



**HAL**  
open science

# Carbone, azote, phosphore... L'enjeu de la durabilité des cycles biogéochimiques en agriculture

Florent Levavasseur

► **To cite this version:**

Florent Levavasseur. Carbone, azote, phosphore... L'enjeu de la durabilité des cycles biogéochimiques en agriculture. Garden Party AgroParisTech, Jun 2023, Palaiseau, France. hal-04262840

**HAL Id: hal-04262840**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04262840>**

Submitted on 27 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Garden Party AgroParisTech

4 juin 2023, Palaiseau

# Carbone, azote, phosphore... L'enjeu de la durabilité des cycles biogéochimiques en agriculture

Florent Levavasseur

INRAE, UMR ECOSYS, Palaiseau, France

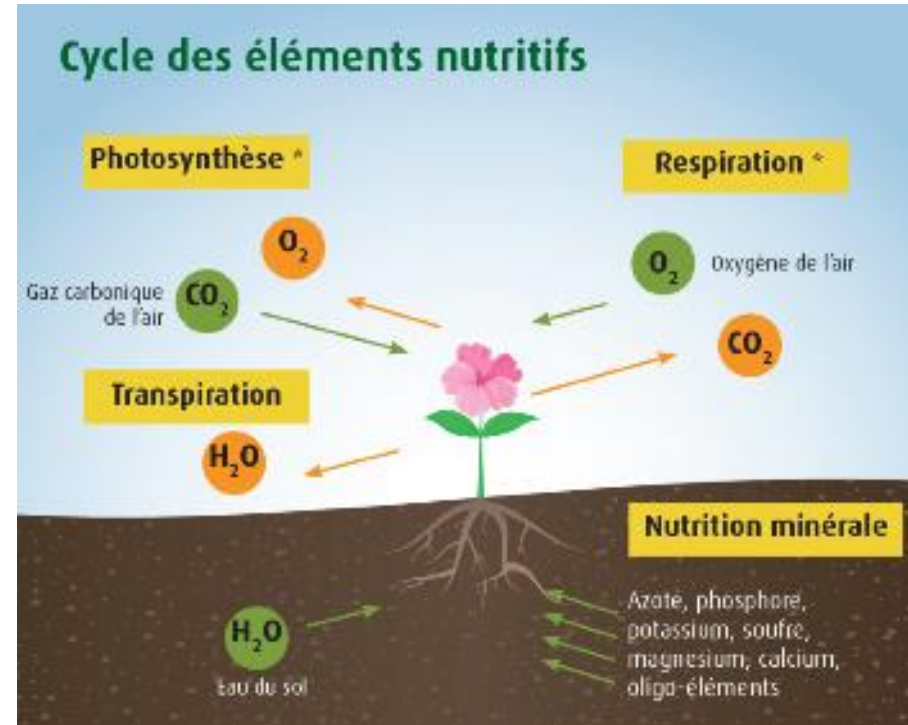


# Plan

- L'agriculture et les cycles des nutriments
- L'agriculture et le cycle du carbone

# Introduction

- Objectif de l'agriculture : produire des végétaux pour l'alimentation humaine ou animale, ou pour d'autres usages (fibres, énergie...)
- La production végétale nécessite :
  - $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$  (gaz) et de l'énergie (soleil)
  - Eau
  - Nutriments : azote (N), phosphore (P), potassium (K), etc. :
  - ...
- Les plantes ne peuvent pas utiliser l'azote abondant dans l'air ( $\text{N}_2$ ) mais le prélèvent dans le sol via leurs racines, tout comme les autres nutriments
- Certaines plantes sont en symbiose avec des bactéries qui fixent le N de l'air : les **légumineuses**



[www.unifa.fr](http://www.unifa.fr)



Féverole \ pois  
[www.terre-net.fr](http://www.terre-net.fr)

# Introduction

- Une (majeure) partie des nutriments prélevés par la plante est exportée avec la récolte
- Une partie est retournée au sol via les résidus de culture (racines mortes, pailles...)
- Reconstitution naturelle des stocks de nutriments limitée à court terme



→ Un sol cultivé a tendance à s'appauvrir en nutriments

# Introduction

- Pratiques mises en œuvre historiquement pour lutter contre l'appauvrissement du sol (*Mazoyer et Roudart, 2002*) :
  - Système d'abattis-brûlis
  - Jachère
  - Transfert de fertilité grâce au pâturage de terres non cultivées
  - Introduction de prairies temporaires (légumineuses)
  - ...

→ Productivité limitée



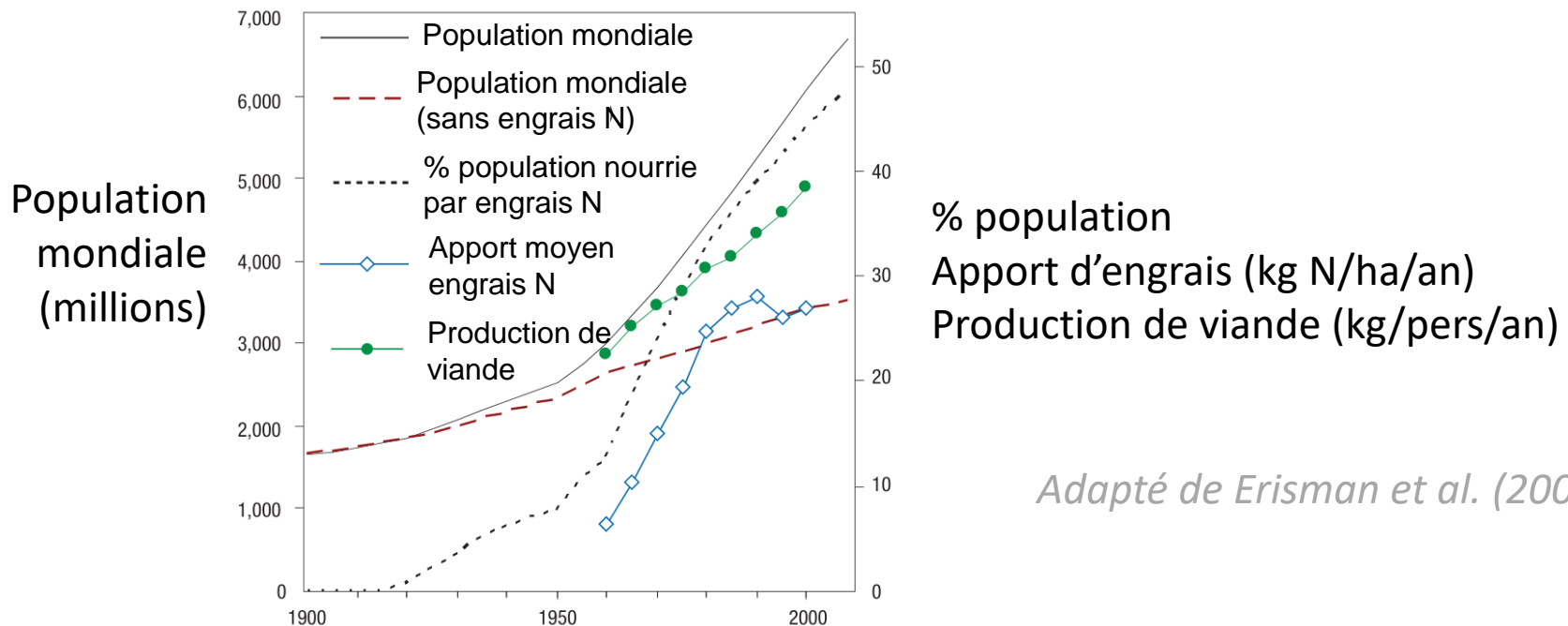
*Agriculture sur brûlis*  
([wikipedia.fr](http://wikipedia.fr))

# Développement de la fertilisation minérale

- Au XX<sup>ème</sup>, fertilisation minérale a contribué à une  $\nearrow$  :
  - des rendements des cultures
  - de la population mondiale
  - de la production de viande (via des cultures fertilisées avec du N minéral utilisées en alimentation animale)
- Environ 50% des humains sont « nourris » avec de l'azote provenant des engrais minéraux



Granulés d'ammonitrate  
(terre-net.fr)



# Production des engrais minéraux N

- Synthèse des engrais minéraux N, réaction Haber-Bosch (1913) :

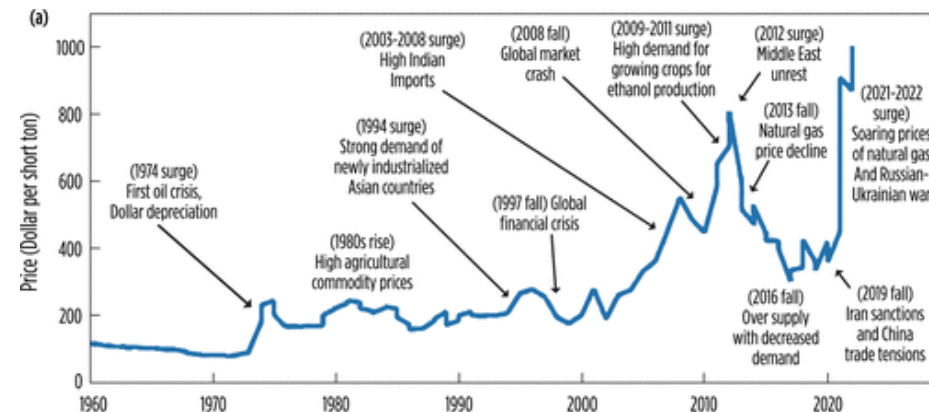


- Forte consommation de gaz naturel pour produire du H<sub>2</sub>:
  - Dépenses énergétiques : 1-2% conso mondiale (*Matassa et al. 2015*)
  - Emissions de GES : 4-5 % GES en France
  - Tensions géopolitiques
- Poids économiques pour les agriculteurs : 11% des charges des céréaliers en temps « normal » (*Lecuyer et al., 2013*)



*Usine de production d'engrais azotés au Havre (Les Echos)*

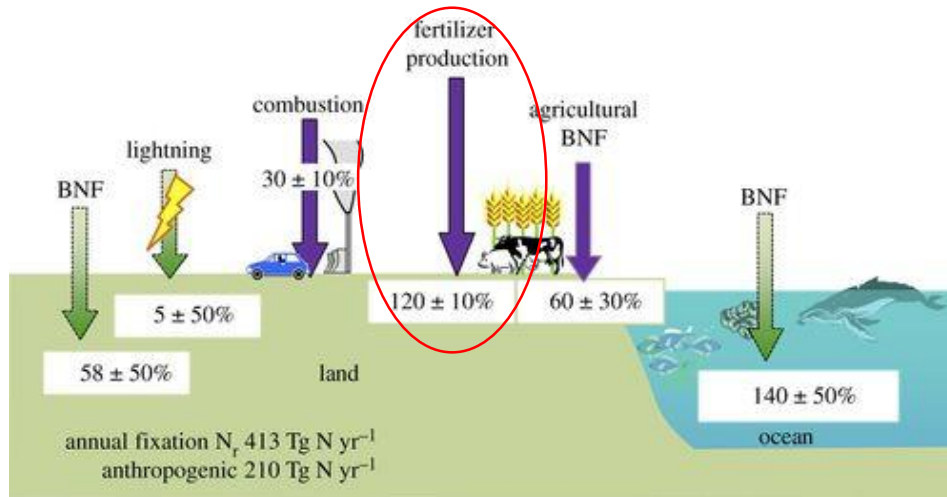
*Evolution du prix de l'urée (Eisa et al., 2022)*





# Problèmes associés à la fertilisation minérale N

- Cycle planétaire du N très perturbé : flux N mondiaux dus aux engrais N > flux N par fixation symbiotique naturelle terrestre (BNF)



*Flux globaux d'azote  
Fowler et al. (2013)*

- ↗ disponibilité du N a induit des excès qui ont des conséquences multiples :
  - Spécialisation des régions de production et ↗ production animale (nourrie par cultures fertilisées avec N)
  - ↗ pertes N vers l'eau (nitrates) et l'air et conséquences environnementales associées (particules fines, changement climatique, eutrophisation...)

# Production des engrais minéraux P et K

- P et K = ressources minières fossiles concentrées dans quelques pays
- Exploitations industrielles ont fortement augmenté au XX<sup>ème</sup> siècle
- Réserves finies, avec un pic de production attendu dans les décennies ou siècles à venir (*Cordell & White, 2011*)
- P classé par l'UE comme une matière première critique présentant un risque élevé de pénurie d'approvisionnement



*Mine de phosphore  
au Maroc  
Le Monde - Reuters*

# Problématique

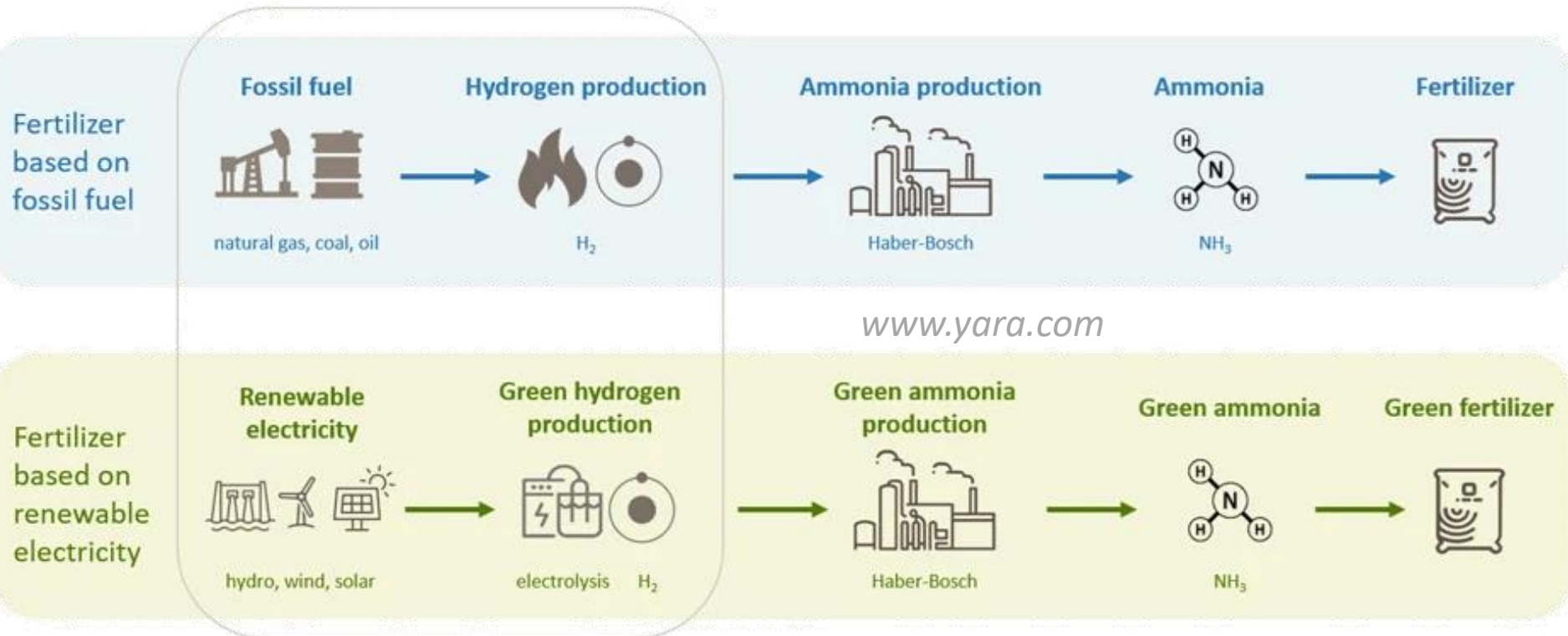
- Engrais minéraux ont permis une forte augmentation de la production agricole, mais sont :
  - basés sur des ressources fossiles non renouvelables
  - associés à de nombreux impacts environnementaux
  - l'objet de tensions économiques / géopolitiques
  - ...

→ Quelles solutions possibles ?

- Energie renouvelable pour production engrais minéraux N ?
- Recyclage des déchets organiques (et des nutriments qu'ils contiennent) ?
- Modification des systèmes alimentaires pour diminuer les besoins de production agricole ? + légumineuses
- ...

# Engrais N produits à partir d'énergie renouvelable

- De fortes réductions annoncées d'émissions de gaz à effet de serre
- Matière première et énergie renouvelables (eau, N<sub>2</sub>, électricité)
- Modèle économique ?
- Pas de remise en cause du système agricole, fuite en avant ?



# Recyclage des déchets organiques

- Activités agricoles, urbaines et agro(industrielles) produisent des déchets organiques
- Déchets doivent être évacués de leur zone de production et parfois traités pour des raisons sanitaires (compostage, méthanisation...)
- Déchets organiques contiennent les nutriments indispensables à la croissance des plantes et peuvent être recyclés en agriculture



*Fumier de cheval*



*Compost de déchets verts*



*Digestat brut de CIVE*



*Boue d'épuration*



*Fientes séchées*



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



*Lisier*



*Boue de papeterie*

# Traitement ou non des déchets organiques

- Epandage direct possible sans traitement amont (lisier, fumier...)
- Compostage (déchets verts, fumier...) :
  - Décomposition en conditions aérobies (avec oxygène) de la matière organique par des micro-organismes
  - Production d'une matière organique stabilisée (compost)
  - Emissions de  $\text{CO}_2$ , eau,  $\text{NH}_3$  + gaz à effet de serre
- Méthanisation (fumier, lisier...)
  - Décomposition en conditions anaérobies de la matière organique par des micro-organismes
  - Production d'une matière organique stabilisée et minéralisation d'une partie de l'azote organique (digestat)  
→ effet fertilisant N + efficace
  - Production de biogaz :  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$   
→ valorisation énergétique



[www.groupe-rds.fr](http://www.groupe-rds.fr)



[www.climaxion.fr](http://www.climaxion.fr)

# Recyclage des déchets organiques

- Intérêt du recyclage des déchets organiques en fertilisant :
  - Apport de nutriments aux cultures en remplacement des engrais minéraux
  - Entretien de la matière organique des sols
  - Solution de traitement des déchets souvent la + économique
- Mais des limites à considérer :
  - Pas aussi efficaces à court-terme par rapport aux engrais minéraux
  - Fertilisation + difficile à piloter (efficacité variable)
  - Lourdeur des chantiers d'épandage
  - Contaminants (métaux, plastiques....)
  - **Ressources en déchets organiques ne sont pas suffisantes pour subvenir aux besoins actuels de l'agriculture en fertilisants**



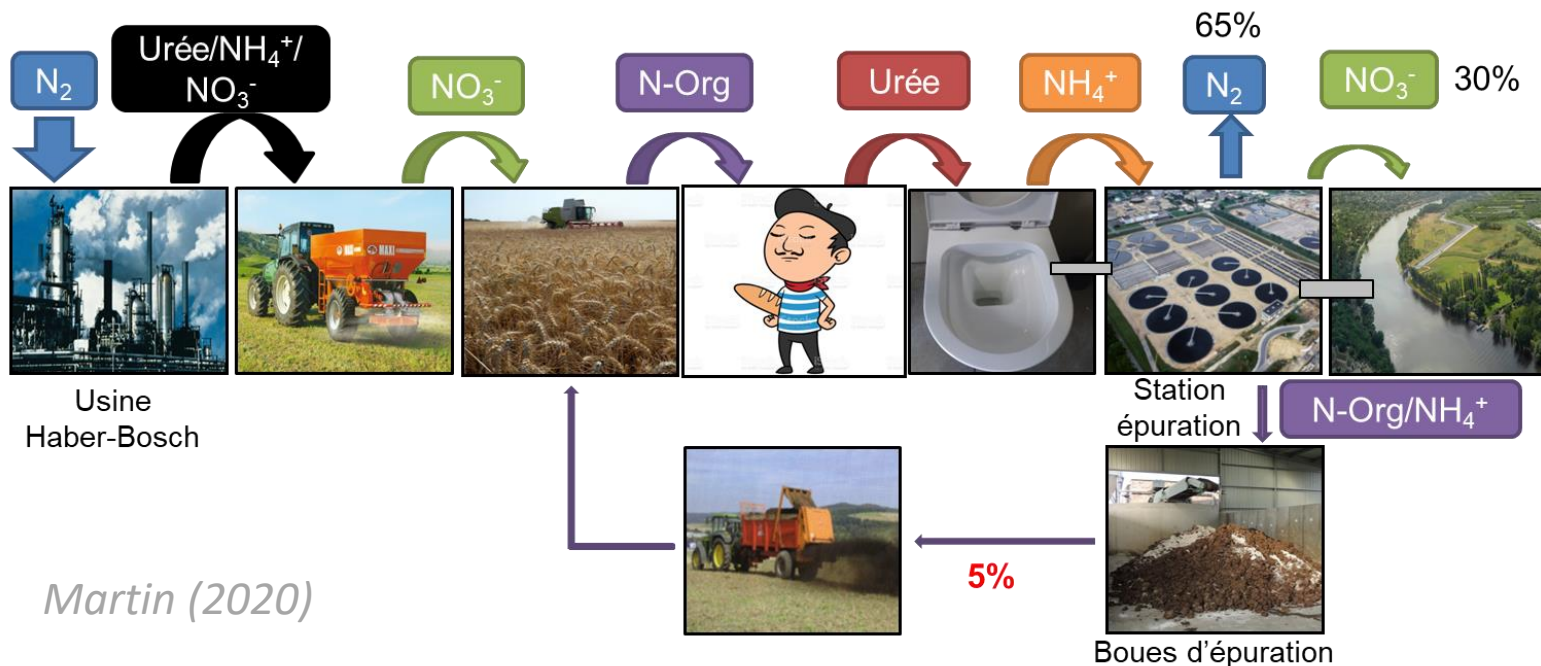
*Epandage de lisier*



*Epandage de compost*

# Recyclage des déchets organiques – le cas de l'urine humaine

- Urine contient majorité des nutriments excrétés, mais diluée dans les eaux usées
- Station d'épuration : objectif de traiter le N, pas de le récupérer :
  - Pertes N vers l'air, conso d'énergie et émissions GES
  - Part non négligeable du N non traitée et rejetée en rivière
  - Seule une très faible part du N est finalement recyclée en agriculture via les boues d'épuration (5%)





# Recyclage des déchets organiques – le cas de l'urine humaine

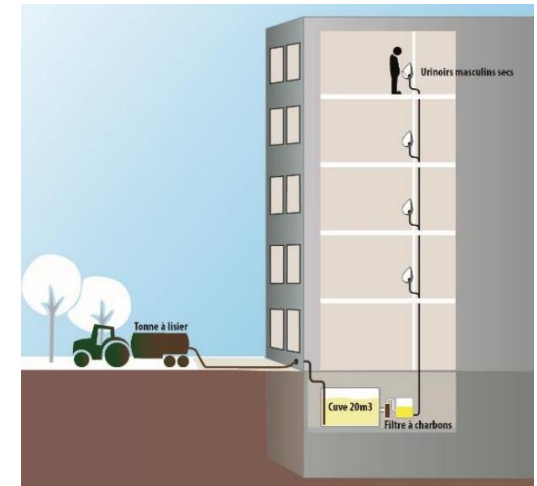
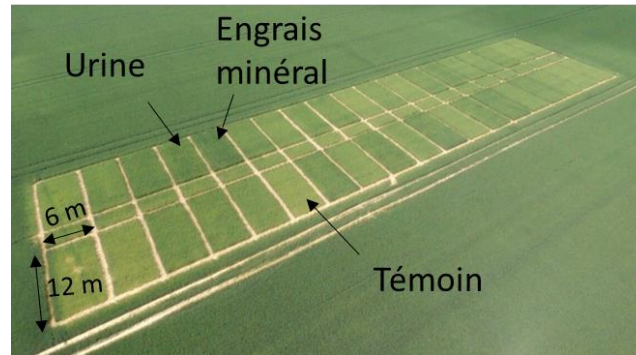
- Possibilité de collecter sélectivement l'urine à la source

Urinoir sec masculin  
(École des Ponts)



Toilettes à séparation  
(Roediger)

- Urine a une très bonne valeur fertilisante (Martin, 2020)

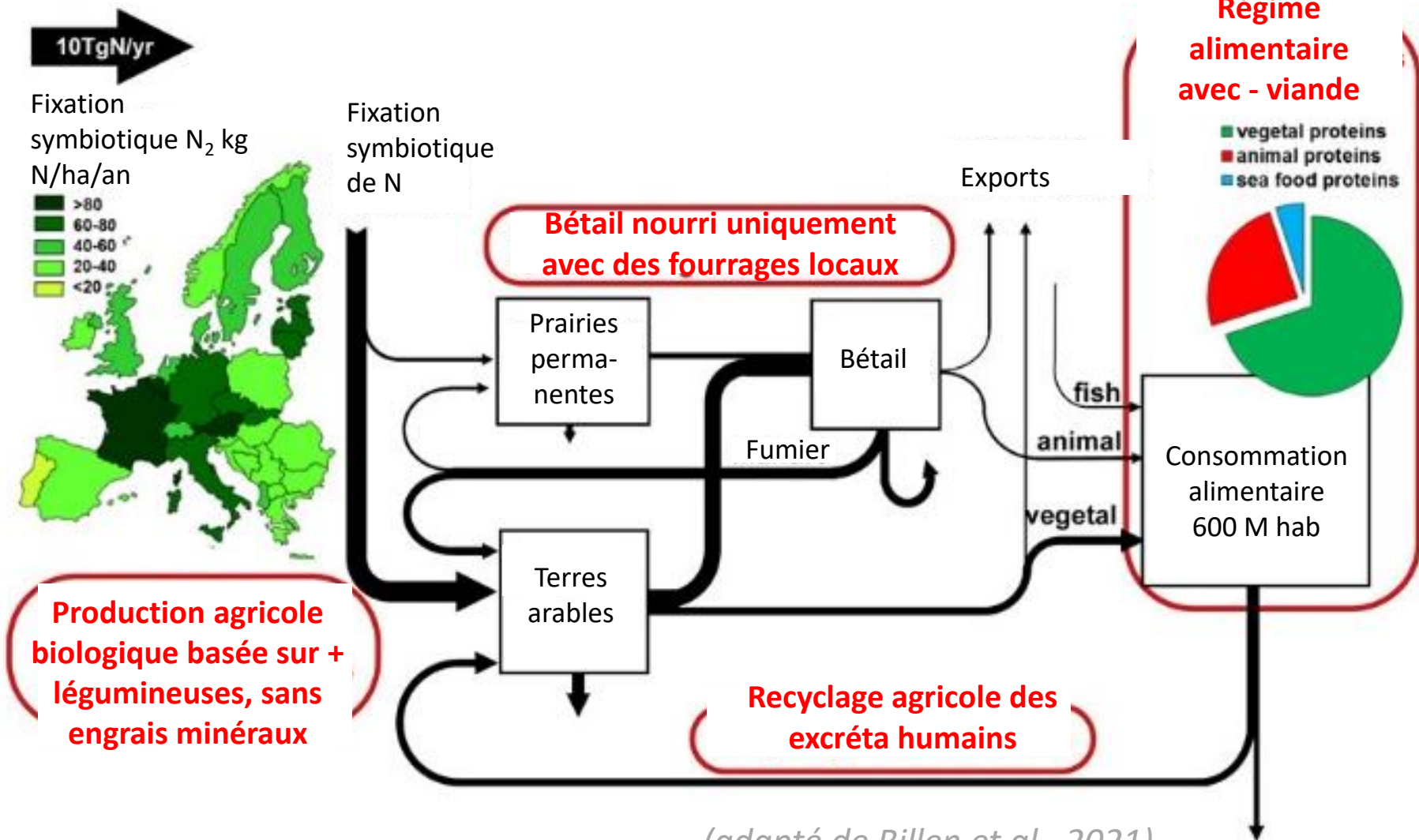


Esculier (2023)

- Fertilisation avec de l'urine permet une amélioration du bilan environnemental de l'agriculture (↘ gaz à effet de serre, eutrophisation...) (Martin, 2020)
- Plus de 100% des besoins agricoles en azote en Ile-de-France pourrait être couverts par l'urine de la métropole (d'après Esculier, 2018 et Unifa, 2019)
- 20% des besoins agricoles à l'échelle mondiale (Martin (2020), d'après Trimmer et al. (2019))

# Modification des systèmes alimentaires et agricoles pour aller vers un cycle du N sans engrais minéraux

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



(adapté de Billen et al., 2021)

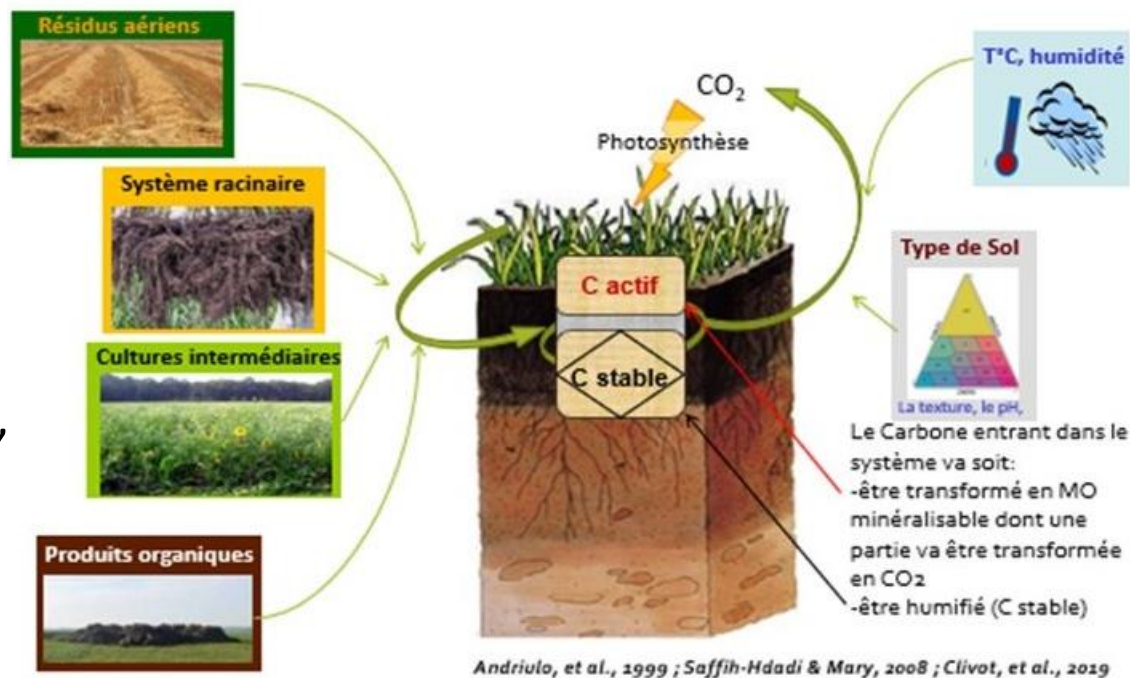
# Plan

- L'agriculture et les cycles des nutriments

- L'agriculture et le cycle du carbone

# Introduction

- Végétaux fixent le CO<sub>2</sub> pour synthétiser des matières organiques (photosynthèse)
- Une partie des matières organiques exportée (aliments, énergie...)
- Une partie restituée au sol (racines, résidus de culture...) et stockée dans le sol +/- longtemps



[www.agro-transfert-rt.org](http://www.agro-transfert-rt.org)

- Matière organique du sol contribue à la fertilité des sols :
    - Fourniture de nutriments par reminéralisation
    - Résistance à l'érosion, amélioration des propriétés hydriques...
    - Stimulation de l'activité biologique des sols
- **Importance de maintenir ou ↗ les stocks de matière organique du sol**

# Comment maintenir / augmenter la matière organique des sols ?

- Conversion en prairies permanentes, introduction de prairies temporaires en rotation
- Restitution des résidus de culture (paille...)
- Restitution des déchets organiques : fumiers, composts urbains...
- Augmenter la production de biomasse végétale : couverts végétaux, agroforesterie, amélioration des rendements ...



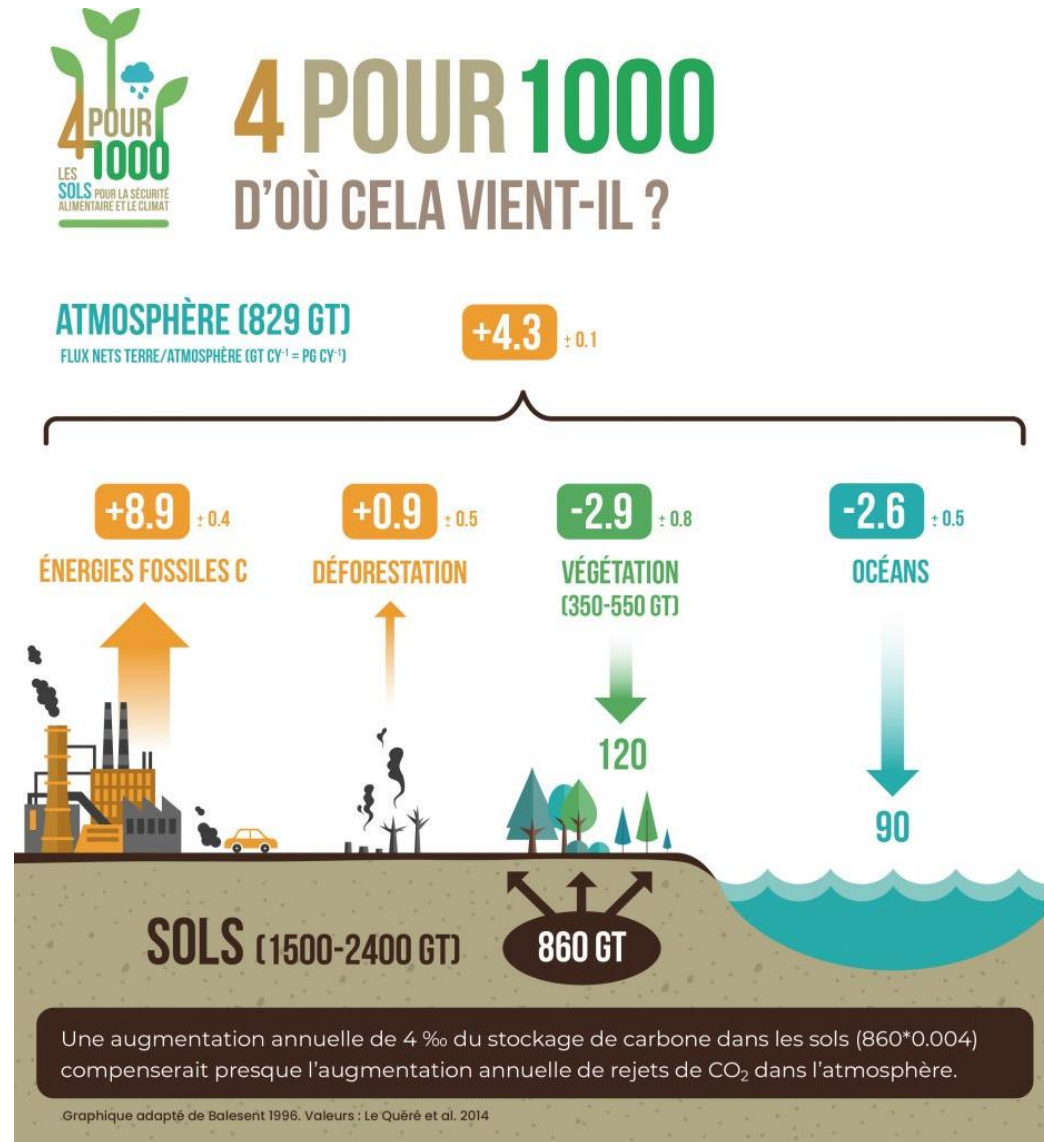
*Epandage de compost*



*Couvert végétal à la place d'un sol en interculture (cultivar.fr)*

# Stockage de C et lutte contre le changement climatique

- Matière organique du sol = principalement du C
- Stockage de C dans les sols = retrait de CO<sub>2</sub> atmosphérique → contribution à l'atténuation du changement climatique
- Initiative 4 pour 1000 : une augmentation de 4‰ des stocks de C du sol par an pourrait compenser le surplus d'émissions de CO<sub>2</sub> anthropiques



<https://4p1000.org/decouvrir/>

# Conclusion

- Engrais minéraux ont permis une forte augmentation de la production alimentaire mondiale
- Production d'engrais minéraux non durable
- Des alternatives envisageables à combiner : substitution des engrais (déchets organiques...) et changements de systèmes alimentaire et agricole
- Rôle clé de la matière organique dans le maintien de la fertilité des sols
- Diverses pratiques envisageables pour augmenter la matière organique des sols
- Un rôle à jouer également dans la régulation du climat

# Merci de votre attention

