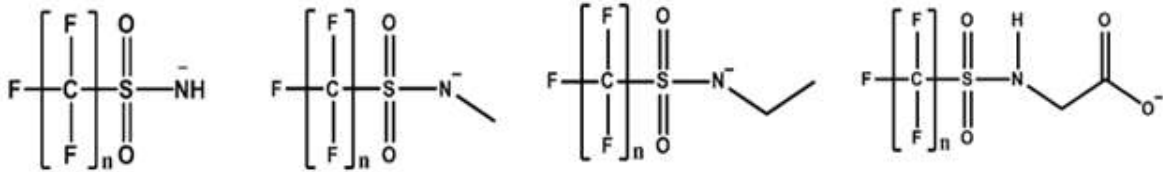
Co-auteurs: Munoz G, Dunsin T, Montenach D, Resseguier C, Watteau F, Sappin-Didier V, Feder F, Morvan T, Houot S





Les composés perfluorés

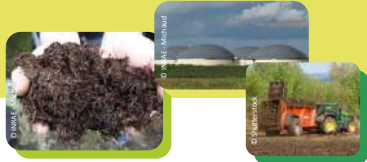
- large famille, milliers de composés
- fortement utilisés depuis années 50
- largement répandus dans l'environnement
- persistants, résistants à la dégradation
- bio-accumulables, vraisemblablement toxiques (carcinogénicité, perturbation hormonale, immunotoxicité)
- exposition directe (alimentation, poussières) et indirecte (biotransformation précurseurs après ingestion)



(Evich et al. 2022)

- Depuis 2000s-2010s, attention accrue des scientifiques surtout au sujet de la contamination des eaux
- Depuis 2010s-20s, attention accrue en Europe (politiques, société, acteurs du développement, de la recherche et industriels)






(Munoz et al. 2017, Zhou et al. 2019, Poothong et al. 2020, EU 2020, le Monde 2020-2024)



Peu d'information en contexte agricole Notamment en cas de recyclage agricole de Produits Résiduaires Organiques (PRO)



Réseau de sites de longue durée du SOERE PRO

Efele (2012-ongoing) Manures (raw/compost/digestate) 	QualiAgro – 1998 ongoing Urban composts, bovine manure 	La Bouzule (1996-2002) Urban/papermill sludge, urban composts 
MetaMetha (2017-ongoing) Manure (raw/digestates) 		PROspective (2000-ongoing) Urban sludge (raw/composted), manure (raw/composted), biowaste (compost/digestate) 
Couhins (1974 -1998) Urban sludge & compost, manure 		La Réunion (2013-ongoing) Urban sludge (raw/composted), manures 
SOERE PRO - Sénégal (2016-ongoing) Urban sludge, poultry manure, digestate 	<p>— Highly instrumented site - - - - Site in resilience</p>	

Etudes conduites dans l'observatoire de recherche en environnement étudiant le recyclage agricole des PRO piloté par INRAE (SOERE PRO) :

- Concentrations dans les PRO ?
- Apports aux sols ?
- Transfert aux cultures et aux eaux du sol ?





(1) **PRO** → 6 sites, 47 PRO, 42 composés PFAS

(2) Sols, plantes

(2) Eaux

Echantillons 1976-2018

→ Analyses à l'Université de Montréal

Effluents d'élevage, 2011-2018

Fumier de bovins (FYM-DC, n = 6)

Lisier de porc (PS, n = 4)

Litière de volailles (PM, n = 4)

Compost de fumier de bovins (C-FYM-DC, n = 1)

Compost de fumier de porcs (C-FYM-P, n = 3)

Digestat de lisier de porc (DIG-PS, n = 3)

PRO urbains, 1976-2018

Boue urbaine (SLU, n = 10, 1976-2017)

Compost de boue urbaine et déchets verts (C-GWS, n = 6, 1996-2017)

Compost de biodéchets (C-BIOW, n = 4, 2009-2016)

Compost d'ordures ménagères résiduelles (C-MSW, n = 3, 2011-2016)

Digestat de biodéchets (DIG-UW, n = 1, 2016)

PRO industriels, 1996

Boue de papeterie (PSLU, n = 1)

Cendres (ASH, n = 1)

SOERE PRO – sites étudiés

Efele (2012-ongoing)

Manures (raw/compost/digestate)



QualiAgro – 1998 ongoing

Urban composts, bovine manure



La Bouzule (1996-2002)

Urban/papermill sludge, urban composts



PROspective (2000-ongoing)

Urban sludge (raw/composted), manure (raw/composted), biowaste (compost/digestate)



Couhins (1974 -1998)

Urban sludge & compost, manure



SOERE-PRO



La Réunion (2013-ongoing)

Urban sludge (raw/composted), manures



— Highly instrumented site - - - Site in resilience



(1) PRO
 (2) Sols, plantes → 5 sites, 75 composés PFAS
 (2) Eaux → 3 sites « ongoing », 75 composés PFAS
Echantillons 1976-2018
 → Analyses à l'Université de Montréal

Effluents d'élevage, 2011-2018

Fumier de bovins (FYM-DC, 2 sites)

Lisier de porc

Litière de volailles

Compost de fumier de bovins (C-FYM-DC, 1 site)

Compost de fumier de porcs

Digestat de lisier de porc

PRO urbains, 1976-2018

Boue urbaine (SLU, 4 sites)

Compost de boue urbaine et déchets verts (C-GWS, 3 sites)

Compost de biodéchets (C-BIOW, 2 sites)

Compost d'ordures ménagères résiduelles (C-MSW, 2 sites)

Digestat de biodéchets (DIG-UW, 1 site)

PRO industriels, 1996

Boue de papeterie

Cendres

+ **Témoin non amendé** (CN, 5 sites) n = 1)

SOERE PRO – sites étudiés

QualiAgro – 1998 ongoing

Urban composts, bovine manure



La Bouzule (1996-2002)

Urban/papermill sludge, urban composts



PROspective (2000-ongoing)

Urban sludge (raw/composted), manure (raw/composted), biowaste (compost/digestate)



Couhins (1974 -1998)

Urban sludge & compost, manure



La Réunion (2013-ongoing)

Urban sludge (raw/composted), manures



— Highly instrumented site - - - Site in resilience

Présence dans les PRO ?



Composés détectés

Au moins 1 composé détecté dans 43 PRO (total 47 PRO)

PRO urbains : en moyenne 39 PFAS

Effluents élevage : en moyenne 4 PFAS

Composés principalement trouvés

PFOS dans 100% PRO, médiane = 23 µg/kg MS

PFOA dans 96% PRO, médiane = 2,6 µg/kg MS

→ interdits depuis 2000s

6:2 FTAB dans 81% PRO, médiane = 20,1 µg/kg MS

précurseur zwitterionique majeur trouvé dans les boues urbaines
rencontré dans les mousses anti-incendies et surfactants

(Munoz et al., Xiao et al. 2017)





PRO industriels historiques

Boue papeterie Σ44PFAS 100 µg/kg MS

Cendres Σ44PFAS < 0.5 µg/kg MS

Boue urbaine (compostée ou non)

≈ compost d'ordures ménagères

→ **vecteurs PFAS aux sols agricoles**

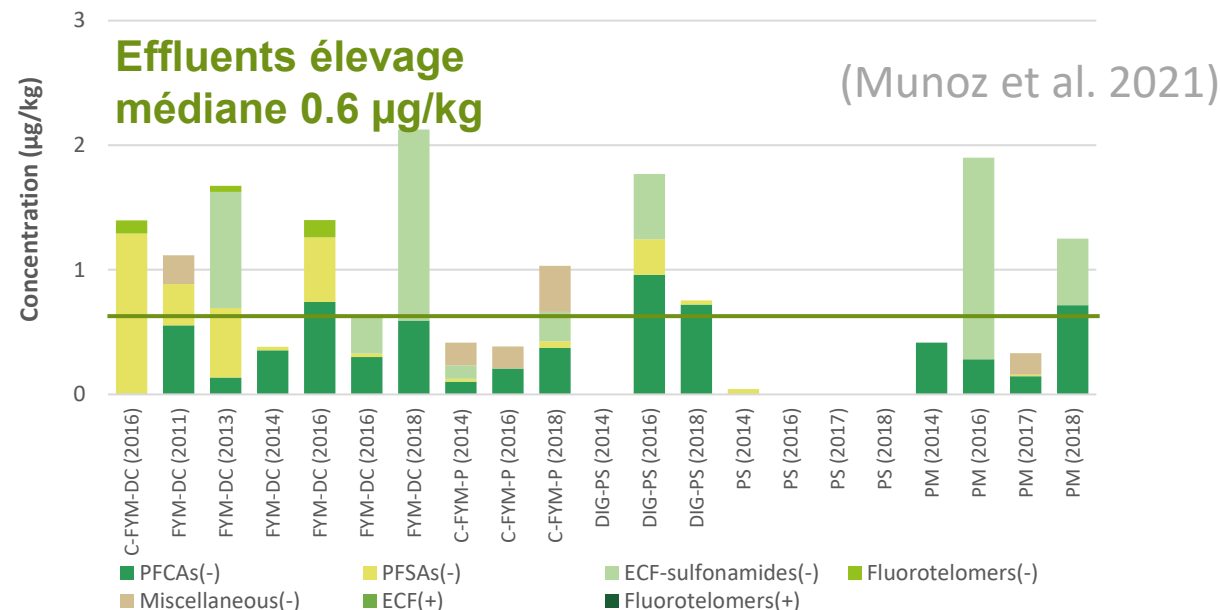
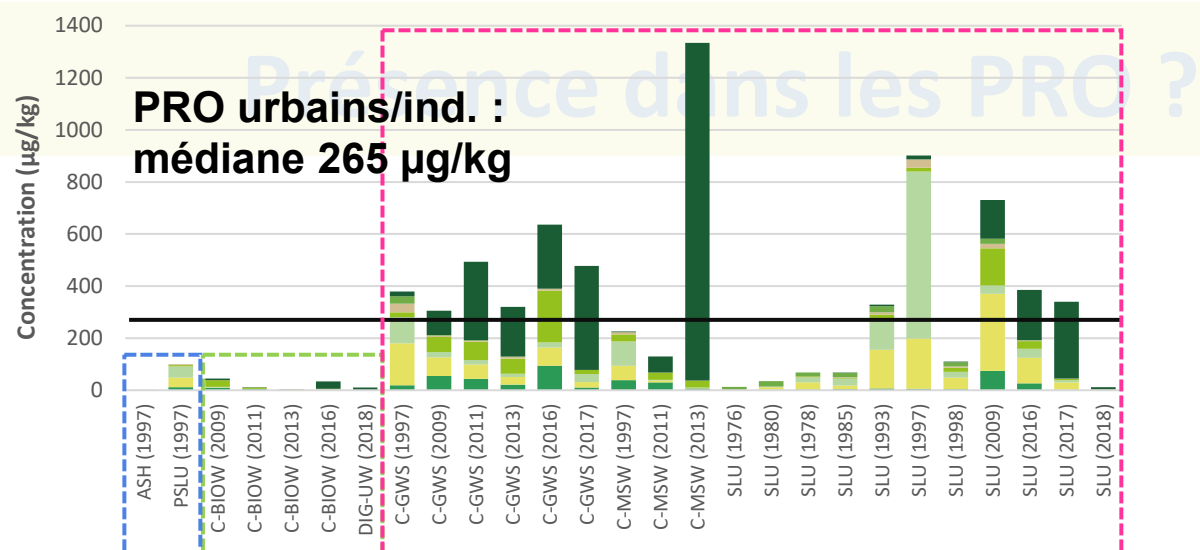
>> compost / digestat biodéchets

→ **faibles vecteurs aux sols agricoles**

Effluents élevage

Très faibles concentrations

→ Apports aux sols faibles/absents



- Boue urbaine (SLU)
- Compost boue urbaine et déchets verts (C-GWS)
- Compost biodéchets (C-BIOW)
- Compost ordures ménagères résiduelles (C-MSW)
- Digestat de biodéchets (DIG-UW)
- Boue de papeterie (PSLU)
- Cendres (ASH)
- Fumier de bovins (FYM-DC)
- Lisier de porc (PS)
- Litière de volailles (PM)
- Compost de fumier de bovins (C-FYM-DC)
- Compost de fumier de porcs (C-FYM-P)
- Digestat de lisier de porc (DIG-PS)

Apports aux sols via les PRO ?



Composés détectés dans les sols

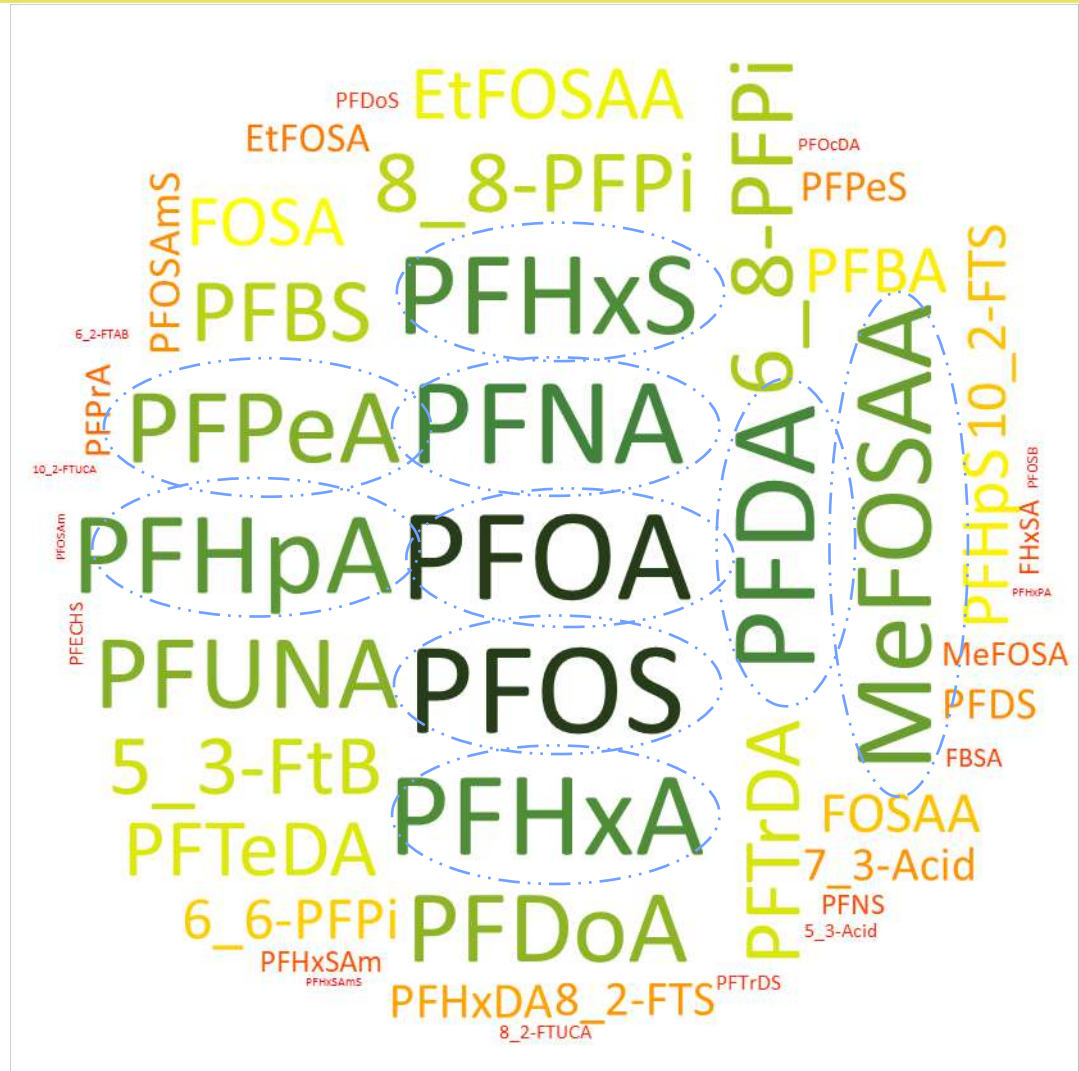
Au total 50 composés trouvés sur les 117 échantillons
De 17 sols avec fumier à 46 avec des boues urbaines

Surtout Perfluoroalkyl acids (PFAA)
= produits dégradation
= perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCA)
+ perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSA)

Composés principalement trouvés

PFOA (PFCA), PFOS (PFSA)
Dans 100% des échantillons
50% de la somme des PFAS

→ Transformation de précurseurs (issus des PRO),
→ Formation de PFOS/PFOA et de composés à chaînes courtes
(Buck et al. 2011, Liu et al. 2013, Wang et al. 2024)



100%
>90%
>80%
>70%
>60%
>50%
>40%
>30%
>20%
>10%
<10%

Apports aux sols via les PRO ?



Concentrations dans les sols

Σ 75 PFAS de 0.27 à 21 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS (moy. site et traitement)

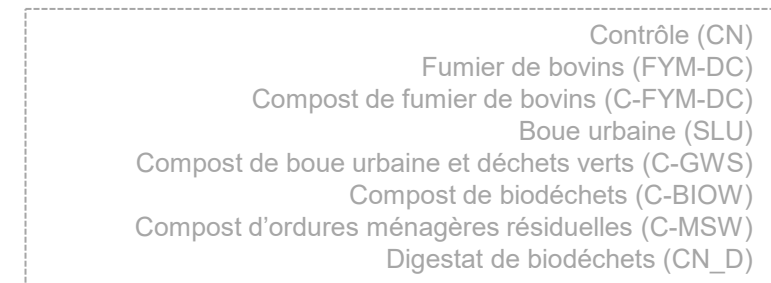
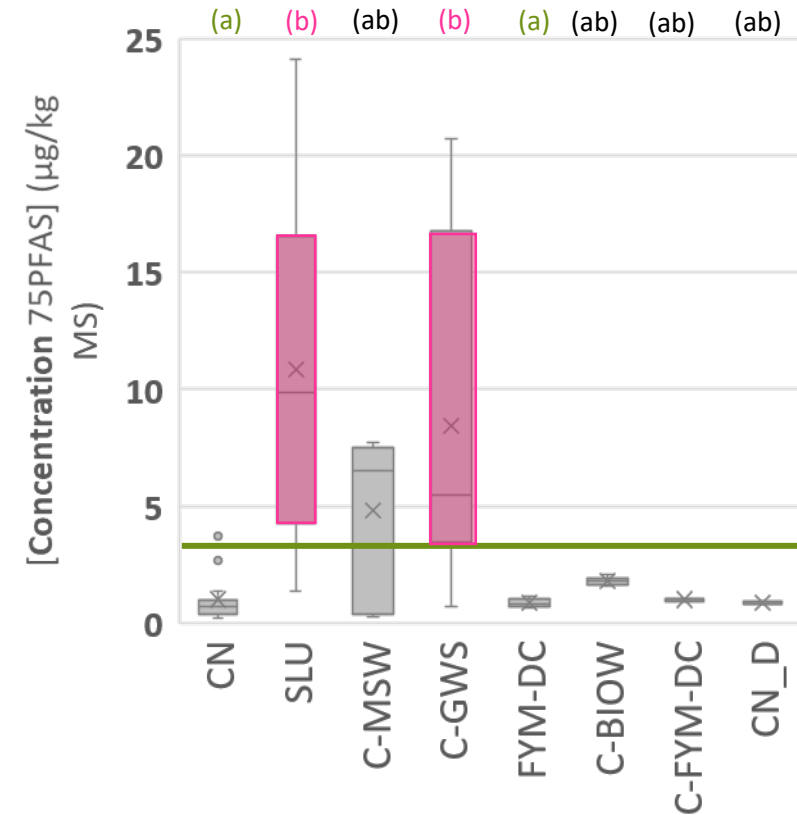
Boue urbaine (compostée ou non) > contrôle et fumier

“background” ≤ 3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS

en sols amendés avec fumier, biodéchets et non amendés bien en dessous de sites contaminés (jusqu’à 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS)

(Brusseau et al. 2019; Sörengard et al. 2022)

Augmentation temporelle significative sur 3 sites



Présence dans les eaux du sol ?



Composés détectés

Jusqu'à 59 congénères détectés

11 composés détectés sur 80% à 100% des éch.

8 composés détectés dans 100 % des échantillons
(dont PFOA)

→ Tous anioniques et majoritairement
des PFCA (perfluoroalkyl carboxylic acids)
(= produits dégradation)

Accord avec études précédentes, prévalence

→ longues chaînes PFCA/PFSA (PFOA, PFOS, PFNA)

→ courtes chaînes PFCA/PFSA (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA ; PFBS, PFPeS, PFHpS, PFHxS)

(Gottschall et al. 2017, Podder et al. 2021, Li et al. 2022)



Présence dans les eaux du sol ?

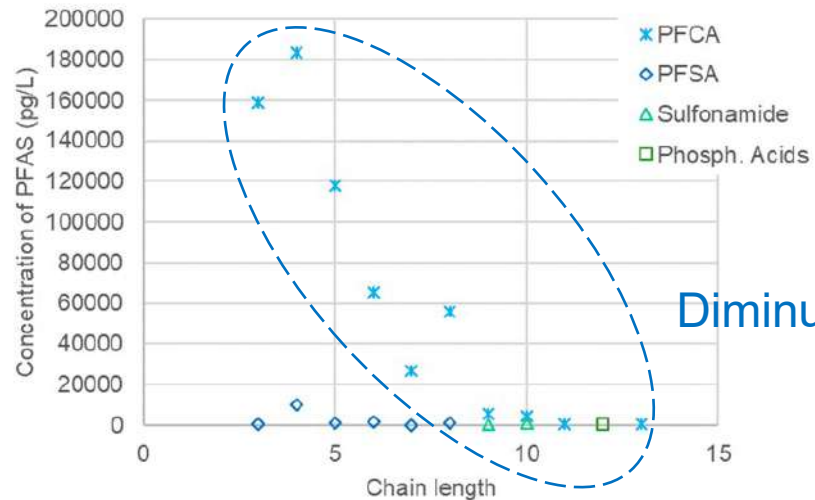


Concentrations ?

Sur les PFAS plus fréquents,
> 10 ng/L sont = PFCA anioniques à courte chaîne ($\leq C7$) et PFOA à longue chaîne (C8) connu pour être très soluble

Background

y compris dans les sols non amendés ou avec fumier



Diminution [PFCA] significative avec augmentation de leur chaîne

NB : In 2020, the European Union (EU) included PFAS into their drinking water directive, with the limit value of 0.1 $\mu\text{g/L}$ for the sum of 20 PFAS and total PFAS of 0.5 $\mu\text{g/L}$ (applicability effective in 2026)

Présence dans les plantes ?



Composés détectés

Grains maïs/blé, tige cane à sucre

16 composés détectés, PFAAs principalement

PFBA (55% des échantillons, courte chaîne)

PFDoS (44%)

PFOS (23%)

PFOA (17%)



Effet des apports de PRO ?

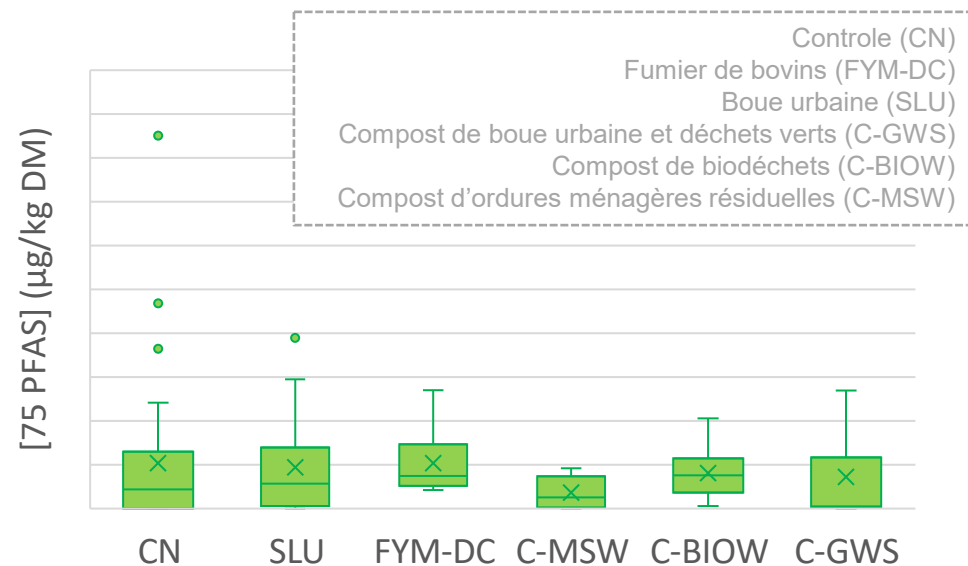
Pas de différence entre traitements

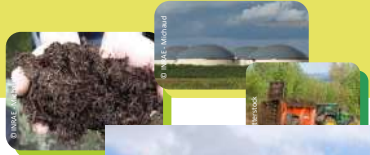
PRO → pas modification transfert dans les plantes

Background global, y compris sur sol non amendé quel que soit le site

→ Prélèvement PFCA à courtes chaînes (PFBA, PFPeA, et PFHxA)

(Bolan et al. 2021, Mei et al. 2021)

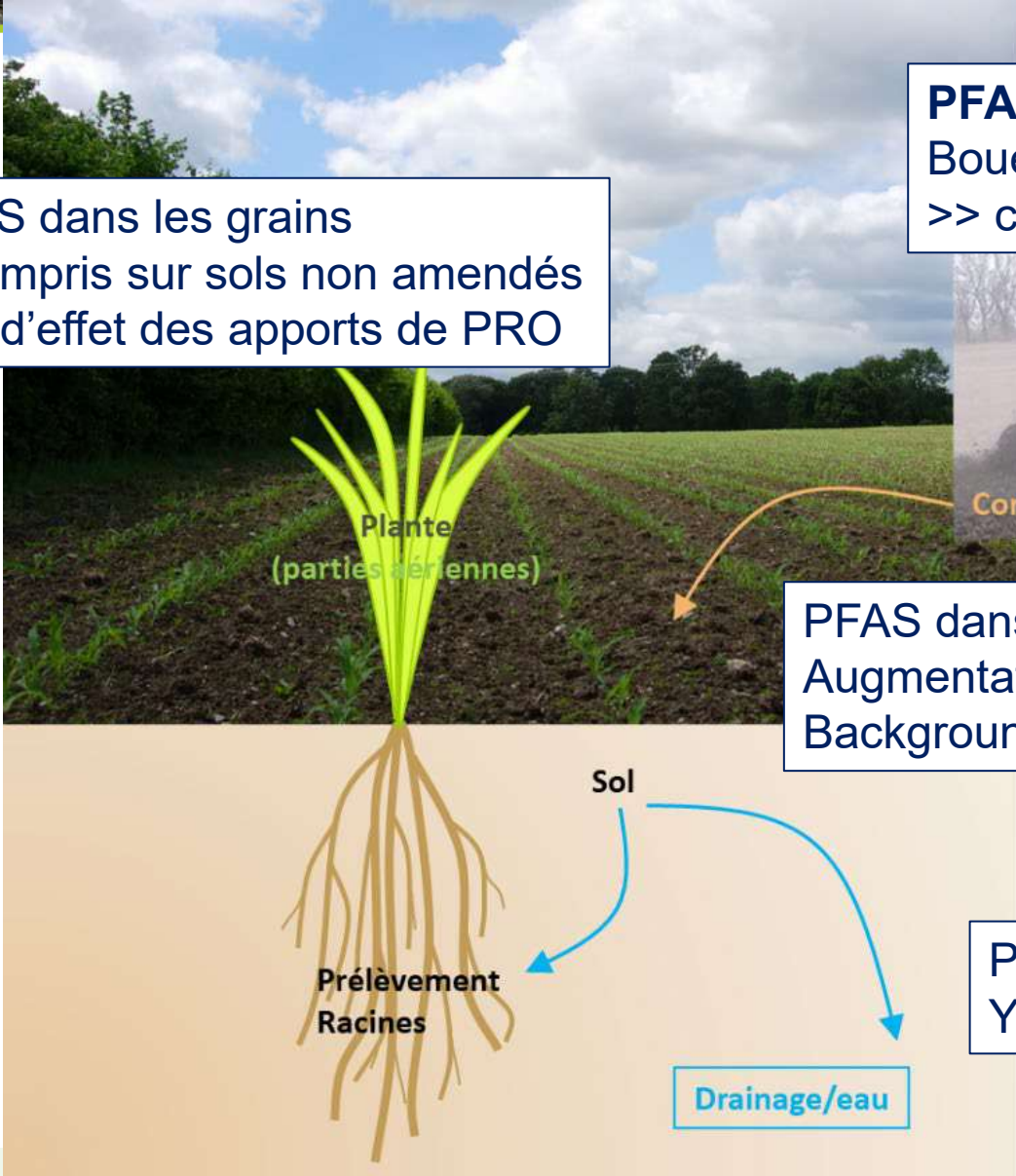




PFAS dans les grains
Y compris sur sols non amendés
Pas d'effet des apports de PRO

PFAS dans les PRO

Boue urbaine (compostée ou non) \approx compost ordures ménagères
>> compost/digestat biodéchets >> effluents élevage



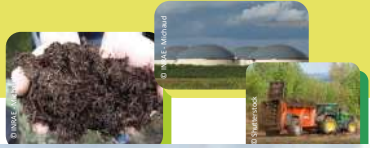
PFAS dans les sols, surtout avec boue urbaine (compostée ou non)
Augmentation stock liée à flux apports PFAS par PRO
Background $\leq 3 \mu\text{g}/\text{kg MS}$ (non amendé, avec effluents élevage et biodéchets)

PFAAs (acides perfluoroalkyls) produits dans les sols
 $\approx 79\%$ [$\Sigma 75$ PFAS]

PFAS anioniques dans les eaux (40 cm)
Y compris les contrôles

Surtout PFCAs (= PFAA), \nearrow PFAS avec \searrow longueur de chaîne

Conclusions & remerciements



Les sols...
... Réservoirs à long-terme de PFAS
.... Avec (bio)transformation après apports et production de PFAAs
(PFOS/PFOA et anioniques mobiles à courte chaîne (ex. PFBA, PFPeA, PFHpA, PFHxA))



Credit : AMichaud

Conclusions & remerciements



**Merci aux collègues (dont Denis)
et partenaires**

...

Merci de votre attention

Credit : AMichaud



Merci !

**LA VALORISATION AGRICOLE
DES PRODUITS ORGANIQUES :**

**UNE PRATIQUE TRADITIONNELLE
QUI RÉPOND À DE NOUVEAUX ENJEUX**