

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 associés
- Contaminations des sols
- Emissions vers l'eau et l'air

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



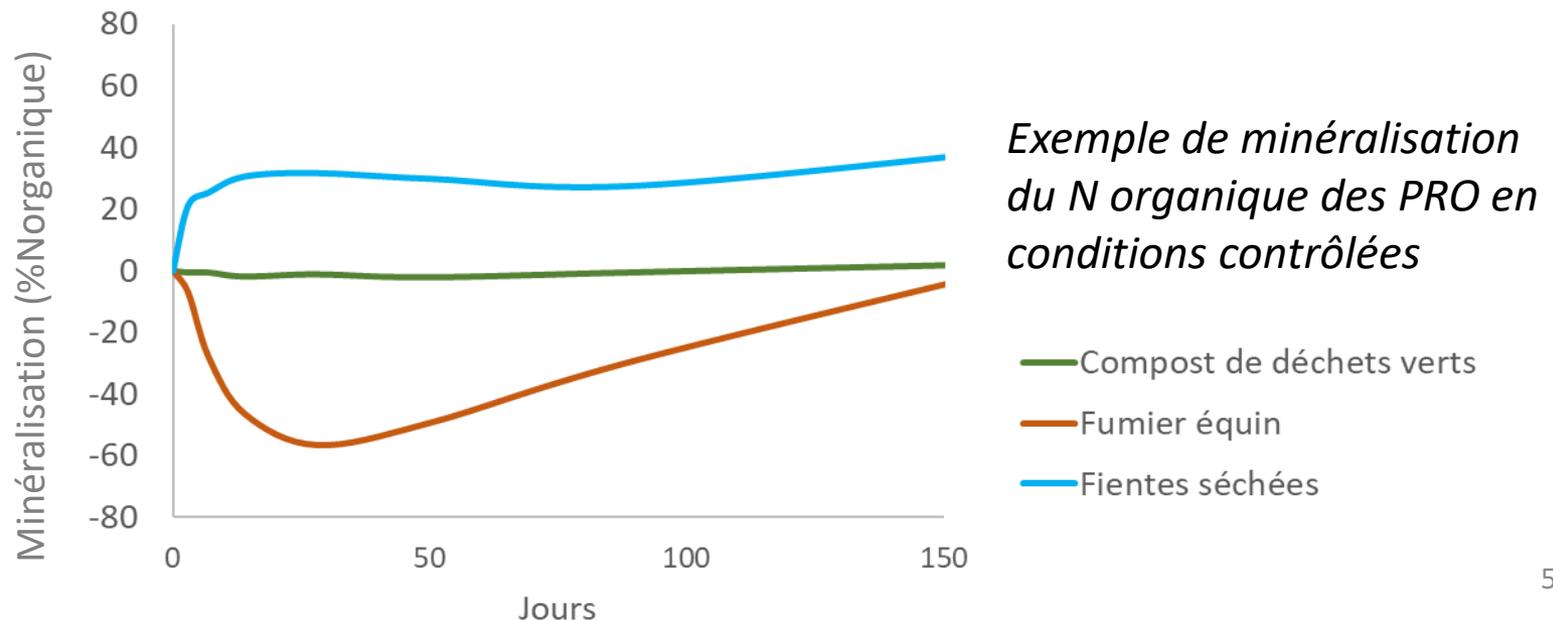
Plan

- 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)	



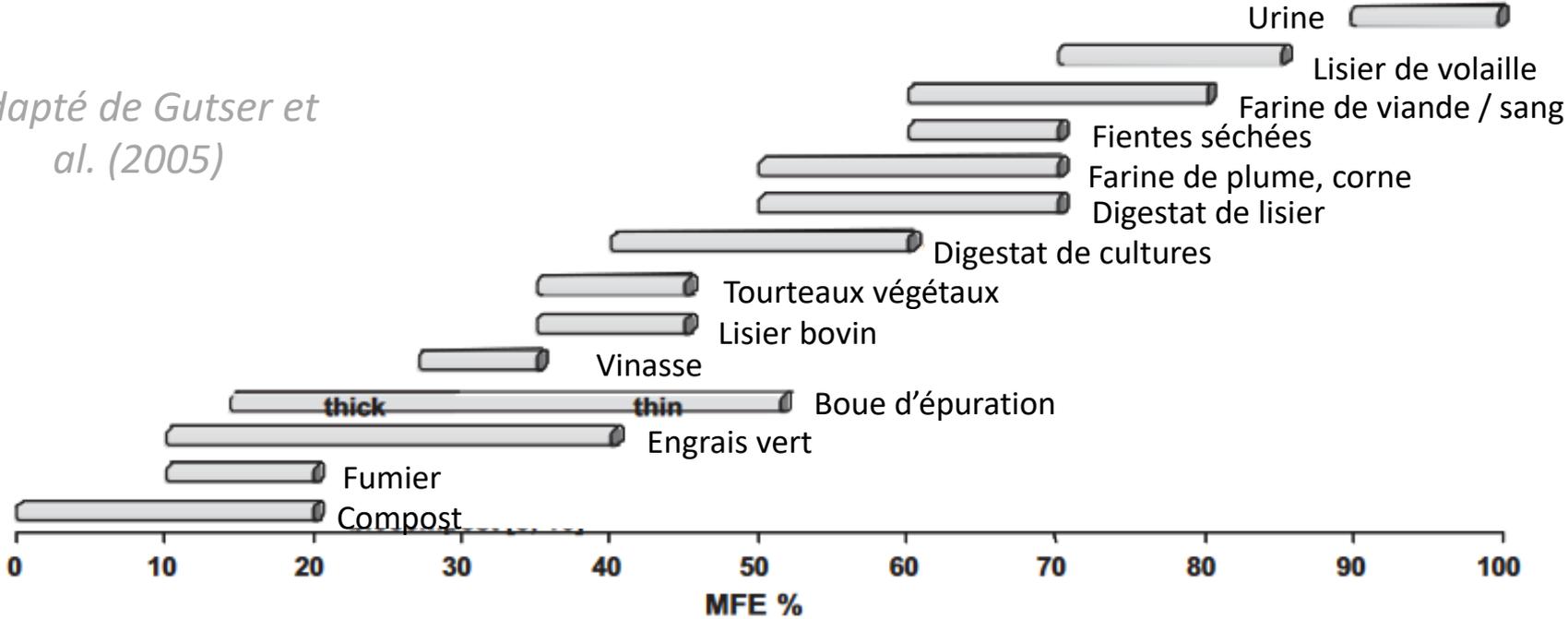
Coefficient d'équivalence engrais

- 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

- 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)

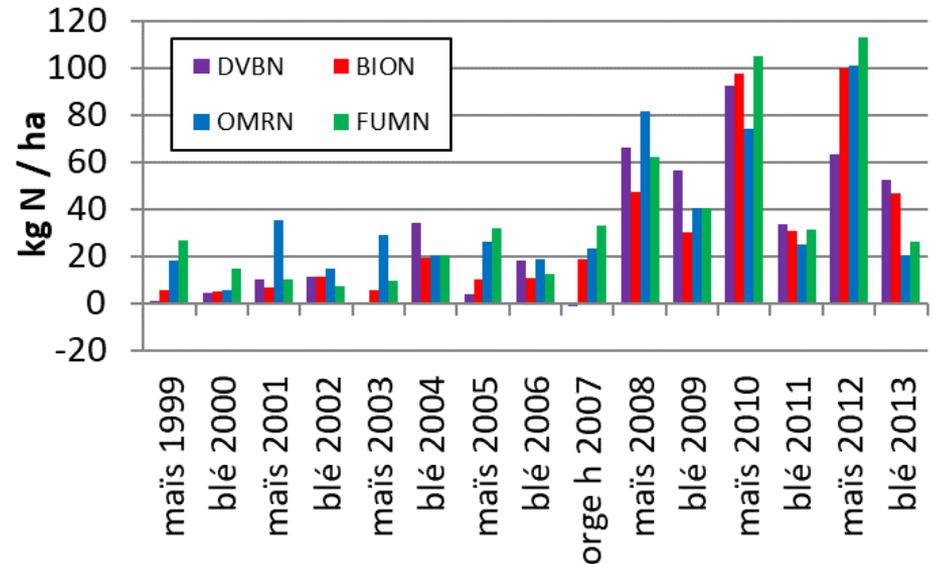


Valeur fertilisante azotée à long terme

- 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)

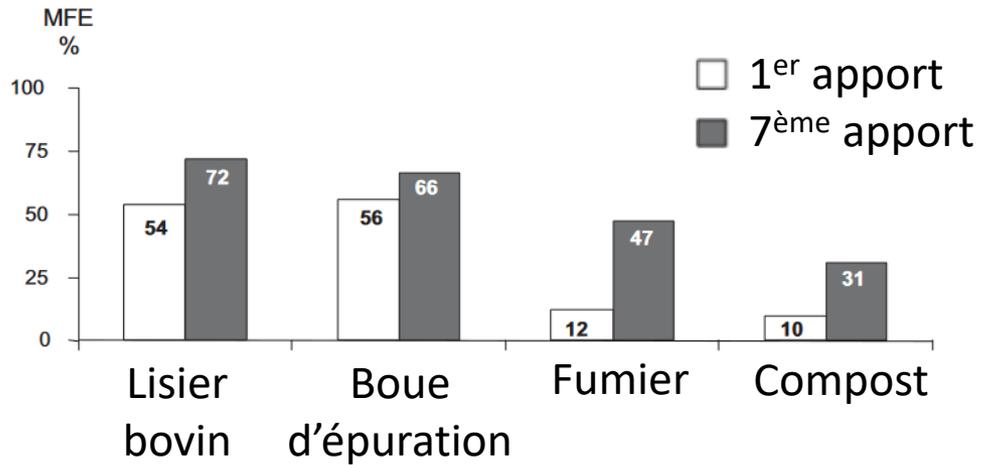
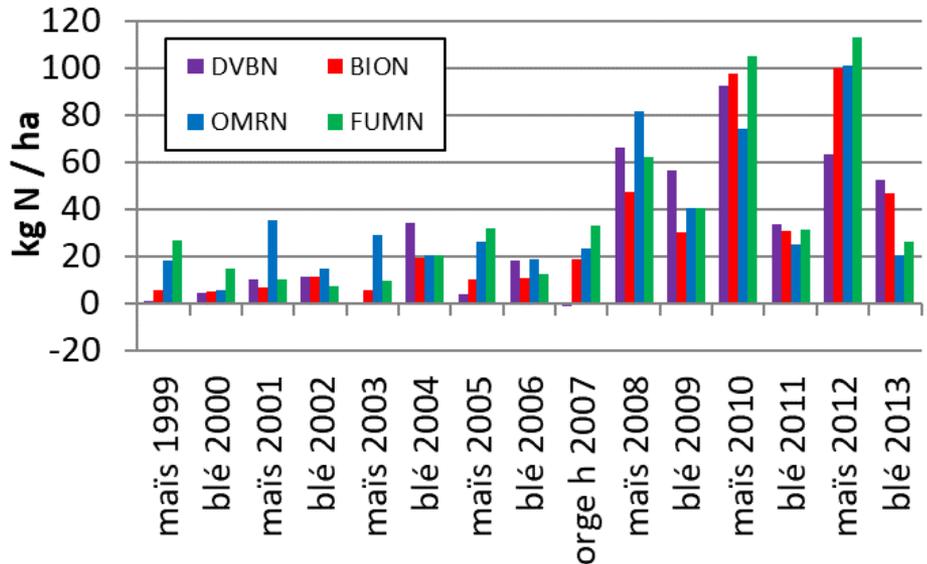


Valeur fertilisante azotée à long terme

- 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

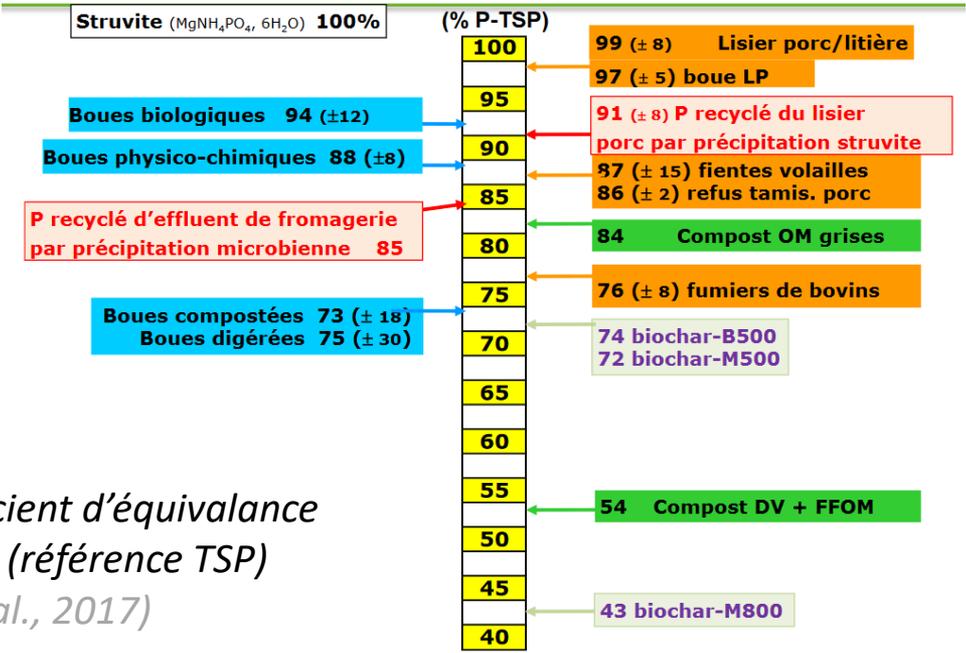
Essai QualiAgro : épandage de 3 composts urbains (*biodéchets*, *boue*, *OMR*) et d'un *fumier bovin* tous les 2 ans (4 t C/ha, soit 20 t/ha à 35 t/ha)



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

Valeur fertilisante P et K

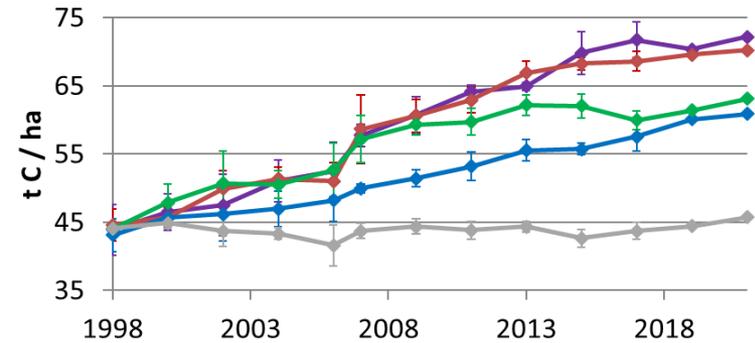
- Forte variabilité des teneurs en P et K entre PRO
- Coefficient d'équivalence engrais P très variables entre PRO, entre contextes pédoclimatiques, méthodes d'évaluation → résultats contrastés dans la littérature (Jordan-Meille et al., 2017, Christiansen et al., 2020)
- K généralement considéré entièrement 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

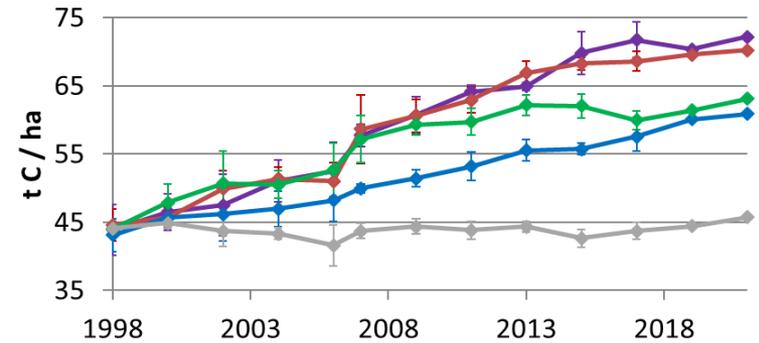
- Apports répétés de PRO \nearrow matière organique des sols (*Levavasseur et al., 2020*) :
 - + \nearrow avec + apports de C (+ dose, + fréquent)
 - + \nearrow si matière organique du PRO + stable (compost...)



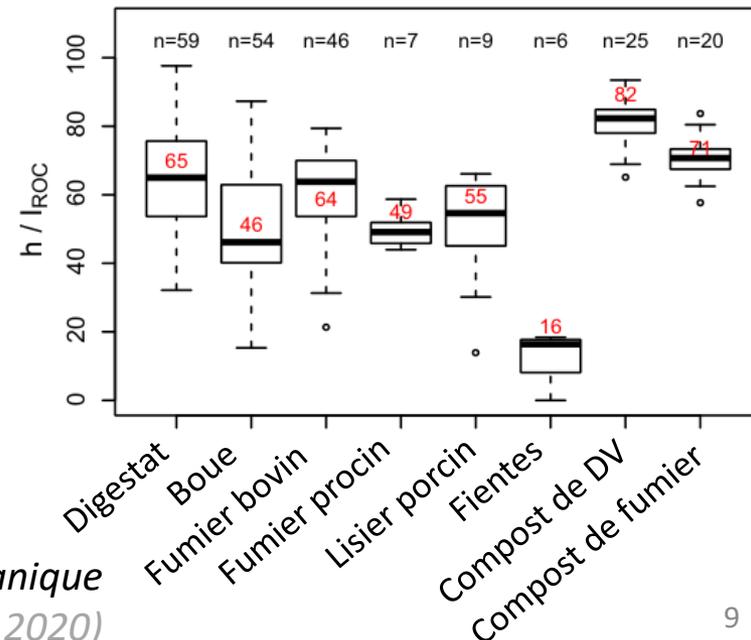
Evolution des stocks de C dans l'essai QualiAgro (N+) avec différents PRO apportés à la même dose de C (Compost DV + boue (DVB), Compost DV + biodéchets (BIO), Fumier bovin (FUM), Compost d'ordures ménagères (OMR), Témoin sans PRO (TEM))

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)

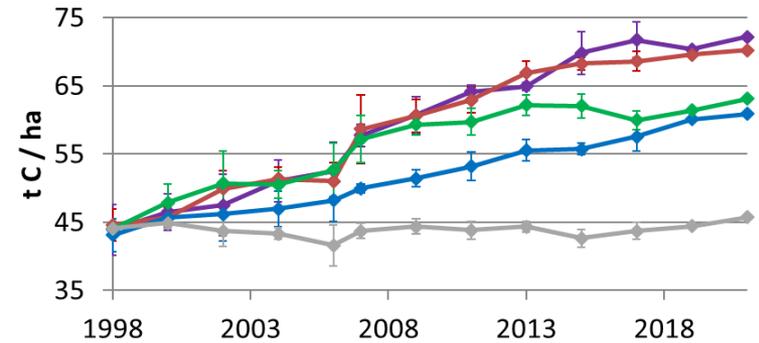
Augmentation de la matière organique du sol

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

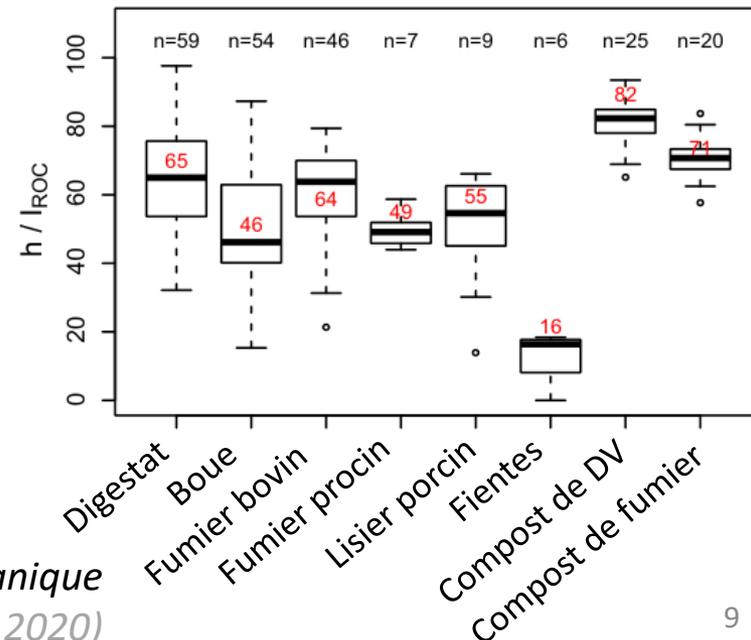
- Stabilité de la MO des PRO variable entre PRO
- Possibilité de l'estimer au champ (long), ou via des analyses de laboratoire (incubation, indicateur ISMO...)

- Intérêt pour ↗ 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)

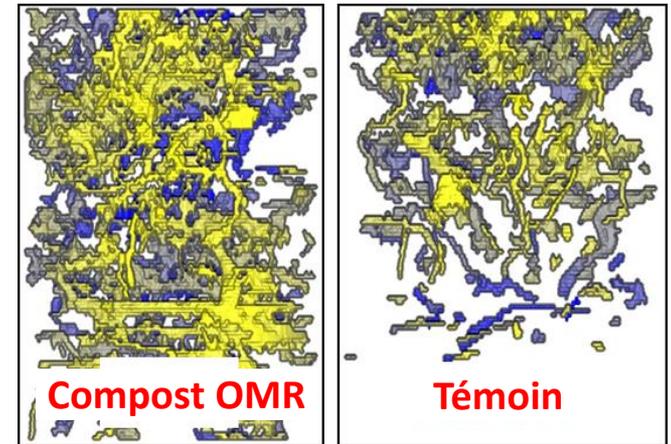


Evolution des stocks de C dans l'essai QualiAgro (N+) avec différents PRO apportés à la même dose de C (Compost DV + boue (DVB), Compost DV + biodéchets (BIO), Fumier bovin (FUM), Compost d'ordures ménagères (OMR). Témoin sans PRO (TEM))



Amélioration de la fertilité physique et chimique du sol

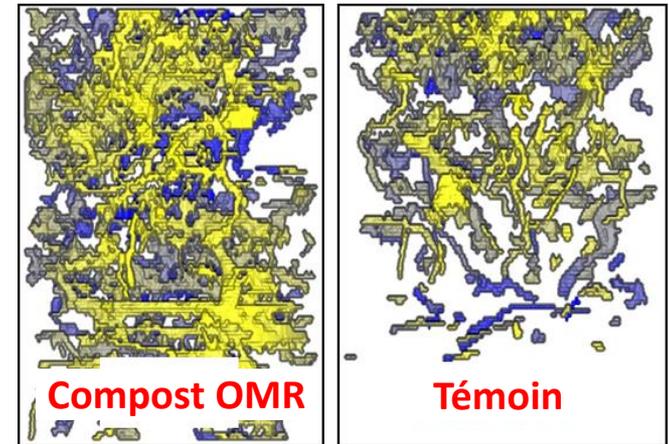
- Amélioration possible des propriétés physiques du sol :
 - ↗ porosité (*Sangotayo et al., 2024*)
 - ↗ stabilité structurale (*Annabi et al., 2011*)
 - Légère ↗ réserve utile (*Eden et al., 2017*)
 - ↘ énergie nécessaire pour travailler le sol (*Peltre et al., 2015*)
- Mais variable après des apports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



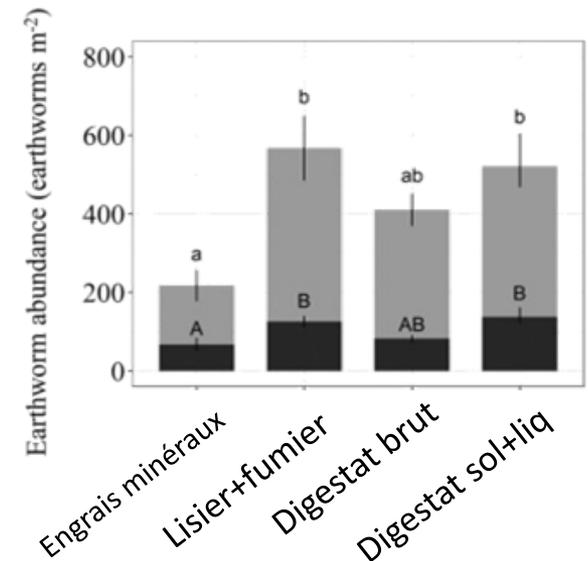
*Macroporosité d'origine lombricienne
(adapté de Capowiez et al., 2009)*

Amélioration de la fertilité physique et chimique 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 après des apports répétés de fortes doses uniquement
- Augmentation de l'activité biologique des sols (*Moinard et al., 2021, Sadet-Bourgeteau et al., 2018*)



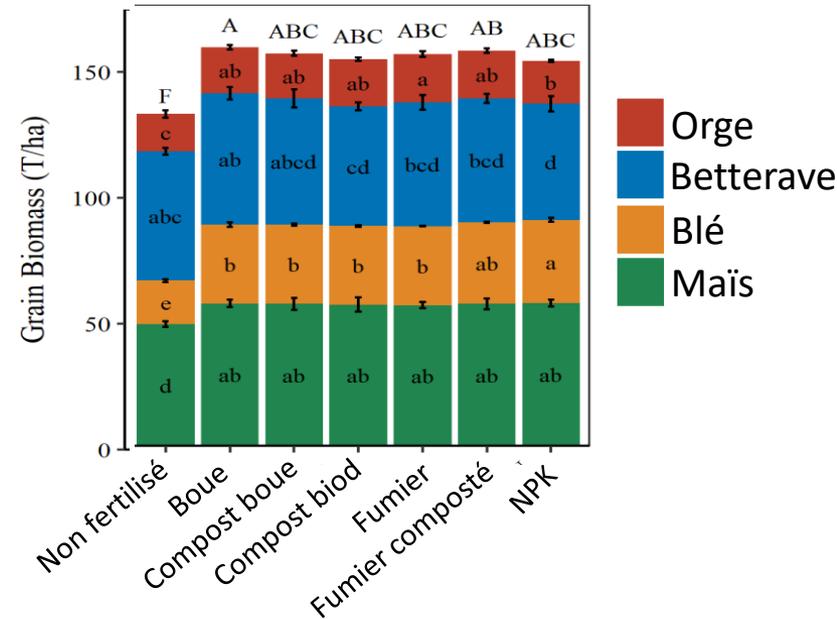
Macroporosité d'origine lombricienne
(adapté de Capowiez et al., 2009)



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

Production agricole avec substitution

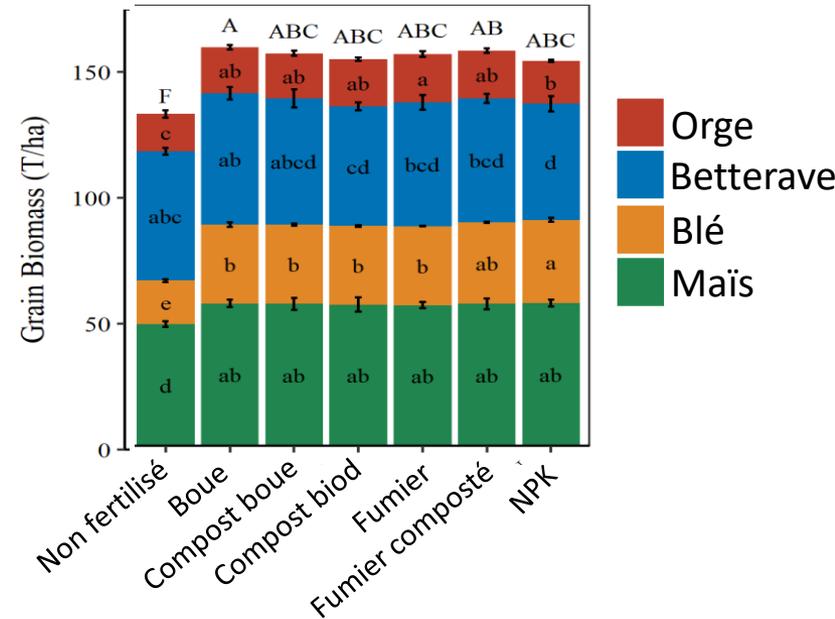
- Avec fertilisation minérale optimale, peu d'effets sur le rendement d'apports additionnels de PRO, mais économies d'engrais possibles (Hijbeek et al., 2016, Zavattaro et al., 2017, Chen et al., 2022)



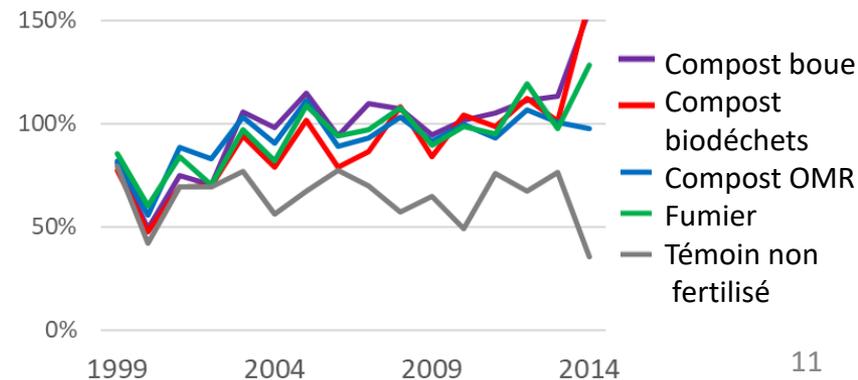
Rendements cumulés (2000-2018) sur l'essai de Colmar avec complémententation en N minéral optimale (adapté de Chen et al., 2022)

Production agricole avec substitution

- 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)



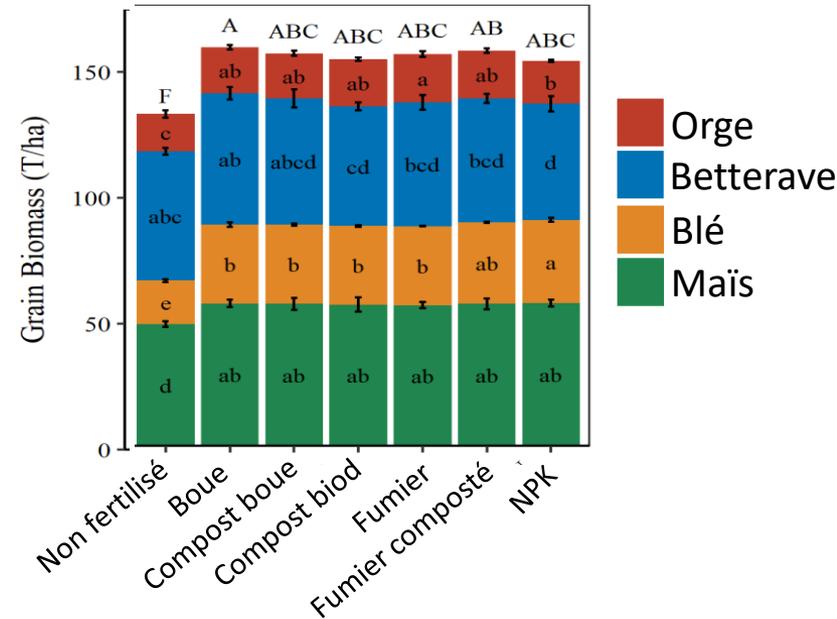
Rendements cumulés (2000-2018) sur l'essai de Colmar avec complémentation en N minéral optimale (adapté de Chen et al., 2022)



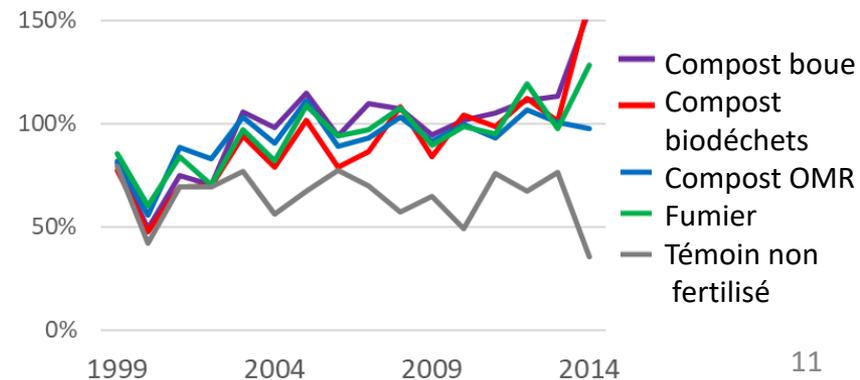
Rendement relatif au témoin N minéral à QualiAgro sur les traitements avec complémentation minimale en N minéral (données internes ECOSYS)

Production agricole avec substitution

- 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 minérale optimale (adapté de Chen et al., 2022)



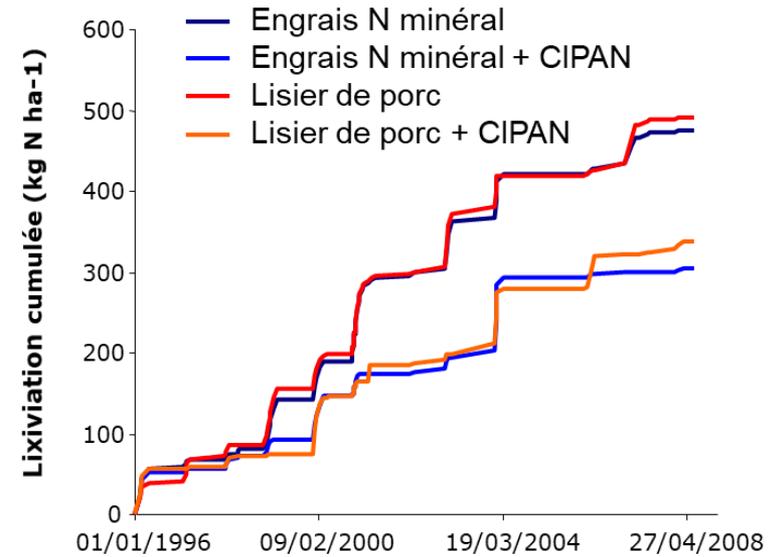
Rendement relatif au témoin N minéral à QualiAgro sur les traitements avec complémentation minimale en N minéral (données internes ECOSYS)

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

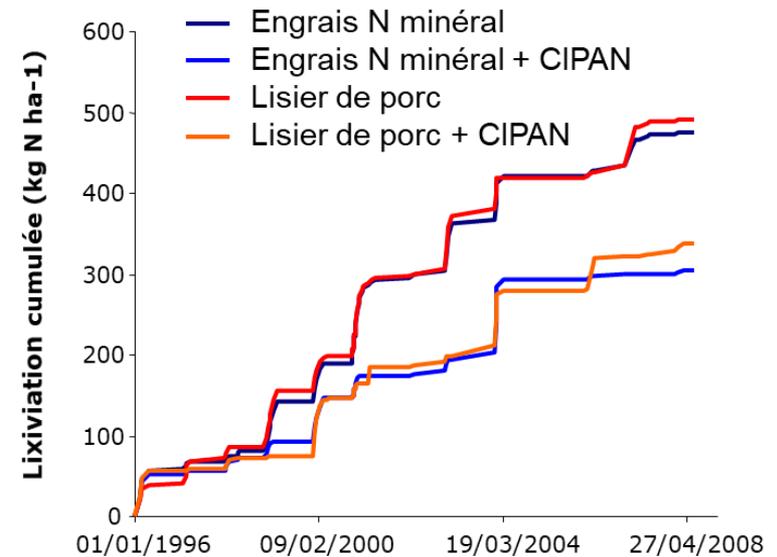
- A court terme :
 - N-NH₄ des PRO rapidement nitrifié dans le sol et nitrates sensibles à la lixiviation : pollution des eaux et perte d'efficacité
 - Pas ↗ risque de lixiviation si apports raisonnés : bonne dose, bonne période, synchronisme prélèvement plante (Chen et al., 2022, Morvan et al., 2017)



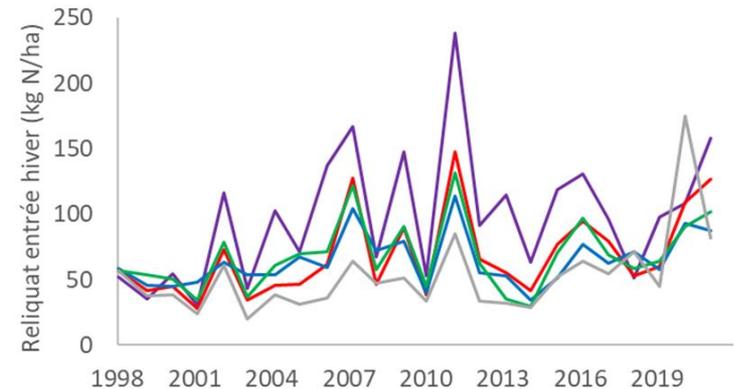
Essai lysimétrique INRA de Rennes Champ
Noel (Morvan et al., 2017)

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)



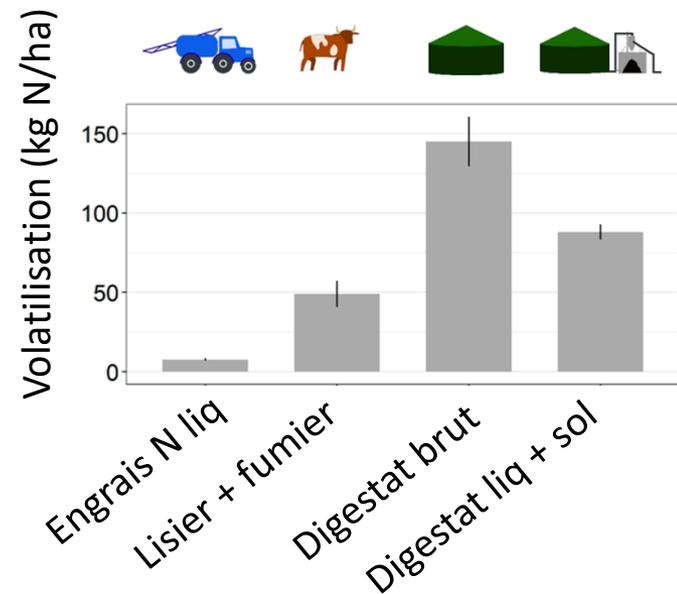
Essai lysimétrique INRA de Rennes Champ Noel (Morvan et al., 2017)



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...



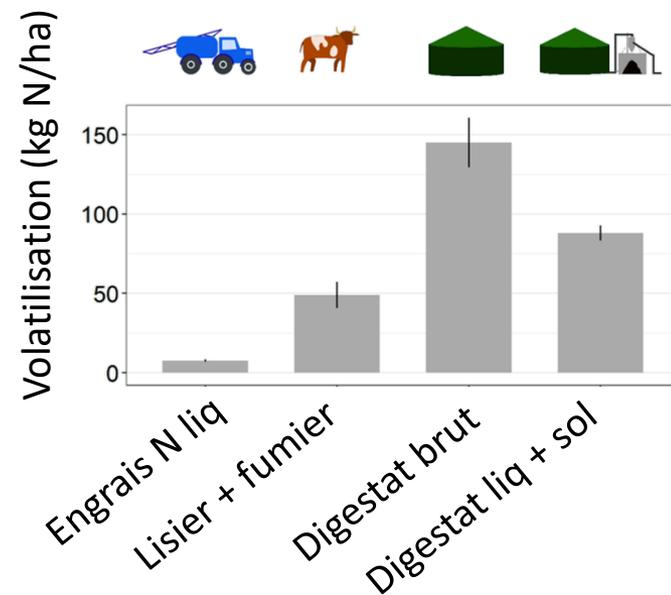
Exemple de mesure de volatilisation ammoniacale sur une succession de 3 ans (Moinard, 2021)



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*)



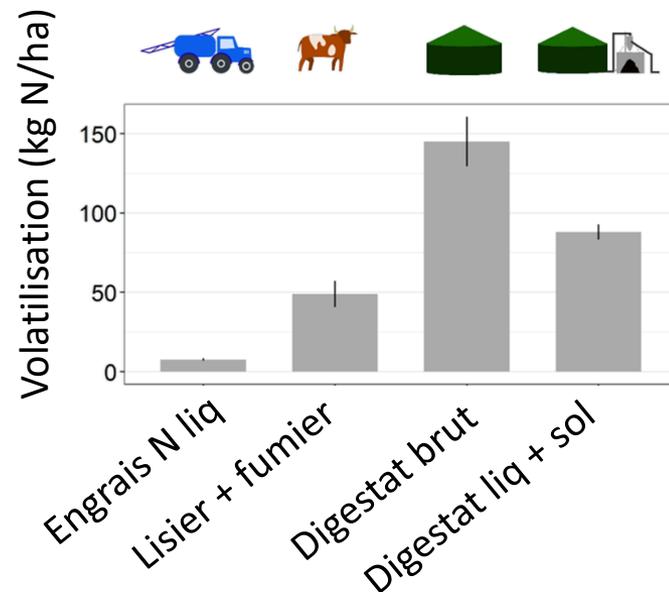
Exemple de mesure de volatilisation ammoniacale sur une succession de 3 ans (Moinard, 2021)



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

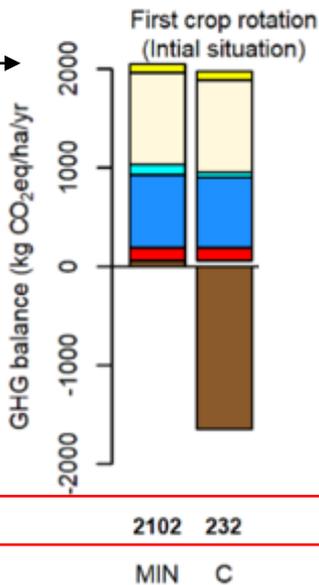
Bilan gaz à effet de serre

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

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.
- 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 →



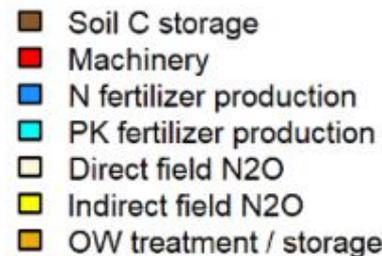
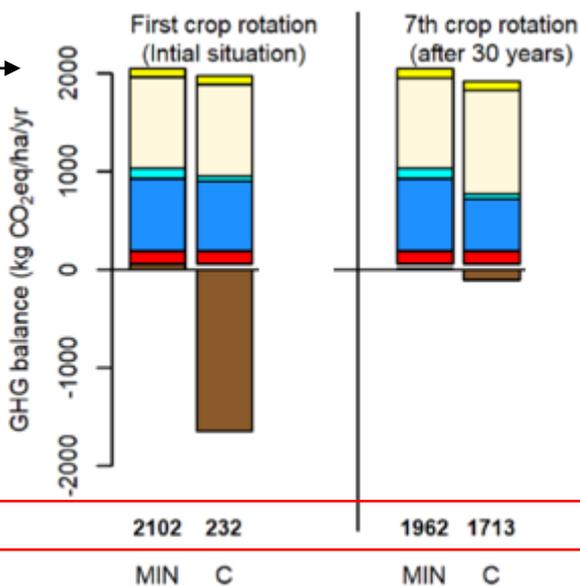
Bilan GES

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.
- 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 →



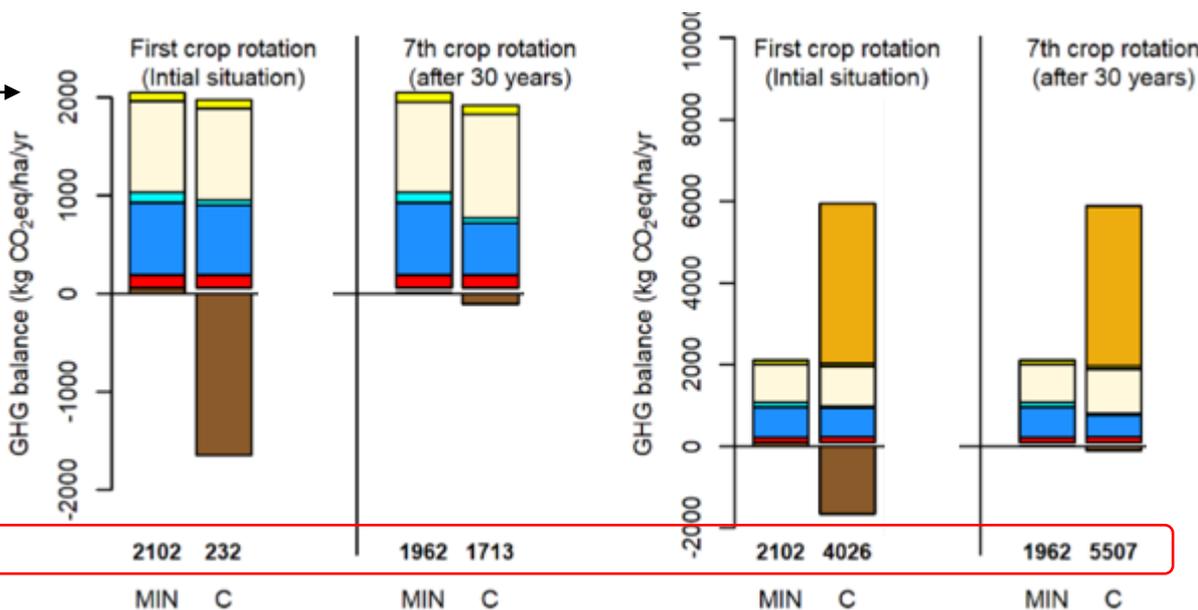
Bilan GES

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.
- 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

Sans les émissions amont des traitements



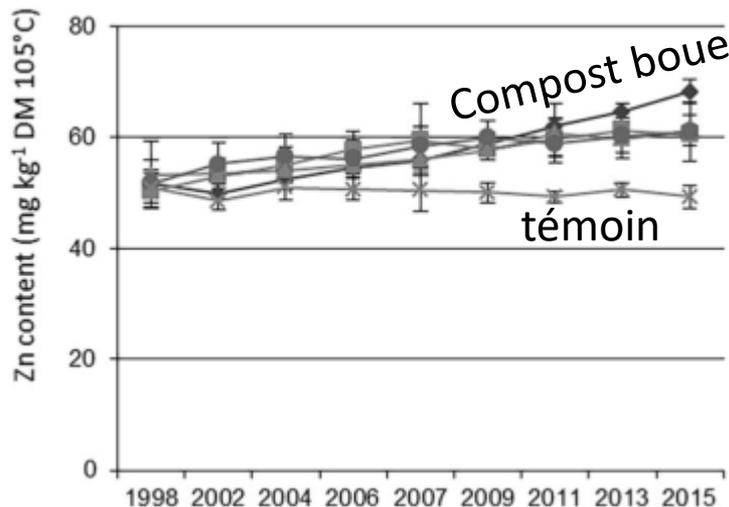
Avec les émissions amont des traitements

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

Adapté de Levavasseur & Houot (2023)

Contaminants métalliques (ETM)

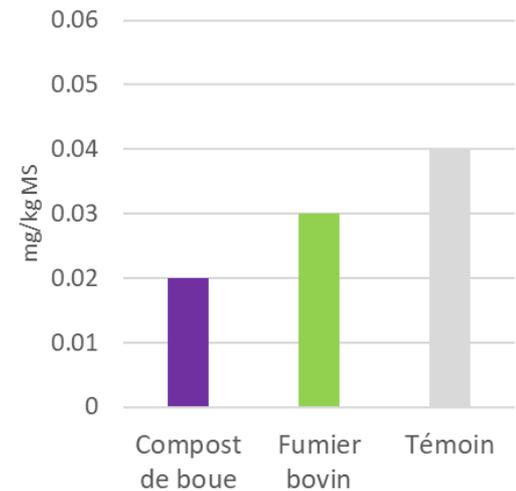
- Variabilité des teneurs en ETM entre PRO, PRO urbains souvent + contaminés
- Exemple du devenir des ETM à QualiAgro (France) après ≈ 20 ans d'apports à « forte » dose :
 - Très peu de « sorties » : accumulation de métaux dans les sols
 - Effets visibles que pour Cu et Zn sur les teneurs en métaux totaux 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, mais + Cu et Zn dans effluents d'élevage
 - Peu de transfert observé vers la plante
 - Risque de dissémination d'antibiorésistance
 - Evaluation écotoxicologique difficile

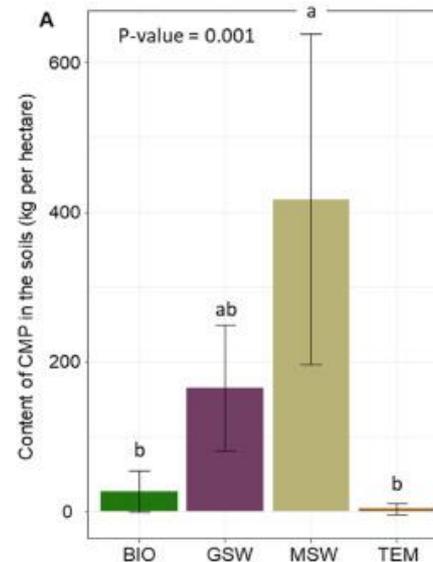
Teneur en microplastiques des sols après 20 ans d'apport (*Colombini et al., 2022*)

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

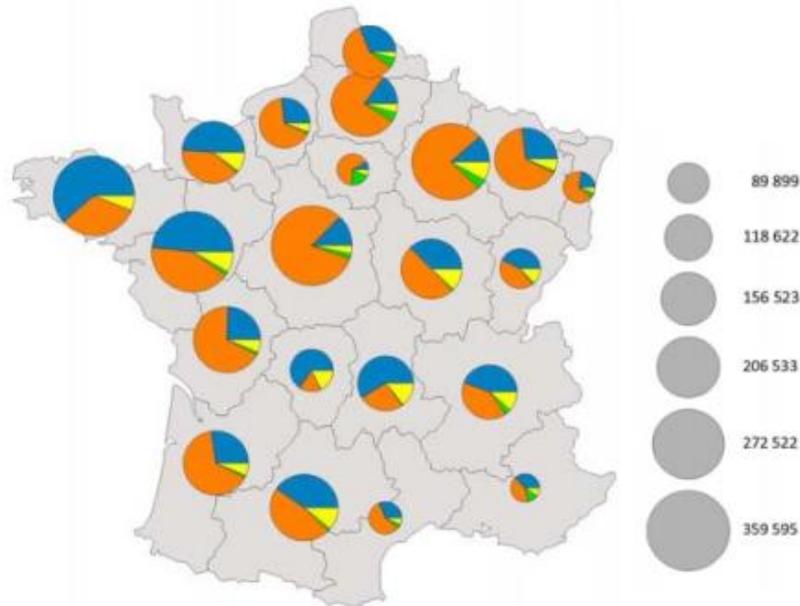
Gisements disponibles / besoin



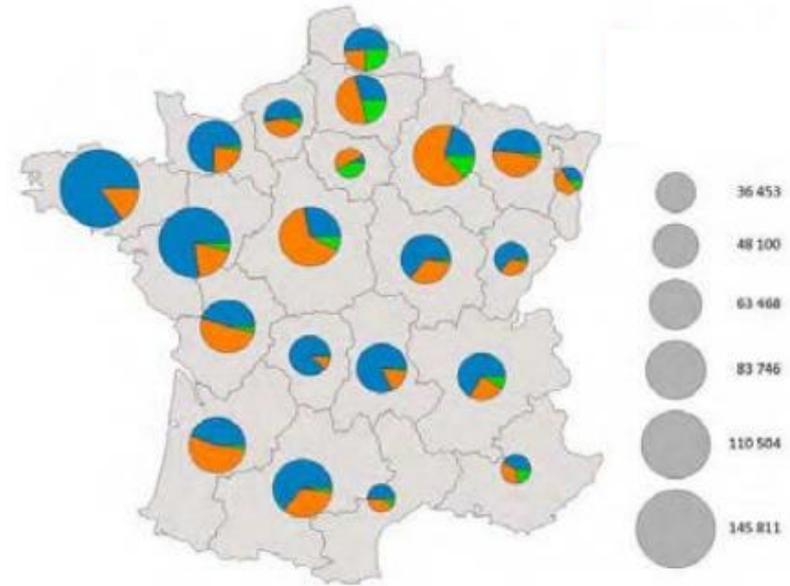
Données incertaines et anciennes

- 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

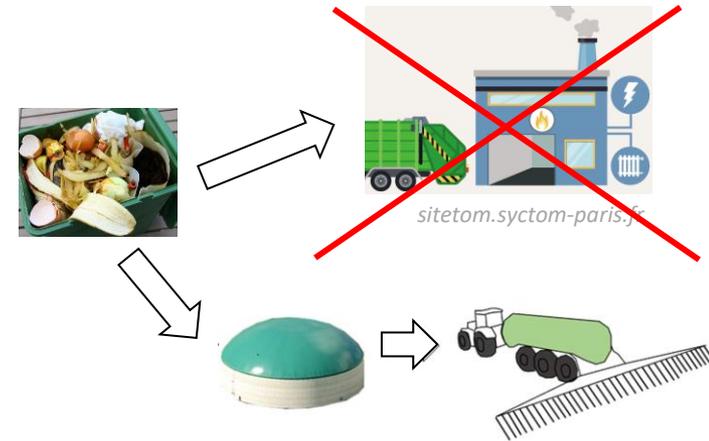
 Fertilisants minéraux

 Autres apports organiques

 Fixation symbiotique

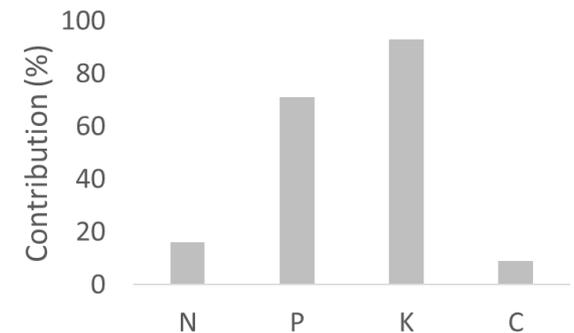
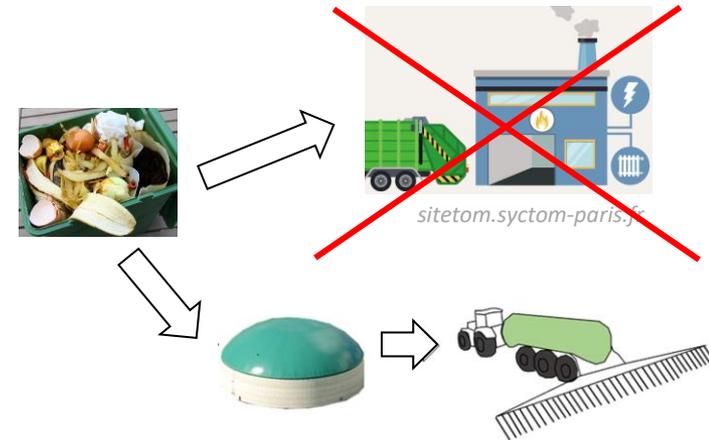
Opportunités futures : compost et digestat de biodéchets

- 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
- 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*)

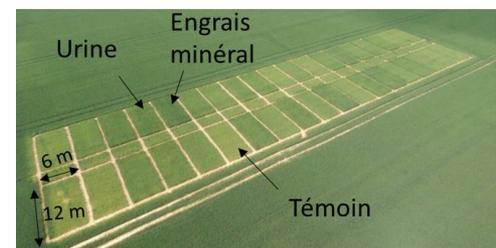
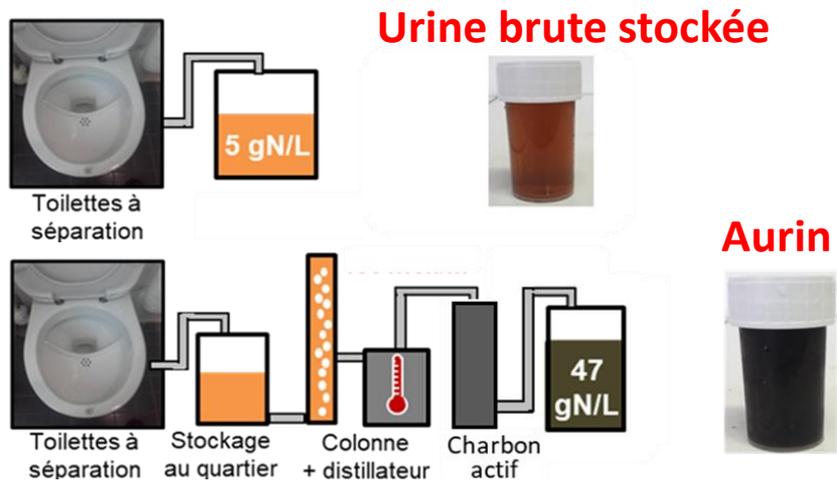


Contribution théorique des biodéchets sur la plaine de Versailles par rapport aux besoins des cultures (NPK) ou aux apports des résidus de culture (C)

(adapté de Moinard et al., 2021) 20

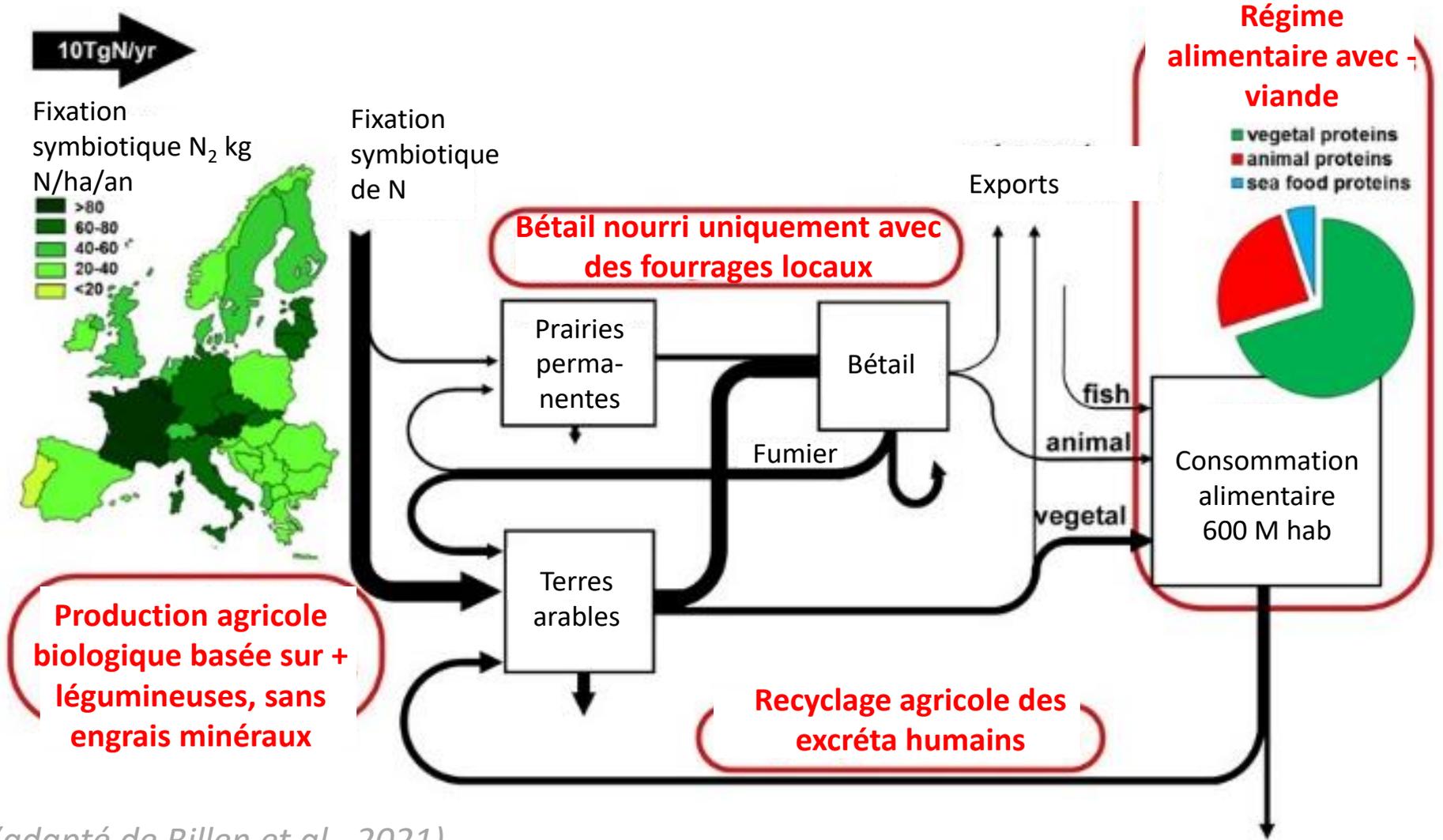
Opportunités futures : urines humaines collectées à la source

- 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