

ASTEE webconférence 09/12/2025 « PFAS dans les boues : enjeux, retours d'expérience et perspectives »

astee
L'association des professionnels
de l'eau et des déchets

Evaluation prospective des risques liés aux composés émergents perfluorés en contexte d'apports de produits résiduaux organiques (PRO)

INRAE

INRAE UMR SAS - Michaud Aurélia

Université 
de Montréal

Co-auteurs travaux INRAE :

Université de Montréal : Munoz G, Dunsin T, Sauvé S

SOERE PRO INRAE-CIRAD : Watteau F, Sappin-Didier V, Feder F, Morvan T, Houot S

 **cirad**



Auteur : AM

Recyclage des produits résiduaux organiques

Contexte et enjeux

Pratique ancienne (ex. épandage fumiers)

Contexte réglementaire favorable et incitatif

Feuille de route pour l'économie circulaire en France 2019

Loi Egalim 2018

Green Deal vers neutralité carbone et diminution des engrais minéraux 2021

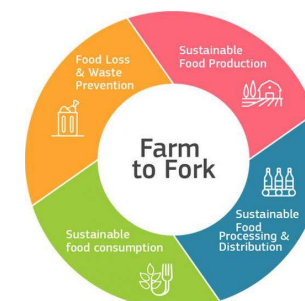
Farm to fork

EU Soil strategy for 2030

Réfaction et augmentation coûts production engrais minéraux ; dépendances aux énergies fossiles

- Obligation de recycler les fractions organiques (biodéchets) des déchets
- Diminuer l'empreinte carbone et augmenter l'autonomie énergétique UE
- Restaurer l'état des sols (75% dégradés) et augmenter leur résilience
- Limiter dépendance intrants/énergies

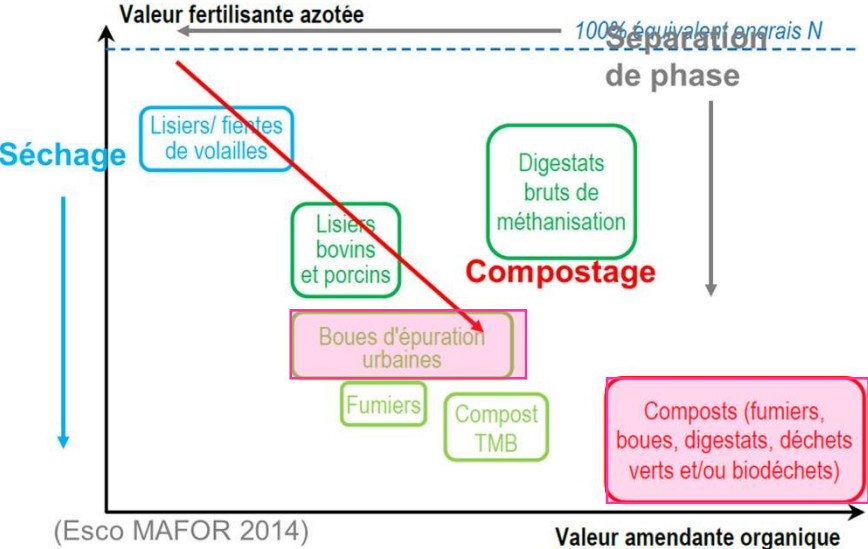
→ **Production énergie via méthanisation et recyclage produits résiduaux organiques (PRO) considérés comme leviers**



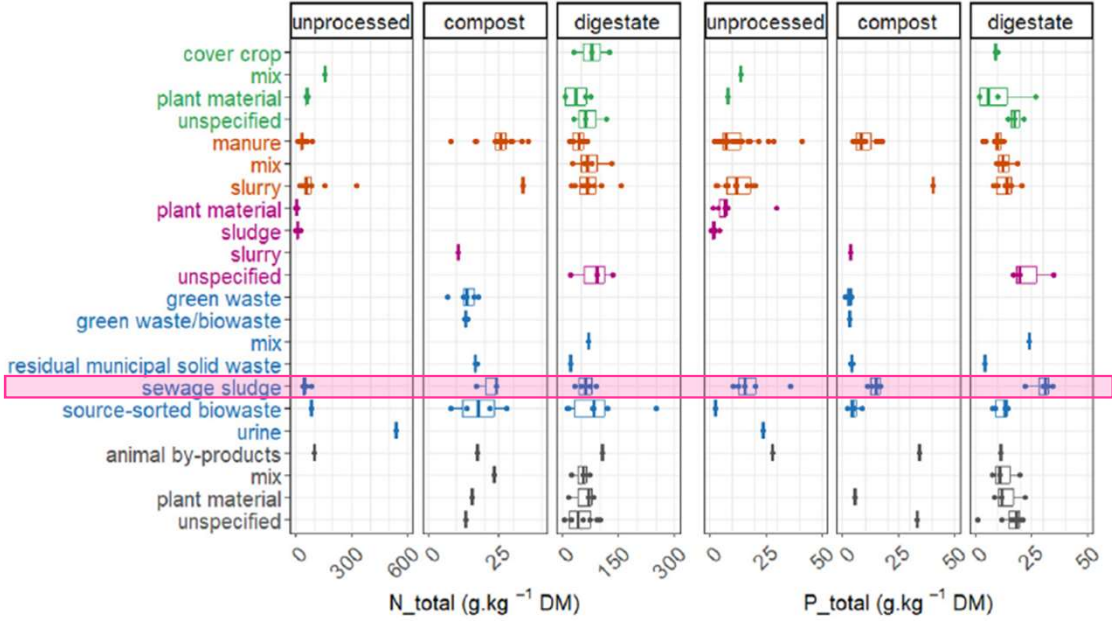
Recyclage des produits résiduels organiques

Boues urbaines

Valeur fertilisante N et amendante C



Source de P



■ Agricultural crops/residues
 ■ Livestock manure
 ■ Industrial
 ■ Urban
 ■ Other/mixed

(Michaud et al. 2025a)

Recyclage des produits résiduaux organiques

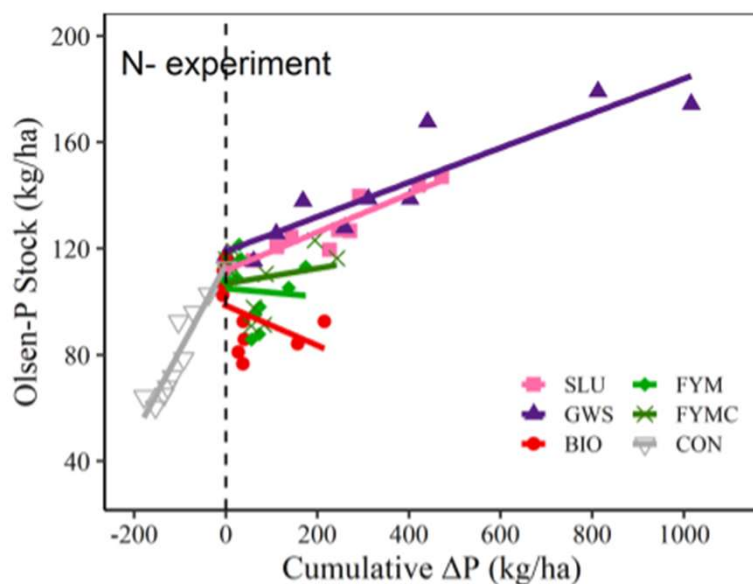
Boues urbaines

Amélioration de la fertilité des sols

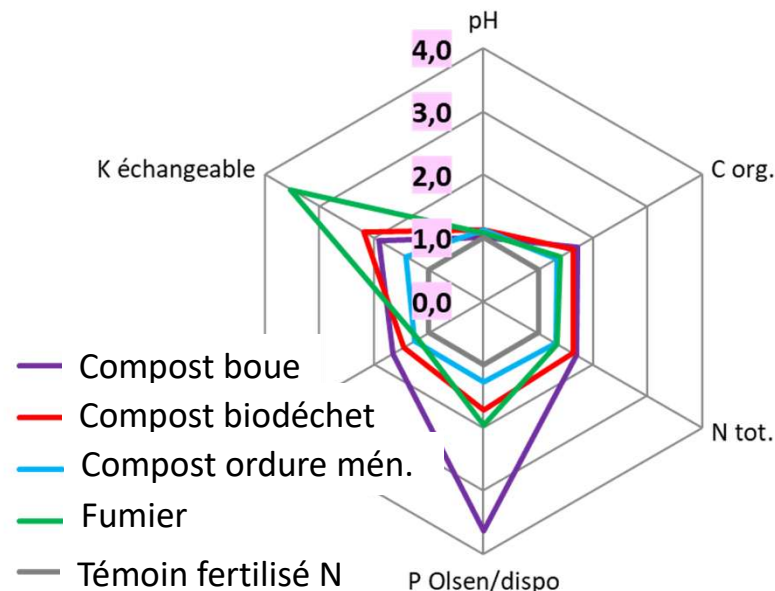
Boue et boue compostée : augmentation P disponible

Boue compostée : augmentation N total, C organique, CEC

(EscoMafor 20214 ; Michaud et Houot 2020/2021 ASTEE)



(Essai INRAE PROspective, Chen et al. 2021)



Valeurs témoin (= 1)		
pH		6,9
C org.	g/kg MS	10,1
N tot.	g/kg MS	1,0
P Olsen	g/kg MS	0,06
CEC	cmol+/kg MS	9,1
K éch.	cmol+/kg MS	0,27

(Essai INRAE QualiAgro, extrait Michaud et al. 2019)

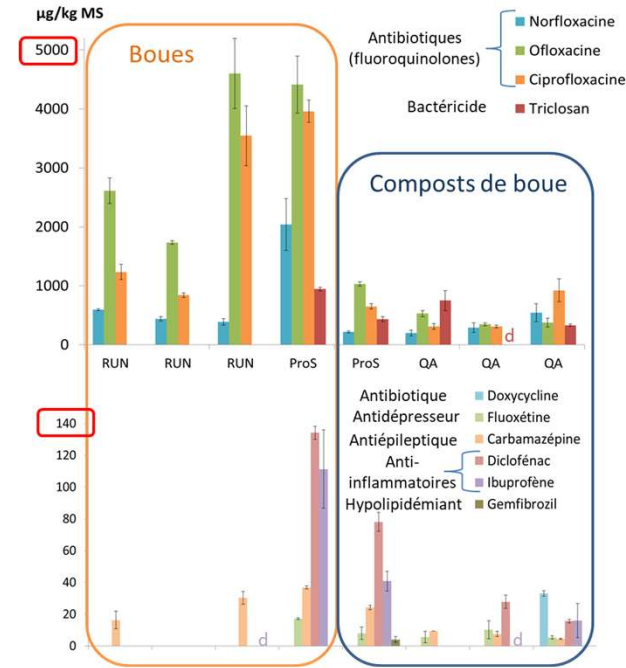
Recyclage des produits résiduels organiques

Boues urbaines

Risques d'apports de contaminants

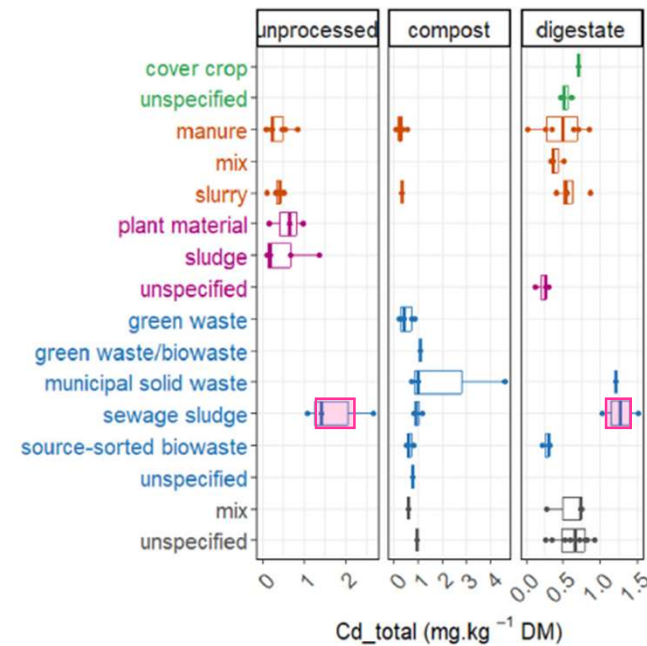
(EscoMafor 2014 ; Michaud et Houot 2020/2021 ASTEE)

Organiques (ex. pharmaceutiques, bactericide)



(Deschamps et al. 2017)

Métalliques (ex. Cu, Zn, Cd...)

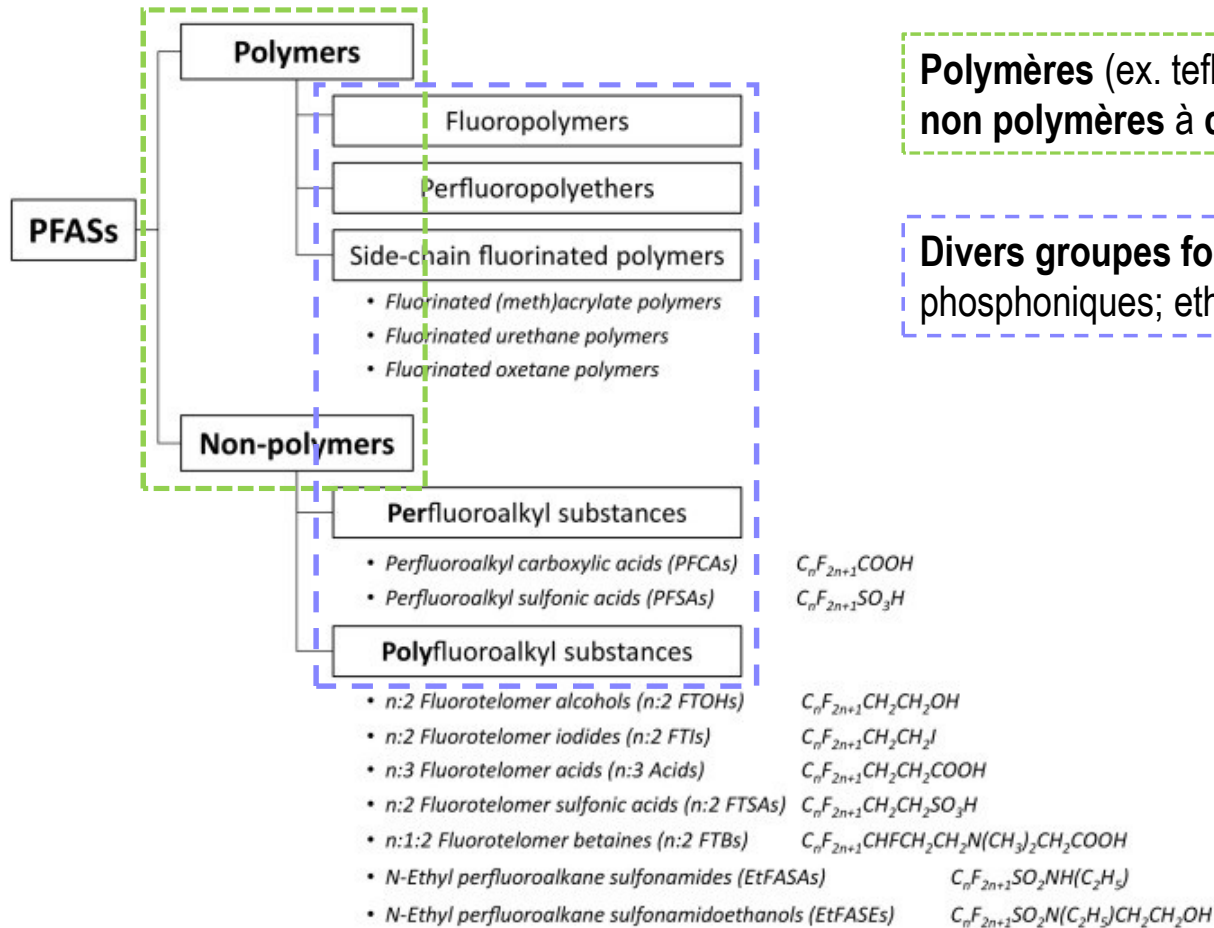


(Michaud et al. 2025a)

Quid pour des composés poly- et perfluorés ?

Les PFAS ?

Milliers de composés à structures variées



Polymères (ex. teflon = PTFE)
non polymères à chaînes carbonées de taille variable (C2, C3, ... C9...)

Divers groupes fonctionnels (acides carboxylique, sulfoniques, phosphoniques; ethers...)

Les PFAS ?

Précurseurs (ex. Fluorotelomer alcohols and perfluoroalkyl phosphate esters, perfluoroalkyl sulfonamides)

dégradés en molécules plus ou moins courtes / mobiles / récalcitrantes

(ex. perfluoroalkyl carboxylic acids - PFCAs, perfluorosulfonic acids - PFSAs)

... jusqu'à des formes courtes (ultra) persistantes

(ex. PFBA, PFHxA, PFPeA; trifluoroacetate = TFA)

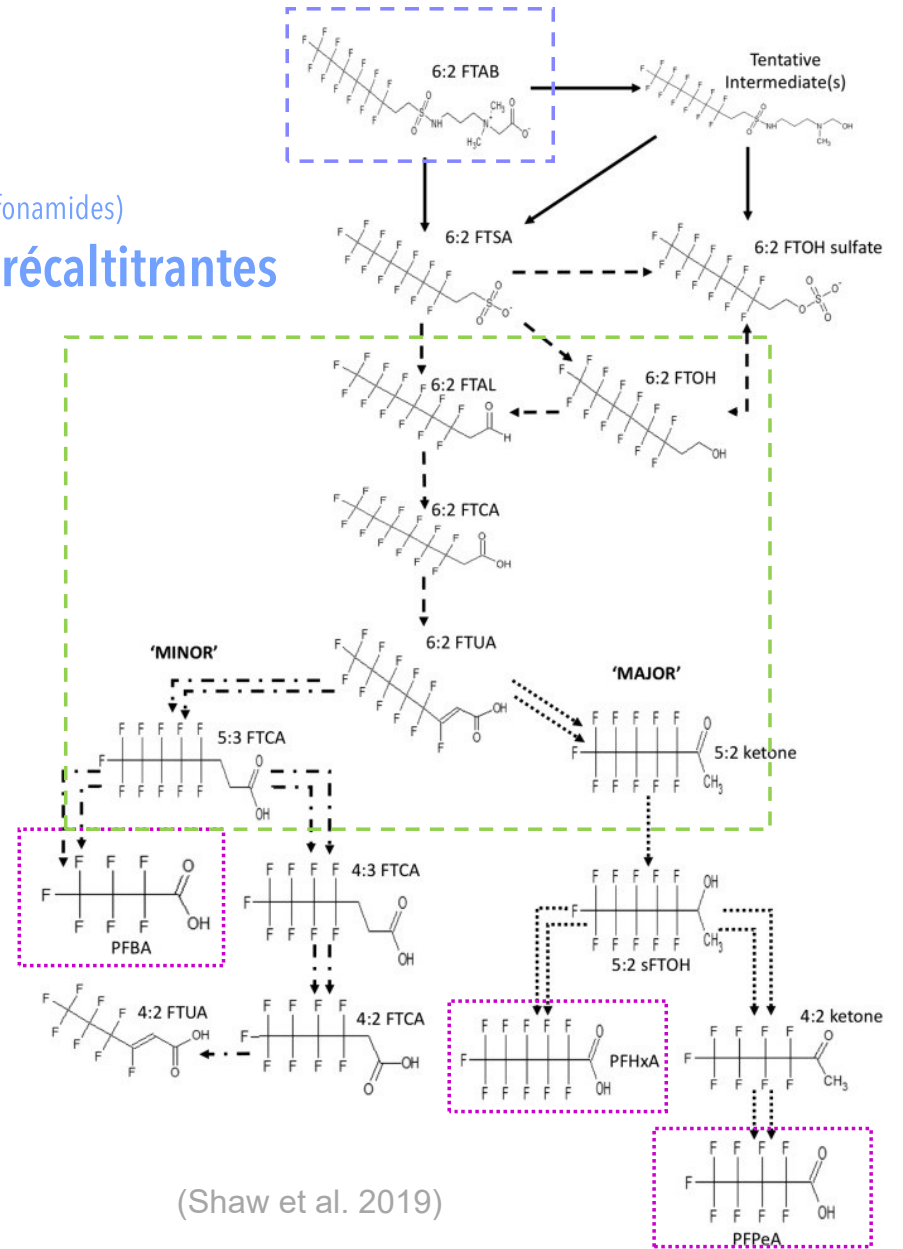
→ **Co-existence dans l'environnement :**

Précurseurs (ex. 6:2 FTAB)

Intermédiaires

Produits de dégradation

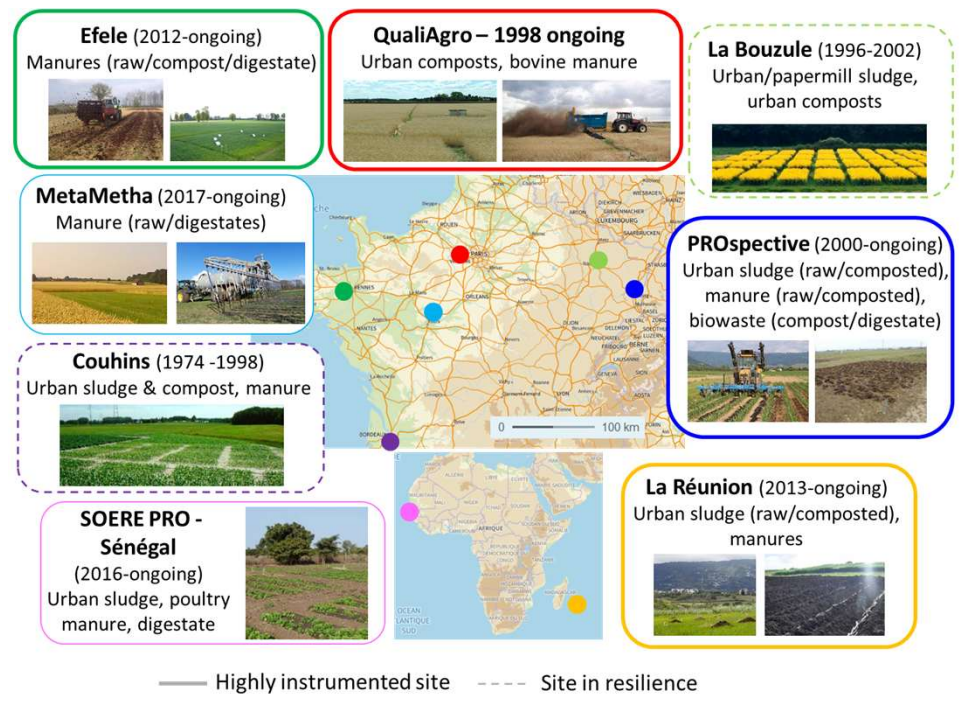
(Gikka et al, 2023)



Etudes prospectives risques liés PFAS en contexte recyclage PRO ?

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

Réseau de sites de longue durée du SOERE PRO



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 ?



SOERE-PRO

Présence dans les PRO ?

Concentrations ?

47 PRO épanchés de 1976 à 2018

Etude Munoz et al. 2021

Effluents élevage

médiane 0.6 µg/kg

→ Apports aux sols faibles/absents

PRO industriels historiques

Boue papeterie Σ44PFAS 100 µg/kg MS

Cendres Σ44PFAS < 0.5 µg/kg MS

Compost / digestat biodéchets

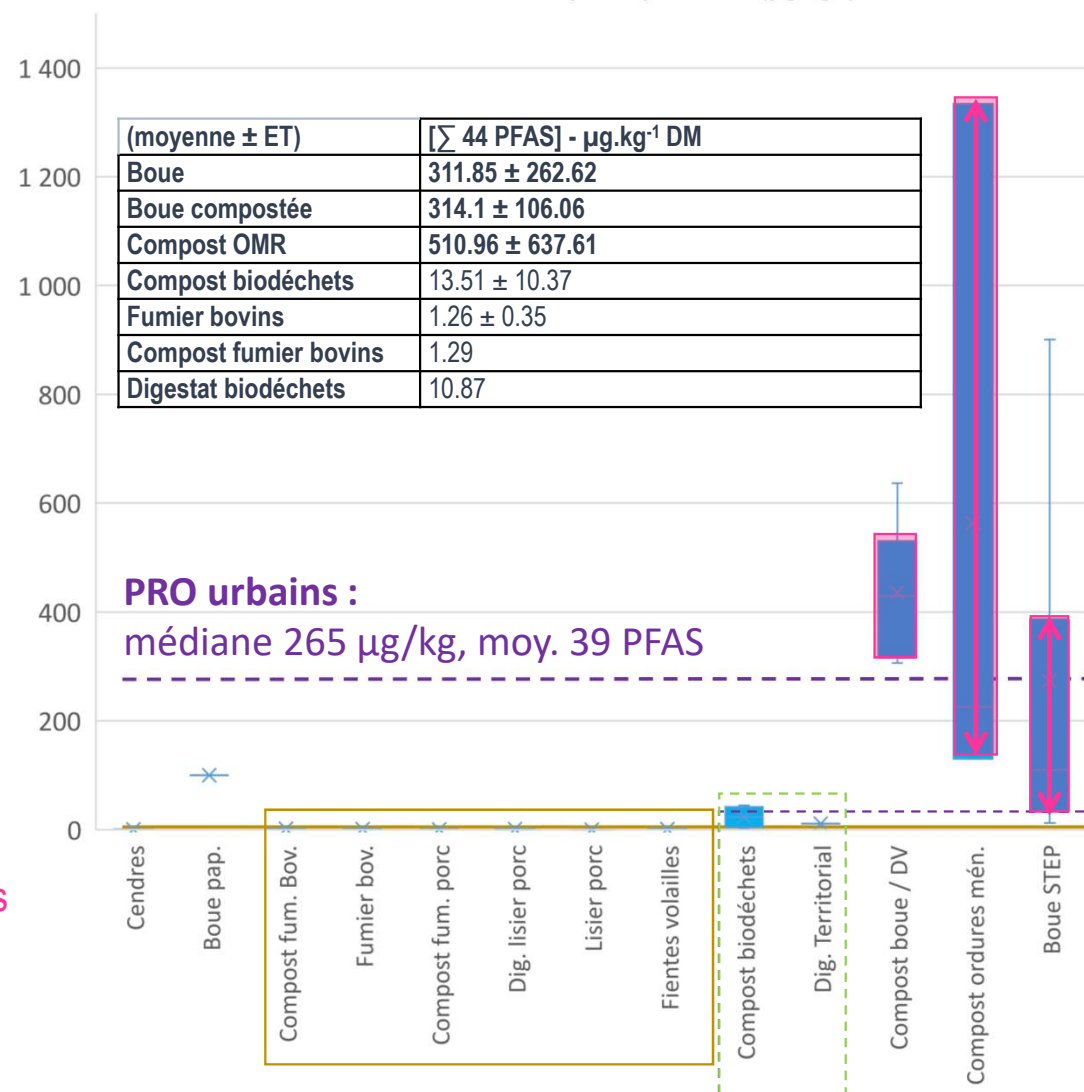
→ faibles vecteurs aux sols agricoles

Boue urbaine (compostée ou non) ≈ compost d'ordures ménagères

Variabilité niveau contamination

→ vecteurs PFAS aux sols agricoles

Concentration totale en composés perfluorés (µg.kg⁻¹)



Présence dans les PRO ?

Composés détectés

Etude Munoz et al. 2021

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

PRO urbains : en moyenne 39 PFAS

Effluents élevage : en moyenne 4 PFAS

PFOS dans 100% PRO

PFOA dans 96% PRO

→ interdits depuis 2000s

6:2 FTAB dans 81% PRO

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

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



(moyenne ± ET)	PFOA	PFOS	6:2 FTAB
Boue	4.3 ± 3.81	101.53 ± 94.74	71.41 ± 102.35
Compost boue	10.07 ± 4.33	59.35 ± 38.29	142.77 ± 123.31
Compost OMR	10.17 ± 9.33	19.04 ± 26.57	427.81 ± 698.21
Compost biodéchets	1.21 ± 0.88	0.68 ± 0.7	7.06 ± 8.94
Fumier bovins	0.13 ± 0.07	0.36 ± 0.11	na
Compost fumier bov.	na	1.25	na
Digestat biodéchets	0.23	0.44	10.11

Présence dans les sols ?

Occurrence dans les sols ?

Centaine d'échantillons de sols ± amendés

Prélèvements : 1976-2018

Etude Michaud et al. 2025b

Omniprésence de PFAS en agricoles amendés ou non

Somme de 75 PFAS ($\Sigma 75$ PFAS)

1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en sols amendés avec du fumier de bovins et non amendés

2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en sols amendés par des composts de biodéchets

jusqu'à 10-20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ dans des sols amendés par des boues urbaines (compostées ou non)

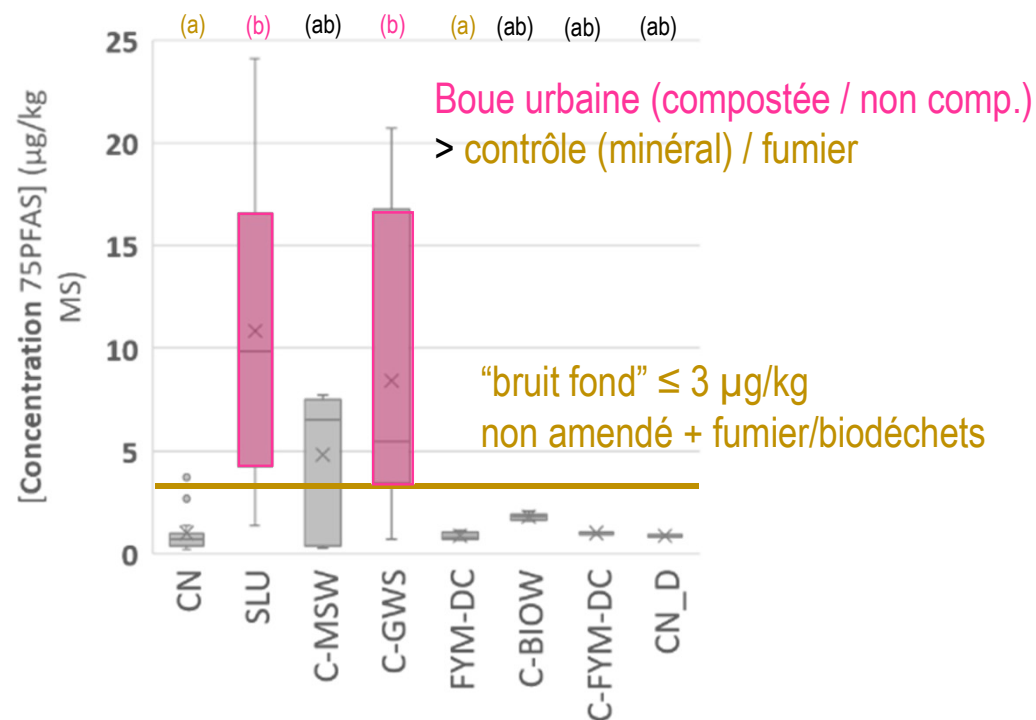
Bien en dessous de sites contaminés (jusqu'à 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS)

Produits dégradation surtout retrouvés (PFCA, PFSA)

PFPeA, MeFOSAA, PFHpA, PFHxS, PFHxA, PFDA...

PFOA, PFOS \approx 50% stocks estimés

→ Transformation de précurseurs



CN = contrôle, fertilisation minérale

CN_D = contrôle avec digestat biodéchets

SLU = boue urbaine

C-MSW = compost ordures ménagères résiduelles

C-GWS = compost boue urb. Déchets verts

C-BIOW = compost biodéchets

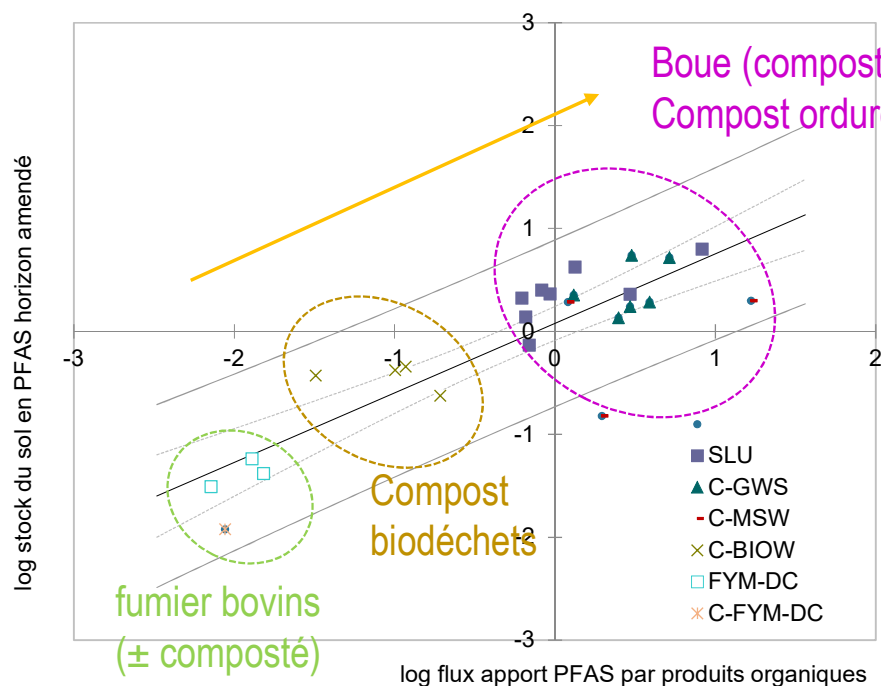
FYM-DC = fumier bovins

C-FYM-DC = compost fumier bovins

Présence dans les sols ?

Flux apportés par les PRO versus évolution des stocks du sol ?

Etude Michaud et al. 2025b



Moyenne ± ET	\sum 44 PFAS inputs - g.ha ⁻¹ / spreading
Boue	3.12 ± 2.63
Compost boue	3.14 ± 1.06
Compost OMR	5.11 ± 6.38
Compost biodéchets	0.14 ± 0.10
Fumier bovins	0.01 ± 0.00
Compost fumier bov.	0.01
Digestat biodéchets	0.11

Augmentation stock PFAS sols en lien avec Augmentation flux PFAS apporté par PRO

- Fumier (composté ou non)
- < Compost biodéchets
- < Boue urbaine (compostée ou non)
- ≈ Compost ordures ménagères résiduelles

SLU = boue urbaine
 C-MSW = compost ordures ménagères résiduelles
 C-GWS = compost boue urb. Déchets verts
 C-BIOW = compost biodéchets
 FYM-DC = fumier bovins
 C-FYM-DC = compost fumier bovins

Migration dans les eaux du sol

Concentrations ?

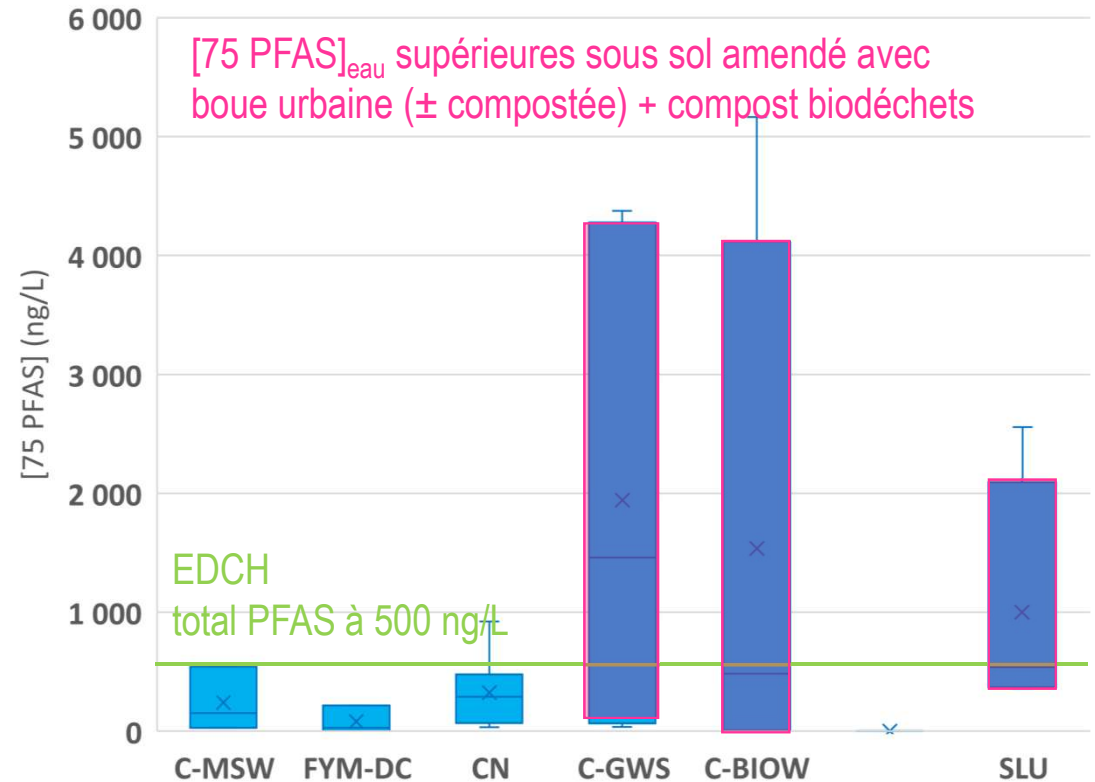
Etude Michaud et al. 2025b

PFAS retrouvés dans eaux lixiviation sous horizon labour y compris en sols non amendés ou avec fumier

→ **Migration verticale** dans les eaux du sol

PFAS anioniques

Majoritairement PFCA (perfluoroalkyl carboxylic acids)
(= produits dégradation)



CN = contrôle, fertilisation minérale

SLU = boue urbaine

C-MSW = compost ordures ménagères résiduelles

C-GWS = compost boue urb. Déchets verts

C-BIOW = compost biodéchets

FYM-DC = fumier bovins

Migration dans les eaux du sol

Mobilité ?

Etude Michaud et al. 2025b

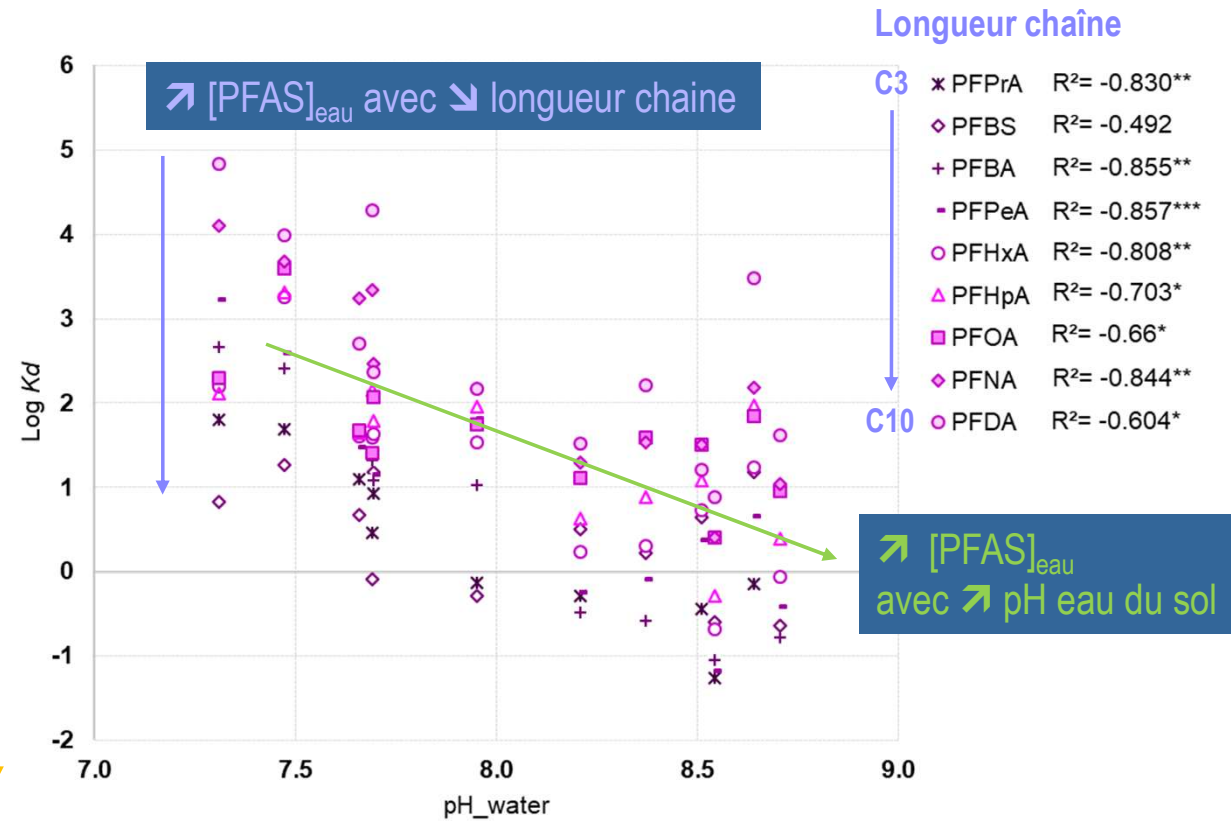
Kd = coefficient distribution sol/eau

Indication potentiel lixiviation et disponibilité de contaminants

(Sauvé et al. 2000)

+ adsorption sol

+ mobilité eau



→ Formation d'acides perfluoroalkyles anioniques, principalement **PFCA** (perfluoroalkyl carboxylic acids) = produits dégradation (ex. PFOA, PFHxA, PFPeA, PFPrA, PFBA) avec leur lixiviation dans le profil de sol gouvernée par leur longueur de chaîne et le pH de la solution

Transfert aux cultures

Concentrations ?

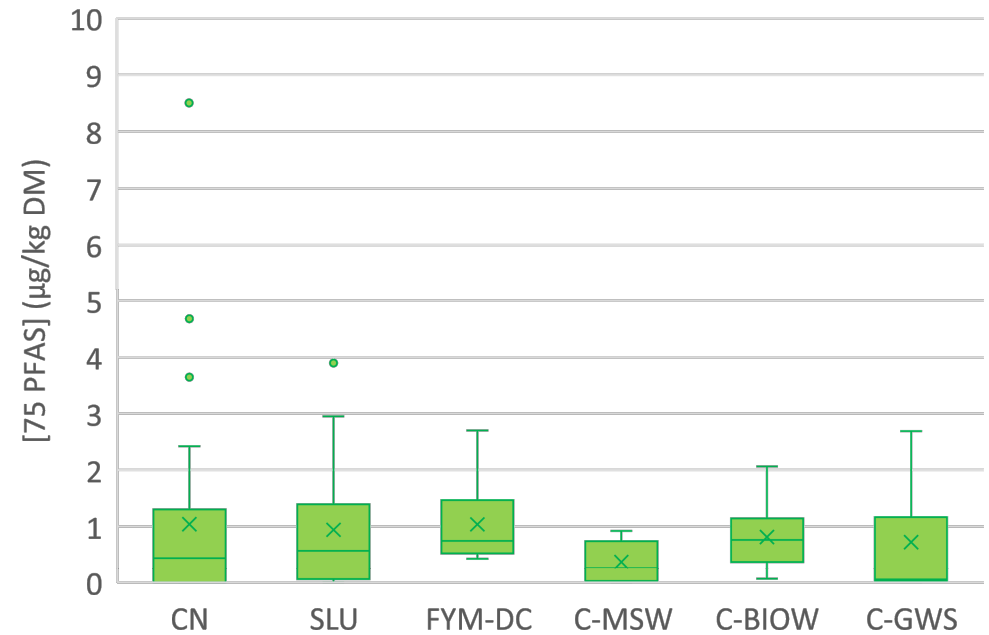
Grains blé, maïs, canne à sucre

Prélèvements 1976-2018

Etude Saliu et al. 2025

Omniprésence dans les organes récoltés
avec des **niveaux relativement bas** (0.01–2.5 µg/kg)

Sans effet des apports de PRO
ou de l'augmentation des **PFAS** dans les sols



CN = contrôle, fertilisation minérale

SLU = boue urbaine

FYM-DC = fumier bovins

C-MSW = compost ordures ménagères résiduelles

C-BIOW = compost biodéchets

C-GWS = compost boue urb. Déchets verts

Transfert aux cultures

Composés retrouvés ?

Grains blé, maïs, canne à sucre

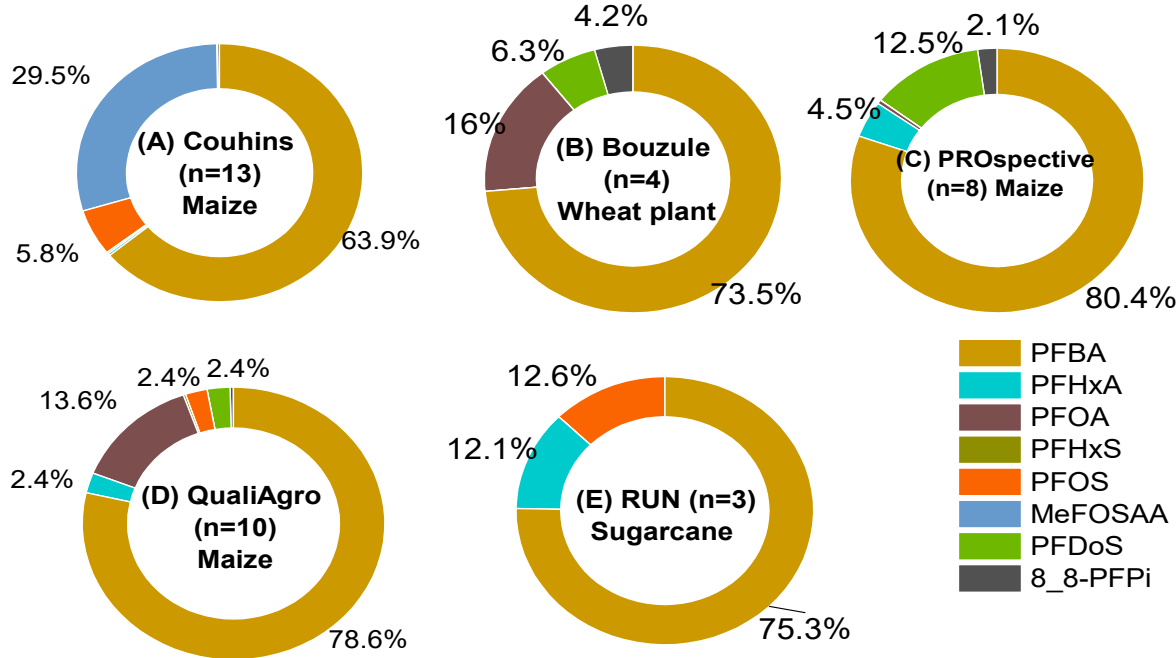
Prélèvements 1976-2018

Etude Saliu et al. 2025

Les composés majoritairement retrouvés

sont le PFBA, le PFOA et le PFOS, (64–80 %, 14–16 % et 6–13 % des $\Sigma 75$ PFAS, respectivement) = Perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs) surtout courte chaîne = produits dégradation

Abondance relative des PFAS (% de la somme PFAS) des cultures



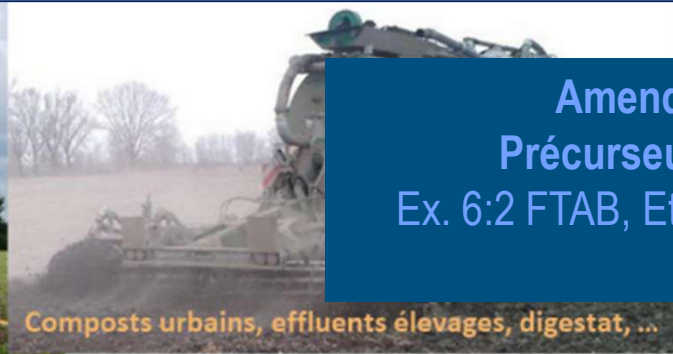
Conclusions études INRAE

Continuum intrants – sol – eaux et cultures



PFAS dans les grains
Y compris sur sols non amendés
Pas d'effets des apports d'amendements org.

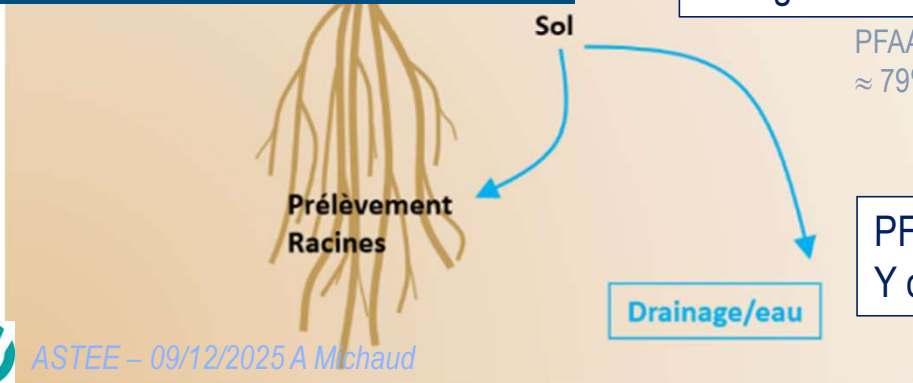
Boue urbaine (compostée ou non) ≈ compost ordures ménagères
>> compost/digestat biodéchets >> effluents élevage



Amendements organiques / Sols
Précurseurs + produits dégradation
Ex. 6:2 FTAB, EtFOSAA, MeFOSAA; PFOS, PFOA, PFAA

Eau, plantes
Produits dégradation
Ex. PFAA dont PFOS/PFOA, PFBA

PFAS dans les sols, **surtout avec boue urbaine (compostée ou non)**
Augmentation stock liée à flux apports PFAS par amendements org.
Background ≤ 2 µg/kg MS (non amendé, avec effluents élevage et biodéchets)



PFAAs (acides perfluoroalkyls) produits dans les sols
≈ 79% [Σ75 PFAS]

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

Belgique

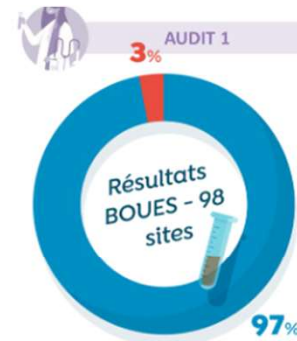
Extrait issu de ‘Matières organiques & agriculture Etudes & mesures mises en place en Wallonie « La filière de l’organique et les PFAS » (Michel Amand 2025)’

Absence de cadre normatif

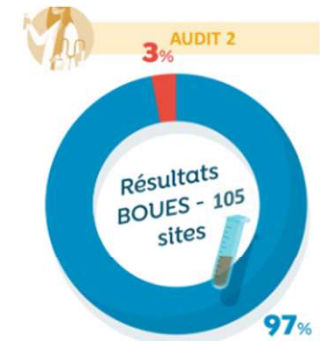
2024-2026 Campagnes suivis PFAS boues et autres PRO (composts, digestats)

Pays	Définition du seuil	Valeur du seuil
Autriche	PFOA + PFOS	100 µg/kg MS
Allemagne	PFOA + PFOS	100 µg/kg MS
Norvège	PFOA + PFOS	40 µg/kg MS
Suède	PFOS	120 µg/kg MS
USA - Michigan	PFOS	125 µg/kg MS
Canada	PFOS	50 µg/kg MS (provisoire)
Danemark	Somme 4 PFAS	10 µg/kg MS
Danemark	Somme 22 PFAS	400 µg/kg MS
Australie	PFOA	25 à 130 µg/kg MS (proposition)
Australie	PFOS+PFHxS	6,2 à 31 µg/kg MS (proposition)

Tableau 1: Seuils d'interdiction de valorisation agricole des boues



Nom	Détections > LOQ	Cmin µg/kg MS	Cmax µg/kg MS	Cmoy µg/kg MS	Cmédiane µg/kg MS
Σ 6 PFAS	100%	1,08	103,55	12,34	9
Σ 22 PFAS	100%	2,78	113,92	16,87	11,94



Nom	Détections > LOQ	Cmin µg/kg MS	Cmax µg/kg MS	Cmoy µg/kg MS	Cmédiane µg/kg MS
Σ 6 PFAS	99,1%	N.Q.	177,5	12,06	8,75
Σ 22 PFAS	100%	0,87	182,62	15,44	10,49

N.Q. = Non-quantifiable, tous les PFAS sont <LOQ

Mesures temporaires d'applications au 1 er janvier 2025 :

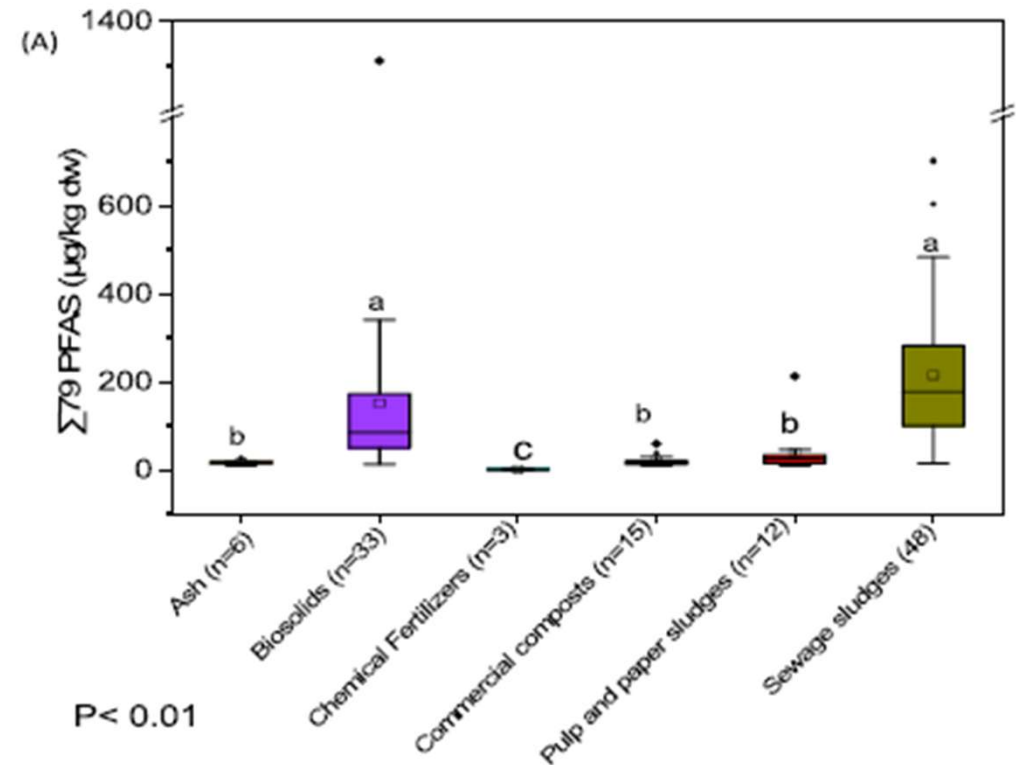
- Limitation des doses d'épandage à 6T MS/ha sur une période de 3 ans
- Application de la valeur cible de 40 µg/kg MS pour la somme de 6 PFAS (PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS, PFDA et PFHxA)
- Application de la valeur cible de 400 µg/kg MS pour la somme des 22 PFAS (PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnS, PFDoS, PFTTrS, PFOSA, 6:2 FTS, PFTBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA et PFTTrDA)

Québec

PFAS profiles in biosolids, composts, and chemical fertilizers intended for agricultural land application in Quebec (Canada)

Saliu et al. 2024

- **PFAS detected in all samples** of composts, manures, sludge or biosolids
- **PFAS concentrations ranged from** 18 to 59 $\mu\text{g}/\text{kg}$ in commercial composts, 9.8 to 213 $\mu\text{g}/\text{kg}$ in pulp and paper sludge **15 to 705 $\mu\text{g}/\text{kg}$ in sewage sludge** 12 to 1310 $\mu\text{g}/\text{kg}$ in biosolids and 14.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ on average in biosolids ash
- **Dominant PFAS classes included** diPAPs (polyfluoroalkyl phosphoric acid diesters), sulfonamides, PFCAs, and PFSAs.



Conclusions et perspectives

Intérêts apport PRO à doses et fréquences agronomiques mixant amendants/fertilisants

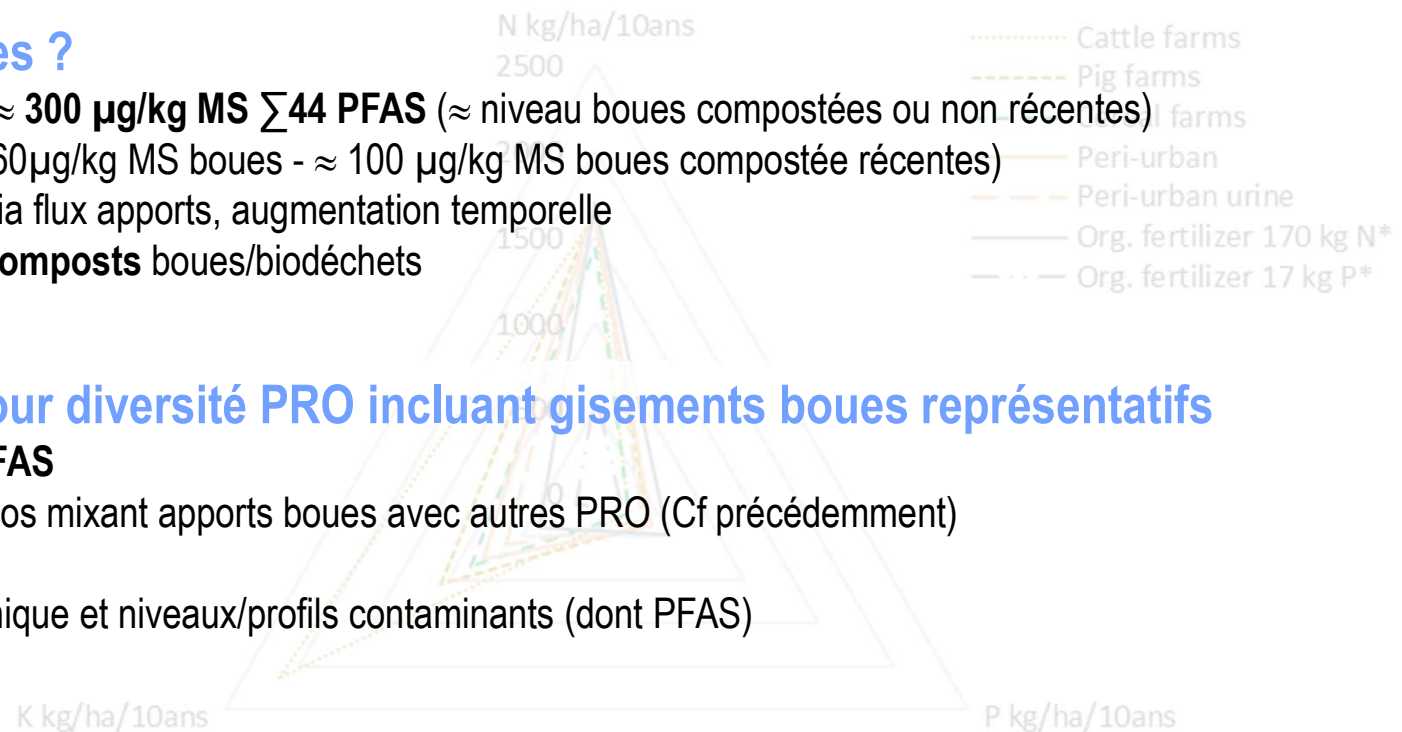
- **Substitution engrais minéraux** via apports plus fréquents et/ou avec forte disponibilité N (ex. urine)
- **Zones sans élevage** (incluant boues / compost boues STEP) flux CNPK \approx zones élevages / engrais organiques NP
- **Apport EOMs avec [métaux] plus élevées** (ex. boues STEP) à **faible fréquence/dose en alternance** avec EOMs à faibles [métaux] (ex. biodéchets) **permet rester sous seuils NFU 44-051/095**
(Michaud et al. 2025c)

Risques liés aux PFAS dans les boues ?

- **Variabilité niveau contamination, moyenne $\approx 300 \mu\text{g/kg MS } \sum 44 \text{ PFAS}$** (\approx niveau boues compostées ou non récentes)
- **Présence précurseur (6:2FTAB) et PFOS** ($\approx 60 \mu\text{g/kg MS boues}$ - $\approx 100 \mu\text{g/kg MS boues}$ compostée récentes)
- **Augmentation concentration / stocks sols** via flux apports, augmentation temporelle
- **Lixiviation supérieure dans sols amendés composts boues/biodéchets**
- **Pas effet sur niveaux dans les végétaux**

Poursuivre acquisition références pour diversité PRO incluant gisements boues représentatifs

- **Evaluer niveaux contaminations et profils PFAS**
- **Estimer flux apports** via boues et via scénarios mixant apports boues avec autres PRO (Cf précédemment)
- **Estimer seuils dans les sols**
- **Classifier “boues”** au regard valeur agronomique et niveaux/profils contaminants (dont PFAS)



Perspectives INRAE

Plusieurs projets démarrent en 2025/2026

pour étudier les niveaux et les dynamiques de contamination en PFAS

- (i) dans divers bassins versants de Bretagne (SAS – AELB/collectivités, Coord. A. Michaud)
- (ii) en cas d'apport agricole de boues et de composts de boues (EcoSys, LAE, SAS – AERM, Coord. P. Benoit)
- (iii) dans divers agroécosystèmes et les transferts aux cultures et aux eaux du sol (EMMAH, SAS, EcoSys, LBE – ANR FLUORAGRO, Coord. E. Michel)



Etudes prospectives INRAE présentées :

Munoz G., Michaud A., Liu M., Montenach M., Resseguier C., Watteau F., Sappin-Didier V., Feder F., Morvan T., Houot S., Vo Duy S., Liu J., Sauvé S., 2022. Target and Nontarget Screening of PFAS in Biosolids, Composts, and Other Organic Waste Products for Land Application in France. *Environmental Science & Technology*; 56: 6056-6068, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03697>

Michaud A.M., Saliu T.D., Munoz G., Feder F., Sappin-Didier V., Watteau F., Houot S., Sauvé S., 2025. In situ occurrence and mobility of per and polyfluoroalkyl substances in soils amended with organic waste products. *Science of the Total Environment* 984, 179708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179708>

Saliu T.D., Michaud A.M., Munoz G., Dinh Q.T., Feder F., Arrouy L., Sappin-Didier V., Watteau F., Houot S., Liu J., Sauvé S., 2025. Influence of organic waste amendments on uptake of per and polyfluoroalkyl substances from soil to crops: Insights from long-term field experiments. *Science of the Total Environment* 996, 180156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180156>



Merci aux collègues et partenaires

...
Merci de votre attention

Auteur : AM

Etudes prospectives risques liés PFAS en contexte recyclage PRO ?

(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



La Réunion (2013-ongoing)

Urban sludge (raw/composted), manures



— Highly instrumented site - - - Site in resilience

Etudes prospectives risques liés PFAS en contexte recyclage PRO ?

(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)

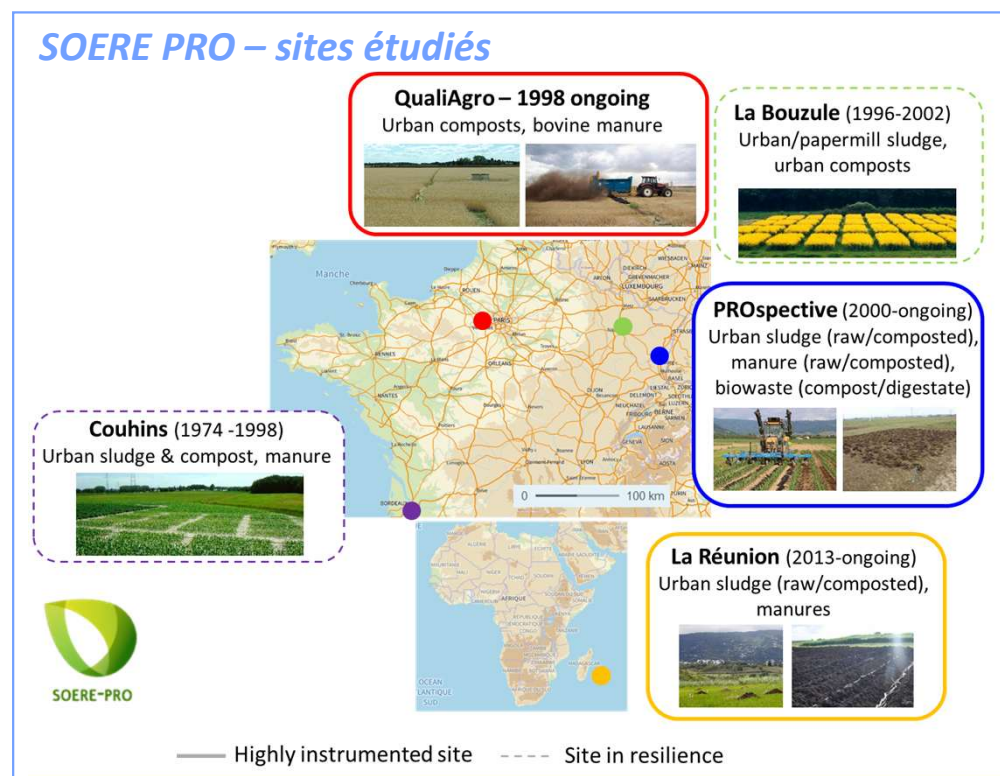
PRO industriels, 1996

Boue de papeterie

Cendres

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

SOERE PRO – sites étudiés

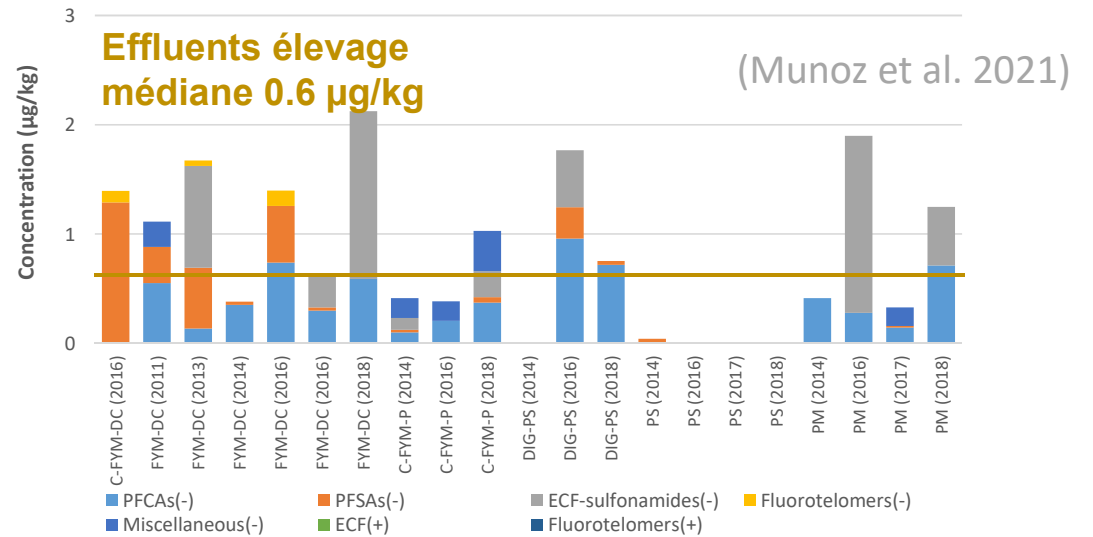
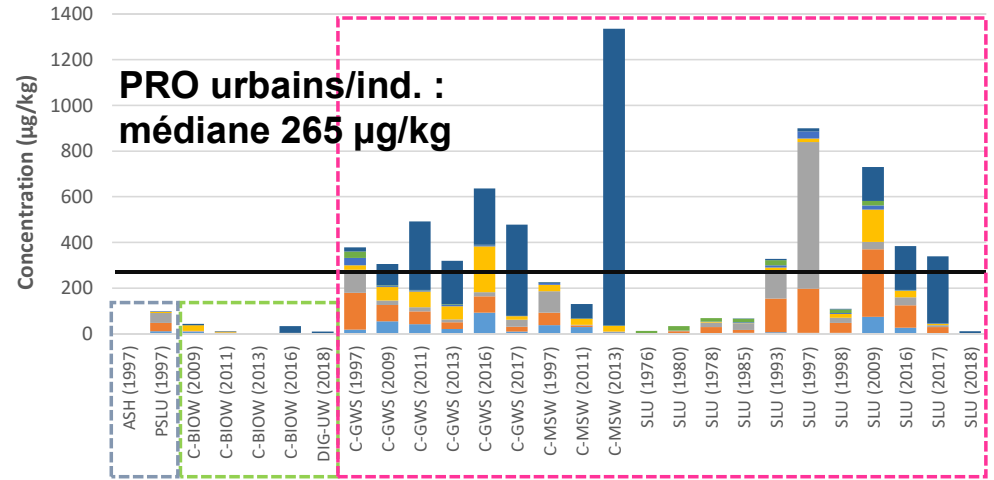


Présence dans les PRO ?

Concentrations ?

47 PRO épanchés de 1976 à 2018

Etude Munoz et al. 2021



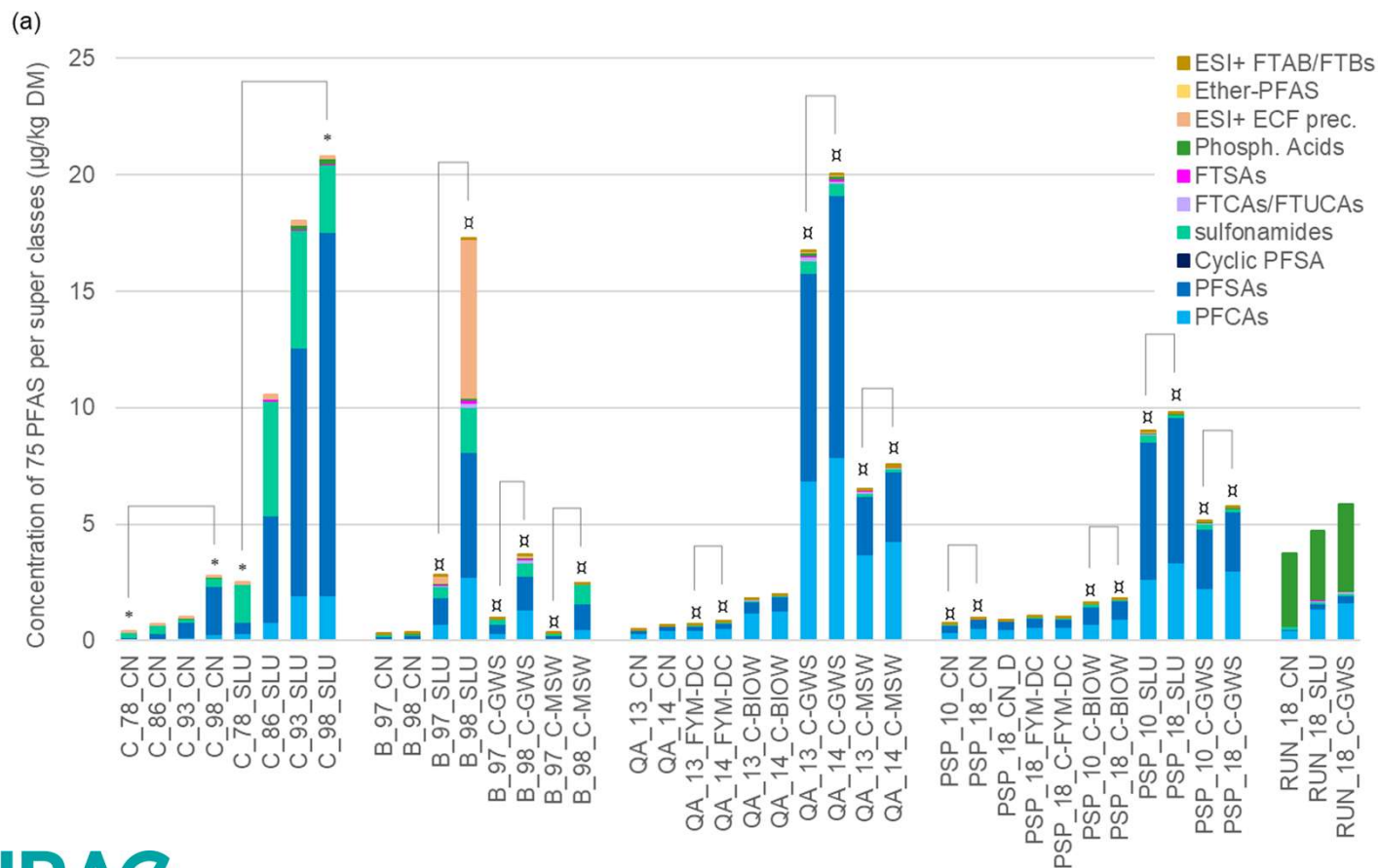
- PFCAs(-)
 - PFSAs(-)
 - ECF-sulfonamides(-)
 - Fluorotelomers(-)
 - Miscellaneous(-)
 - ECF(+)
 - Fluorotelomers(+)
- Boue urbaine (SLU)
 - Fumier de bovins (FYM-DC)
 - Compost boue urbaine et déchets verts (C-GWS)
 - Lisier de porc (PS)
 - Compost biodéchets (C-BIOW)
 - Litière de volailles (PM)
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

Présence dans les sols ?

Occurrence dans les sols ?

Centaine d'échantillons de sols ± amendés ; Prélèvements : 1976-2018

Etude Michaud et al. 2025b



CN = contrôle, fertilisation minérale
 CN_D = contrôle avec digestat biodéchets
 SLU = boue urbaine
 C-MSW = compost ordures ménagères résiduelles
 C-GWS = compost boue urb. Déchets verts
 C-BIOW = compost biodéchets
 FYM-DC = fumier bovins
 C-FYM-DC = compost fumier bovins