

Journée de l'innovation ARVALIS
6 février 2024, Troyes

La valorisation des gisements issus du recyclage

Florent Levavasseur, Sabine Houot
INRAE, UMR ECOSYS, Palaiseau, France



INRAE

AgroParisTech

université
PARIS-SACLAY

ARVALIS

- Les Produits résiduaux organiques (PRO)
- Valeur fertilisante NPK
- Effets collatéraux des épandages de PRO
- Quel gisement disponible ? Quelle contribution aux besoins de l'agriculture ?

Les Produits Résiduaires Organiques (PRO)

- Matière organique issue d'activités diverses (agriculture, ville, agro-industrie...) et non produite sur le champ où elle est épandue
- Peuvent être épandus bruts ou après traitements (compostage, méthanisation...), qui modifient les caractéristiques des PRO

Quelques PRO classiques



Web-agri

Fumier bovin



Compost de déchets verts



SMRA 68

Boue STEP



Fientes séchées



*Engrais organique commercial
(à base de déchets d'abattoir)*



www.agribat-concept.com

Lisier



Des PRO qui devraient / pourraient se développer

- 1^{er} janvier 2024 : généralisation de l'obligation du tri à la source des biodéchets (réglementation EU) :
 - Compostage de proximité → usage non agricole
 - Collecte sélective puis :
 - Compostage industriel (avec déchets verts)
 - Méthanisation → digestat



www.smictom-paysdevilaine.fr



Méthaniseur et digestat de biodéchets



Des PRO qui devraient / pourraient se développer

- 1^{er} janvier 2024 : généralisation de l'obligation du tri à la source des biodéchets (réglementation EU) :
 - Compostage de proximité → usage non agricole
 - Collecte sélective puis :
 - Compostage industriel (avec déchets verts)
 - Méthanisation → digestat

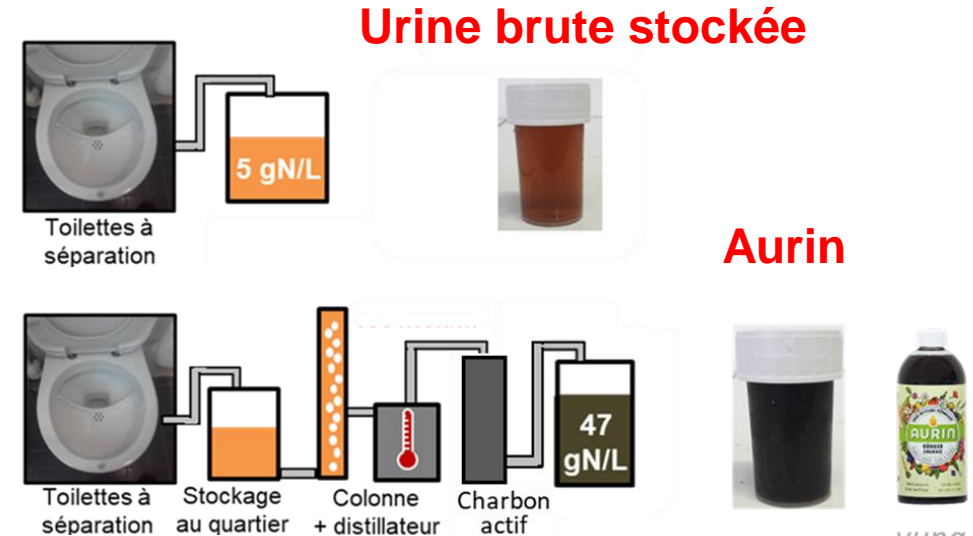


www.smictom-paysdevilaine.fr



Méthaniseur et digestat de biodéchets

- Collecte sélective à la source des urines humaines :
 - Urine humaine brute
 - Aurin : urine nitrifiée concentrée, passée sur charbon actif (résidus médicamenteux). Autorisation de mise sur le marché en Suisse



Plan

- Les Produits résiduaux organiques (PRO)
- Valeur fertilisante NPK
- Effets collatéraux des épandages de PRO
- Quel gisement disponible ? Quelle contribution aux besoins de l'agriculture ?

Efficacité fertilisante N à court terme des PRO

- Azote disponible = N minéral (N-NH₄) + N organique rapidement minéralisable
- Minéralisation de l'azote organique par les micro-organismes du sol dépend :
 - des conditions de température et d'humidité (qui ↗)
 - des caractéristiques du PRO (stabilité de la MO et rapport C_{org}/N_{org})

	MO facilement dégradable	MO difficilement dégradable
C _{org} /N _{org} bas	+ minéralisation N (fourniture de N)	Faible minéralisation ou immobilisation
C _{org} /N _{org} élevé	+ immobilisation N (prélèvement N par les microorganismes)	



Efficacité fertilisante N à court terme des PRO

- Azote disponible = N minéral (N-NH₄) + N organique rapidement minéralisable
- Minéralisation de l'azote organique par les micro-organismes du sol dépend :
 - des conditions de température et d'humidité (qui ↗)
 - des caractéristiques du PRO (stabilité de la MO et rapport C_{org}/N_{org})
- Forte variabilité des teneurs en N minéral et N organique entre types de PRO
- Efficacité relative des PRO / engrais minéral = coefficient équivalent engrais KEQ
- KEQ dépend aussi des pratiques d'apport (période, météo, culture...)

	MO facilement dégradable	MO difficilement dégradable
C _{org} /N _{org} bas	+ minéralisation N (fourniture de N)	Faible minéralisation ou immobilisation
C _{org} /N _{org} élevé	+ immobilisation N (prélèvement N par les microorganismes)	

PRO	Apport automne	Apport sortie hiver
Compost de déchets verts	2%	5%
Boues urbaines pâteuses	10%	35%
Digestat brut	10%	60%

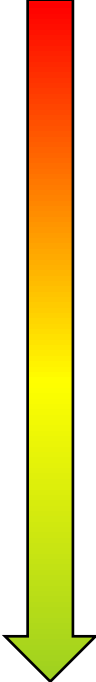
KEQ GREN Grand-Est pour cultures d'hiver



Efficacité fertilisante N à court terme des PRO

- Apport N disponible dépend des doses, des teneurs en N minéral et organique, de la minéralisation du N organique

PRO	Dose classique (t/ha)	N total (kg/ha)	N-NH ₄ (kg/ha)	N organique (kg/ha)	Minéralisation Norg (%)	N disponible (kg/ha)
Compost de déchets verts	20	167	9	157	-1	8
Fumier de litière accumulée	30	174	22	152	3	26
Boues urbaines épaissies chaulées	10	93	1	92	32	31
Lisier non dilué	40	140	70	70	-1	69
Engrais organique	1	120	0	120	60	72
Fientes (séchées)	5	203	25	178	30	78
Lisier porcin mixte	40	144	108	36	20	115
Digestat de biodéchets	20	160	120	40	≈ 0	120
Urine humaine	20	140	120	20	?	120

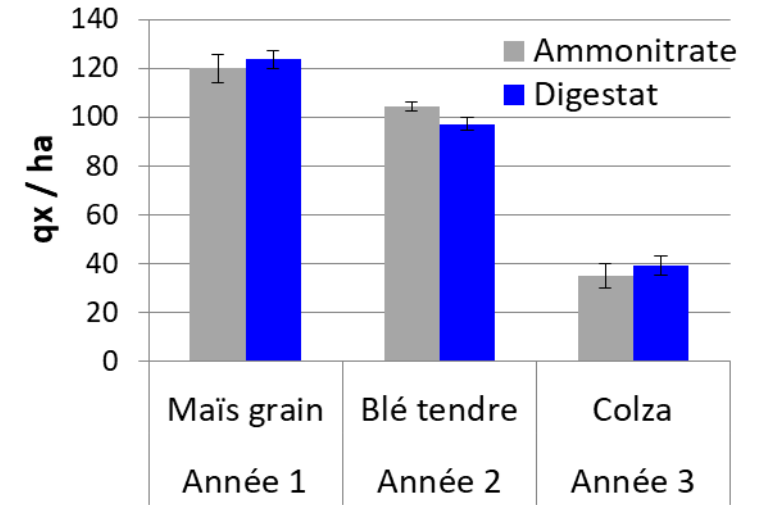


Exemple d'apports de N par différents PRO (attention variabilité)



Pourrait-on se passer de fertilisants N (à la parcelle) ?

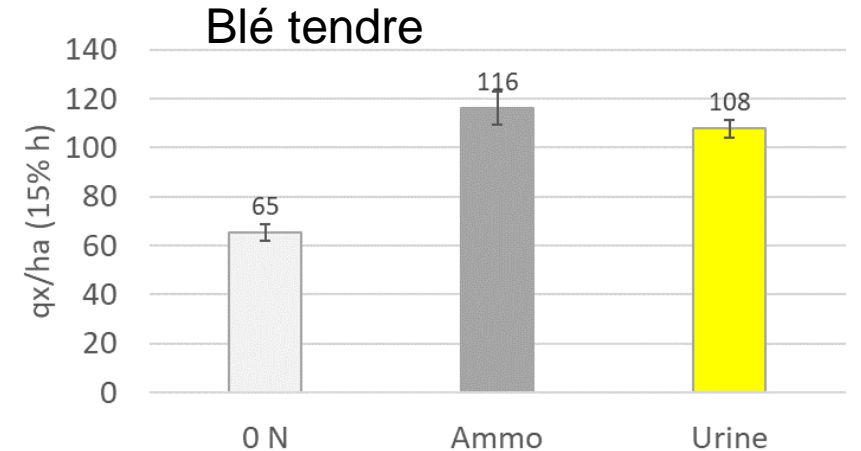
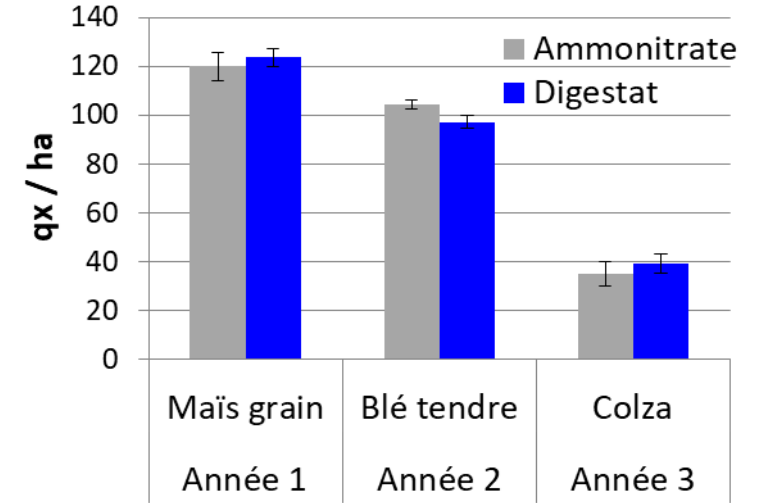
- Substitution totale des engrais N par du digestat de biodéchets pendant 3 ans : pas de différence significative de rendement
- Mais 35 m³/ha de digestats en 2 apports sur blé/colza !
- KEQ moyen du digestat de biodéchets ≈ 65 %



Pourrait-on se passer de fertilisants N (à la parcelle) ?

- Substitution totale des engrais N par du digestat de biodéchets pendant 3 ans : pas de différence significative de rendement
- Mais 35 m³/ha de digestats en 2 apports sur blé/colza !
- KEQ moyen du digestat de biodéchets ≈ 65 %

- Substitution totale des engrais N par des urines humaines : pas de différence significative de rendement, ni de teneur en protéines
- Mais 45 m³/ha d'urine en 3 apports !
- KEQ moyen de l'urine ≈ 80%

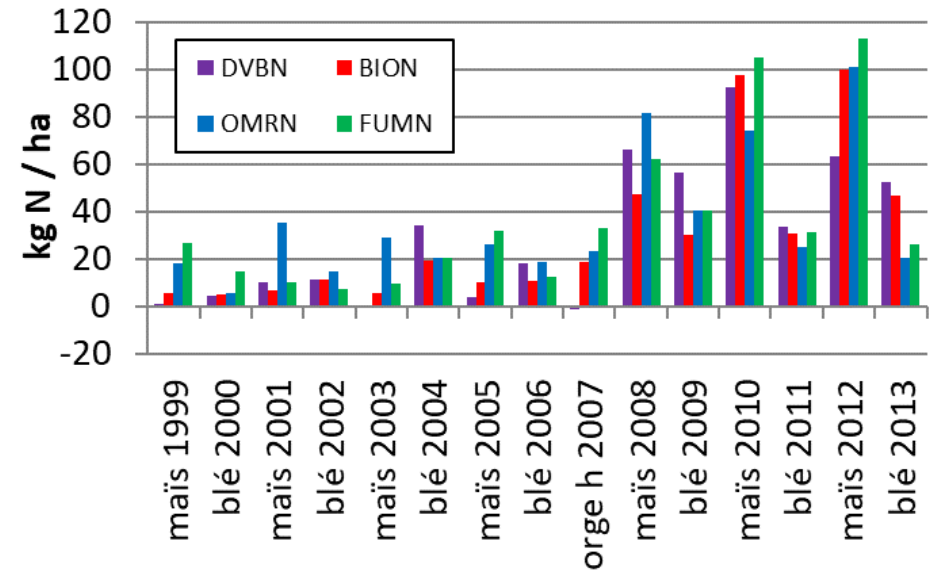


Efficacité fertilisante N à long terme

- Apports répétés de PRO amendants → augmentation de la matière organique du sol → augmentation de la minéralisation d'azote du sol → réduction des besoins en engrais N

Surplus de fourniture N à QualiAgro par rapport au témoin N minéral

Essai QualiAgro : épandage de 3 composts urbains (*biodéchets*, *boue*, *OMR*) et d'un *fumier bovin* tous les 2 ans (4 t C/ha, soit 20 t/ha à 35 t/ha)

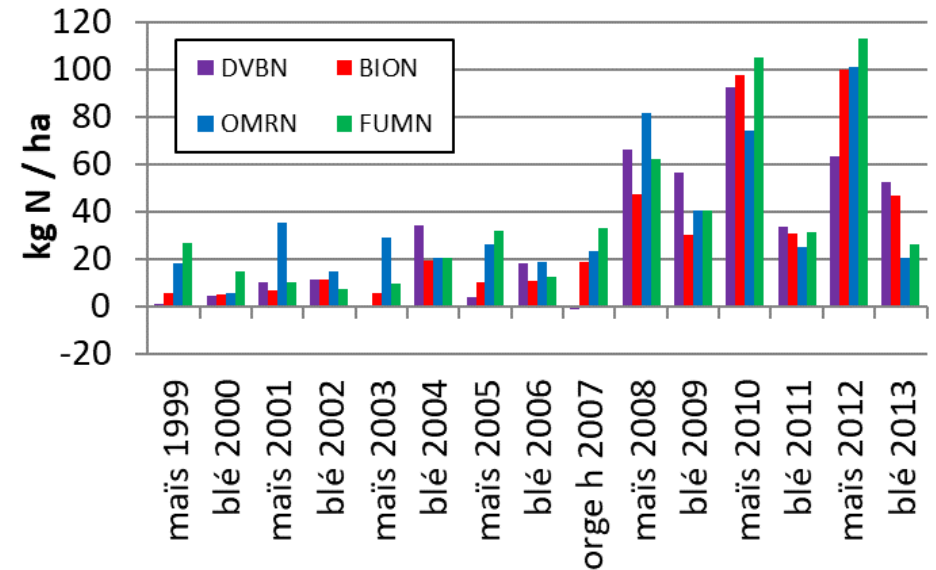
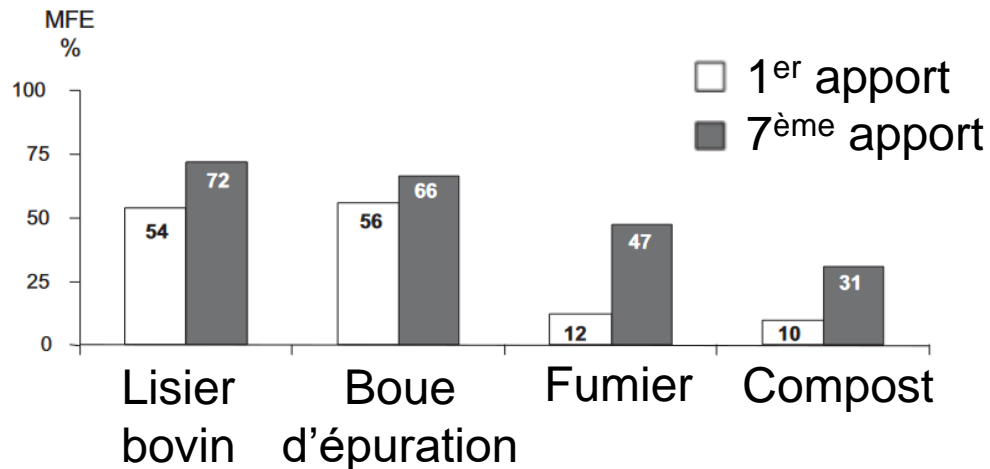


Efficacité fertilisante N à long terme

- Apports répétés de PRO amendants → augmentation de la matière organique du sol → augmentation de la minéralisation d'azote du sol → réduction des besoins en engrais N

Surplus de fourniture N à QualiAgro par rapport au témoin N minéral

Essai QualiAgro : épandage de 3 composts urbains (*biodéchets*, *boue*, *OMR*) et d'un *fumier bovin* tous les 2 ans (4 t C/ha, soit 20 t/ha à 35 t/ha)



Coefficient d'équivalence engrais à court et long terme
(adapté de Gutser et al., 2005)

Valeur fertilisante P

- Valeur fertilisante P des PRO dépend :
 - Teneurs en P des PRO, très variables entre PRO

Exemple de teneur en P de quelques PRO

PRO	P₂O₅ (kg/t brut)
Phase solide lisier porcin	45
Boue déshydratée	9
Compost déchets verts	4
Digestat biodéchets	1
Urine humaine	0.5

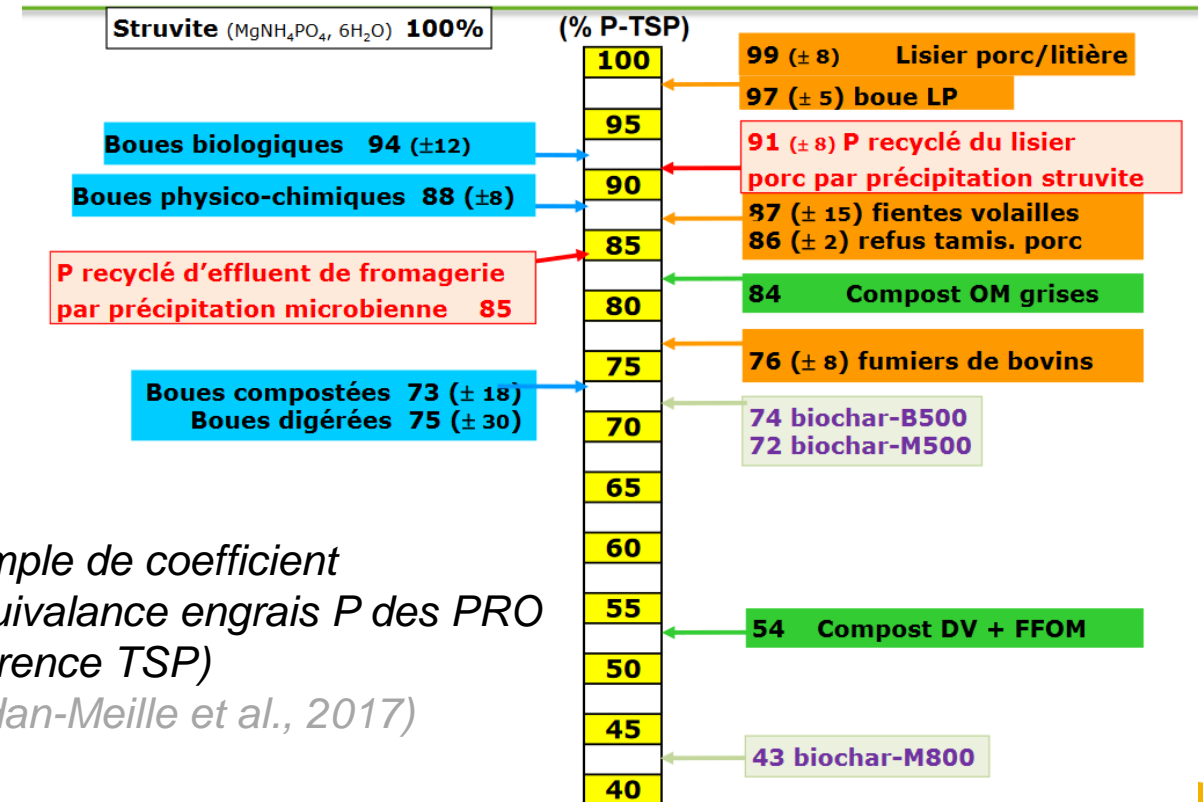


Valeur fertilisante P

- Valeur fertilisante P des PRO dépend :
 - Teneurs en P des PRO, très variables entre PRO
 - Coefficient d'équivalence engrais P des PRO, très variables entre PRO, entre contextes pédoclimatiques, méthodes d'évaluation → résultats contrastés dans la littérature

Exemple de teneur en P de quelques PRO

PRO	P ₂ O ₅ (kg/t brut)
Phase solide lisier porcin	45
Boue déshydratée	9
Compost déchets verts	4
Digestat biodéchets	1
Urine humaine	0.5

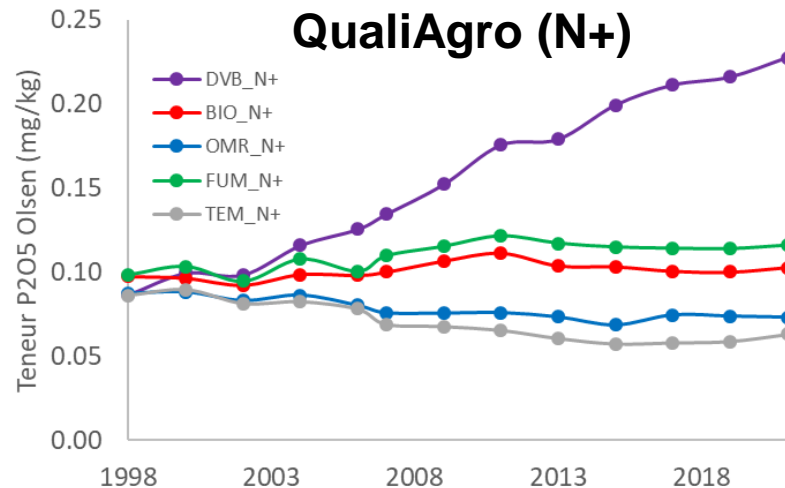
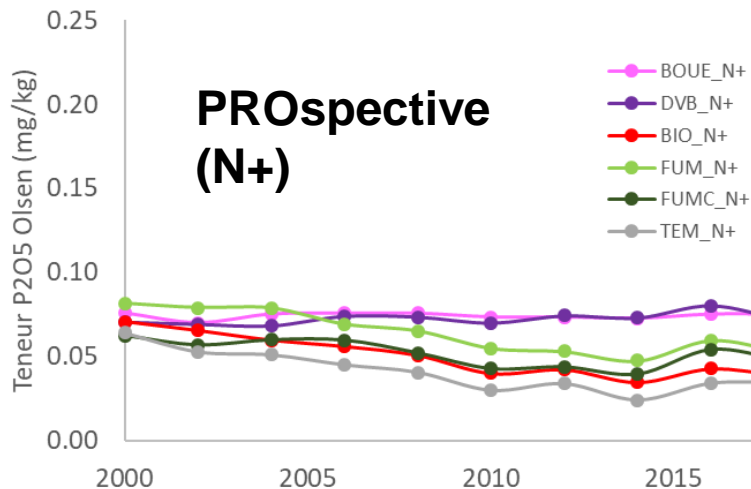


Exemple de coefficient d'équivalence engrais P des PRO (référence TSP)
(Jordan-Meille et al., 2017)

Dynamique de P du sol après des apports répétés

- Deux sites de longue durée avec apports de PRO :
 - QualiAgro (Ile-de-France) : sol acide, apports tous les deux ans à 4 t C/ha
 - PROspective (Alsace) : sol calcaire, apports tous les deux ans à 170 kg N/ha
 - QualiAgro : augmentation (sauf OMR) des teneurs
 - PROspective : Moindre décroissance ou maintien (boue, DVB) des teneurs
- Origine des différences entre traitements et entre sites ?

Teneur du sol en P_2O_5 Olsen



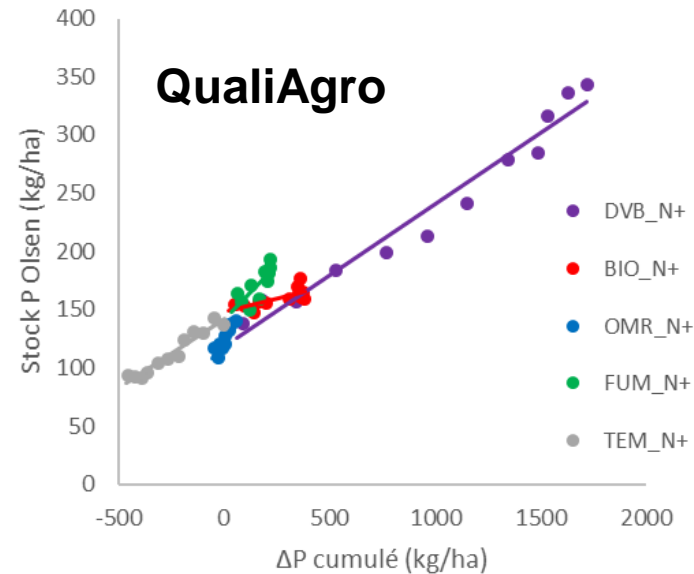
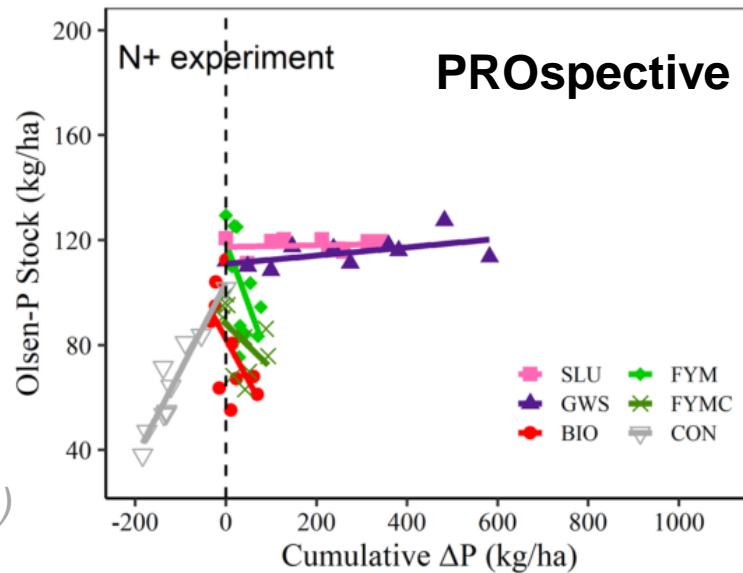
- Boue (BOUE / SLU)
- Compost DV + boue (DVB)
- Compost DV + biodéchets (BIO)
- Fumier bovin (FUM)
- Compost de fumier (FUMC)
- Compost d'ordures ménagères (OMR)
- Témoin sans PRO (TEM)



Dynamique de P du sol après des apports répétés

- ΔP = apport ferti (PRO + minéral) – export plante
- P en excès dans presque tous les traitements PRO, mais effet variable sur les stocks de P Olsen :
 - QualiAgro : effet \approx identique et positif selon les traitements
 - PROspective : effet très variable selon les traitements : d'une légère \nearrow à une forte \searrow
- Mécanismes sous-jacents encore mal compris

Relation ΔP et stock P Olsen



Boue (BOUE / SLU)
Compost DV + boue (DVB)
Compost DV + biodéchets (BIO)
Fumier bovin (FUM)
Compost de fumier (FUMC)
Compost d'ordures ménagères (OMR)
Témoïn sans PRO (TEM)

Chen et
al. (2022)

Effet fertilisante K

- Grande variabilité des teneurs en K entre PRO
- K des PRO généralement considéré totalement disponible (équivalent engrais minéral KCl) (*Wen et al., 1997*)

Exemple de teneur en K de quelques PRO

PRO	K₂O (kg/t brut)
Boue déshydratée	1
Digestat biodéchets	2
Urine humaine	2
Compost déchets verts	5
Fumier bovin	7



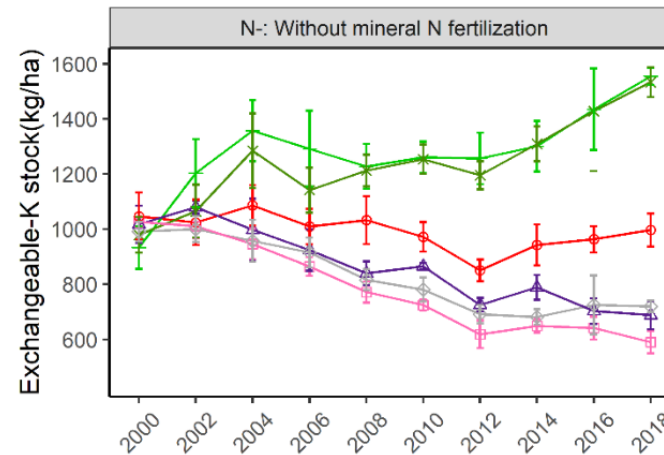
Effet fertilisante K

- Grande variabilité des teneurs en K entre PRO
- K des PRO généralement considéré totalement disponible (équivalent engrais minéral KCl) (*Wen et al., 1997*)
- Dynamique du K disponible pourtant encore mal comprise dans certains essais longue durée (ex : essai Colmar, sol calcaire) :
 - ↗ teneur K sol avec fumier, maintien ou ↘ sinon
 - $\Delta K = \text{apport ferti (PRO + minéral)} - \text{export plante}$
 - K en excès dans presque tous les traitements PRO, mais effet variable sur les stocks de K disponibles

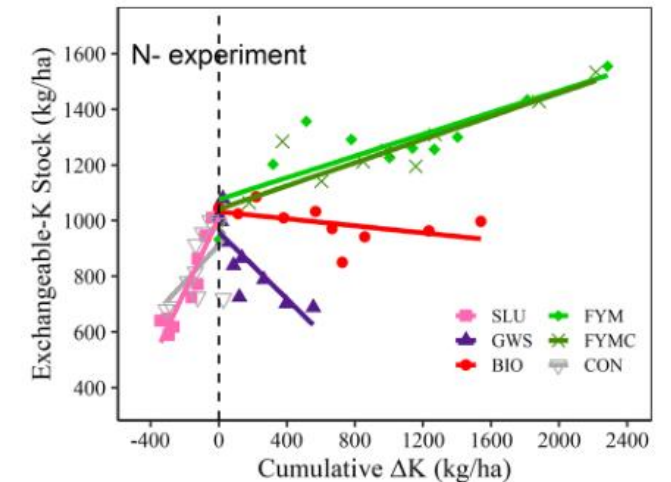
Exemple de teneur en K de quelques PRO

PRO	K ₂ O (kg/t brut)
Boue déshydratée	1
Digestat biodéchets	2
Urine humaine	2
Compost déchets verts	5
Fumier bovin	7

Stock K disponible du sol



Relation ΔK et stock K disponible



Boue (BOUE / SLU) Compost DV + boue (DVB) Compost DV + biodéchets (BIO)
Fumier bovin (FUM) Compost de fumier (FUMC) Témoin sans PRO (TEM)



Plan

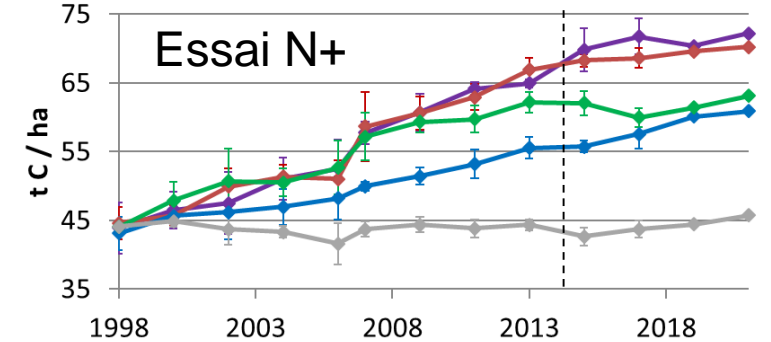
- Les Produits résiduaux organiques (PRO)
- Valeur fertilisante NPK
- Effets collatéraux des épandages de PRO
- Quel gisement disponible ? Quelle contribution aux besoins de l'agriculture ?



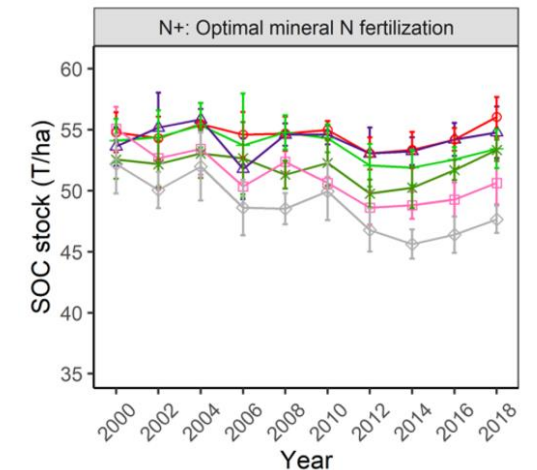
Effets collatéraux : augmentation de la matière organique du sol

- QualiAgro : forte ↗ des stocks de C
(teneur MO : ↗ de 1.8 à 3% au max)
- PROspective : légère ↗ ou maintien des stocks
- Augmentation des stocks bien expliquée par
 - les quantités de C appliquées (ex : + à QualiAgro qu'à PROspective)
 - stabilité de la matière organique (ex : compost boue > fumier > boue)
- Des bénéfices en termes de qualité biologique et/ou physique des sols, mais souvent limités

Stock de carbone à QualiAgro



Stock de carbone à PROspective



Boue (BOUE / SLU)
Fumier bovin (FUM)

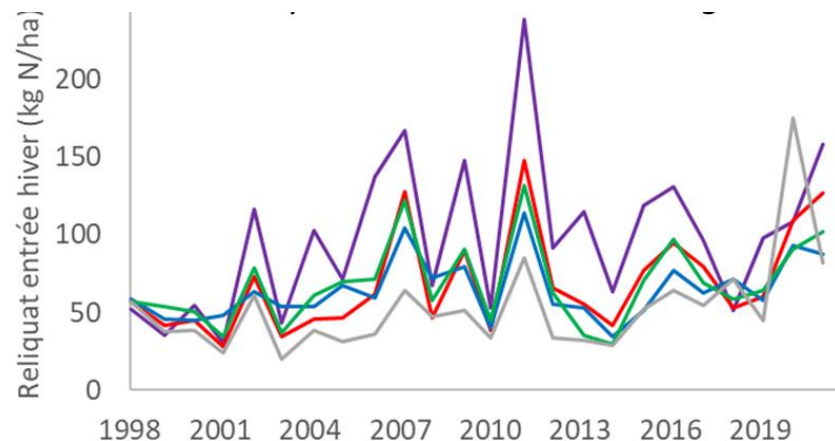
Compost DV + boue (DVB)
Compost de fumier (FUMC)

Compost DV + biodéchets (BIO)
Compost d'ordures ménagères (OMR)

Témoin sans PRO (TEM)

Effets collatéraux : pertes de N et P

- Possibles augmentations des pertes de N par lixiviation (et N₂O ?) après des apports répétés : bien couvrir les sols pour capter l'excédent de minéralisation
- Pertes de N par volatilisation pour les PRO riches en N-NH₄ (lisier, digestat, urine...)
- Pertes de P possible par ruissellement et lessivage : limiter les pertes en limitant les doses (prise en compte des besoins en P), les épandages d'hiver et avant des pluies, et en enfouissant

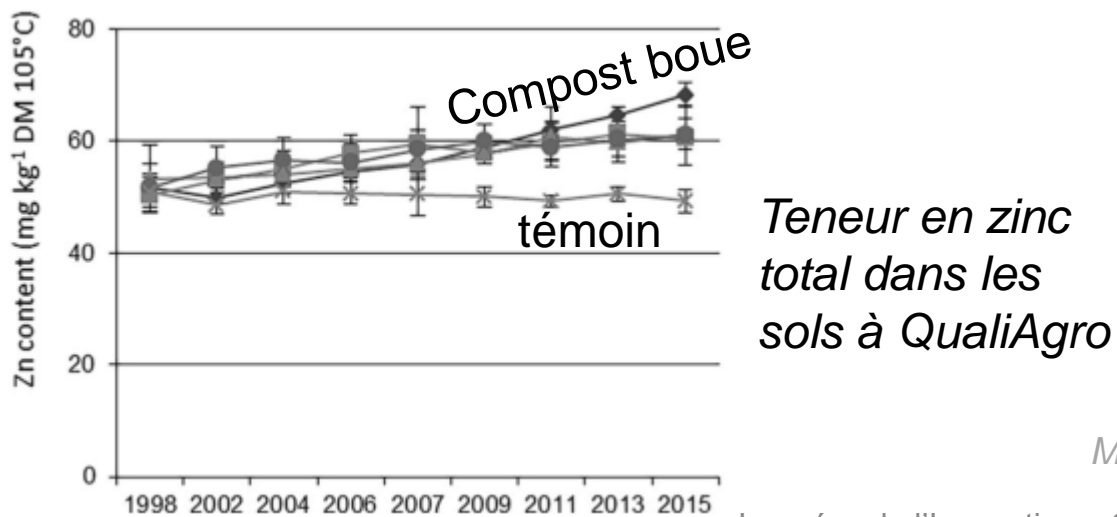


Evolution des reliquats entrée hiver à QualiAgro après des apports répétés de PRO :

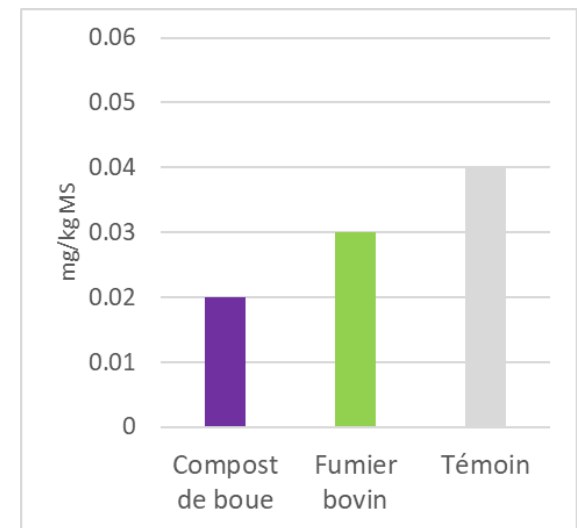
Compost DV + boue (DVB)
Compost DV + biodéchets (BIO)
Compost d'ordures ménagères (OMR)
Fumier bovin (FUM)
Témoin sans PRO (TEM)

Effets collatéraux : contaminants métalliques (ETM)

- Forte variabilité des teneurs en ETM entre PRO, PRO urbains souvent + contaminés
- Exemple du devenir des ETM à QualiAgro après ≈ 20 ans d'apports à « forte » dose :
 - Très peu de « sorties » : accumulation de métaux dans les sols
 - Effets visibles que pour Cu et Zn sur les teneurs en métaux totaux des sols
 - Teneurs sols < seuil réglementaire, même à long terme avec des doses élevées (simulations) et < seuil considéré à risque
 - Pas d'effets sur les teneurs dans les grains



Teneur en cadmium des grains à QualiAgro

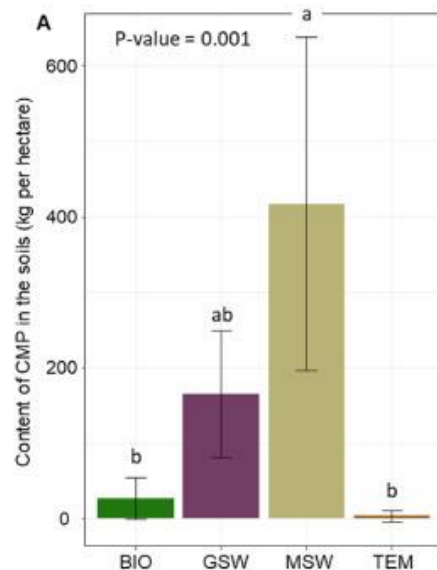


Michaud et al., (2019, 2021)



Effets collatéraux : autres contaminants

- Divers contaminants retrouvés dans les PRO : HAP, PCB, résidus médicamenteux, pathogènes, perfluorés, microplastiques...
- Persistance, mobilité et toxicité très variable entre contaminants
- Forte variabilité des teneurs en contaminants entre PRO
- PRO urbains non issus d'une collecte sélective à la source globalement plus contaminés
- Peu de transfert observé vers la plante et évaluation écotoxicologique difficile



Teneur en microplastiques après 20 ans d'apport (*Colombini et al., 2022*)

BIO : compost de biodéchets triés à la source

GSW : compost de boue

MSW : compost d'ordures ménagères

TEM : témoin sans PRO



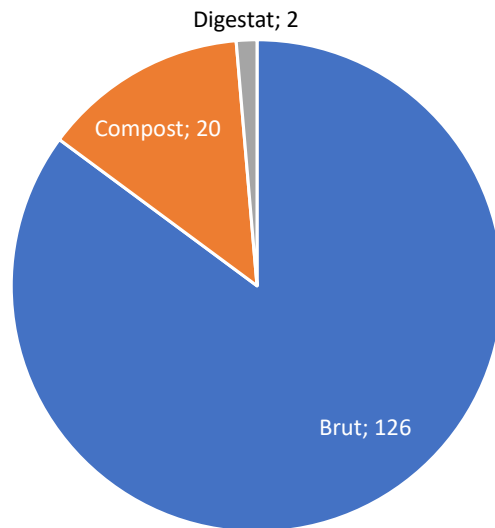
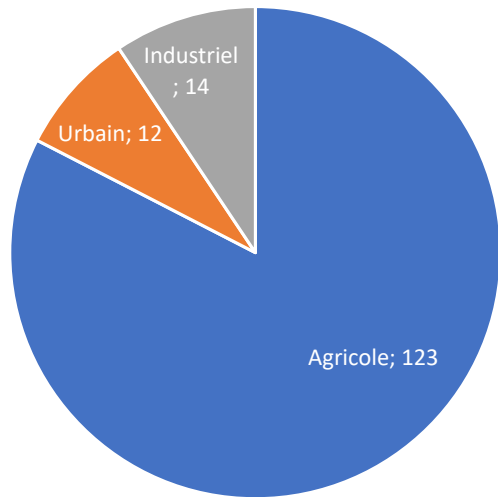
Plan

- Les Produits résiduaire organiques (PRO)
- Valeur fertilisante NPK
- Effets collatéraux des épandages de PRO
- Quel gisement disponible ? Quelle contribution aux besoins de l'agriculture ?

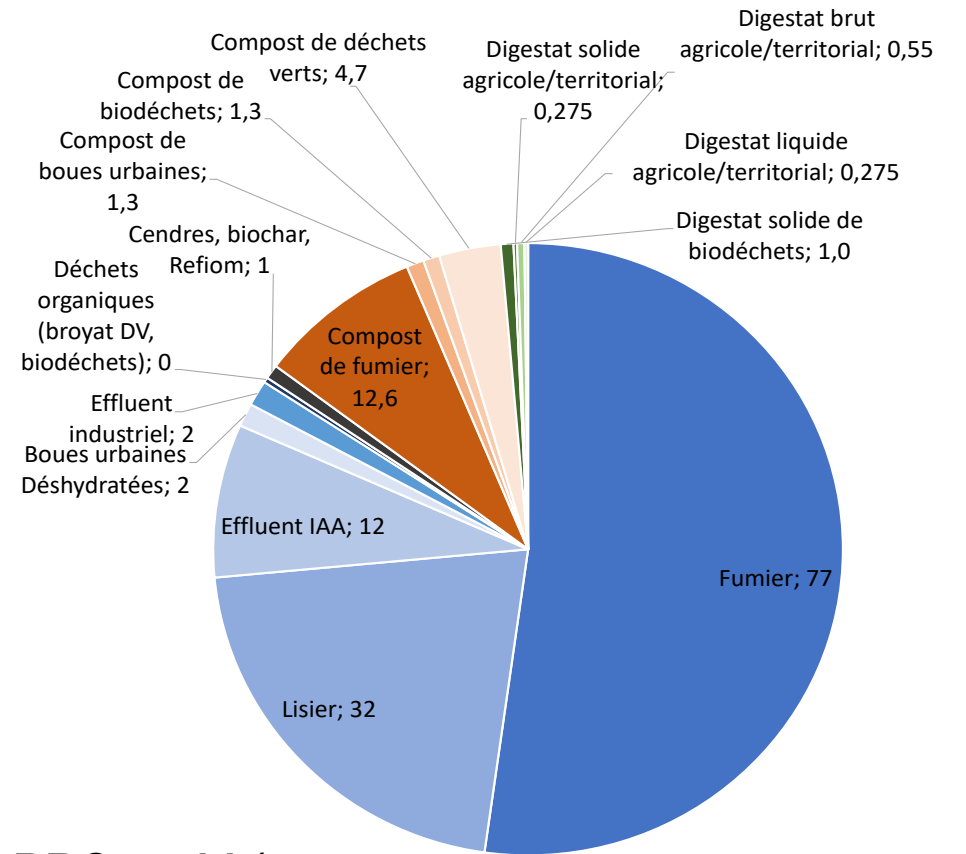


Gisements de PRO en France

- Origine agricole des PRO très majoritaire
- PRO épandus majoritairement bruts (sans traitement)



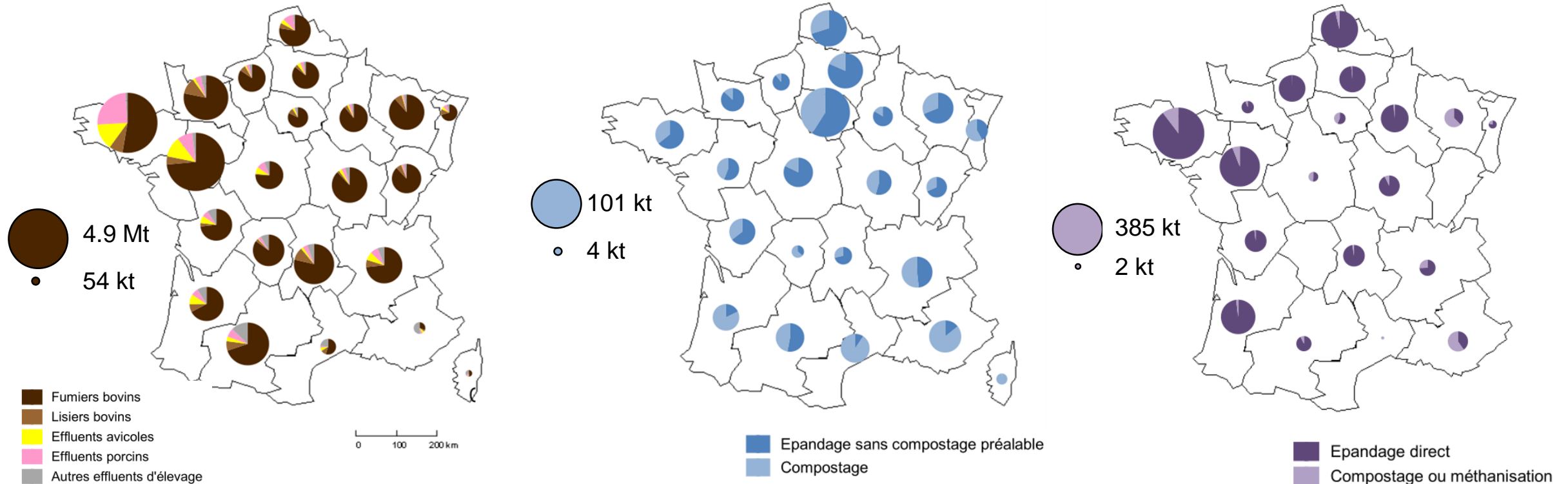
Gisement de PRO en Mt/an
RECORD (2022)



Gisements de PRO en France

- Forte hétérogénéité des gisements en France, liées aux activités d'élevage et industrielles, aux centres urbains

Gisement de PRO épandus en France (en t MS/an) (Houot et al., 2014)



Effluents d'élevages récupérables en France en 2000-2001

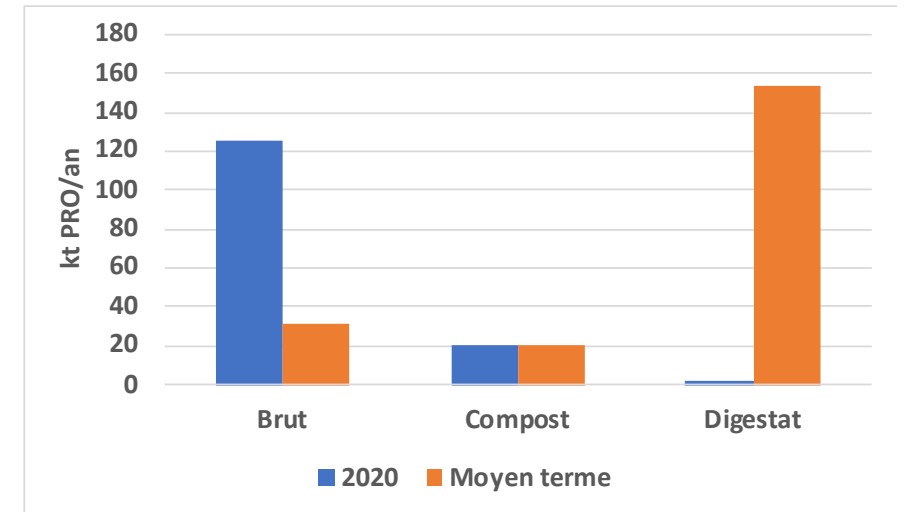
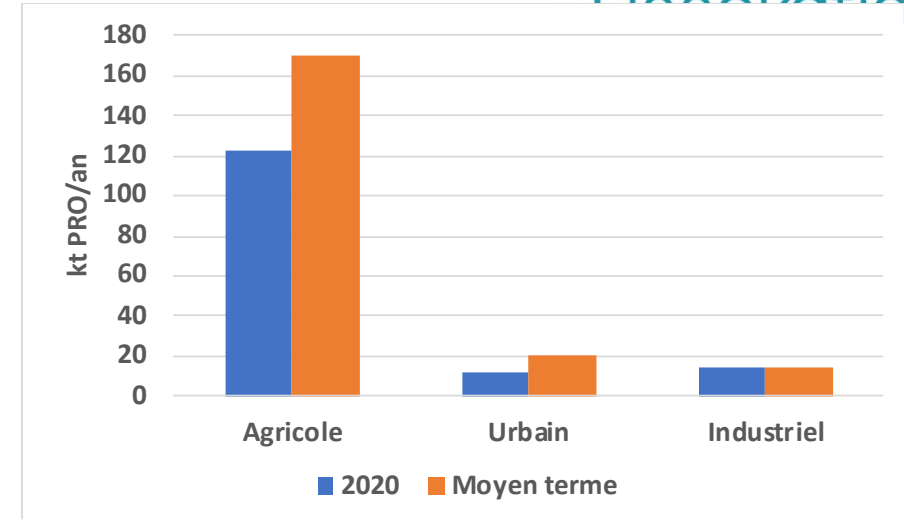
Boues d'épuration urbaines épandues en 2011

Déchets et effluents industriels épandues en 2008



Gisements – évolutions envisageables

- Déchets alimentaires :
 - Aujourd'hui encore en partie incinérés
 - Généralisation du tri à la source (loi AGEC) mais objectif de prévention des déchets et compostage de proximité prioritaire : gisement additionnel de PRO (compost, digestat) limité
- Réduction tendancielle du cheptel → moins de PRO d'élevage
- Développement de la méthanisation :
 - Moins de PRO épandus bruts (lisiers, fumiers...)
 - Augmentation du gisement via la mobilisation des cultures intermédiaires à vocation énergétique
- Biochar ? Urine collectée à la source ?...



Gisement de PRO actuel et envisageable à moyen terme en Mt/an RECORD (2022)

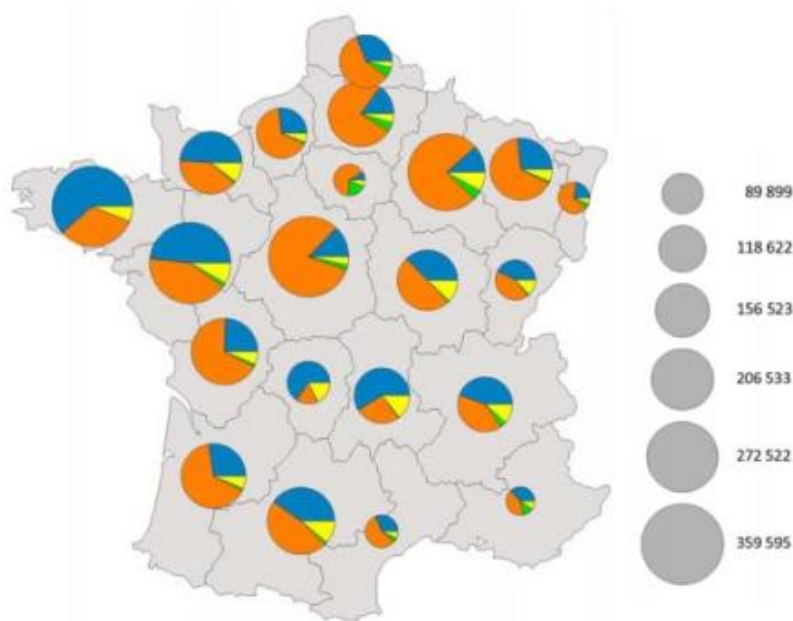


Part du NPK d'origine résiduaire

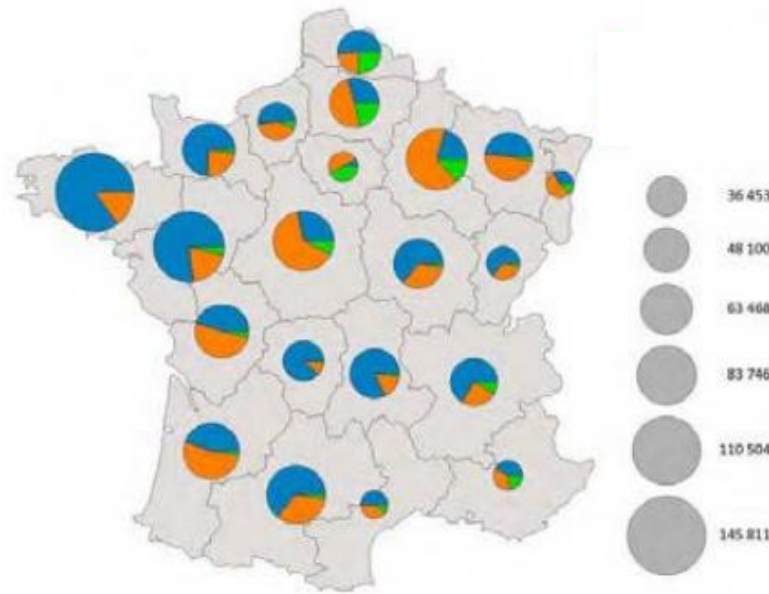
- 39% N, 70% P et 82% K proviennent d'apports organiques, principalement des effluents d'élevage (restitution à la pâture incluse) (Houot et al., 2014)
- Seulement 2% N, 5% P et 3% du K proviennent des PRO hors élevage (Houot et al., 2014)

⚠ Données incertaines et anciennes

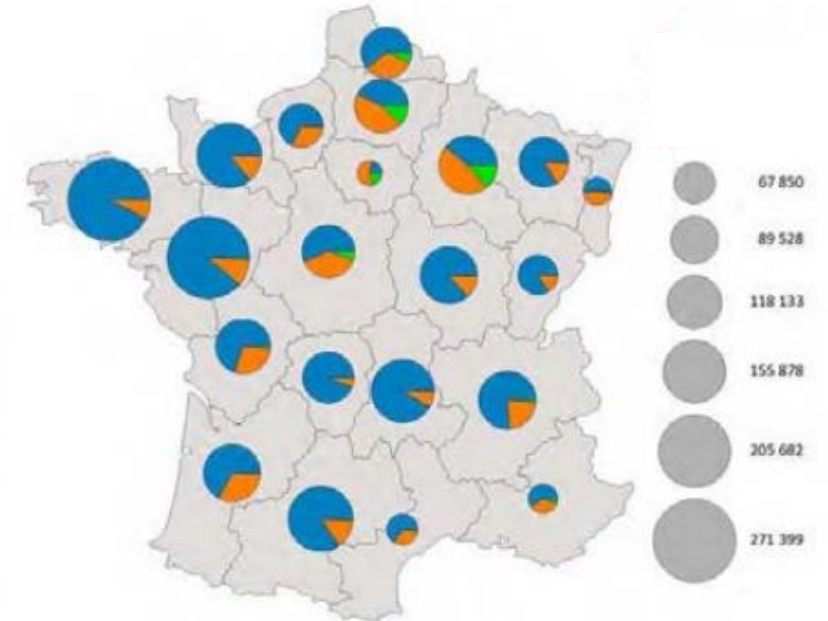
Azote



Phosphore





Potassium



 Excrétion animale

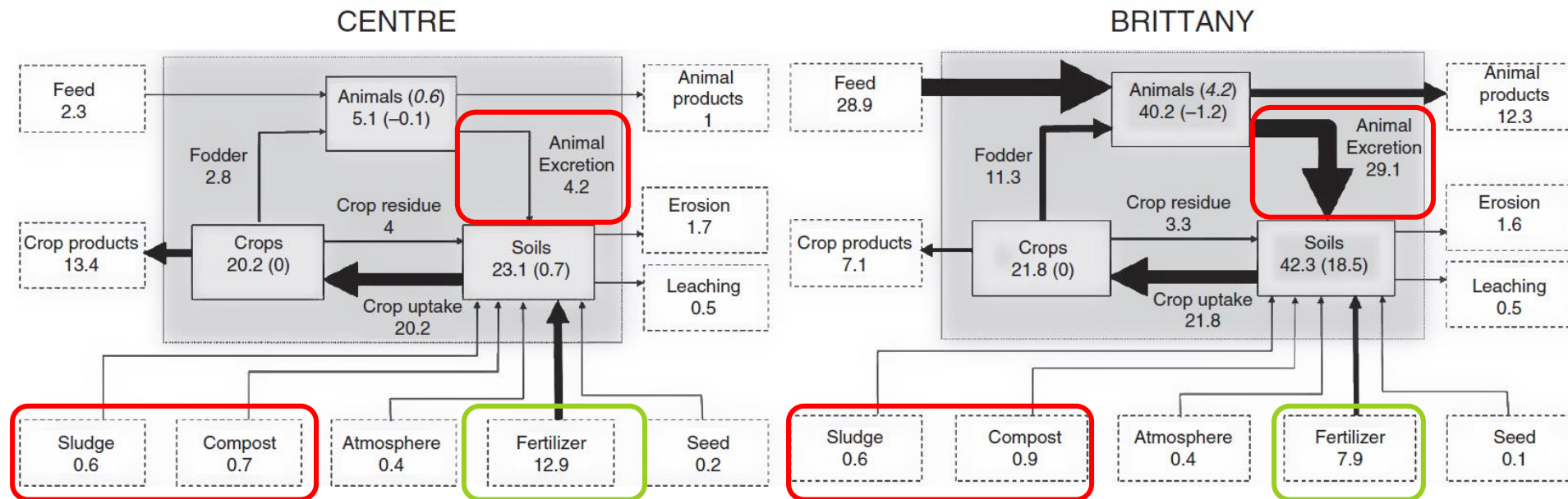
 Fertilisants minéraux

 Autres apports organiques

 Fixation symbiotique

Contribution des PRO aux besoins en P dans les régions françaises

- Flux de P dans des régions contrastées (*Senthilkumar et al., 2012*)
 - Balance P proche de l'équilibre dans le Centre mais dépendant d'import de fertilisant
 - Balance P largement excédentaire en Bretagne due aux imports d'aliments et retour des effluents d'élevage au sol
 - Faible contribution des PRO urbains dans les deux cas



Stocks, flux et bilans (en parenthèse) pour deux régions françaises, en kg P/ha/an (*Senthilkumar et al., 2012*)



Potentiel des nouveaux PRO en termes de flux

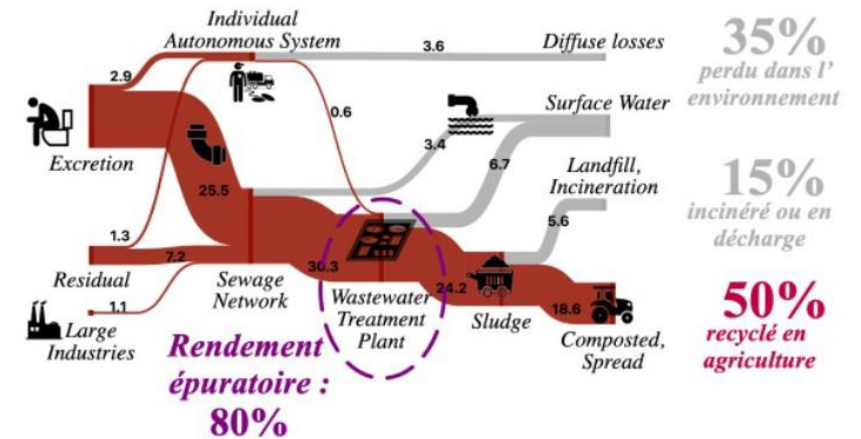
- A l'échelle nationale, potentiel limité des composts et digestats de biodéchets par rapport à la demande agricole actuelle en fertilisants (*icare&consult, 2020*) : flux de biodéchets limités + objectif de limitation du gaspillage alimentaire + gestion de proximité favorisée (usage non agricole)

Potentiel des nouveaux PRO en termes de flux

- A l'échelle nationale, potentiel limité des composts et digestats de biodéchets par rapport à la demande agricole actuelle en fertilisants (*icare&consult, 2020*) : flux de biodéchets limités + objectif de limitation du gaspillage alimentaire + gestion de proximité favorisée (usage non agricole)
- Collecte sélective des urines humaines permettrait d'augmenter considérablement les flux de N et P recyclés en agriculture :
 - Seuls 10% et 50% du P des eaux usées actuellement recyclées avec les boues de STEP
 - 140% des consommations agricoles de N et 75% pour P pourraient être couverts en IDF (*Martin 2020, d'après Esculier, 2018 et Unifa, 2019*)
 - 20% des besoins en N à l'échelle mondiale (*Martin (2020), d'après Trimmer et al. (2019)*)
- Mais de nombreux verrous à lever pour mobiliser ce potentiel (culturel, économique, logistique, réglementaire...)

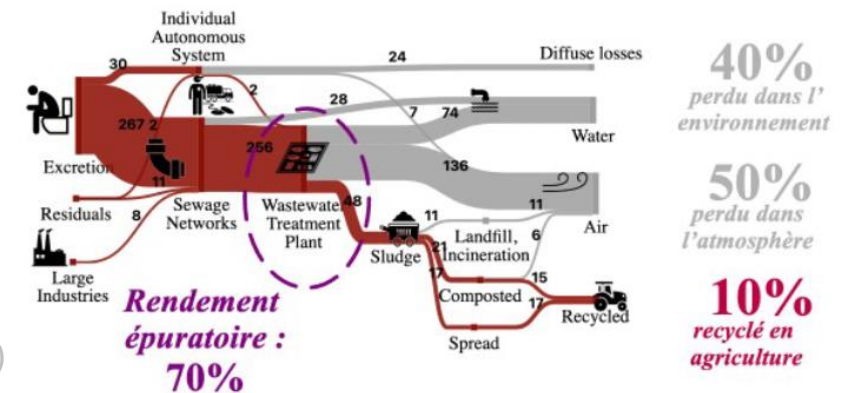
Phosphore

(fluxs en ktP)



Azote

(fluxs en ktN)



Starck & Esculier (2023)

Des potentiels localement plus importants

- Plaine de Versailles : territoire périurbain situé à 15 km à l'ouest de Paris, 24 000 ha, 57% agricoles
- Activité agricole principalement céréalière et conventionnelle
- Assolement assez peu diversifié, avec des cultures assez « gourmandes » en azote (colza, blé...)
- Très peu d'élevage (1 grosse exploitation laitière), mais centres équestres
- Gros imports de déchets organiques urbains des alentours : déchets verts vers compostières, eaux usées vers STEP, ordures ménagères vers incinérateur
- Une partie des PRO réexportés du territoire (boue notamment)



www.plainedeversailles.fr



Compostière (www.bioyvelines.fr)

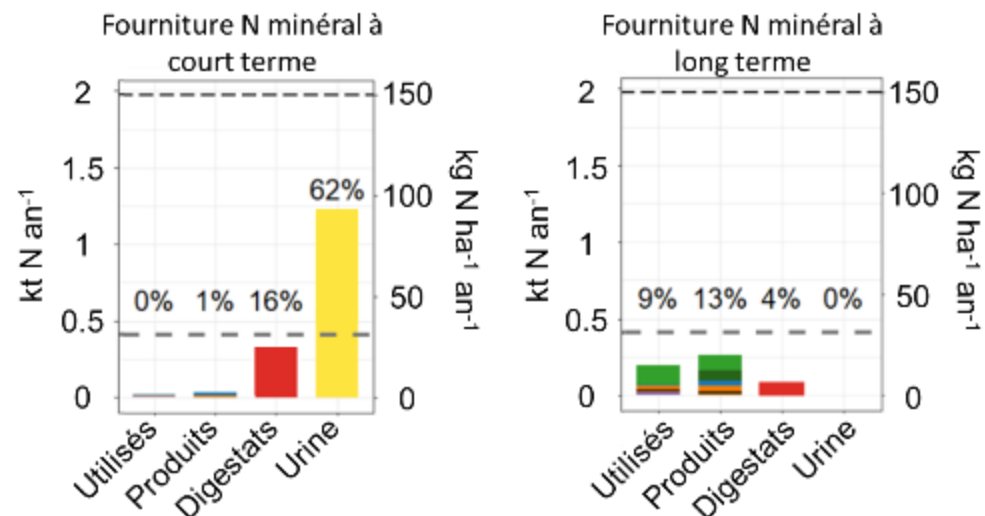


Station d'épuration de Versailles
(www.renaissancedupatrimoine.com)



Des potentiels localement plus importants

- Faible contribution à court ou long terme aux besoins N actuels, potentiel des digestats ou de l'urine
- Scénario AB : autonomie N + accessible

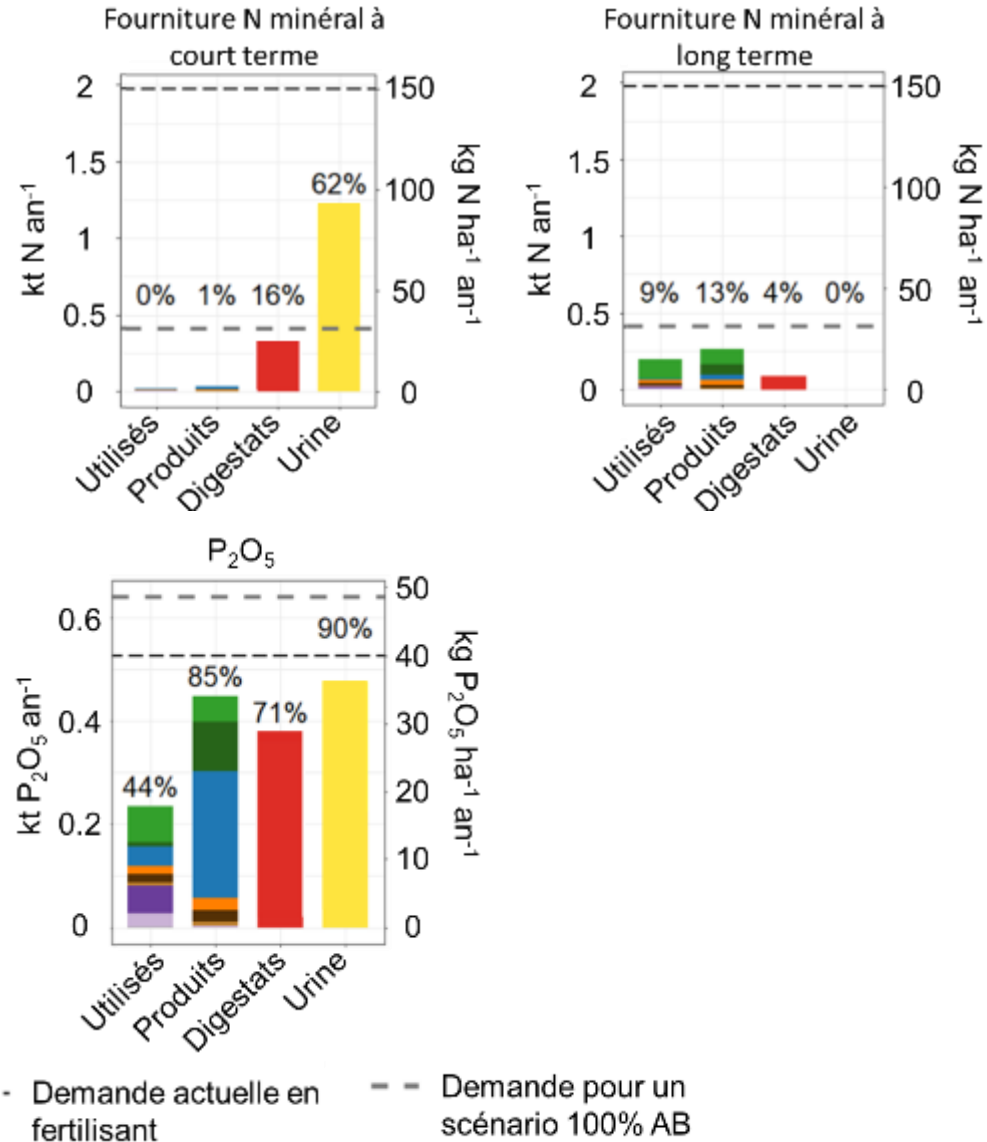


adapté de Moinard et al. (2021)

--- Demande actuelle en fertilisant - - Demande pour un scénario 100% AB

Des potentiels localement plus importants

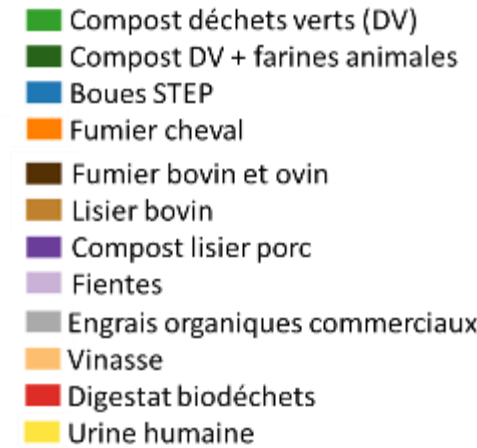
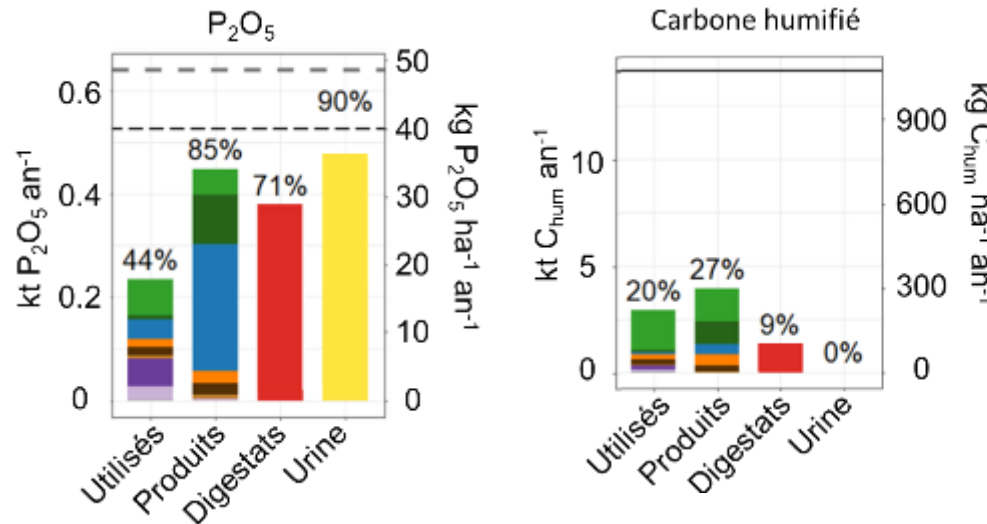
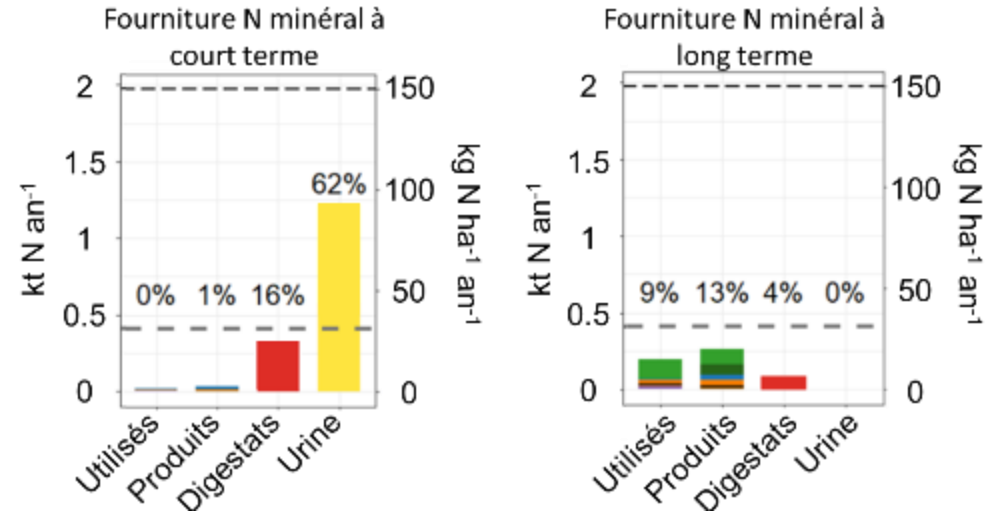
- Faible contribution à court ou long terme aux besoins N actuels, potentiel des digestats ou de l'urine
- Scénario AB : autonomie N + accessible
- Contribution aux besoins P déjà forte, potentiel + important si relocalisation du recyclage (boues)



adapté de Moinard et al. (2021)

Des potentiels localement plus importants

- Faible contribution à court ou long terme aux besoins N actuels, potentiel des digestats ou de l'urine
- Scénario AB : autonomie N + accessible
- Contribution aux besoins P déjà forte, potentiel + important si relocalisation du recyclage (boues)
- Contribution non négligeable au stockage de C par rapport aux résidus de culture

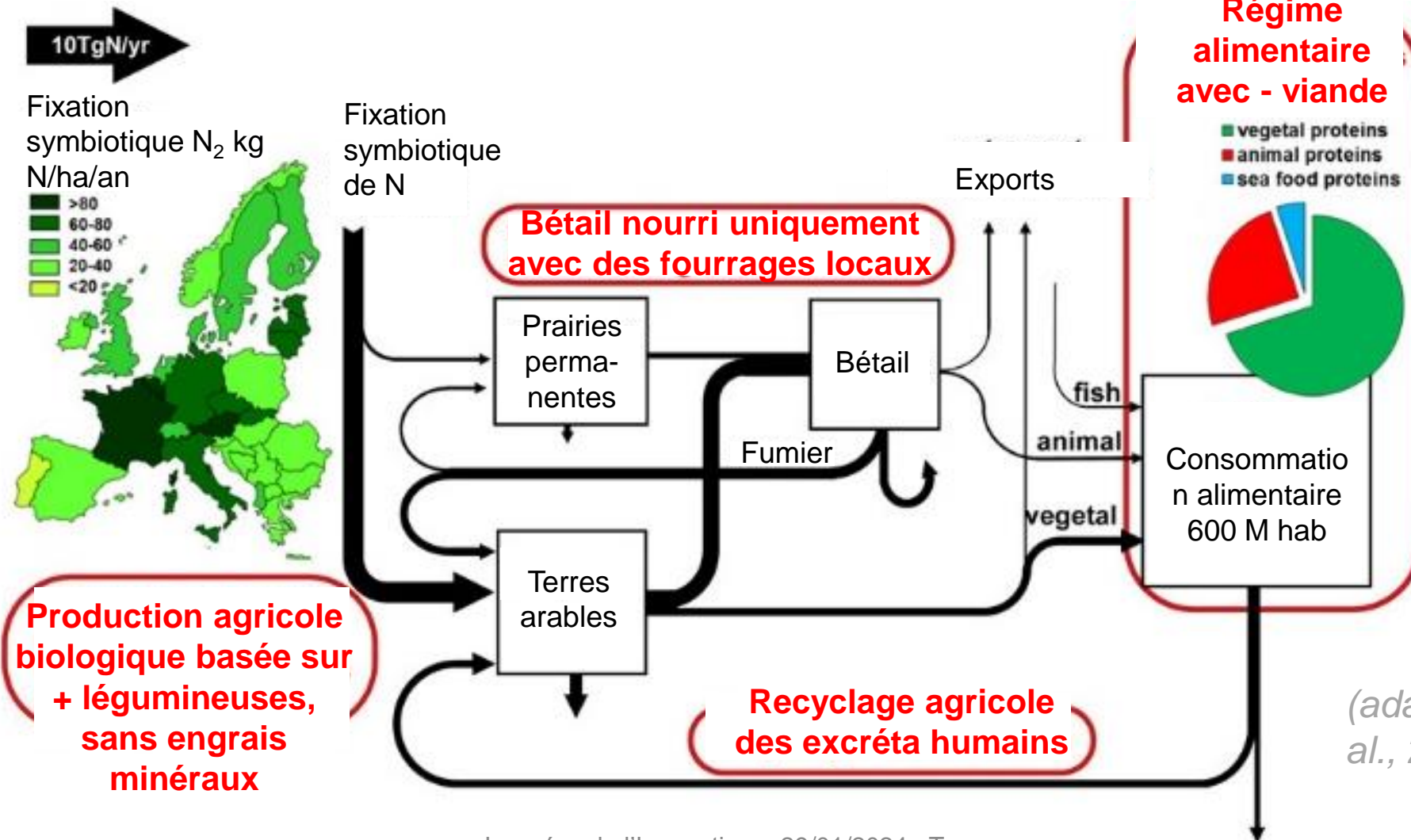


--- Demande actuelle en fertilisant - - Demande pour un scénario 100% AB — C des résidus de culture

adapté de Moinard et al. (2021)

Bouclage du cycle du N (et P, K ?)

- Possibilité de nourrir la population européenne sans engrais N ni importation et en bouclant le « cycle du N »



(adapté de Billen et al., 2021)



Conclusion

- Grande diversité de PRO issus d'activités diverses + divers traitements
- Effluents d'élevage bruts restent dominants
- Efficacité pour substituer les engrais minéraux (NKP) variable selon les PRO, avec certaines dynamiques encore mal comprises (ex : disponibilité du P en sol calcaire)
- La plupart des déchets organiques déjà valorisée en agriculture → importance de maintenir le recyclage agricole existant mais potentiel additionnel limité (sauf urine)
- Principale évolution envisageable :
 - Court terme : développement de la méthanisation et du recyclage des déchets alimentaires
 - Long terme : collecte sélective des urines, mais nombreux verrous
- Pas que des fertilisants NPK : ne pas oublier les effets amendants après des apports répétés
- Questions des contaminants et de l'évaluation écotox toujours à approfondir
- Recyclage des déchets organiques devra être combiné avec d'autres leviers pour tendre vers l'autonomie de l'agriculture en fertilisants

Organisé par :



Membre de :



En partenariat avec les filières
(Intercéréales, SEMAE, FNPSMS, CNIPT,
GIPT, CIPALIN, FNAMS, FNPT)

