

Livre Blanc Céréales
Gembloux, 21 février 2024

Fertiliser avec des produits résiduaux organiques : quels potentiels et limites ?

Florent Levavasseur, Sabine Houot

INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, Palaiseau, France

Les Produits Résiduaire 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)*



Lisier

Effets du recyclage des PRO en agriculture

- + Fourniture de nutriments → augmentation des rendements et/ou substitution d'engrais minéraux
- + Augmentation de la matière organique du sol et des propriétés physiques et biologiques associées
- Contaminations des sols
- Emissions vers l'eau et l'air

Des effets à court terme, d'autres à long terme après apports répétés



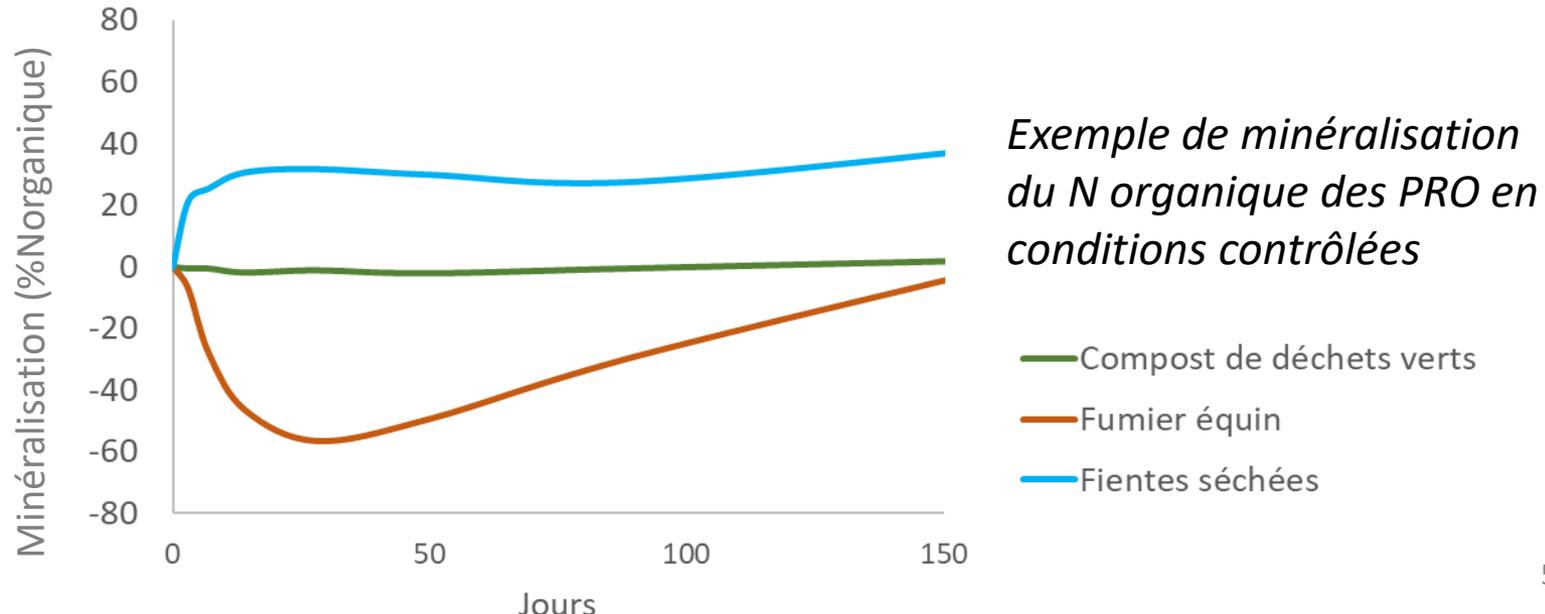
Plan

- Introduction
- Intérêt agronomique
 - Valeur fertilisante
 - Valeur amendante
 - Production agricole
- Impacts environnementaux
 - Pertes de nutriments
 - Bilan gaz à effet de serre
 - Contaminants
- Gisement / potentiel besoin de l'agriculture
- Conclusion

Valeur fertilisante azotée à court terme

- 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)	



Coefficient d'équivalence engrais

- Efficacité relative des PRO / engrais minéral = coefficient d'équivalence engrais (KEQ, NFRV, MFE...)

Ex : KEQ PRO = 40% → 100 kg N de PRO = 40 kg N engrais minéral

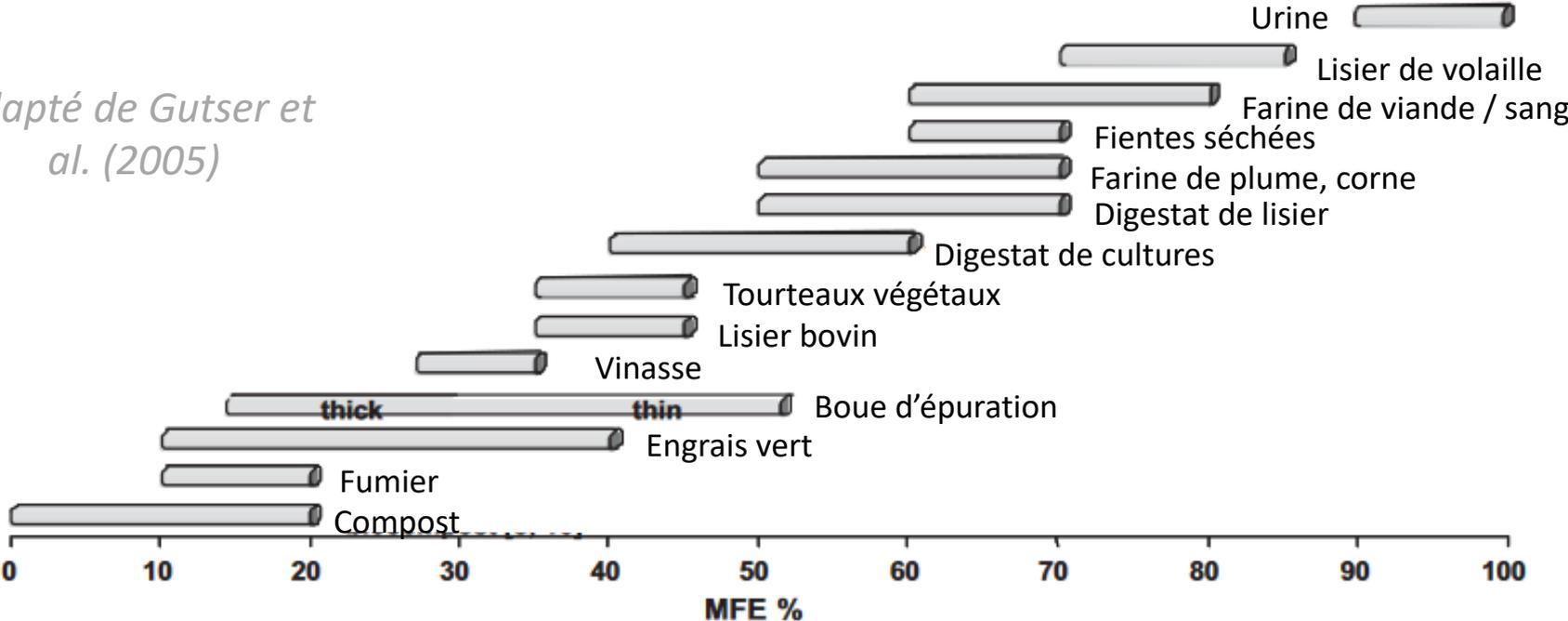
Coefficient d'équivalence engrais

- Efficacité relative des PRO / engrais minéral = coefficient d'équivalence engrais (KEQ, NFRV, MFE...)

Ex : KEQ PRO = 40% → 100 kg N de PRO = 40 kg N engrais minéral

- Forte variabilité des teneurs en N minéral et des teneurs et forme de N organique entre types de PRO → forte variabilité du KEQ
- KEQ dépend aussi des pratiques d'apport (période, météo, culture...)
- KEQ ↗ après des apports répétés

Adapté de Gutser et al. (2005)

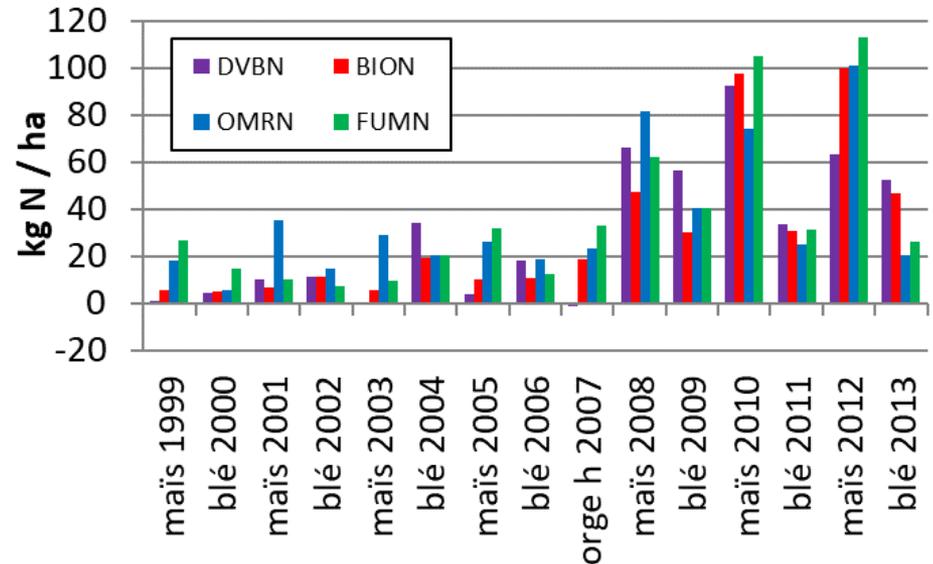


Valeur fertilisante azotée à long terme

- 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)

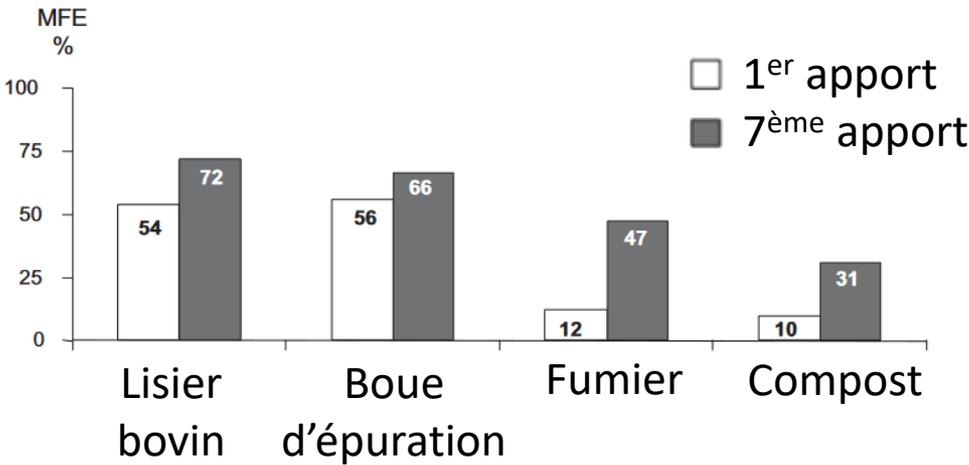
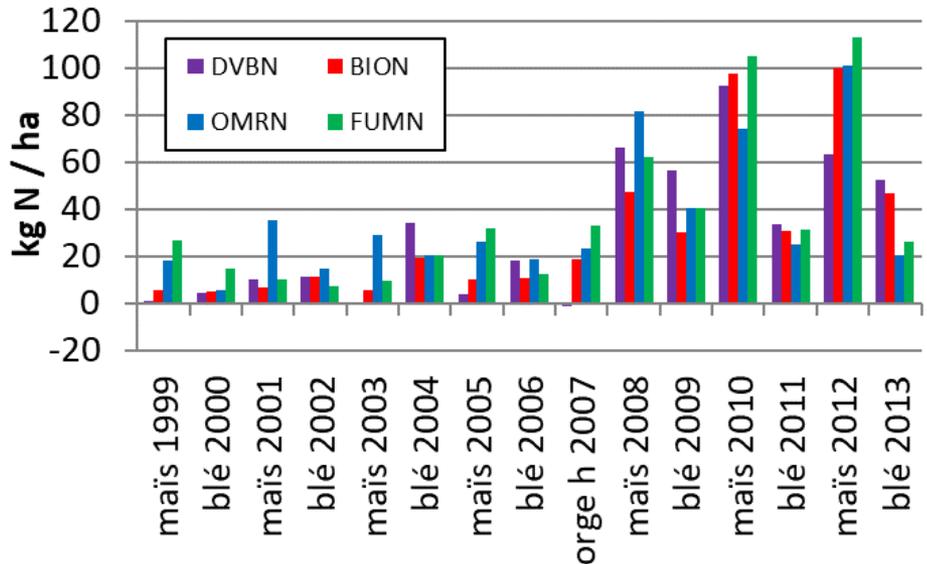


Valeur fertilisante azotée à long terme

- 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

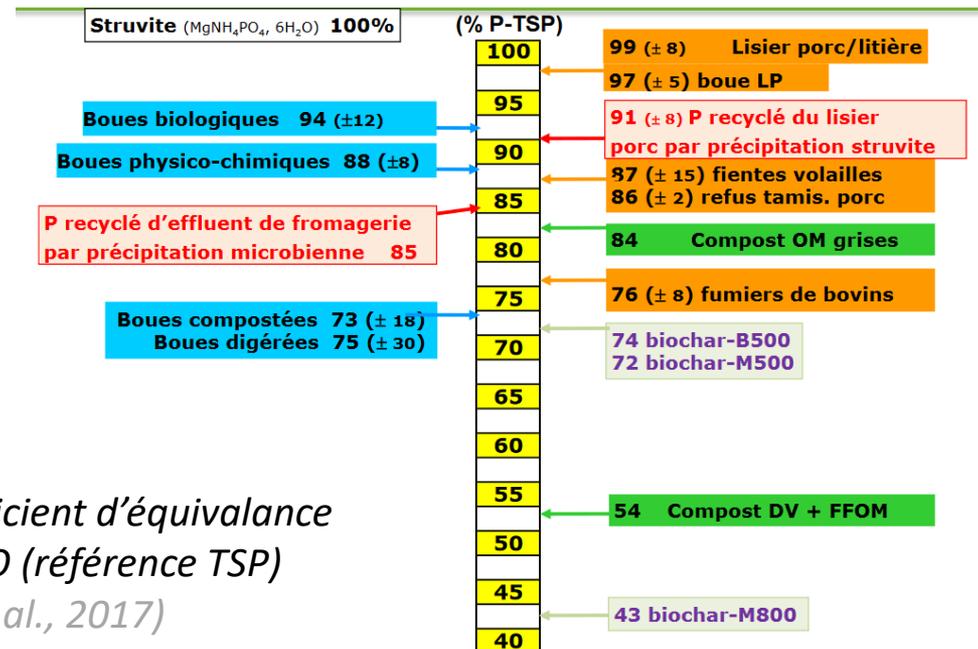
Essai QualiAgro : épandage de 3 composts urbains (*biodéchets*, *boue*, *OMR*) et d'un *fumier bovin* tous les 2 ans (4 t C/ha, soit 20 t/ha à 35 t/ha)



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

Valeur fertilisante P et K

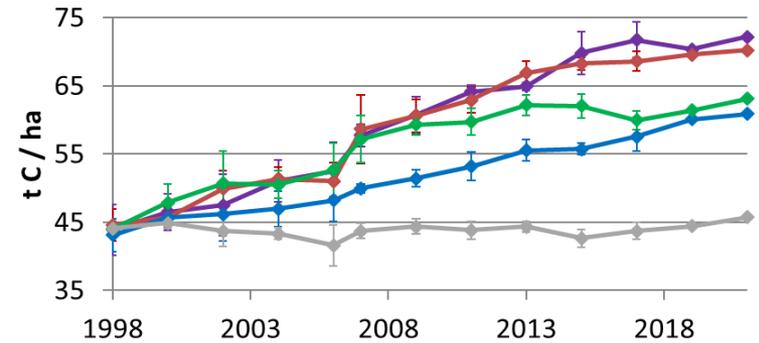
- Forte variabilité des teneurs en P et K entre PRO
- Coefficient d'équivalence engrais P très variables entre PRO, entre contextes pédoclimatiques, méthodes d'évaluation → résultats contrastés dans la littérature (*Jordan-Meille et al., 2017, Christiansen et al., 2020*)
- K généralement considéré entièrement disponible (équivalent KCl) (*Wen et al., 1997*)
- Des dynamiques parfois mal comprises en sol calcaire (*Chen et al., 2022*)



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

Augmentation de la matière organique du sol

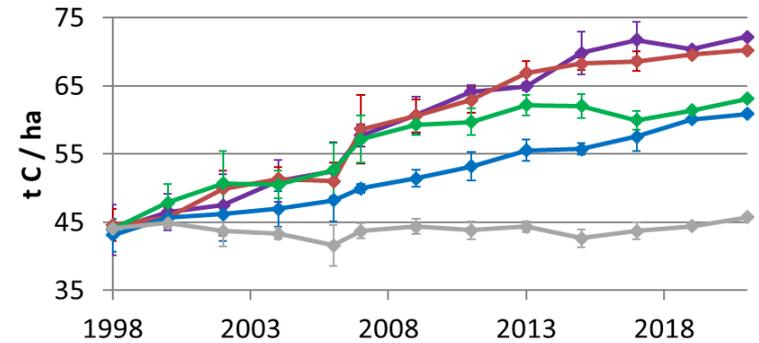
- Apports répétés de PRO ↗ matière organique des sols (*Levavasseur et al., 2020*) :
 - + ↗ avec + apports de C (+ dose, + fréquent)
 - + ↗ si matière organique du PRO + stable (compost...)



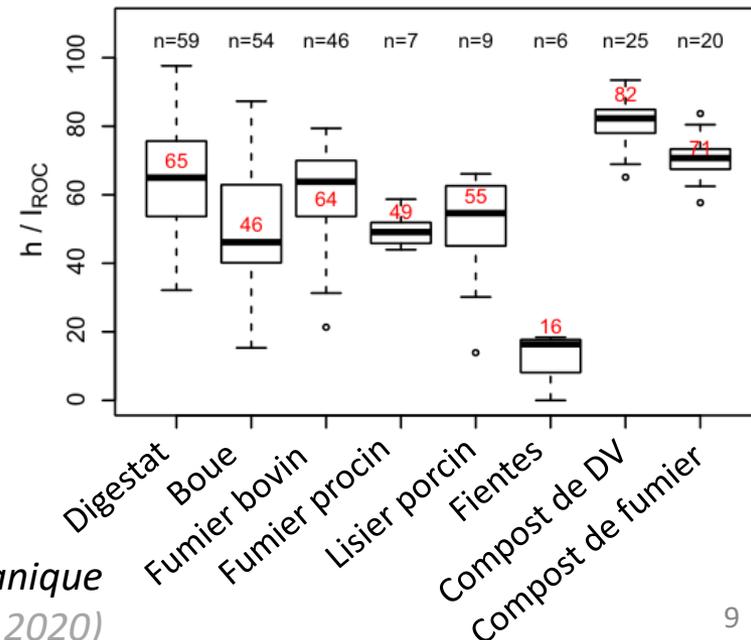
Evolution des stocks de C dans l'essai QualiAgro (N+) avec différents PRO apportés à la même dose de C (Compost DV + boue (DVB), Compost DV + biodéchets (BIO), Fumier bovin (FUM), Compost d'ordures ménagères (OMR), Témoin sans PRO (TEM))

Augmentation de la matière organique du sol

- Apports répétés de PRO \nearrow matière organique des sols (Levavasseur et al., 2020) :
 - + \nearrow avec + apports de C (+ dose, + fréquent)
 - + \nearrow si matière organique du PRO + stable (compost...)
- Stabilité de la MO des PRO variable entre PRO
- Possibilité de l'estimer au champ (long), ou via des analyses de laboratoire (incubation, indicateur ISMO...)



Evolution des stocks de C dans l'essai QualiAgro (N+) avec différents PRO apportés à la même dose de C (Compost DV + boue (DVB), Compost DV + biodéchets (BIO), Fumier bovin (FUM), Compost d'ordures ménagères (OMR). Témoin sans PRO (TEM))



Indice de stabilité de la matière organique de différents PRO (Levavasseur et al. 2020)

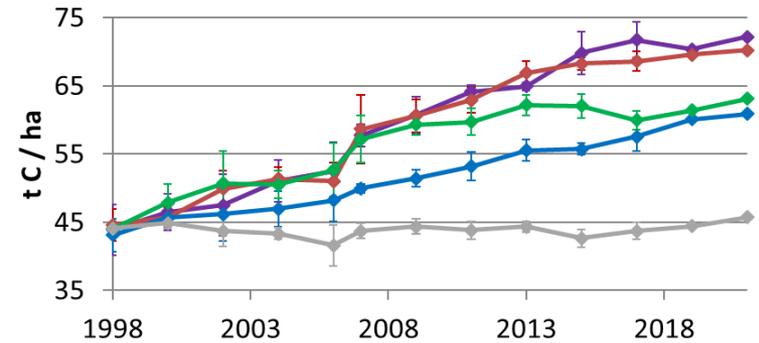
Augmentation de la matière organique du sol

- Apports répétés de PRO \nearrow matière organique des sols (Levavasseur et al., 2020) :
 - + \nearrow avec + apports de C (+ dose, + fréquent)
 - + \nearrow si matière organique du PRO + stable (compost...)

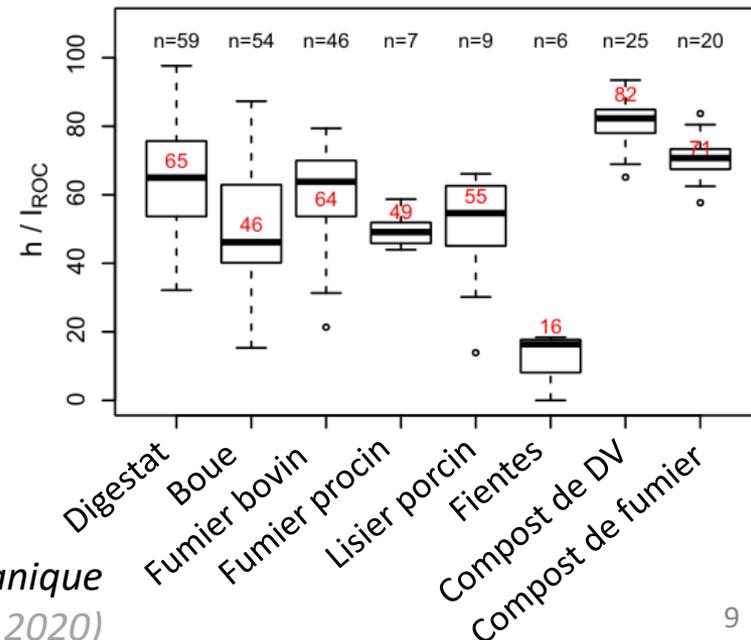
- Stabilité de la MO des PRO variable entre PRO
- Possibilité de l'estimer au champ (long), ou via des analyses de laboratoire (incubation, indicateur ISMO...)

- Intérêt pour \nearrow fertilité du sol et lutter contre le changement climatique, mais potentiel de stockage additionnel très limité (plupart des PRO déjà épandus) (Launay et al., 2021)

Indice de stabilité de la matière organique de différents PRO (Levavasseur et al. 2020)

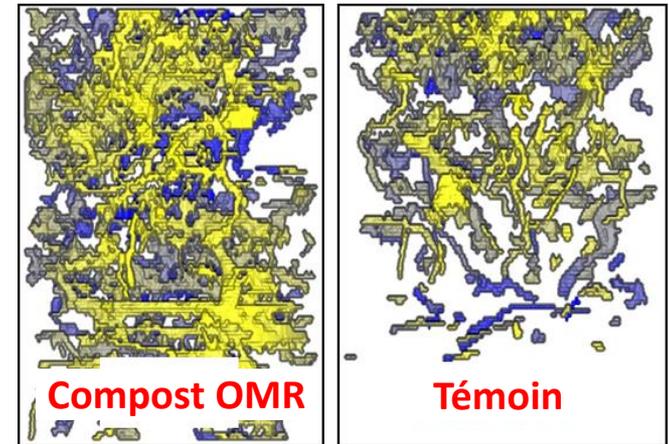


Evolution des stocks de C dans l'essai QualiAgro (N+) avec différents PRO apportés à la même dose de C (Compost DV + boue (DVB), Compost DV + biodéchets (BIO), Fumier bovin (FUM), Compost d'ordures ménagères (OMR). Témoin sans PRO (TEM))



Amélioration de la fertilité physique et biologique du sol

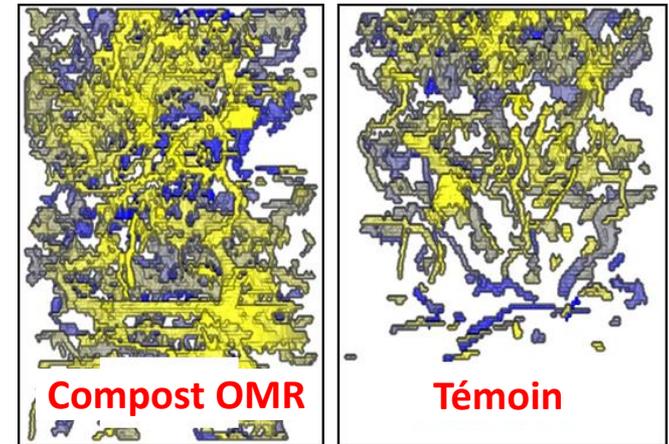
- Amélioration possible des propriétés physiques du sol :
 - ↗ porosité (*Sangotayo et al., 2024*)
 - ↗ stabilité structurale (*Annabi et al., 2011*)
 - Légère ↗ réserve utile (*Eden et al., 2017*)
 - ↘ énergie nécessaire pour travailler le sol (*Peltre et al., 2015*)
- Mais variable et après des apports répétés de fortes doses uniquement



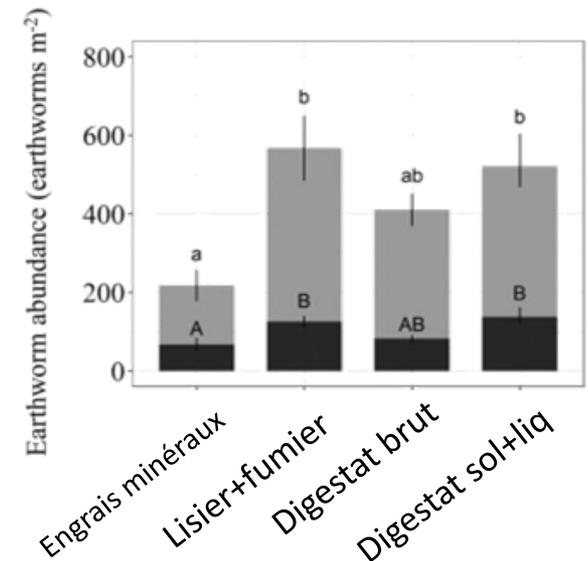
*Macroporosité d'origine lombricienne
(adapté de Capowiez et al., 2009)*

Amélioration de la fertilité physique et biologique du sol

- Amélioration possible des propriétés physiques du sol :
 - ↗ porosité (*Sangotayo et al., 2024*)
 - ↗ stabilité structurale (*Annabi et al., 2011*)
 - Légère ↗ réserve utile (*Eden et al., 2017*)
 - ↘ énergie nécessaire pour travailler le sol (*Peltre et al., 2015*)
- Mais variable et après des apports répétés de fortes doses uniquement
- Augmentation de l'activité biologique des sols (*Moinard et al., 2021, Sadet-Bourgeteau et al., 2018*)



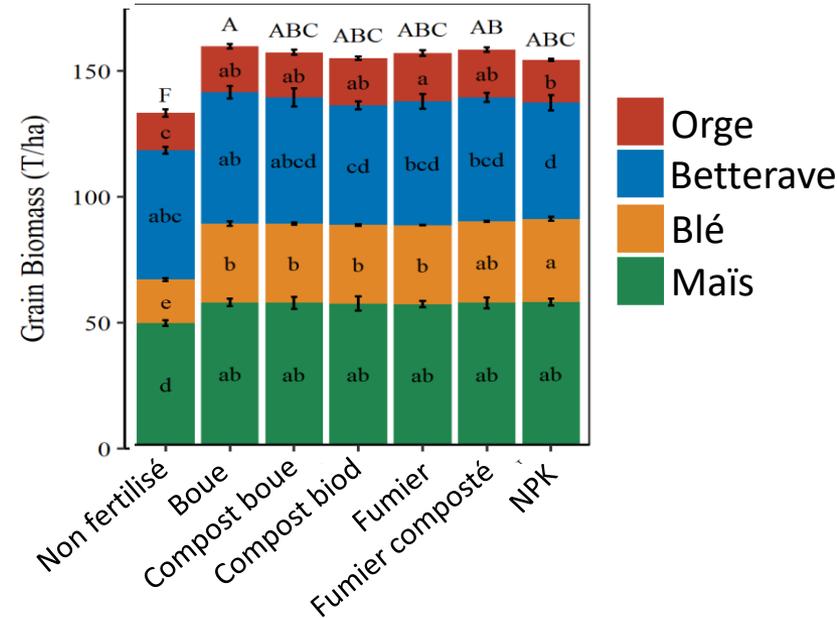
Macroporosité d'origine lombricienne
(adapté de Capowiez et al., 2009)



Abondance de vers de terre après 2 ans d'apport à MétaMétha (adapté de Moinard et al., 2021b) 10

Production agricole avec les PRO

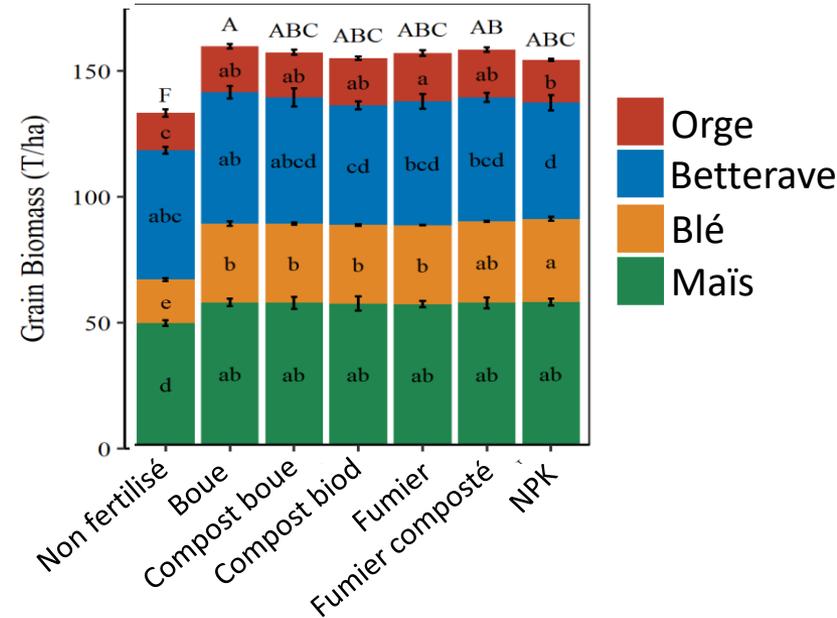
- Avec fertilisation minérale optimale, peu d'effets sur le rendement d'apports additionnels de PRO, mais économies d'engrais possibles (Hijbeek et al., 2016, Zavattaro et al., 2017, Chen et al., 2022)



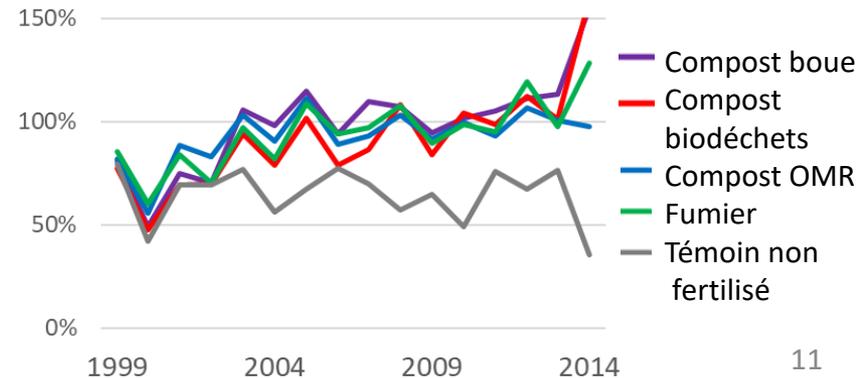
Rendements cumulés (2000-2018) sur l'essai de Colmar avec complémentation en N minéral optimale (adapté de Chen et al., 2022)

Production agricole avec les PRO

- Avec fertilisation minérale optimale, peu d'effets sur le rendement d'apports additionnels de PRO, mais économies d'engrais possibles (Hijbeek et al., 2016, Zavattaro et al., 2017, Chen et al., 2022)
- En cas de fertilisation minérale minimale, effets positifs sur le rendement d'apports de PRO, à +/- court terme selon le PRO (fertilisant/amendant) (Blanchet et al., 2016, Chen et al., 2022, Maltas et al., 2018)



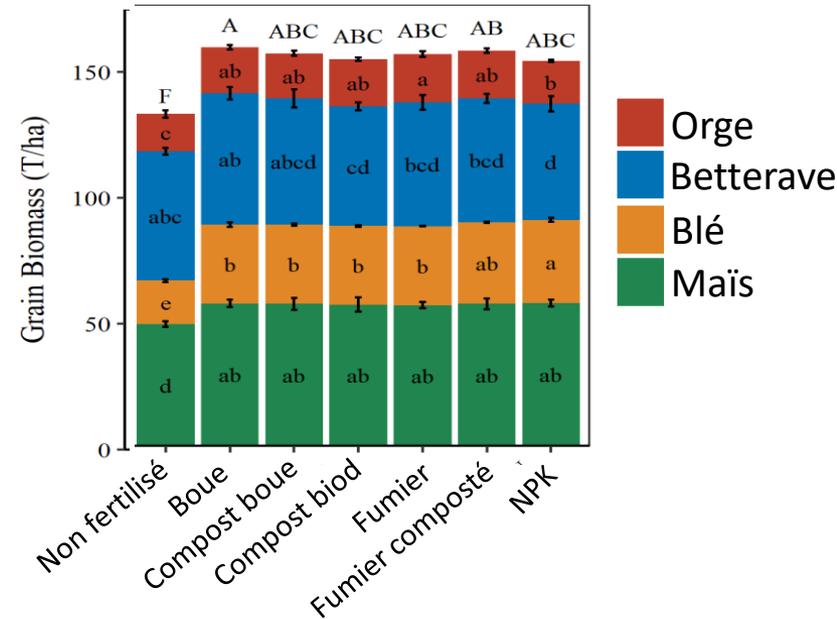
Rendements cumulés (2000-2018) sur l'essai de Colmar avec complémentation en N minéral optimale (adapté de Chen et al., 2022)



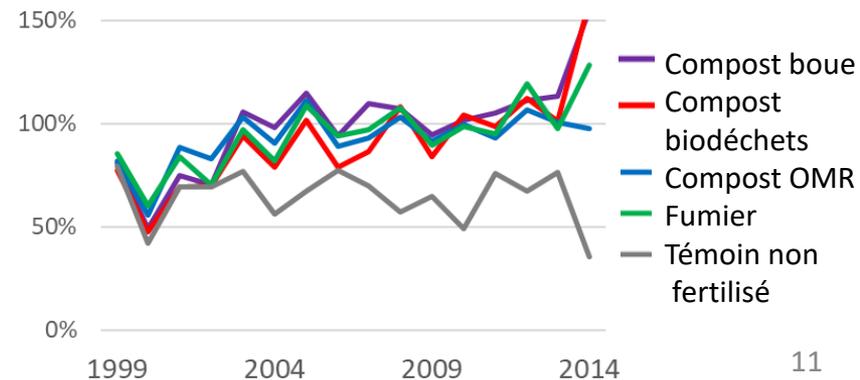
Rendement relatif au témoin N minéral à QualiAgro sur les traitements avec complémentation minimale en N minéral (données internes ECOSYS)

Production agricole avec les PRO

- Avec fertilisation minérale optimale, peu d'effets sur le rendement d'apports additionnels de PRO, mais économies d'engrais possibles (*Hijbeek et al., 2016, Zavattaro et al., 2017, Chen et al., 2022*)
- En cas de fertilisation minérale minimale, effets positifs sur le rendement d'apports de PRO, à +/- court terme selon le PRO (fertilisant/amendant) (*Blanchet et al., 2016, Chen et al., 2022, Maltas et al., 2018*)
- Teneur élevée en matière organique des sols peut limiter la variabilité des rendements (*Pan et al., 2009*)



Rendements cumulés (2000-2018) sur l'essai de Colmar avec complémentation en N minéral optimale (adapté de Chen et al., 2022)



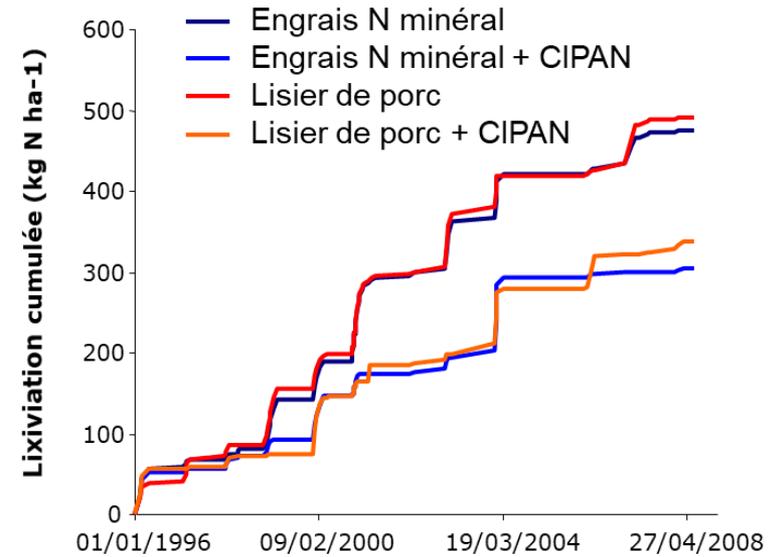
Rendement relatif au témoin N minéral à QualiAgro sur les traitements avec complémentation minimale en N minéral (données internes ECOSYS)

Plan

- Introduction
- Intérêt agronomique
 - Valeur fertilisante
 - Valeur amendante
 - Production agricole
- Impacts environnementaux
 - Pertes de nutriments
 - Bilan gaz à effet de serre
 - Contaminants
- Gisement / potentiel besoin de l'agriculture
- Conclusion

Pertes de nutriments – lixiviation de nitrates

- A court terme :
 - N-NH₄ des PRO rapidement nitrifié dans le sol et nitrates sensibles à la lixiviation : pollution des eaux et perte d'efficacité
 - Pas ↗ risque de lixiviation si apports raisonnés : bonne dose, bonne période, synchronisme prélèvement plante (Chen et al., 2022, Morvan et al., 2017)

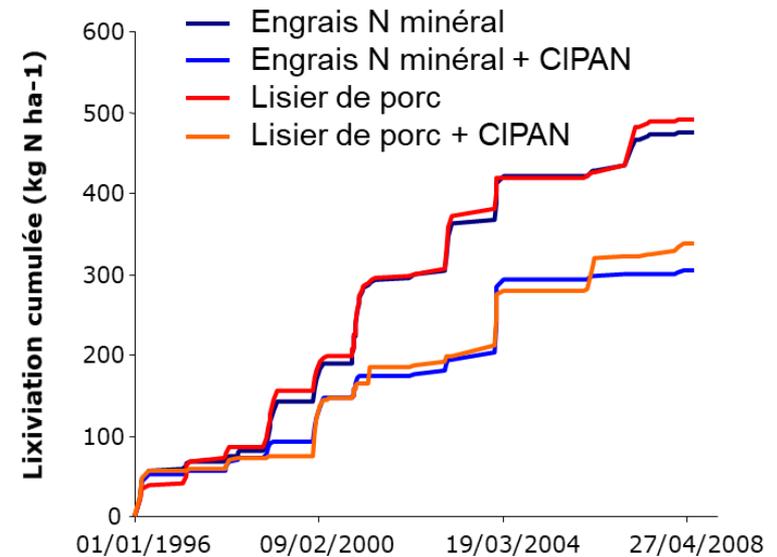


Essai lysimétrique INRA de Rennes Champ
Noel (Morvan et al., 2016)

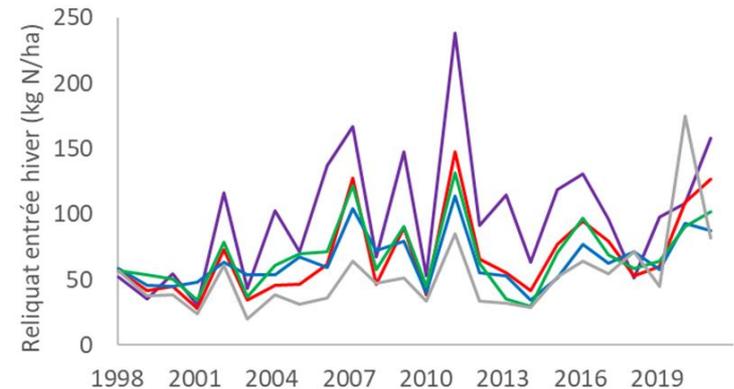
Pertes de nutriments – lixiviation de nitrates

- A court terme :
 - N-NH₄ des PRO rapidement nitrifié dans le sol et nitrates sensibles à la lixiviation : pollution des eaux et perte d'efficacité
 - Pas ↗ risque de lixiviation si apports raisonnés : bonne dose, bonne période, synchronisme prélèvement plante (Chen et al., 2022, Morvan et al., 2017)

- A long terme, après des apports répétés de PRO amendants, augmentation possible de la lixiviation suite à l'augmentation de la fourniture de N par le sol, même après arrêt des apports (Asada et al., 2015, Kyte et al., 2023)



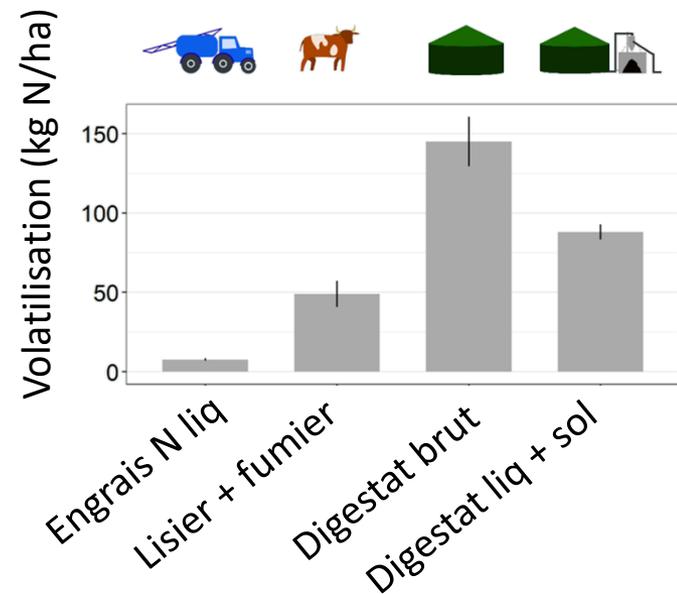
Essai lysimétrique INRA de Rennes Champ Noël (Morvan et al., 2016)



Reliquat entrée hiver à QualiAgro (Compost DV + boue (DVB), Compost DV + biodéchets (BIO), Fumier bovin (FUM), Compost d'ordures ménagères (OMR), Témoin sans PRO (TEM))

Autres pertes de nutriments

- Volatilisation ammoniacale :
 - perte de N potentiellement importante pour les PRO à forte teneur en N-NH₄ (lisier, digestat...)
 - Pollution de l'air + perte efficacité fertilisante
 - Peut être > ou < à celle des engrais minéraux selon les cas considérés (Pedersen et al., 2023)
 - A limiter dans tous les cas : bonnes conditions météo, matériel adapté...



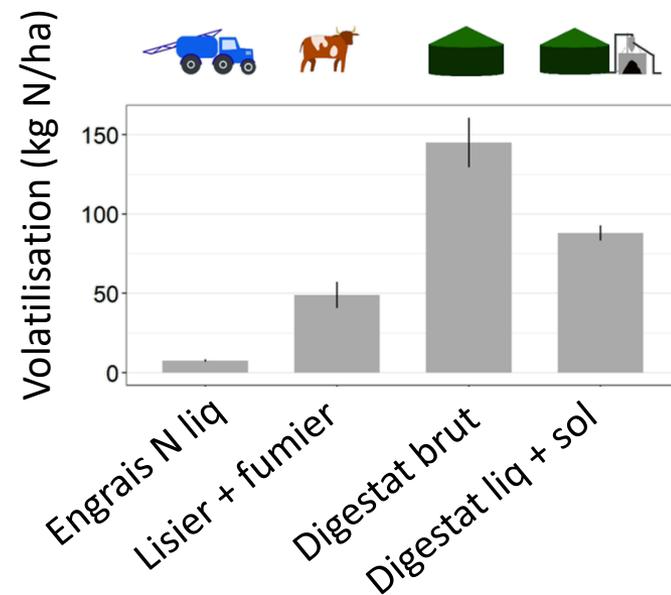
Exemple de mesure de volatilisation ammoniacale sur une succession de 3 ans (Moinard, 2021)



Injection

Autres pertes de nutriments

- Volatilisation ammoniacale :
 - perte de N potentiellement importante pour les PRO à forte teneur en N-NH₄ (lisier, digestat...)
 - Pollution de l'air + perte efficacité fertilisante
 - Peut être > ou < à celle des engrais minéraux selon les cas considérés (Pedersen et al., 2023)
 - A limiter dans tous les cas : bonnes conditions météo, matériel adapté...
- Emissions de N₂O (gaz à effet de serre) :
 - + d'émissions / témoin non fertilisé
 - Variable selon les PRO, mais pas de consensus sur le différentiel / engrais minéral (Charles et al., 2017, Walling et., 2020)



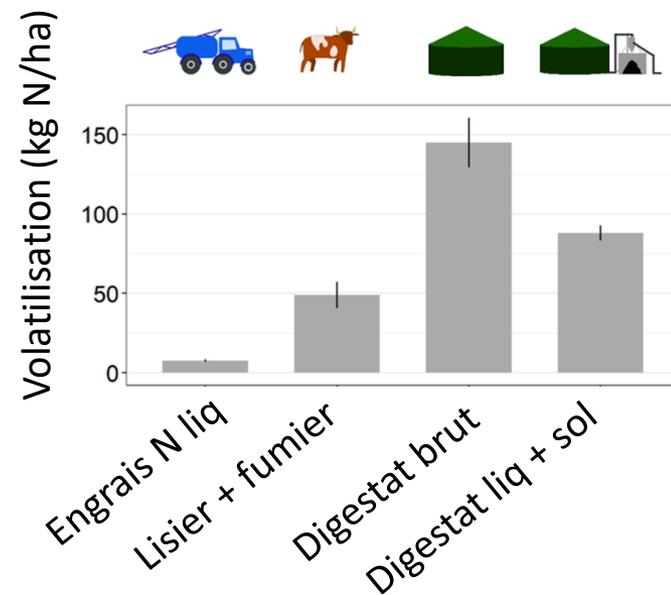
Exemple de mesure de volatilisation ammoniacale sur une succession de 3 ans (Moinard, 2021)



Injection

Autres pertes de nutriments

- Volatilisation ammoniacale :
 - perte de N potentiellement importante pour les PRO à forte teneur en N-NH₄ (lisier, digestat...)
 - Pollution de l'air + perte efficacité fertilisante
 - Peut être > ou < à celle des engrais minéraux selon les cas considérés (Pedersen et al., 2023)
 - A limiter dans tous les cas : bonnes conditions météo, matériel adapté...
- Emissions de N₂O (gaz à effet de serre) :
 - + d'émissions / témoin non fertilisé
 - Variable selon les PRO, mais pas de consensus sur le différentiel / engrais minéral (Charles et al., 2017, Walling et., 2020)
- Pertes de phosphore : par ruissellement et lessivage. A limiter en adaptant les doses de P apporté, limitant les épandages d'hiver, en enfouissant... (King et al., 2018)



Exemple de mesure de volatilisation ammoniacale sur une succession de 3 ans (Moinard, 2021)



Injection

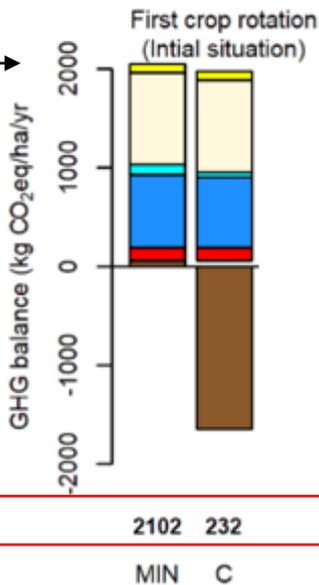
Bilan gaz à effet de serre

- Quel bilan entre effets favorables et défavorables ?
- Des résultats variables dans la littérature selon les hypothèses considérées, les filières alternatives considérées, etc. (*Bong et al., 2017*)

Bilan gaz à effet de serre

- Quel bilan entre effets favorables et défavorables ?
- Des résultats variables dans la littérature selon les hypothèses considérées, les filières alternatives considérées, etc. (*Bong et al., 2017*)
- Ex : grandes cultures fertilisées avec des engrais minéraux (MIN) ou amendées avec du compost de déchets vert et fertilisées avec des engrais minéraux (C) :
 - 1^{ère} rotation : bilan GES amélioré avec compost grâce au stockage de C

Sans les émissions amont des traitements →



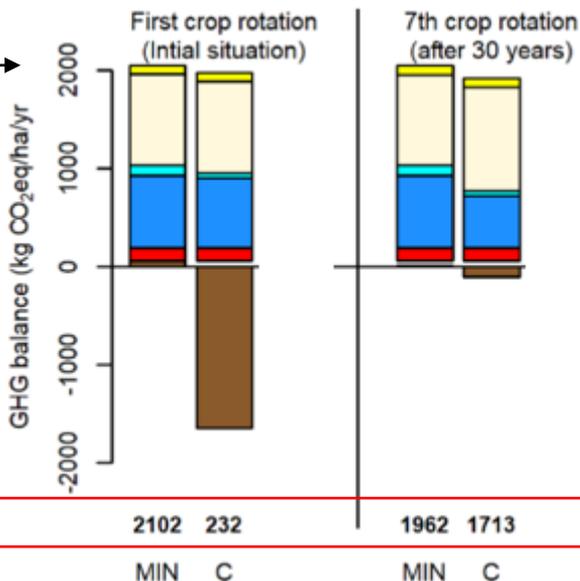
Bilan GES

Adapté de Levavasseur & Houot (2023)

Bilan gaz à effet de serre

- Quel bilan entre effets favorables et défavorables ?
- Des résultats variables dans la littérature selon les hypothèses considérées, les filières alternatives considérées, etc. (*Bong et al., 2017*)
- Ex : grandes cultures fertilisées avec des engrais minéraux (MIN) ou amendées avec du compost de déchets vert et fertilisées avec des engrais minéraux (C) :
 - 1^{ère} rotation : bilan GES amélioré avec compost grâce au stockage de C
 - 7^{ème} rotation : stock C à l'équilibre, mais économies d'engrais N améliorent le bilan

Sans les émissions amont des traitements →



Bilan GES

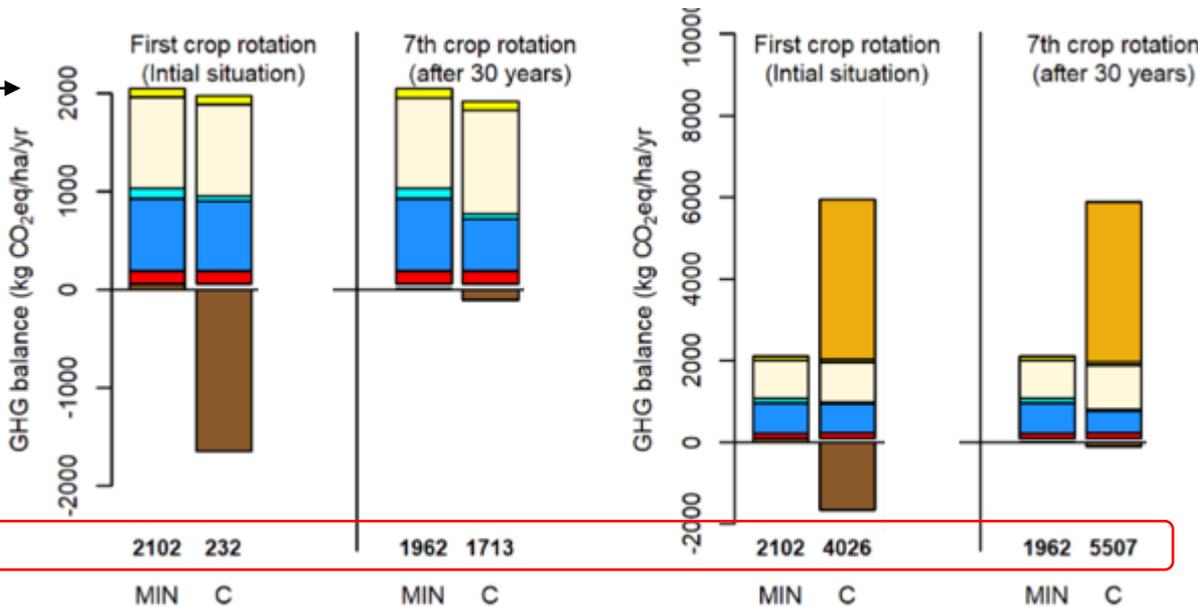
Adapté de Levavasseur & Houot (2023)

Bilan gaz à effet de serre

- Quel bilan entre effets favorables et défavorables ?
- Des résultats variables dans la littérature selon les hypothèses considérées, les filières alternatives considérées, etc. (*Bong et al., 2017*)
- Ex : grandes cultures fertilisées avec des engrais minéraux (MIN) ou amendées avec du compost de déchets vert et fertilisées avec des engrais minéraux (C) :
 - 1^{ère} rotation : bilan GES amélioré avec compost grâce au stockage de C
 - 7^{ème} rotation : stock C à l'équilibre, mais économies d'engrais N améliorent le bilan
 - Avec émissions des traitements, bilan GES + favorable sans compost

⚠ Emissions amont très incertaines / Quelles émissions du traitement alternatif ?

Sans les émissions amont des traitements →



← Avec les émissions amont des traitements

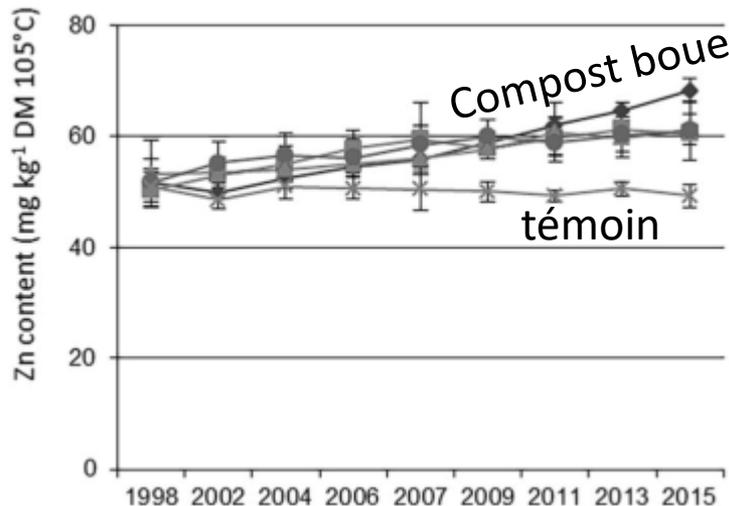
- Soil C storage
- Machinery
- N fertilizer production
- PK fertilizer production
- Direct field N₂O
- Indirect field N₂O
- OW treatment / storage

Bilan GES

Adapté de Levavasseur & Houot (2023)

Contaminants métalliques (ETM)

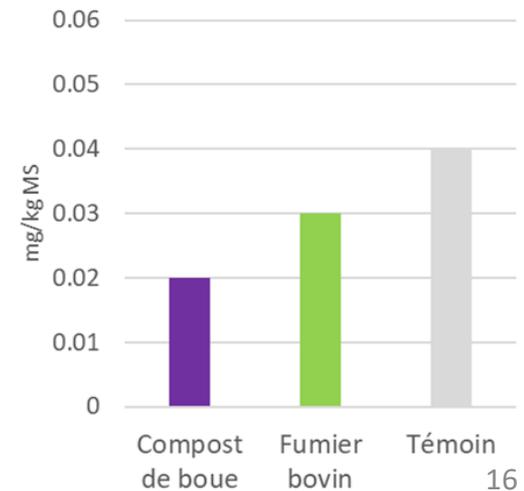
- Variabilité des teneurs en ETM entre PRO, PRO urbains souvent + contaminés
- Exemple du devenir des ETM à QualiAgro (France) après ≈ 20 ans d'apports à « forte » dose :
 - Très peu de « sorties » : accumulation de métaux dans les sols
 - Effets visibles que pour Cu et Zn sur les teneurs en métaux totaux 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



Michaud et al., (2019, 2021)

Teneur en zinc total dans les sols à QualiAgro

Teneur moyenne en cadmium des grains à QualiAgro



Autres contaminants

- Problématique complexe ! (*Bünemann et al., 2024*)
 - 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
 - Risque de dissémination d'antibiorésistance
 - Evaluation écotoxicologique difficile

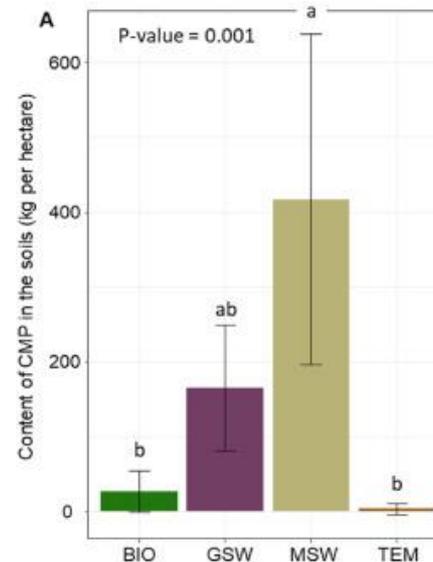
Teneur en microplastiques des sols après 20 ans d'apport (*Colombini et al., 2022*)

BIO : compost de biodéchets triés à la source

GWS : compost de boue

MSW : compost d'ordures ménagères

TEM : témoin sans PRO



Plan

- Introduction
- Intérêt agronomique
 - Valeur fertilisante
 - Valeur amendante
 - Production agricole
- Impacts environnementaux
 - Pertes de nutriments
 - Bilan gaz à effet de serre
 - Contaminants
- Gisement / potentiel besoin de l'agriculture
- Conclusion

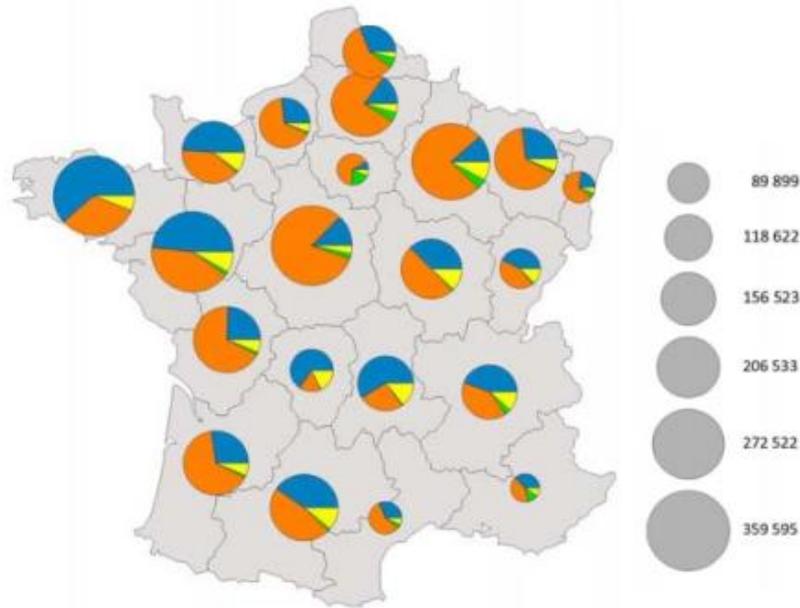
Gisements disponibles / besoin



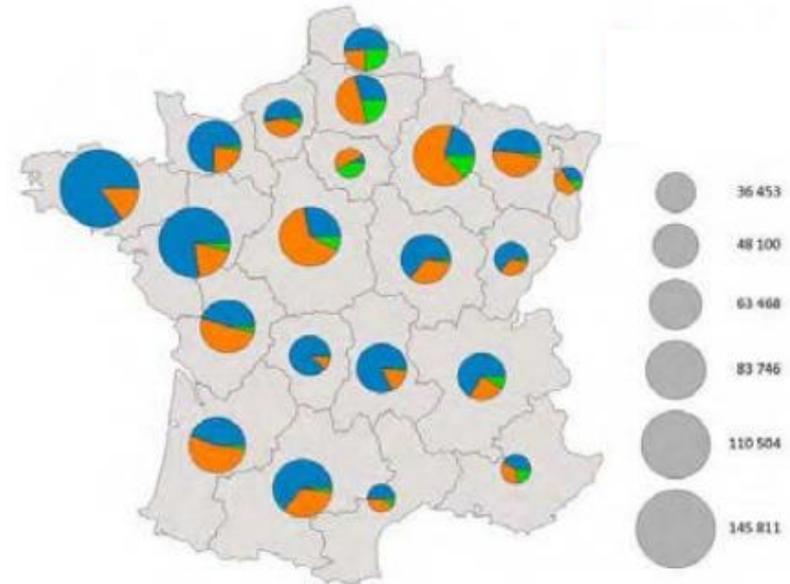
Données incertaines et anciennes

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

Azote



Phosphore



 Excrétion animale

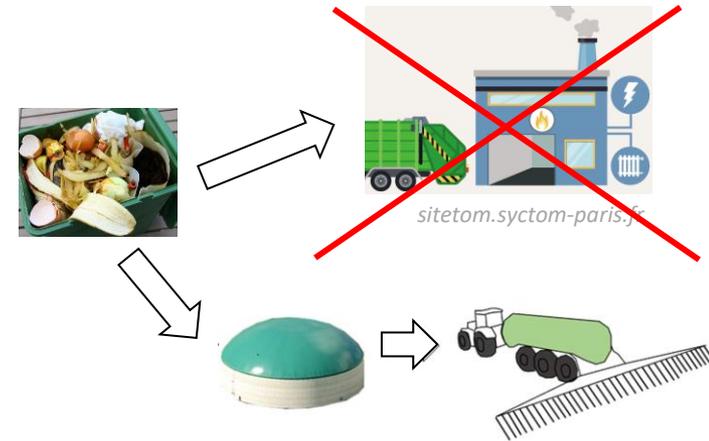
 Fertilisants minéraux

 Autres apports organiques

 Fixation symbiotique

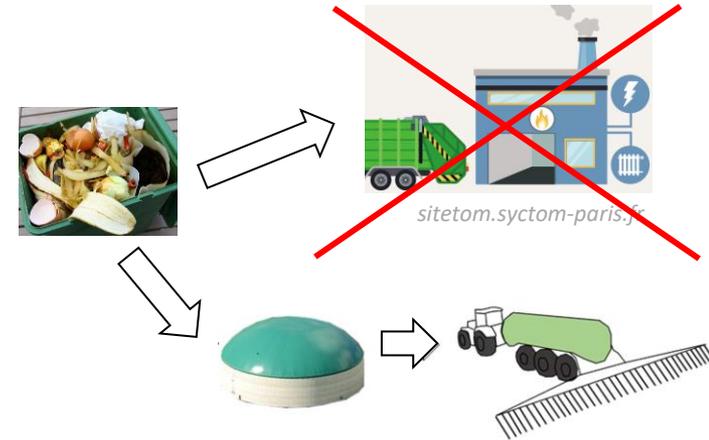
Opportunités futures : compost et digestat de biodéchets

- 1^{er} janvier 2024 (en France) : 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



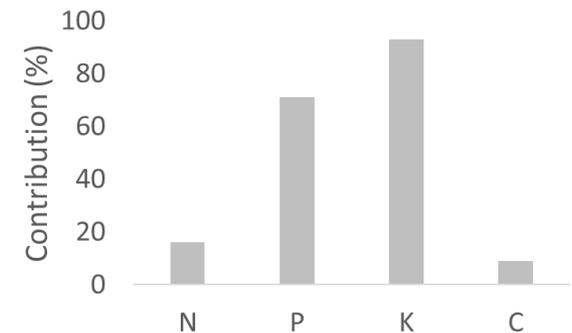
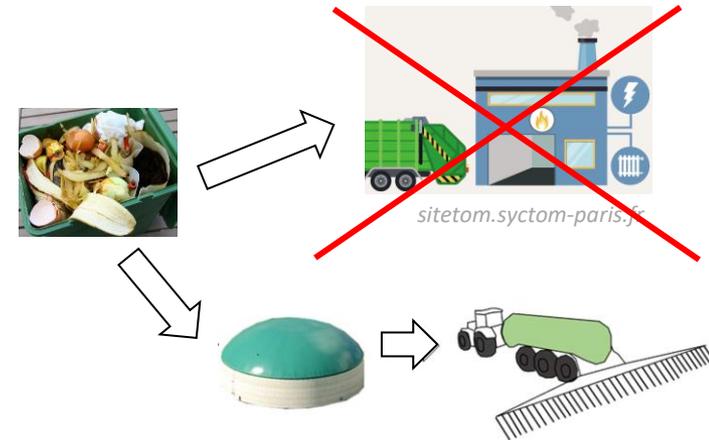
Opportunités futures : compost et digestat de biodéchets

- 1^{er} janvier 2024 (en France) : 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
- Bonne valeur fertilisante N des digestats de biodéchets : KEQ \approx 65 % (*Martin et al., 2023*)



Opportunités futures : compost et digestat de biodéchets

- 1^{er} janvier 2024 (en France) : 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
- Bonne valeur fertilisante N des digestats de biodéchets : KEQ \approx 65 % (*Martin et al., 2023*)
- Objectif de prévention des déchets et compostage de proximité prioritaire : gisement additionnel de PRO (compost, digestat) restera limité (*icare&consult, 2020*)
- Potentiel autour des unités de traitement en zones périurbaines (*Moinard et al., 2021*)

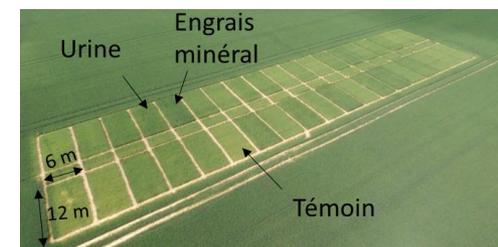
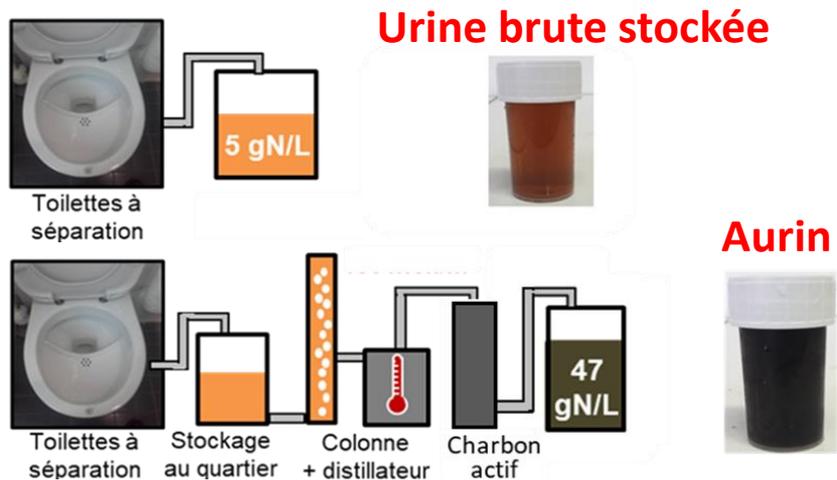


Contribution théorique des biodéchets sur la plaine de Versailles par rapport aux besoins des cultures (NPK) ou aux apports des résidus de culture (C)

(adapté de Moinard et al., 2021) 20

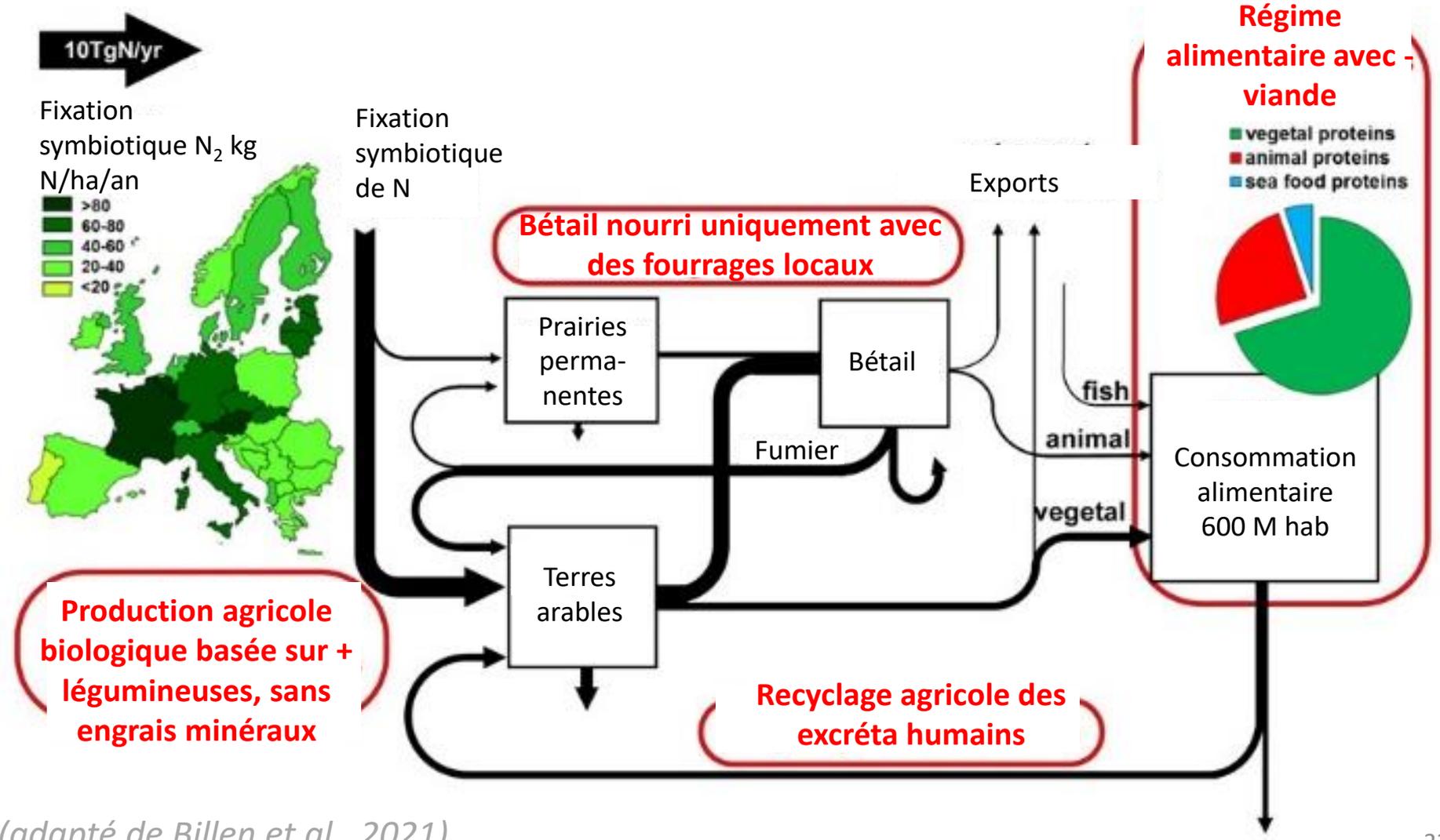
Opportunités futures : urines humaines collectées à la source

- Evite la dilution et la contamination des urines dans les eaux usées
- Permet la récupération du N :
 - 10% seulement recyclé en France à l'heure actuelle via les boues (*Stark et al., 2024*)
 - Recyclage de tout le N des urines couvrirait 140% des besoins N en Île-de-France, 20% à l'échelle mondiale (*Martin, 2020*)
- Bonne efficacité fertilisante / PRO classiques : KEQ = 80% (*Martin et al., 2023*)
- Vigilance : volume à épandre, volatilisation NH_3 , résidus médicamenteux
- Traitements pour concentrer l'urine, stabiliser l'azote, retirer les micropolluants...
- Nombreux verrous : culturel, économique, logistique, réglementaire...



Bouclage des cycles en combinant avec d'autres pratiques

- Possibilité de nourrir la population européenne sans engrais N ni importation, en bouclant le « cycle du N » grâce à une combinaison de pratiques (dont les PRO)



(adapté de Billen et al., 2021)

Plan

- Introduction
- Intérêt agronomique
 - Valeur fertilisante
 - Valeur amendante
 - Production agricole
- Impacts environnementaux
 - Pertes de nutriments
 - Bilan gaz à effet de serre
 - Contaminants
- Gisement / potentiel besoin de l'agriculture
- Conclusion

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
- Effets amendants après des apports répétés
- Questions des contaminants et de l'évaluation écotox toujours à approfondir
- La plupart des déchets organiques déjà valorisée en agriculture → importance de maintenir le recyclage agricole existant mais potentiel additionnel limité (sauf urine)
- Recyclage des déchets organiques devra être combiné avec d'autres leviers pour tendre vers l'autonomie de l'agriculture en fertilisants

Merci pour votre attention



Bibliographie

- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., & Houot, S. (2011). Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.005>
- Asada, K., Eguchi, S., Tsunekawa, A., Tsuji, M., Itahashi, S., & Katou, H. (2015). Predicting nitrogen leaching with the modified LEACHM model : Validation in soils receiving long-term application of animal manure composts. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9690-9>
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Le Noë, J., & Sanz-Cobena, A. (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle : The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4(6), Article 6. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Blanchet, G., Gavazov, K., Bragazza, L., & Sinaj, S. (2016). Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.032>
- Bong, C. P. C., Lim, L. Y., Ho, W. S., Lim, J. S., Klemeš, J. J., Towprayoon, S., Ho, C. S., & Lee, C. T. (2017). A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 146, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.066>
- Bünemann, E. K., Reimer, M., Smolders, E., Smith, S. R., Bigalke, M., Palmqvist, A., Brandt, K. K., Möller, K., Harder, R., Hermann, L., Speiser, B., Oudshoorn, F., Løes, A. K., & Magid, J. (2023). Do contaminants compromise the use of recycled nutrients in organic agriculture? A review and synthesis of current knowledge on contaminant concentrations, fate in the environment and risk assessment. *Science of The Total Environment*, 168901. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168901>
- Charles, A., Rochette, P., Whalen, J. K., Angers, D. A., Chantigny, M. H., & Bertrand, N. (2017). Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments : A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.021>
- Chen, H., Levvasseur, F., Montenach, D., Lollier, M., Morel, C., & Houot, S. (2022). An 18-year field experiment to assess how various types of organic waste used at European regulatory rates sustain crop yields and C, N, P, and K dynamics in a French calcareous soil. *Soil and Tillage Research*, 221, 105415. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105415>
- Christiansen, N. H., Sørensen, P., Labouriau, R., Christensen, B. T., & Rubæk, G. H. (2020). Characterizing phosphorus availability in waste products by chemical extractions and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000015>
- Colombini, G., Rumpel, C., Houot, S., Biron, P., & Dignac, M.-F. (2022). A long-term field experiment confirms the necessity of improving biowaste sorting to decrease coarse microplastic inputs in compost amended soils. *Environmental Pollution*, 315, 120369. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120369>
- Eden, M., Gerke, H. H., & Houot, S. (2017). Organic waste recycling in agriculture and related effects on soil water retention and plant available water : A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0419-9>
- Gutser, R., Ebertseder, Th., Weber, A., Schraml, M., & Schmidhalter, U. (2005). Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/jpln.200520510>
- Hijbeek, R., Ittersum, M. K. van, Berge, H. F. M. ten, Gort, G., Spiegel, H., & Whitmore, A. P. (2016). Do organic inputs matter – a meta-analysis of additional yield effects for arable crops in Europe. *Plant and Soil*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3031-x>
- Houot, S., Pons, M. N., & Pradel, M. (2014). Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'expertise scientifique collective.
- Icare&consult, 2020. Etude prospective fixant des objectifs stratégiques d'augmentation de la part de fertilisants issus de ressources renouvelables. Rapport final.
- Jordan-Meille, L., Morel, C., Salducci, X., & Michaud, J. (2017, novembre 8). Valeur agronomique (C, N, P) de digestats de méthanisation d'origine agricole et agro-alimentaire de Dordogne. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse Comifer Gemas., Nantes.
- King, K. W., Williams, M. R., LaBarge, G. A., Smith, D. R., Reutter, J. M., Duncan, E. W., & Pease, L. A. (2018). Addressing agricultural phosphorus loss in artificially drained landscapes with 4R nutrient management practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(1), Article 1. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.1.35>
- Kyte, E., Cey, E., Hrapovic, L., & Hao, X. (2023). Nitrate in shallow groundwater after more than four decades of manure application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104200. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104200>
- Launay, C., Constantin, J., Chlebowski, F., Houot, S., Graux, A.-I., Klumpp, K., Martin, R., Mary, B., Pellerin, S., & Therond, O. (2021). Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. *Global Change Biology*, 27(8), Article 8. <https://doi.org/10.1111/gcb.15512>
- Levvasseur, F., & Houot, S. (2023). Predicting the short- and long-term effects of recycling organic wastes in cropping systems with the PROLEG tool. *Soil Use and Management*, 39(1), Article 1. <https://doi.org/10.1111/sum.12856>

Bibliographie

- Levasseur, F., Mary, B., Christensen, B. T., Duparque, A., Ferchaud, F., Kätterer, T., Lagrange, H., Montenach, D., Resseguier, C., & Houot, S. (2020). The simple AMG model accurately simulates organic carbon storage in soils after repeated application of exogenous organic matter. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117, 215-229. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10065-x>
- Maltas, A., Kebli, H., Oberholzer, H. R., Weisskopf, P., & Sinaj, S. (2018). The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation & Development*, 29(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/ldr.2913>
- Martin, T. (2020). *L'urine humaine en agriculture : Des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable* [Theses, Université Paris Saclay]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03189185>
- Martin, T. M. P., Levasseur, F., Dion, C., Vidal, M., Genermont, S., Carozzi, M., Esculier, F., & Houot, S. (2023). High fertilizing value but potentially high volatilization of urine based fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10304-x>
- Michaud, A. M., Cambier, P., Sappin-Didier, V., Deltreil, V., Mercier, V., Rampon, J.-N., & Houot, S. (2019). Mass balance and long-term soil accumulation of trace elements in arable crop systems amended with urban composts or cattle manure during 17 years. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07166-8>
- Michaud, A. M., Sappin-Didier, V., Cambier, P., Nguyen, C., Janot, N., Montenach, D., Filipovic, L., Deltreil, V., & Houot, S. (2021). Phytoavailability of Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Tl and Zn in Arable Crop Systems Amended for 13 to 15 Years with Organic Waste Products. *Agronomy*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040664>
- Moinard, V. (2021). *Conséquences de l'introduction de la méthanisation dans une exploitation de polyculture-élevage sur les cycles du carbone et de l'azote. Combinaison de l'expérimentation et de la modélisation à l'échelle de la ferme* [Phdthesis, Université Paris-Saclay]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03485490>
- Moinard, V., Levasseur, F., & Houot, S. (2021). Current and potential recycling of exogenous organic matter as fertilizers and amendments in a French peri-urban territory. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105523>
- Moinard, V., Redondi, C., Etiévant, V., Savoie, A., Duchene, D., Pelosi, C., Houot, S., & Capowiez, Y. (2021). Short- and long-term impacts of anaerobic digestate spreading on earthworms in cropped soils. *Applied Soil Ecology*, 168, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104149>
- Morvan, T., Houot, S., Levasseur, F., Parnaudeau, V., Trochard, R., & Hanocq, D. (2016, juillet 11). Comment des systèmes avec apports organiques restent aujourd'hui source de pollution par le nitrate, pistes pour demain. Séminaire RMT SdCi. *Changer la gestion de l'azote dans les champs cultivés : comment accompagner les agriculteurs dans leurs choix stratégiques ?*, Paris.
- Pan, G., Smith, P., & Pan, W. (2009). The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.10.008>
- Pedersen, J., & Hafner, S. D. (2023). Ammonia emissions after field application of anaerobically digested animal slurry : Literature review and perspectives. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 357, 108697. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108697>
- Peltre, C., Nyord, T., Bruun, S., Jensen, L. S., & Magid, J. (2015). Repeated soil application of organic waste amendments reduces draught force and fuel consumption for soil tillage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 211, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.004>
- Sadet-Bourgeteau, S., Houot, S., Dequiedt, S., Nowak, V., Tardy, V., Terrat, S., Montenach, D., Mercier, V., Karimi, B., Chemidlin Prévost-Bouré, N., & Maron, P. A. (2018). Lasting effect of repeated application of organic waste products on microbial communities in arable soils. *Applied Soil Ecology*, 125, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.006>
- Sangotayo, A. O., Chakraborty, P., Xu, S., Kumar, S., & Kovacs, P. (2023). Cattle manure application for 12 and 17 years enhanced depth distribution of soil organic carbon and X-ray computed tomography-derived pore characteristics. *SCIENTIFIC REPORTS*, 13(1), 23042. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50110-7>
- Starck, T., Fardet, T., & Esculier, F. (2024). Fate of nitrogen in French human excreta : Current waste and agronomic opportunities for the future. *Science of The Total Environment*, 912, 168978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168978>
- Walling, E., & Vaneekhaute, C. (2020). Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use : A review of emission factors and their variability. *Journal of Environmental Management*, 276, 111211. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111211>
- Wen, G., Winter, J. P., Voroney, R. P., & Bates, T. E. (1996). Potassium availability with application of sewage sludge, and sludge and manure composts in field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 47(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/BF01986278>
- Zavattaro, L., Bechini, L., Grignani, C., van Evert, F. K., Mallast, J., Spiegel, H., Sandén, T., Pecio, A., Giráldez Cervera, J. V., Guzmán, G., Vanderlinden, K., D'Hose, T., Ruysschaert, G., & ten Berge, H. F. M. (2017). Agronomic effects of bovine manure : A review of long-term European field experiments. *European Journal of Agronomy*, 27, 90(Supplement C), Article Supplement C. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.010>