

12 AVRIL 2022
WEBINAIRE

comifer 

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

www.comifer.asso.fr

III – Enjeux sanitaires et environnementaux

Animateur :
*Lionel Jordan-Meille - Enseignant
chercheur - Bordeaux Sciences Agro - UMR
ISPA*

Animateur Chat :
*Jean-Yves Cornu - Chargé de recherche -
INRAe*



- **Cas d'étude sur les enjeux sanitaires impliquant le Cd dans le blé dur**
Christophe Nguyen - Chercheur - INRAe
- **Eléments en traces métalliques et apports de Produits Résiduaire Organiques épandus en grande culture en contexte péri-urbain - Synthèse des résultats de l'observatoire SOERE-PRO -**
Aurélia Michaud - Ingénieur- INRAe
- **Cas d'étude sur les enjeux environnementaux liant Cu et viticulture**
Laurence Denaix - Chercheur - INRAe UMR ISPA (Interactions Sol Plante Atmosphère)
- **Contextes d'outre-mer tropicaux : des particularités ?**
Matthieu Bravin - Chercheur - Cirad

III – Enjeux sanitaires et environnementaux

- **Eléments en traces métalliques et apports de Produits Résiduaire Organiques épandus en grande culture en contexte péri-urbain - Synthèse des résultats de l'observatoire SOERE-PRO -**

Aurélia Michaud – Ingénieur - INRAE



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

Contexte encourageant le recyclage des produits résiduels organiques

Feuille de route pour l'économie circulaire en France 2019

Loi Egalim 2018

Green Deal vers neutralité carbone et diminution des engrais minéraux 2021

- 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
- **Apports de produits résiduels organiques (PRO) considérés comme un des leviers**

#EGalim : 1 an après sa promulgation, le bilan de la loi Agriculture et Alimentation

28/10/2019 EGALIM | PNA | TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE | RESTAURATION COLLECTIVE



Observatoire de recherche en environnement 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 N_2O , CO_2

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 (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-continentale	pH _{eau} 8,3 MO 2,4 % Limons 69%	Maïs, blé, betterave, orge	2 produits bruts : boue urbaine, fumier de bovins 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...)

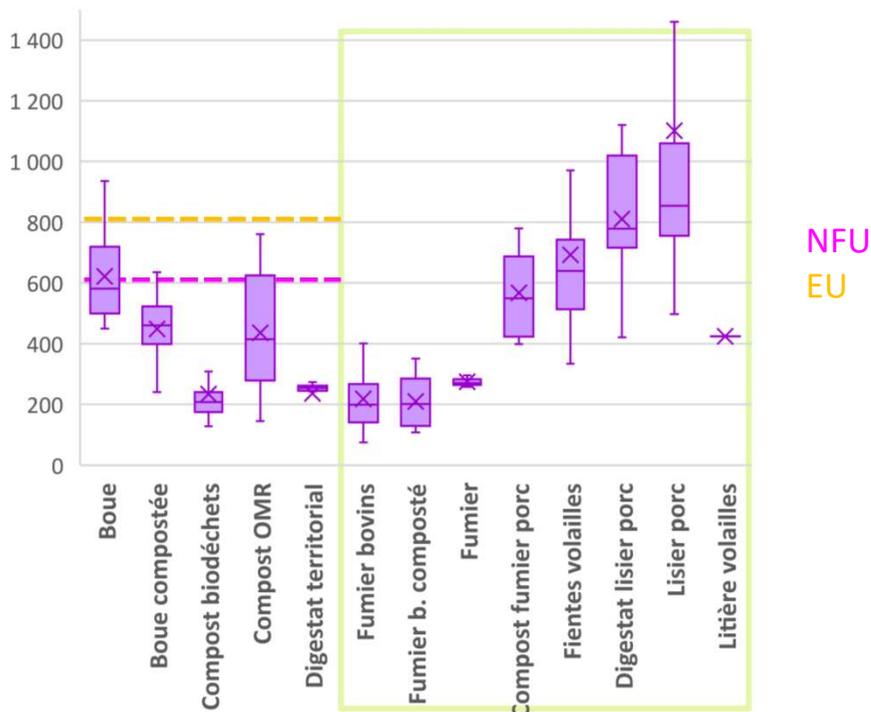
Effluents élevages avec les plus faibles concentrations, exceptés pour Mn et Zn

- 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

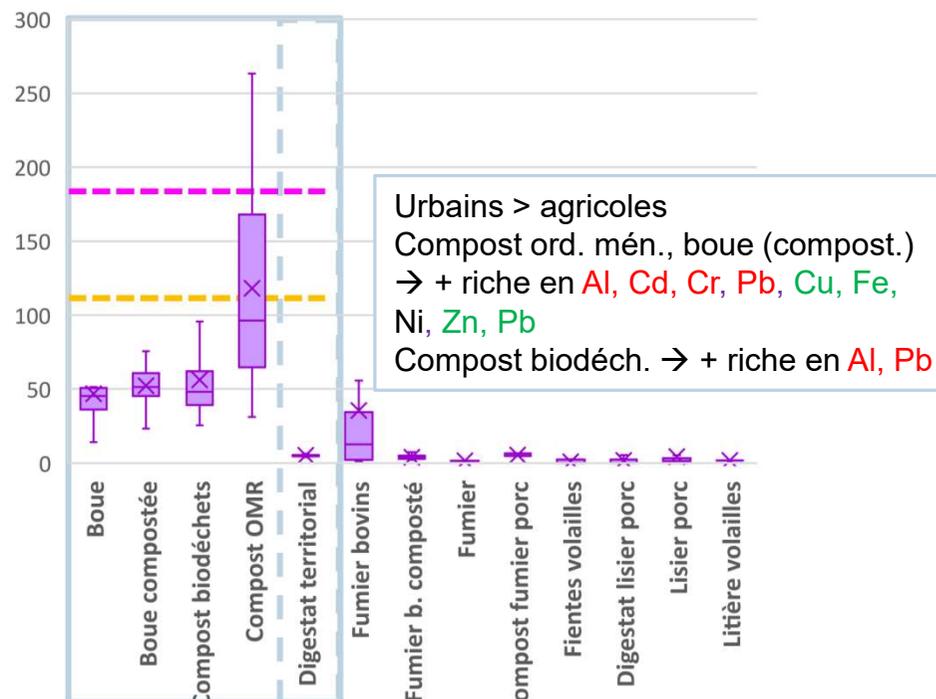


Zinc (mg.kg⁻¹ matière sèche)



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

Plomb (mg.kg⁻¹ matière sèche)



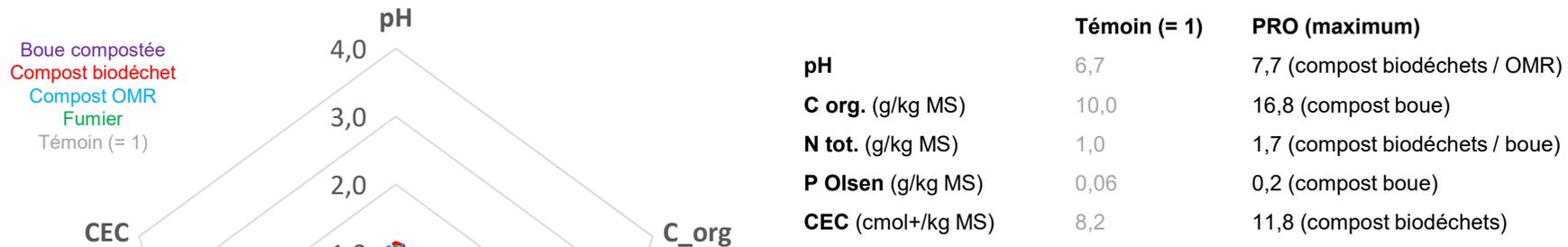
Digestat territorial → + faible des urbains, comme l'exemple Pb

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

Propriétés des sols soumis à apports répétés de PRO ?



QualiAgro, 21 ans d'apports (compost, fumier bovins)



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

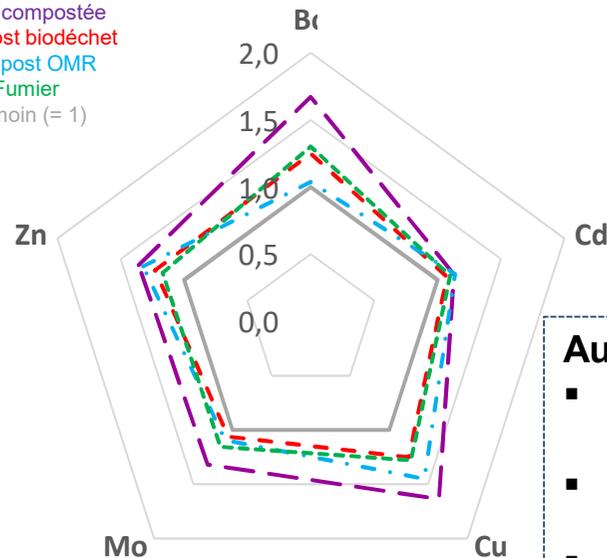
→ Apports PRO modifient les propriétés du sol, contrôlant notamment les processus pouvant moduler la mobilité et in fine la (bio)disponibilité des ETM pour les organismes (ISO 2008, Gupta et al. 2019, Michaud et al. 2021)

Concentration en ETM totaux des sols après apports répétés



QualiAgro, 21 ans d'apports (compost, fumier bovins)

Boue compostée
 Compost biodéchet
 Compost OMR
 Fumier
 Témoin (= 1)



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	Grain	0.03	4.5	17,5		0.30	0.50	25.0
Kabata-Pendias 2012	Maïs	Grain							
Codex Al. 2015	Céréales	Grain	0,1					0.20	

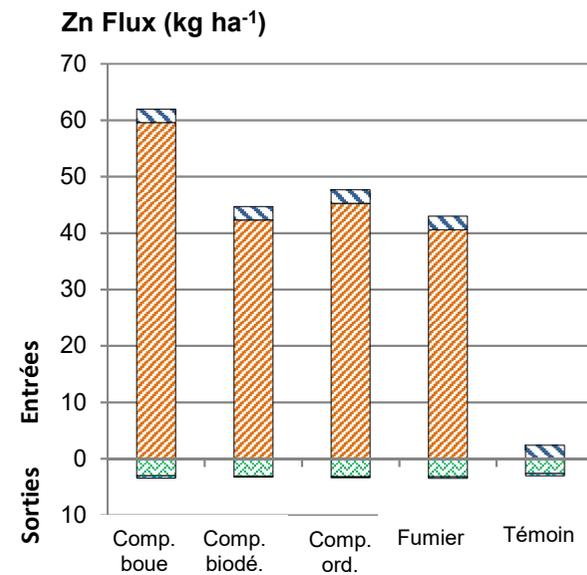
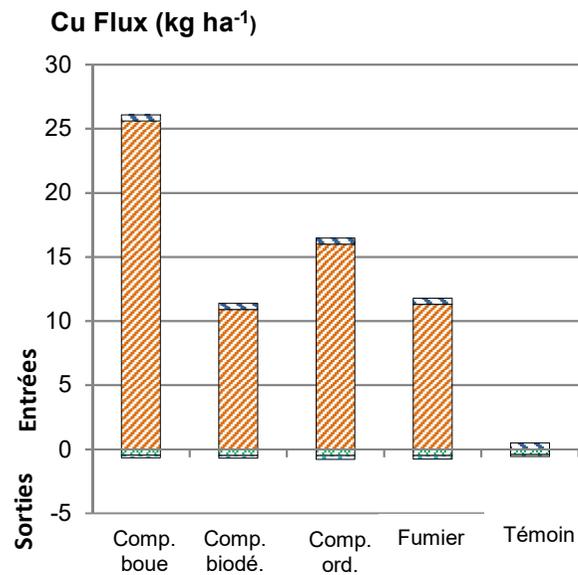
Cd, Hg, Pb et As, teneurs inférieures aux limites de dosage et *a minima* aux valeurs réglementaires/usuelles
Cu, Fe et Zn considérés oligo-éléments des plantes, dans la gammes des valeurs usuelles
 (* différences significatives entre traitements ponctuelles à confirmer dans la durée, Michaud et al. 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 :
 $\leq 1 \%$ (Cr, Ni, Pb), $\leq 2 \%$ (Cd, Cu, Hg) et $\leq 5 \%$ (Zn)

Cu, Ni, Zn : cohérence globale balance entrées-sorties et augmentation de stock du sol
 → Flux PRO \approx 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 (et simulées après 100 ans 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)*

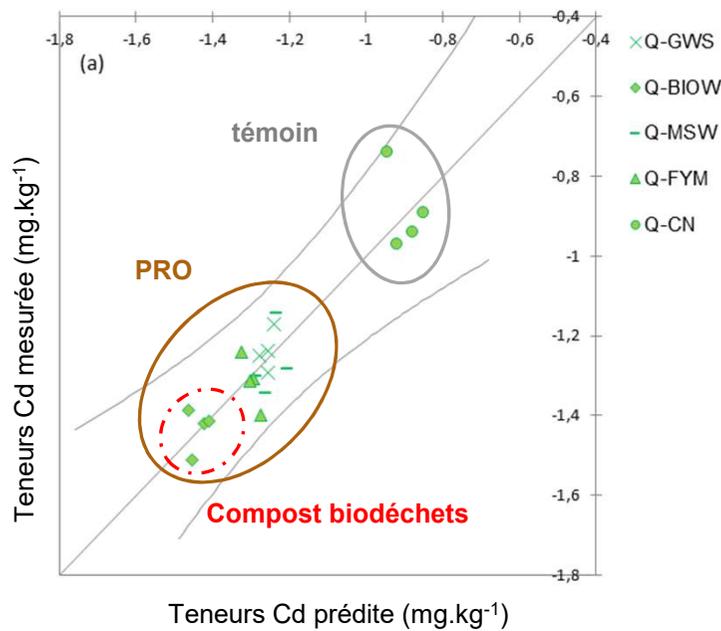
limiter les flux Zn apportés dans les réglementations (ex. 20 kg.ha⁻¹.10 ans au lieu de 30 kg.ha⁻¹.10 ans) devrait permettre de rester en dessous d'un seuil évalué sans risque (Michaud et al. 2020)

Focus QualiAgro – évaluation prospective

Phytodisponibilité (prélèvement par les plantes) ?



Teneur Cd, Mn, TI des parties aériennes de plantule de blé : témoin > PRO
 Lien avec les propriétés du sol différenciées après l'apport répété de PRO ?



Cd = probablement le plus problématique en termes d'accumulation dans les cultures (Carrillo-Gonzalez et al. 2006)

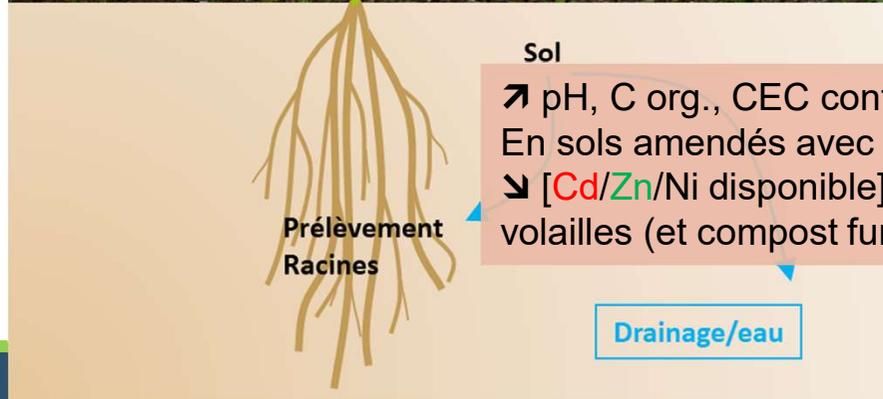
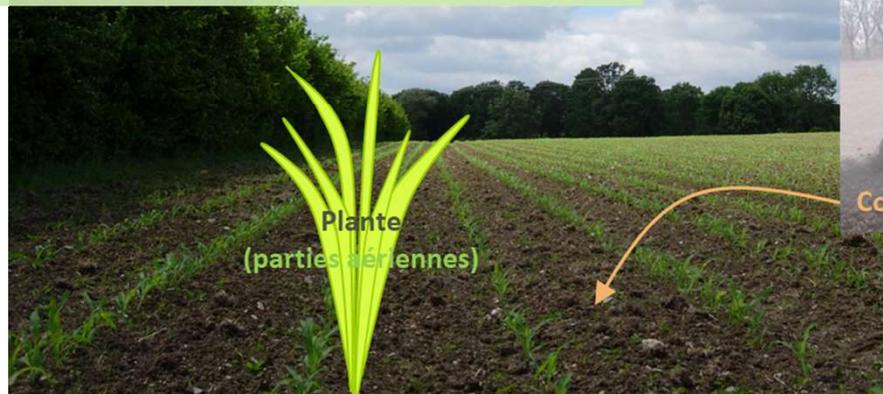
Phytodisponibilité Cd prédite
 diminue avec l'augmentation du C organique et du pH sol
 → Apports de PRO a diminué le risque de transfert de Cd aux stades jeunes de la culture, en particulier pour le compost de biodéchets qui a effet amendant pH et organique (Michaud et al. 2021)

$\text{Log}_{10}(\text{Cd-plant}) = 2,224 - 0.195 \text{ pH}^{**} - 1.804 \text{ log}_{10}(\text{Org. C})^{***}$
 $p \text{ Value} < 0.0001$

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 et projet socle commun EU



Sol
 ↗ 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

Drainage/eau



...Merci... à Denis

Merci de votre attention

INRAE
cirad

AnaEE
Analysis and Experimentation on Ecosystems
France