



Colloque « Retour au sol des
produits résiduaux organiques »
organisé par l'observatoire de
recherche SOERE PRO

Campus Agro Paris-Saclay
22 juin 2023



Eléments en traces métalliques et apports de Produits Résiduaires Organiques épanchés en grande culture en contexte péri-urbain - Synthèse des résultats de l'observatoire SOERE-PRO –

*Aurélia Michaud (INRAE), Camille Resseguier (INRAE), Denis Montenach (INRAE),
Thierry Morvan (INRAE), Charles Detaille (CIRAD), Frédéric Feder (CIRAD), Sabine Houot (INRAE)*

Eléments en traces métalliques ?

Oligo-éléments pour les plantes

Pouvant devenir (phyto)toxiques

Non essentiels au métabolisme végétal, mais potentiellement « bénéfiques », notamment pour les animaux comme pour Co, Ni et Se

« Contaminants stricts » toxiques ou potentiellement toxiques

Exemples : As, Cr, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, B, Mo, Sb

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Masse atomique → 55.845 26 ← Numéro atomique (nombre de protons dans le noyau)

Symbole chimique → Fe

Nom → fer

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18												
1 H hydrogène	2 He hélium	3 Li lithium	4 Be béryllium	5 B bore	6 C carbone	7 N azote	8 O oxygène	9 F fluor	10 Ne néon	11 Na sodium	12 Mg magnésium	13 Al aluminium	14 Si silicium	15 P phosphore	16 S soufre	17 Cl chlore	18 Ar argon												
19 K potassium	20 Ca calcium	21 Sc scandium	22 Ti titane	23 V vanadium	24 Cr chrome	25 Mn manganèse	26 Fe fer	27 Co cobalt	28 Ni nickel	29 Cu cuivre	30 Zn zinc	31 Ga gallium	32 Ge germanium	33 As arsenic	34 Se sélénium	35 Br brome	36 Kr krypton												
37 Rb rubidium	38 Sr strontium	39 Y yttrium	40 Zr zirconium	41 Nb niobium	42 Mo molybdène	43 Tc technétium	44 Ru ruthénium	45 Rh rhodium	46 Pd palladium	47 Ag argent	48 Cd cadmium	49 In indium	50 Sn étain	51 Sb antimoine	52 Te tellure	53 I iode	54 Xe xénon												
55 Cs césium	56 Ba barium	57-71 lanthanides	72 Hf hafnium	73 Ta tantalum	74 W tungstène	75 Re rhenium	76 Os osmium	77 Ir iridium	78 Pt platine	79 Au or	80 Hg mercure	81 Tl thallium	82 Pb plomb	83 Bi bismuth	84 Po polonium	85 At astate	86 Rn radon												
87 Fr francium	88 Ra radium	89-103 actinides	104 Rf rutherfordium	105 Db dubnium	106 Sg seaborgium	107 Bh bohrium	108 Hs hassium	109 Mt meitnérium	110 Ds darmstadtium	111 Rg roentgenium	112 Cn copernicium	113 Uut ununtrium	114 Fl flérovium	115 Uup ununpentium	116 Lv livermorium	117 Uus ununseptium	118 Uuo ununoctium												
119 La lanthane	120 Ce cérium	121 Pr praseodyme	122 Nd néodyme	123 Pm prométhéum	124 Sm samarium	125 Eu europium	126 Gd gadolinium	127 Tb terbium	128 Dy dysprosium	129 Ho holmium	130 Er erbium	131 Tm thulium	132 Yb ytterbium	133 Lu lutécium	134 Ac actinium	135 Th thorium	136 Pa protactinium	137 U uranium	138 Np néptunium	139 Pu plutonium	140 Am américium	141 Cm curium	142 Bk berkélium	143 Cf californium	144 Es einsteinium	145 Fm fermium	146 Md mendelevium	147 No nobélium	148 Lr lawrencium

métaux alcalins
 alcalino-terreux
 métaux pauvres
 métaux de transition
 métalloïdes
 non-métaux
 halogènes
 gaz rares

Sources : IUPAC, Wikimedia Commons

Marschner 1995

Johnston 2004

Kirkby & Romheld 2004

Eléments en traces métalliques ?

Phytotoxicité, rhizotoxicité (ex. Cu, Zn)

→ Risque d'altération de la fonction de production agricole des sols

Transfert vers les parties récoltées

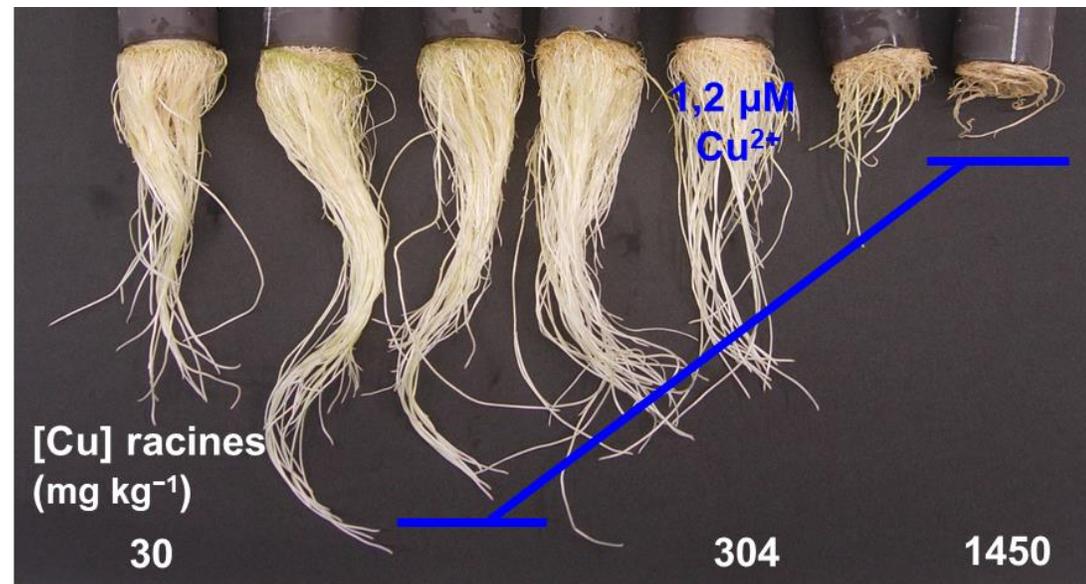
→ Risque de contamination de la chaîne alimentaire (ex. Cd)

Transfert vers les eaux souterraines (ex. Zn, Cd)

→ Risque de contamination des eaux

Impact sur (micro)organismes du sol (ex. Cu, Zn...)

→ Modification diversité/nombre ; altération activités biologiques (ex. nitrif., dég. MO)



McGrath et al. 1995
Sheldon et Menzies 2005
Kopittke et Menzies 2006
Michaud et al. 2006/2007
Cambier et al. 2014
Charlton et al. 2016

Observatoire de recherche SOERE PRO

Dispositifs expérimentaux au champ

PRO urbains/agricoles, ≠ procédés
Péri-urbain
Pratiques proches agriculteurs

Monitoring commun complet

PRO, sol, plantes, eau

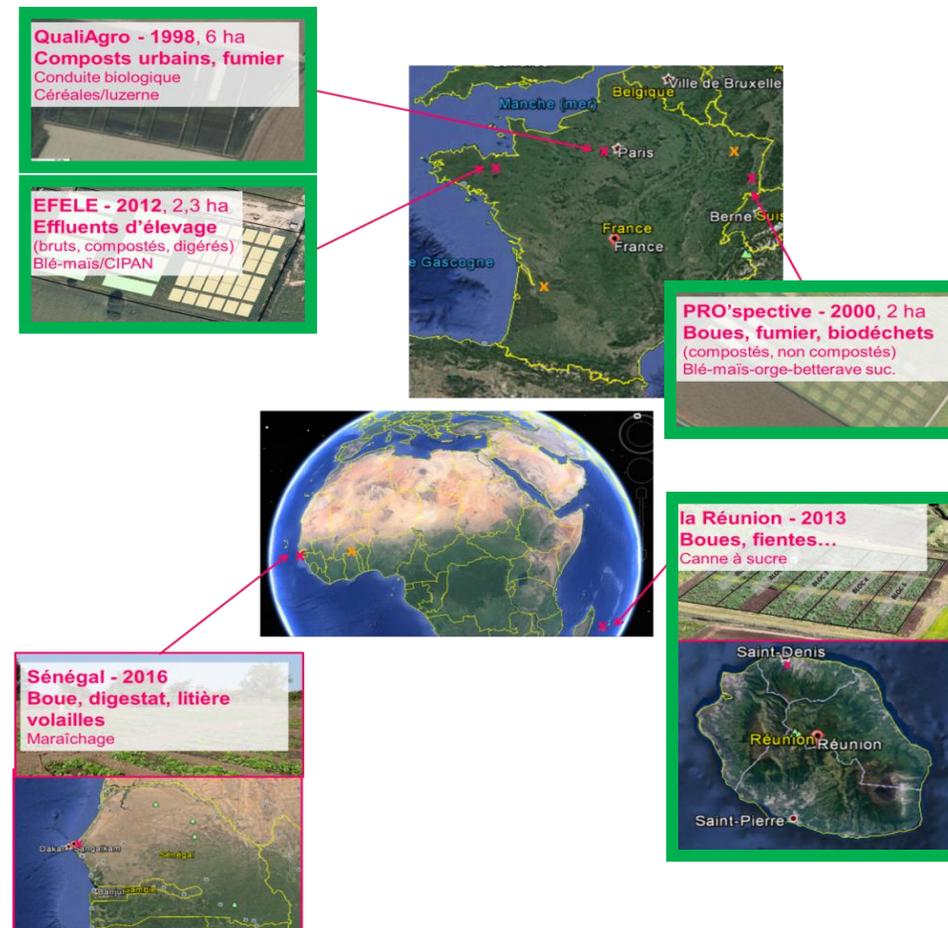
Propriétés physico-chimiques
Contaminants
Variables biologiques

Emissions N₂O, CO₂

Eau percolation

Données climatiques

Fonctionnement hydrodynamique



→ Synthèse « ETM » des 4 sites principaux QualiAgro, EFELE, PRO'spective, La Réunion
→ Focus « évaluation prospective » sur le plus ancien site (> 15 ans apports, QualiAgro)

SOERE PRO – contexte et produits étudiés

Site	Début	Climat	Sol (initial)	Cultures	Produits étudiés
QualiAgro (jusqu'à 1,5-2 x dose agri)	1998	Océanique dégradé	pH _{eau} 7,0 MO 1,8 % Limons 78%	> 2013 : maïs, blé, escourgeon, seigle, orge	3 composts : boue urb. + déchets verts, biodéchets, ordures ménagères résiduelles 1 effluent élevage : fumier bovins
PROspective (essai « agri »)	2000	Semi- continental	pH _{eau} 8,3 MO 2,4 % Limons 69%	Maïs, blé, betterave, orge	3 produits bruts : boue urbaine, fumier de bovins, digestat biodéchets 3 composts : boue urb. + déchets verts, biodéchets, fumier bovins
EFELE (essai « agri »)	2012	Océanique	pH _{eau} 6,1 MO 2,0% Limons 69 %	Maïs ensilage, blé	3 effluents élevage bruts : fumier bovins, fientes volailles, lisier de porc 2 effluents traités : compost porcs et digestat lisier porc
La Réunion (essai « agri »)	2013	tropical	pH _{eau} 6,1 MO 2,5 % Argiles 70%	Canne à sucre	1 boue urbaine : brute, compostée 2 effluents élevage : lisier de porc et litière de volailles

Sur chaque site, en plus des produits étudiés, un **témoin avec fertilisant** :
minéral pour EFELE et La Réunion
minéral (< 2015) ou organique (> 2015) pour QualiAgro et PROspective

Concentrations en ETM des produits ?

	Al	As	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn	Se	Ag
	mg.kg matière sèche														
Urbain	20,7	6,0	0,8	57	12	160	19	0,5	346	3,9	29	56	432	0,8	3,1
Agricole	4,5	1,8	0,5	16	6	132	3	0,1	484	2,6	9	8	609	0,5	0,0
NFU 44-051/095			3	120		300		2			60	180	600		
EU socle com. (classe A1)			2	120		300		1			50	120	800		

PRO urbains avec les plus fortes concentrations, notamment de Cd, Hg, Pb et As présentant la majorité des attentions internationales (Lopez-Rayó et al. 2016, Hamid et al. 2020...)

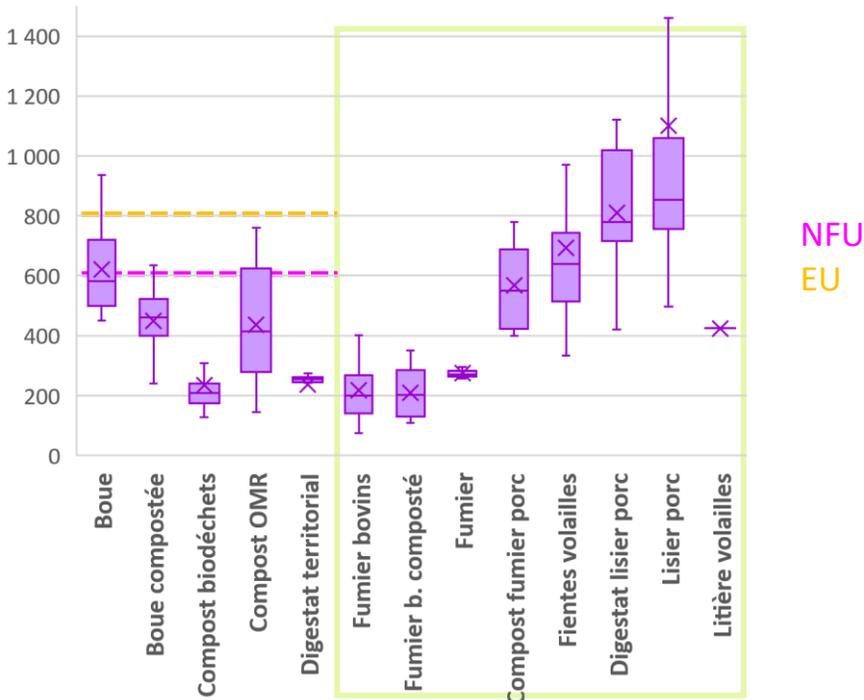
Effluents élevages avec les plus faibles concentrations, exceptés pour Mn et Zn

- Respect des normes NFU 44-095 (composts boues) et NFU 44-051 (autres composts)
- Respect classe 1 (engrais, amendements) du projet socle commun EU 2021 (Michaud et al. 2021)

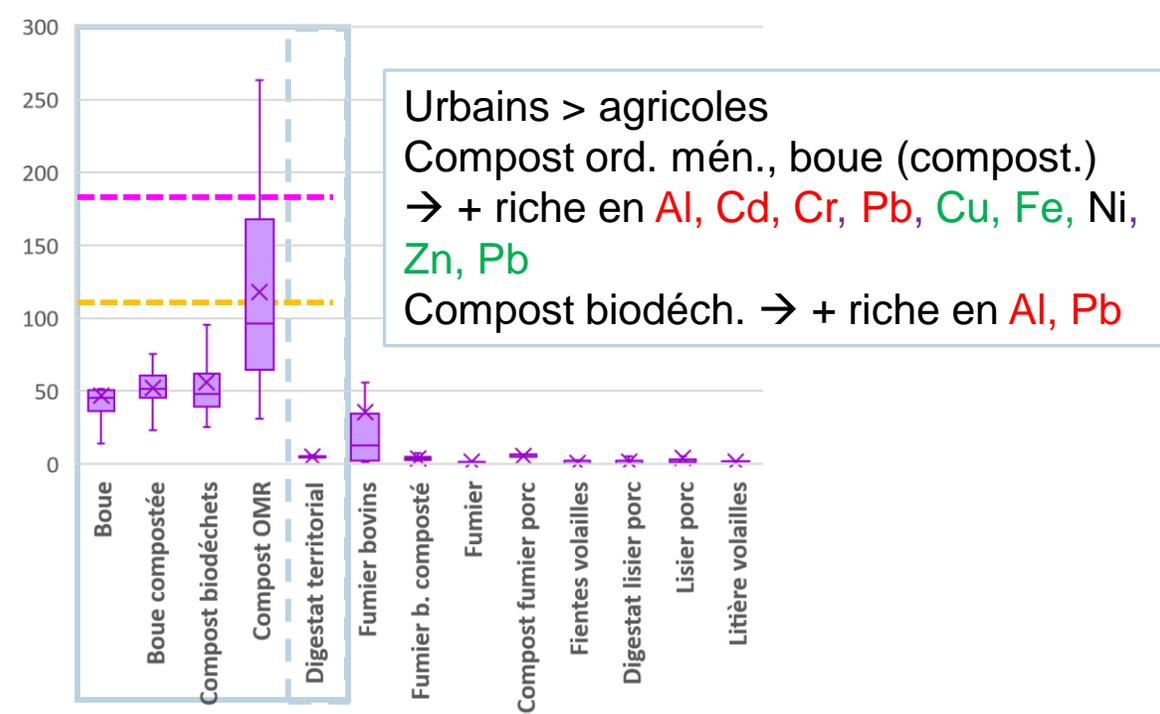
Concentrations en ETM des produits ?

Cas de Zn et Pb

Zinc (mg.kg⁻¹ matière sèche)



Plomb (mg.kg⁻¹ matière sèche)



Urbains > agricoles
 Compost ord. mén., boue (compost.)
 → + riche en Al, Cd, Cr, Pb, Cu, Fe, Ni, Zn, Pb
 Compost biodéch. → + riche en Al, Pb

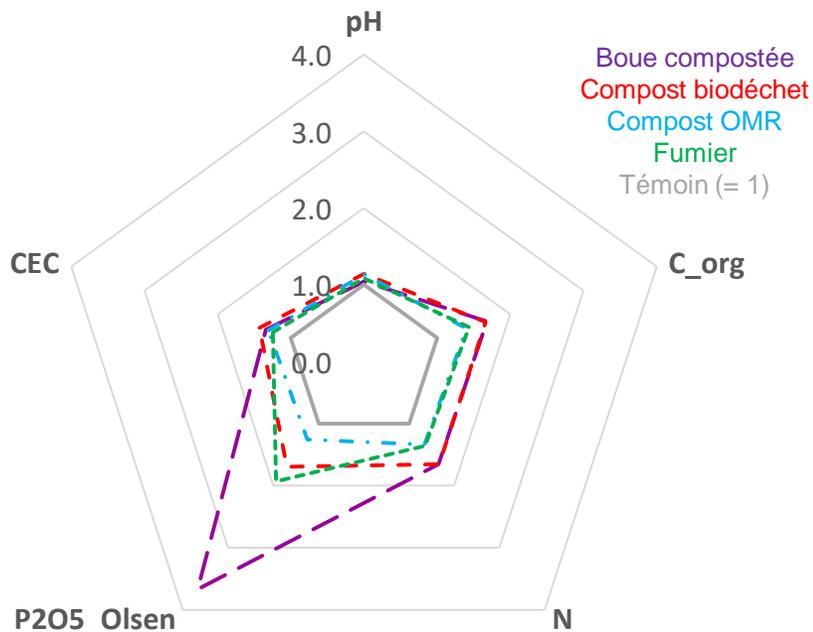
Effluents élevage, surtout lisier porc (digéré), fientes et compost fumier porc
 → + riche Zn, tout comme pour Cu et Mn

Digestat territorial « biodéchets »
 → + faible des urbains, comme l'exemple Pb

→ Origine matières premières influence les concentrations en ETM des produits épandus sur les sols agricoles

Propriétés des sols soumis à apports de PRO ?

QualiAgro, 20 ans d'apports (compost, fumier bovins)



	Témoin (= 1)	PRO (maximum)
pH	6,7	7,7 (compost biodéchets / OMR)
C org. (g/kg MS)	10,0	16,8 (compost boue)
N tot. (g/kg MS)	1,0	1,7 (compost biodéchets / boue)
P Olsen (g/kg MS)	0,06	0,2 (compost boue)
CEC (cmol+/kg MS)	8,2	11,8 (compost biodéchets)

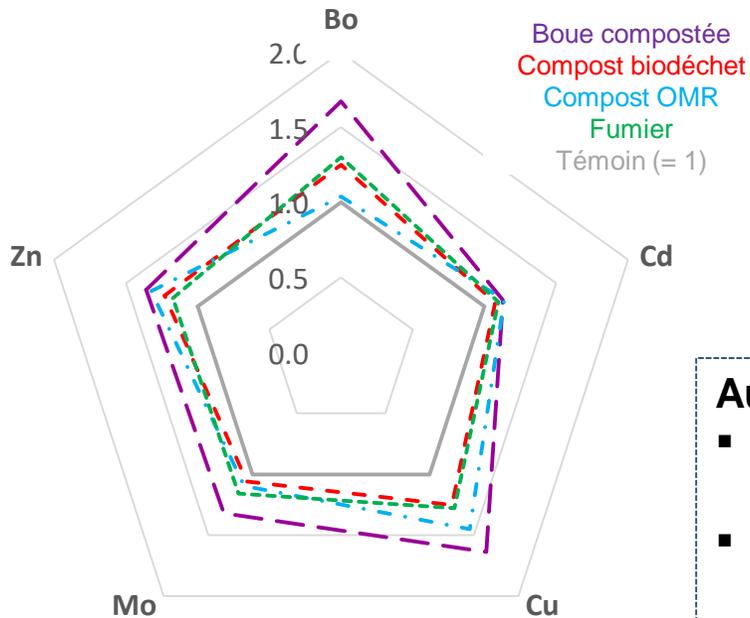
Augmentation significative dans les sols avec PRO pour :

- QualiAgro – 20 ans – CEC, pH, C organique, N total, P Olsen ; surtout composts boue et biodéchets
- PROspective – 18 ans – CEC, C organique, N total, P Olsen ; pour boue compostée et compost biodéchets
- EFELE – 9 ans – pH ; pour fientes volailles
- RUN – 5 ans – N total, P Olsen ; pour boue compostée

→ Apports PRO modifient les propriétés du sol, contrôlant notamment les processus pouvant moduler la mobilité et in fine la (bio)disponibilité des ETM pour les organismes (ISO 2008, Gupta et al. 2019, Michaud et al. 2021)

Concentrations en ETM totaux des sols ?

QualiAgro, 20 ans d'apports (compost, fumier bovins)



g/kg MS	Témoin (=1)	PRO (maximum)
B	0,25	0,45 (compost boue)
Cd	0,21	0,24 (compost ordures mén.)
Cu	12,2	20,0 (compost boue)
Mo	0,46	0,60 (compost boue)
Zn	50,1	68,1 (compost boue)

Augmentation significative dans les sols avec PRO pour :

- QualiAgro – 20 ans – pour **B**, **Cd**, **Cu**, **Mo**, **Zn** pour composts boue et ordures ménagères (pas As, Cr, Hg, Ni, Pb, Tl)
- PROspective – 18 ans – pour **Ag** pour boue (compostée) (pas B, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Tl, Zn, As)
- EFELE – 9 ans – aucun
- RUN – 5 ans – pour **Hg** pour compost de boue (pas Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)

→ Pas d'augmentation significative jusqu'à 18 ans d'apports à doses usuelles (hormis pour (compost) boue pour Hg et Ag)

→ En métropole, valeurs inférieures ou dans la gamme des concentrations mesurées en sols agricoles, même avec 20 ans à 1,5 doses d'apports PRO usuelles (Saby et al. 2019 ; Michaud et al. 2020/21)

Concentrations en ETM “disponibles” des sols ?

Produits	Cd CaCl ₂	Cu CaCl ₂	Ni CaCl ₂	Zn CaCl ₂
	µg/kg matière sèche			
Compost boue / DV	2,1 ± 0,2	54 ± 5	< LQ	97 ± 7
Compost biodéchets	< LQ	39 ± 6	< LQ	<u>11 ± 7</u>
Compost ordures mén.	1,6 ± 0,3	61 ± 3	< LQ	23 ± 16
Fumier bovins	2,7 ± 0,3	40 ± 5	< LQ	44 ± 11
Témoin	8,4 ± 1,5	<u>25 ± 4</u>	28 ± 7	97 ± 43
Témoin zéro	18,9 ± 6,0	78 ± 15	165 ± 27	874 ± 176
Compost fumier porc	<u>10,9 ± 1,7</u>	84 ± 11	92 ± 2	<u>561 ± 48</u>
Digestat lisier porc	17,9 ± 2,3	75 ± 3	133 ± 16	874 ± 171
Fumier bovins	13,0 ± 2,0	74 ± 5	88 ± 14	580 ± 116
Fientes volailles	<u>8,4 ± 1,4</u>	73 ± 10	<u>56 ± 10</u>	<u>290 ± 120</u>
Lisier porc	15,1 ± 2,8	76 ± 5	136 ± 23	785 ± 96
Témoin N minéral	25,2 ± 5,8	92 ± 11	209 ± 25	1179 ± 90

PROspective (pH 8) → ETM extraits par CaCl₂, *in fine* « disponibles » < limites de dosages (sauf Cu)

QualiAgro et EFELE (pH 7 et 6) **différences significatives entre sols avec/sans PRO :**

- Cd-CaCl₂ témoin > **compost biodéchet**, **compost ordures ménagères**, **fientes volailles**, **compost fumier porc**
- Zn-CaCl₂ témoin > **compost biodéchet**, **fientes volailles**, **compost fumier porc**
- Ni-CaCl₂ témoin > **fientes volailles**, **composts urbains**

→ Cd, Zn, Ni « disponibles » *inférieures en sols amendés avec PRO ayant augmenté pH (C org.) (Cambier et al. 2019)*

Rendements des plantes cultivées ?

	Espèce	Partie exportée	Rendement 15% humidité (q/ha)
QualiAgro	Blé	Grain	58
PROspective	Blé	Grain	71
EFELE	Blé	Grain	82
QualiAgro	Maïs	Grain	37
PROspective	Maïs	Grain	78
La Réunion	Canne	Tiges	950
Agreste (2010-2019)	Blé	Grain	71
	Maïs	Grain	90
	Canne	Tiges	680

Pas de différence significative de rendements entre traitements (sur 2017-2019)

Par rapport à rendements nationaux en conventionnel : QualiAgro inférieurs (conduite AB)
PROspective et EFELE équivalents
RUN supérieurs

→ *Maintien des rendements avec PRO par rapport à fertilisant commercial minéral et organique*

→ *Substitution possible des engrais minéraux par des apports de PRO (Montenach et Schaub, et al. 2020)*

Concentrations en ETM des plantes cultivées ?

Année	Espèce	Partie exportée	Cd	Cu	Fe	Mo	Ni	Pb	Zn
			mg/kg matière sèche						
QualiA.	Blé	Grain	0,0	3,3	27,9	2,7*	0,3	0,1	27,6
PROsp.	Blé	Grain		2,9	38,7				28,6
EFELE	Blé	Grain		3,8	27,6*				31,4
QualiA.	Maïs	Grain	< LQ	0,7*	19,1	0,2*	0,3	< LQ	26,3
PROsp.	Maïs	Grain		1,5	16,9				19,7
EFELE	Maïs	Ensilage		2,6	60,5				26,5*
RUN	Canne	Tiges	< QL – 0,01	1,8	53,7	0,1	0,4	< LQ	17,8
Feix Tremmel 2005	Blé Maïs	Grain	0.03	4.5	17,5		0.30	0.50	25.0
Kabata-Pendias 2012									
Codex Al. 2015	Céréales	Grain	0,1					0.20	

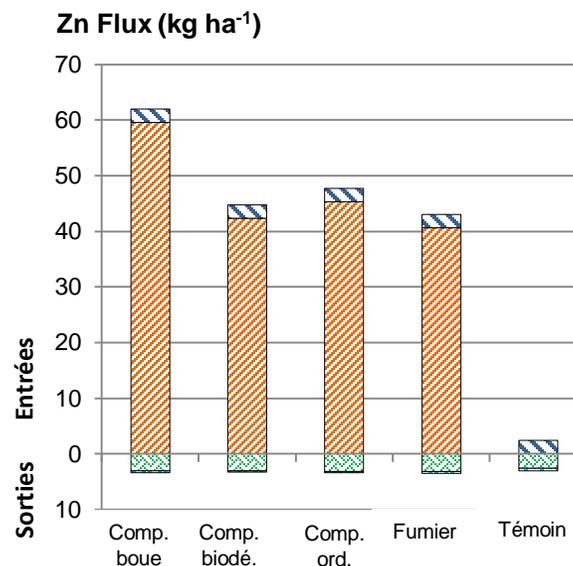
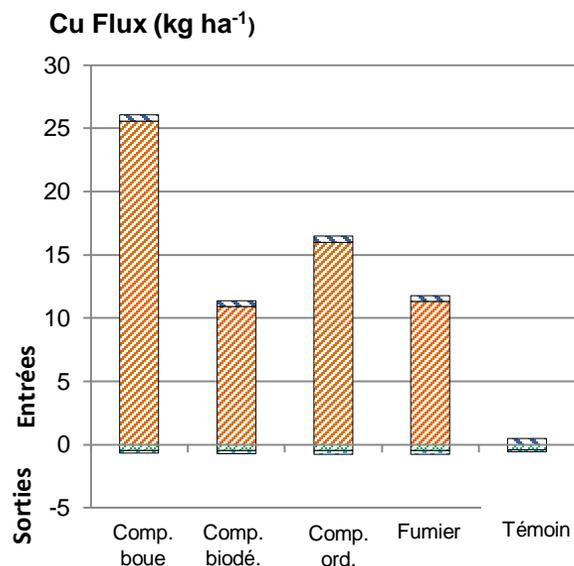
Cd, Hg, Pb et As, teneurs inférieures aux limites de dosage et *a minima* aux valeurs réglementaires/usuelles
Cu, Fe et Zn considérés oligo-éléments des plantes, dans la gammes des valeurs usuelles
 (* différences significatives entre traitements ponctuelles à confirmer dans la durée, Michaud et al. 2020/2021)

Apports de PRO

- Pas de contamination des grains pour Cd, Hg, Pb et As présentant la majorité des attentions internationales
- Maintien global des teneurs en oligo-éléments

Focus QualiAgro – évaluation prospective

Bilan parcelle, entrées – sorties ?



- Entrées atmosph. 1998-2015 (kg ha⁻¹) (estimation biblio.)
- Apports PRO 1998-2015 (kg ha⁻¹) (valeurs calculées)
- Exportations plantes 1998-2015 (kg ha⁻¹) (valeurs calc.)
- Drainage 1998-2015 (kg ha⁻¹) (valeurs estimées exp.)

Exportations des plantes et lixiviation eau << Flux apports par les PRO, tous traitements :
≤ 1 % (Cr, Ni, Pb), ≤ 2 % (Cd, Cu, Hg) et ≤ 5 % (Zn)

Cu, Ni, Zn : cohérence globale balance entrées-sorties et augmentation de stock du sol
→ Flux PRO ≈ augmentation stock (Michaud et al. 2020)

Focus QualiAgro – évaluation prospective

Seuils sans risque vis-à-vis de la microbiologie du sol

	Concentration sol après 17 ans apports	Concentration estimée sans risque
	mg kg ⁻¹ matière sèche	
Cd	0,20 (témoin) - 0,25 (composts boues et biod.)	2,7
Cu	12 (témoin) - 20 (compost boues)	64 (témoin) - 78 (compost boues)
Ni	15,3 (témoin) – 15,9 (compost biodéchets)	41 (témoin) - 59 (compost biodéchets)
Pb	21 (témoin) - 28 (compost ordures mén.)	182 (témoin) - 273 (compost biodéchets)
Zn	49 (témoin) - 68 (compost boues)	117 (témoin) - 166 (compost biodéchets)

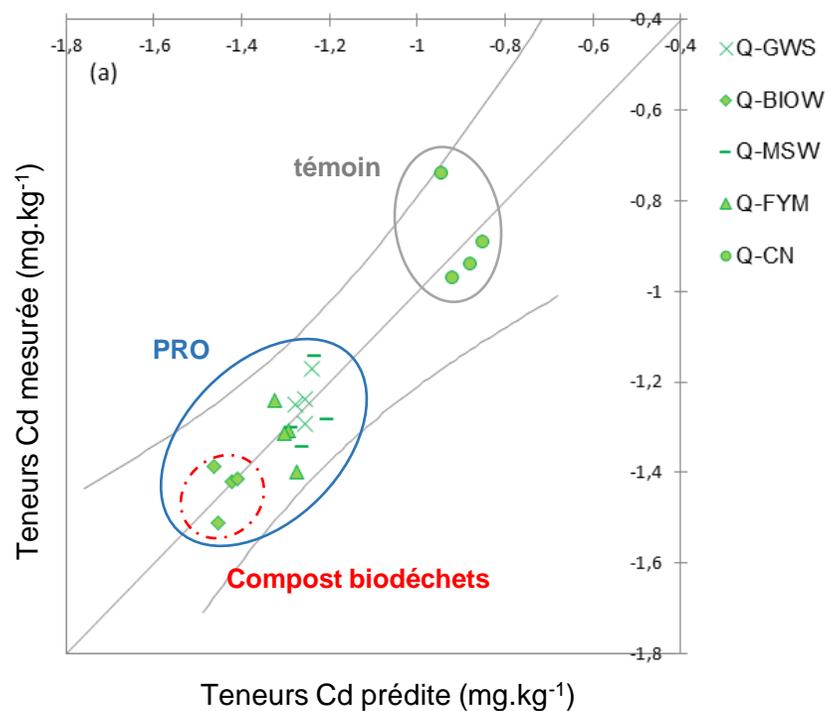
(Indicateur de valeur seuil sans risque des sols, <5% de population microbienne affectée ; Oorts et al. 2018)

Concentration mesurée après 17 ans d'apports inférieure à seuil sans risque

- *Apports répétés à long-terme à doses appropriées ne devraient pas atteindre des teneurs "critiques"*
- *Toutefois pour Zn présentant une écotoxicité (Yoshida et al. 2018) limiter les flux Zn apportés dans les réglementations (ex. 20 kg.ha⁻¹.10 ans au lieu de 30 kg.ha⁻¹.10 ans) devrait permettre de rester en dessous d'un seuil évalué sans risque (Michaud et al. 2020)*

Focus QualiAgro – évaluation prospective

Phytodisponibilité Cd (prélèvement par les plantes) ?



Phytodisponibilité Cd prédite
diminue avec l'augmentation du C organique et du pH sol
→ Apports de PRO a diminué le risque de transfert de Cd aux stades jeunes de la culture, en particulier pour le compost de biodéchets qui a effet amendant pH et organique (Michaud et al. 2021)

$$\text{Log}_{10}(\text{Cd-plant}) = 2,224 - 0.195 \text{ pH}^{**} - 1.804 \text{ log}_{10}(\text{Org. C})^{***}$$

p Value < 0.0001

Conclusion

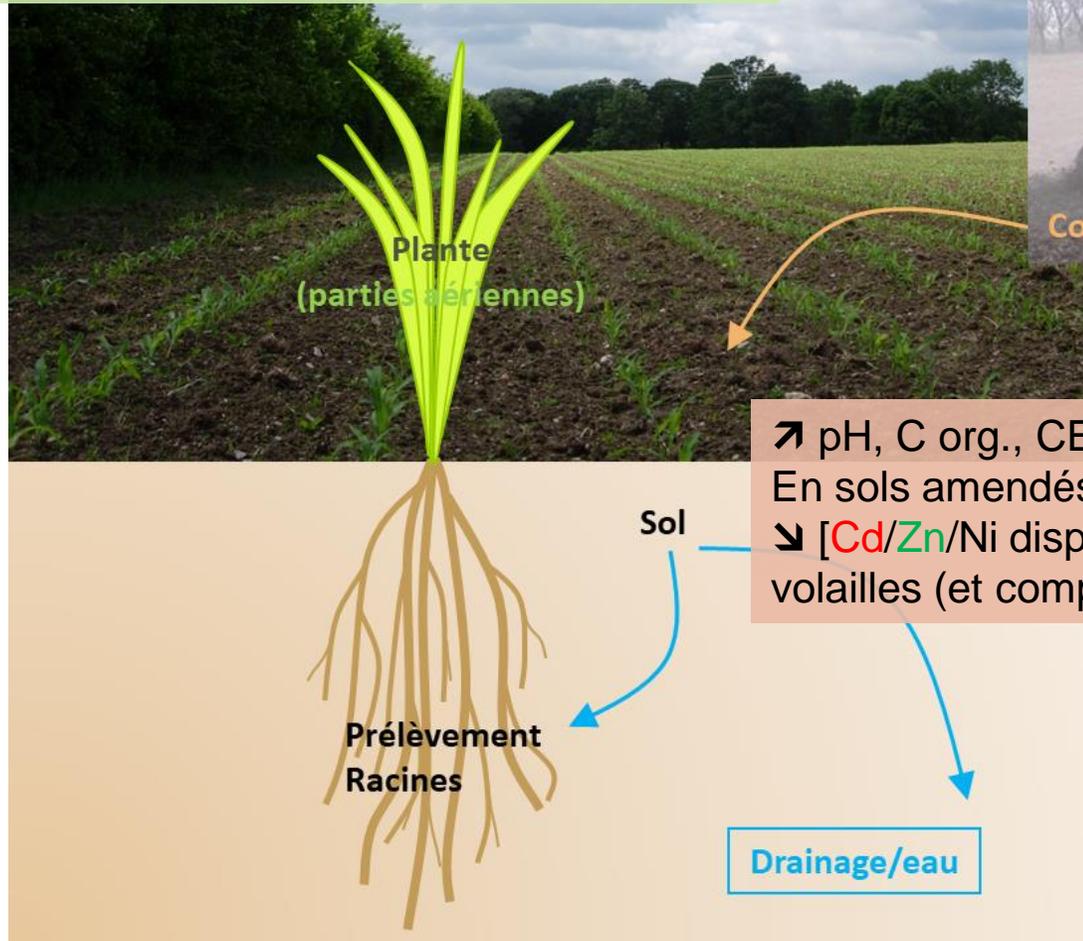
Parties exportées/consommées

Maintien des rendements

Pas de contamination pour **Cd/Hg/Pb/As**

Maintient [**oligo-éléments**, ex. **Cu, Fe, Zn**]

[ETM] PRO urbains > [ETM] PRO agricoles (sauf Mn et Zn)
Respect normes

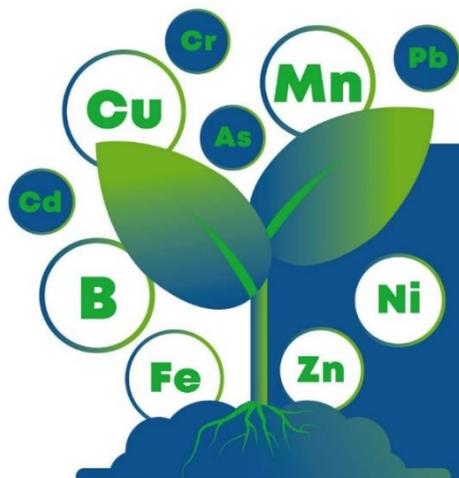


↗ pH, C org., CEC contrôlant processus modulant (bio)disponibilité ETM
En sols amendés avec compost boue, ↗ [B, Cu, Mo, Zn; Ag, Hg]
↘ [Cd/Zn/Ni disponible] en sols amendés avec compost biodéchets, fientes volailles (et compost fumier porc) → lien ↗ pH sols amendés

Diffusion auprès d'acteurs du monde agricole

Résultats présentés en 2022

- Webinaire COMIFER « Oligo-éléments et contaminants métalliques en agriculture »
- Article « Évaluer l'effet des PRO sur les teneurs en éléments traces métalliques », La France Agricole 3962 - 24 juin 2022



www.comifer.asso.fr

12 AVRIL 2022
WEBINAIRE

comifer

Oligo-éléments et contaminants métalliques en agriculture :
quelles réponses face aux enjeux agronomiques, sanitaires, environnementaux ?

TECHNIQUE CULTURES

Évaluer l'effet des PRO sur les teneurs en éléments traces métalliques

L'Inrae et ses partenaires mènent des essais de longue durée en grandes cultures pour évaluer les effets du recyclage agricole des produits résiduaux organiques.

De plus en plus, la valorisation des produits résiduaux organiques (PRO) est encouragée. En effet, ils peuvent constituer un levier pour réduire l'empreinte carbone, accompagner l'augmentation de l'autonomie énergétique pour la méthanisation (produisant également des digestats) et améliorer les propriétés agronomiques des sols. Piloté par l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) en collaboration avec plusieurs partenaires (notamment Cirad, AgroParisTech, Institut Agro, Veolia, SMRA68, CRA Grand-Est, Arvalis), l'observatoire SOERE-PRO vise à étudier l'effet des apports de PRO en grandes cultures, en particulier dans des contextes périurbains, et notamment vis-à-vis des éléments traces métalliques (ETM).

Neuf sites expérimentaux au champ ont été mis en place, dont trois majeurs en France métropolitaine. Depuis 1998, QualiAgro, en Ile-de-France, évalue l'effet d'apports de trois composts urbains et d'un effluent d'élevage ; depuis 2000, PRO'spective, en région Grand-Est, évalue l'effet d'apports de PRO urbains et agricoles compostés ou non ; depuis 2012, EFELE, en Bretagne, évalue l'effet d'apports de divers effluents d'élevage bruts ou traités. Sur chaque site, un témoin en fertilisation minérale ou organique est présent.

RENDEMENT ÉQUIVALENT

Sur l'ensemble des sites, les analyses montrent que les produits urbains ont globalement les teneurs en éléments traces métalliques les plus importantes. Il est à noter que parmi les PRO urbains,



les produits à base de biodéchets (composts, digestats) présentent les teneurs en ETM les plus faibles et elles sont équivalentes à celles des effluents d'élevage.

A SAVOIR

Les éléments traces métalliques peuvent être considérés en tant qu'oligo-éléments comme le cuivre ou le fer, non essentiels pour les plantes comme le nickel et le sélénium, ou toxiques comme le cadmium et le plomb.

En termes de rendements, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes modalités sur la période 2017-2019. « Ils sont équivalents aux rendements nationaux Agreste (service de la statistique du ministère de l'Agriculture) de référence en conventionnel,

à l'exception du site QualiAgro, conduit sans engrais de synthèse ni traitement phytosanitaire », précise l'ingénieure. De plus, ces apports répétés de PRO n'entraînent pas de contamination des

produits à base de biodéchets (composts, digestats) présentent les teneurs en ETM les plus faibles et elles sont équivalentes à celles des effluents d'élevage.

« Dans notre observatoire, les effluents d'élevage montrent les plus faibles teneurs en ETM, sauf pour le manganèse et le zinc », complète Aurélie Michaud, ingénieure à l'Inrae. Néanmoins, tous les produits épandus respectent les normes en vigueur et le projet de socle commun prévu à l'échelle nationale comme cadre réglementaire pour toutes les matières fertilisantes.

« Limiter le flux d'apport de zinc permettrait de rester sous ce seuil estimé sans risque », indique Aurélie Michaud.

IMPACT SUR LA MICROBIOLOGIE DU SOL

L'observatoire a aussi étudié les risques que pouvaient avoir les apports répétés de PRO sur la microbiologie du sol. Les teneurs en ETM mesurées après dix-sept ans d'apports ont été comparées à des valeurs seuils estimées sans risque, issues de la littérature scientifique. Quel que soit l'ETM et la modalité considérée, toutes les valeurs sont apparues inférieures à ces seuils, donc sans risques. Les simulations à cent ans donnent les mêmes résultats. Il faut toutefois être vigilant pour limiter les flux apportés en zinc, élément pouvant présenter une écotoxicité. « Limiter le flux d'apport de zinc permettrait de rester sous ce seuil estimé sans risque », indique Aurélie Michaud.



...Merci... à Denis

Références SOERE PRO :

Cambier et al. 2014, STOTEN

Cambier et al. 2019, STOTEN

Michaud et al. 2020, ESPR

Michaud et al., 2021, Agronomy

Montenach et Schaub, et al. 2020, Journée PROspective

Merci de votre attention