



Retour au sol des digestats de méthanisation

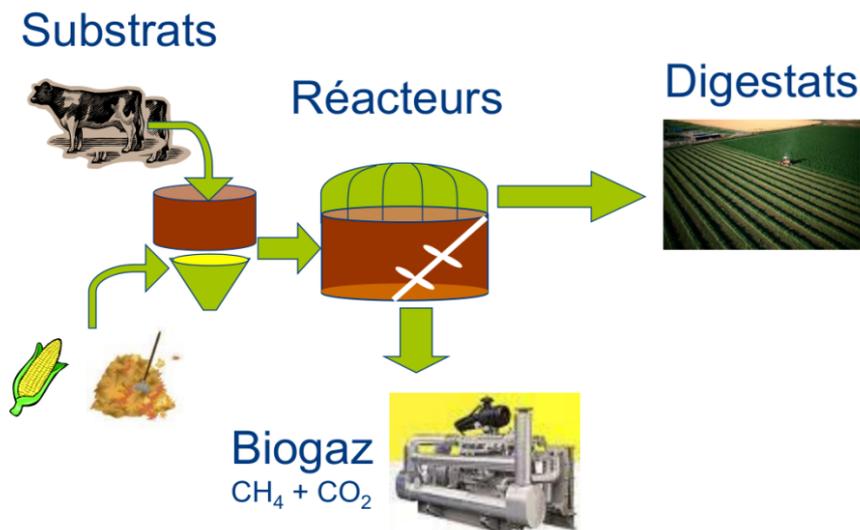
Florent Levavasseur, Sabine Houot
INRAE, AgroParisTech, Université Paris Saclay,
UMR ECOSYS, 78850 Thiverval-Grignon

en partenariat avec



Méthanisation et digestats

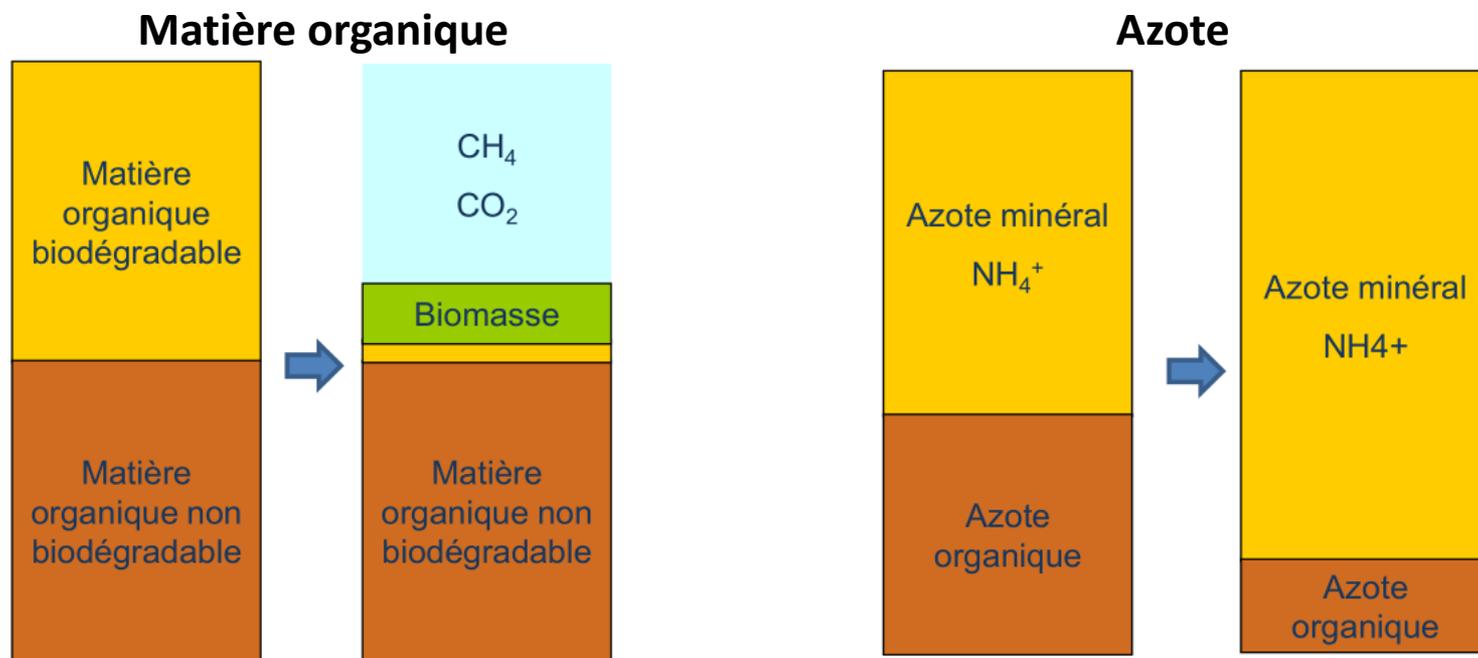
- Production de biogaz (méthane CH_4 et dioxyde de carbone CO_2) par fermentation anaérobie (sans oxygène) de résidus organiques
- Résidus de la méthanisation : le digestat → fertilisation
- Caractéristiques digestats: f(substrats, procédés)
- Effets au champ: f(digestat, pratiques)
- Stockage



Girault (2019)

Transformation de la matière au cours de la méthanisation

- Dégradation +/- complète de la matière organique :
 - \searrow matière organique dans le digestat, mais relativement + stable
 - Conservation de l'azote dans le digestat, mais \nearrow de la fraction minérale
 - Conservation des autres éléments (P, K...)



Girault (2019)

Effets des digestats lors du retour au sol



Photo V. Moinard

- Apport de nutriments (N, P, K...)
- Apport de matière organique :
 - Augmentation de la fourniture d'azote à long terme
 - Effets associés sur la fertilité physique et biologique du sol
 - Stockage de carbone (lutte contre réchauffement climatique)
- Perte N ammoniacale / pollution de l'air

Objet de la
présentation

- Contamination du sol
- Compaction du sol
- Lixiviations de nitrates, émissions de gaz à effet de serre (N_2O) ...
- Mais aussi d'autres effets du fait des changements de systèmes de culture associés à la méthanisation (rotation, couverts...)

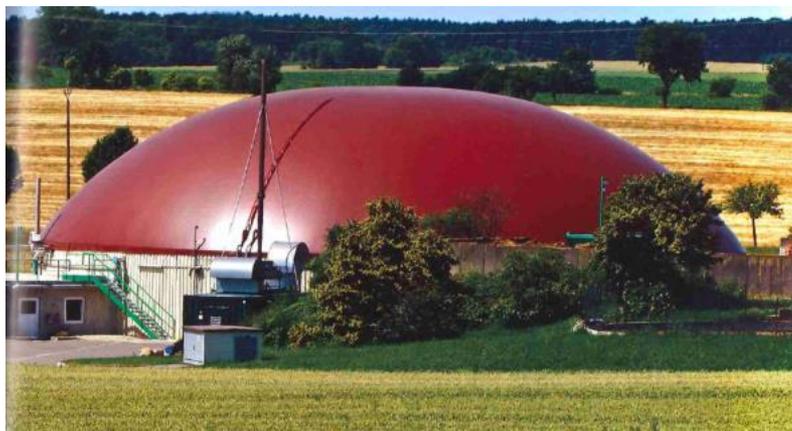
Plan

- Introduction
- Variabilité des digestats
- Valeur fertilisante azotée et volatilisation ammoniacale
- Valeur amendante à long terme
- Valeur fertilisante P et autres effets des digestats
- Conclusion

Des méthanisations et des digestats

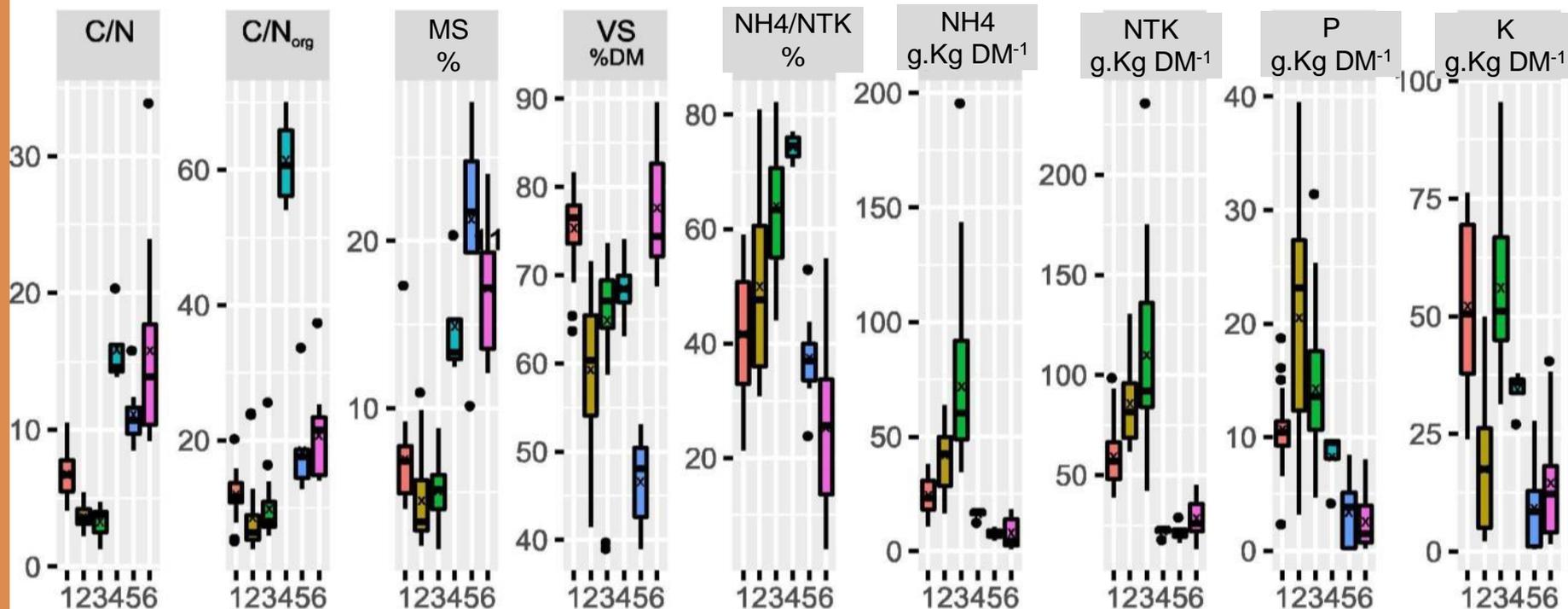
- Variabilité des process (voie humide / sèche, continue / discontinue)
- Variabilité des post-traitements (séparation de phase plus ou moins poussée)
- Variabilité des intrants (effluents d'élevage, CIVE, déchets agro-industriels, boue STEP...)

→ **Grande diversité des digestats**



Influence des intrants

Digestat bruts

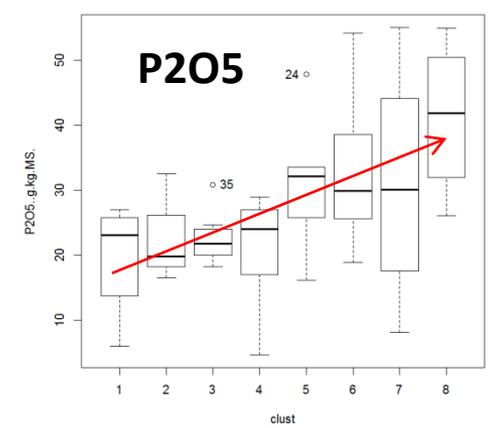
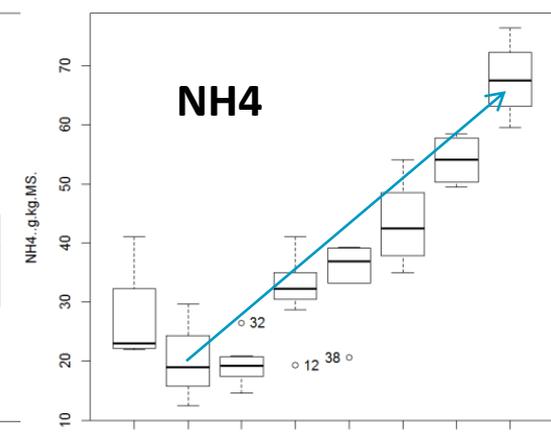
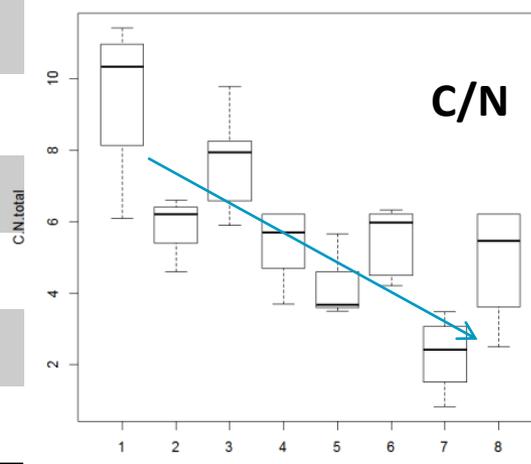
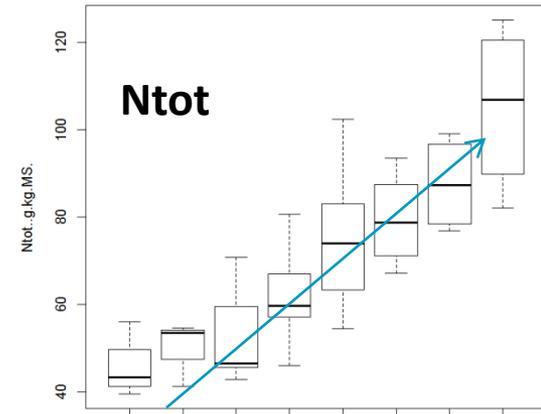
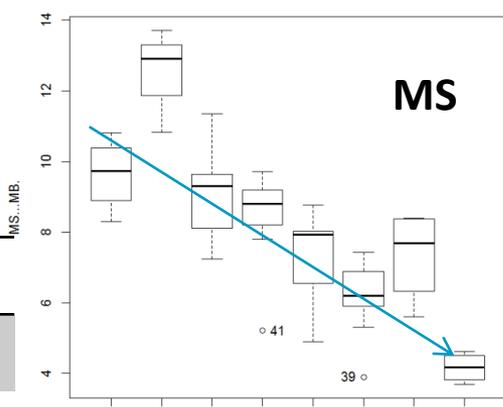


- | | | |
|-------------|----|--|
| | 1. | Fumiers, ensilage |
| Voie humide | 2. | Boues, biodéchets, IAA |
| | 3. | Déchets alimentaires, lisier de porc, FFOM |
| Voie sèche | 4. | Fumiers et autres |
| | 5. | FFOM, biodéchets |
| | 6. | Fumiers, déchets verts |

Adapté de Guilayn et al. (2019)

Digestats bruts (Enquête AAMF)

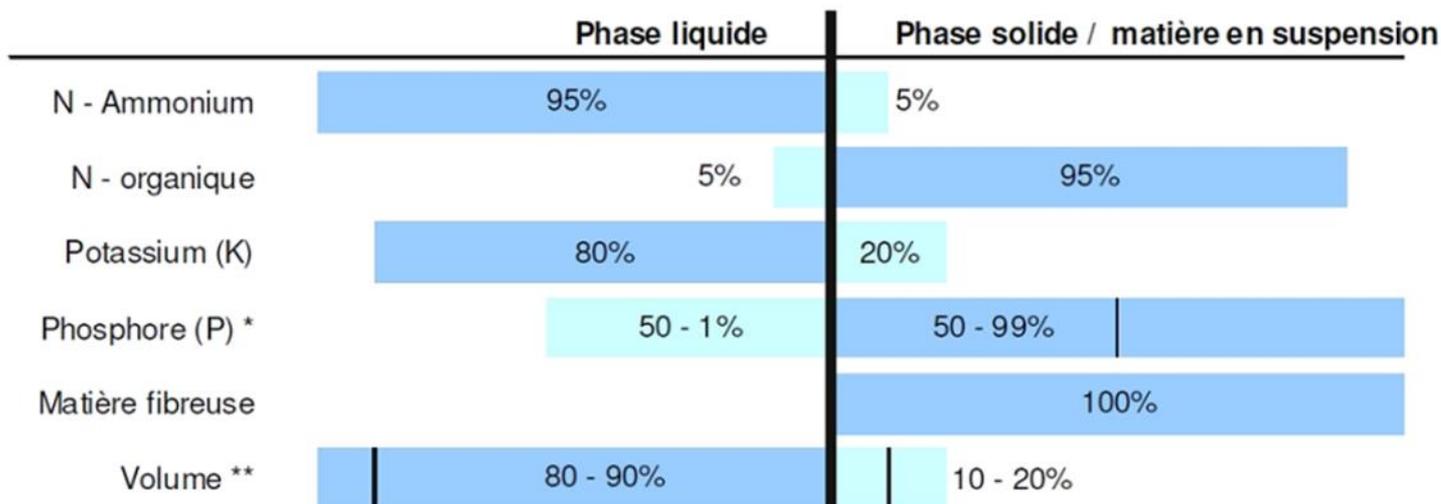
| Classe | Intrants |
|--------|----------------------------------|
| 1 | Fumiers+Vgtx |
| 2 | Fumiers + Vgtx+ Lisier Rum. |
| 3 | Fumiers |
| 4 | Lisier Ruminant |
| 5 | Lisier NR + Biodéchets |
| 6 | Lisier NR |
| 7 | Lisier Ruminant + Graisse |
| 8 | Lisier NR+ Graisse |



- MS et N opposés; même classification pour MS et C/N
- Effet fertilisant augmente de classe 1 à classe 8
- Effet amendant diminue mais moins clair (pas de classification sur les teneurs en MO)

Influence de la séparation de phase

- Obtention d'un digestat liquide majoritairement fertilisant (NH_4) et d'un digestat solide majoritairement amendant



* Dépend de l'utilisation des coagulants / flocculants pour la séparation de la phase solide

* Dépend de la technique utilisée

- Issu de l' « Etat de l'art des méthodes (rentables) pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de taille petite/moyenne », EREP SA, EAWAG, 2009

Influence de la séparation de phase

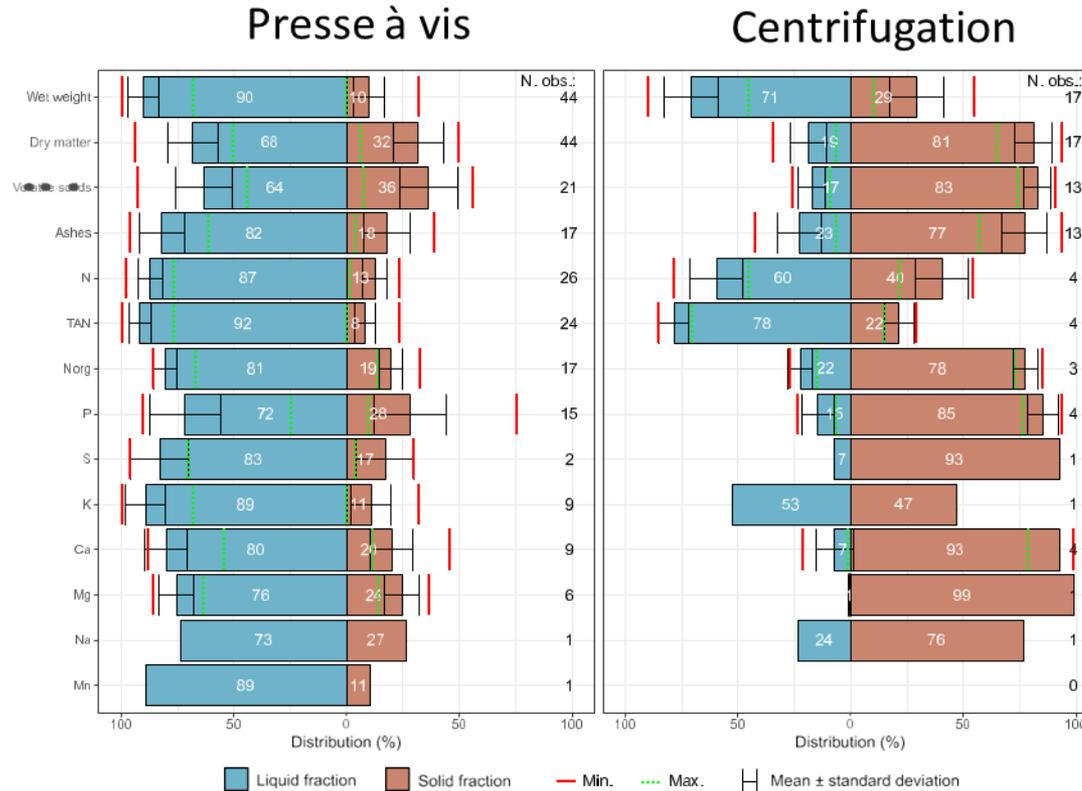
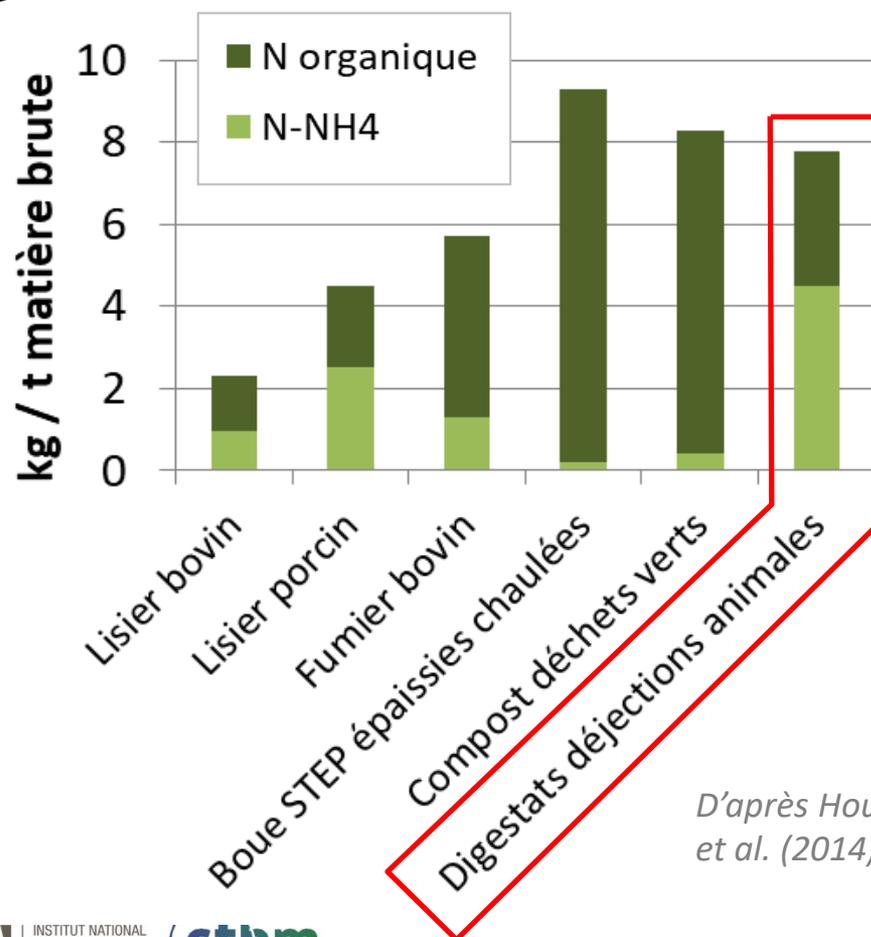


Figure : Mass distributions profiles of digestate mechanical separation according to low and high efficiency categories.

Guilayn et al., 2019

Valeur fertilisante azotée à court terme

- Valeur fertilisante azotée à court terme d'un Produit Résiduaire Organique (PRO) : **N minéral du PRO** + minéralisation N organique
- Teneur en azote en moyenne assez élevée par rapport aux autres PRO
- **Fraction de l'azote sous forme minérale en moyenne plus élevée** que pour les autres PRO
- **Mais forte variabilité** → importance de l'analyse



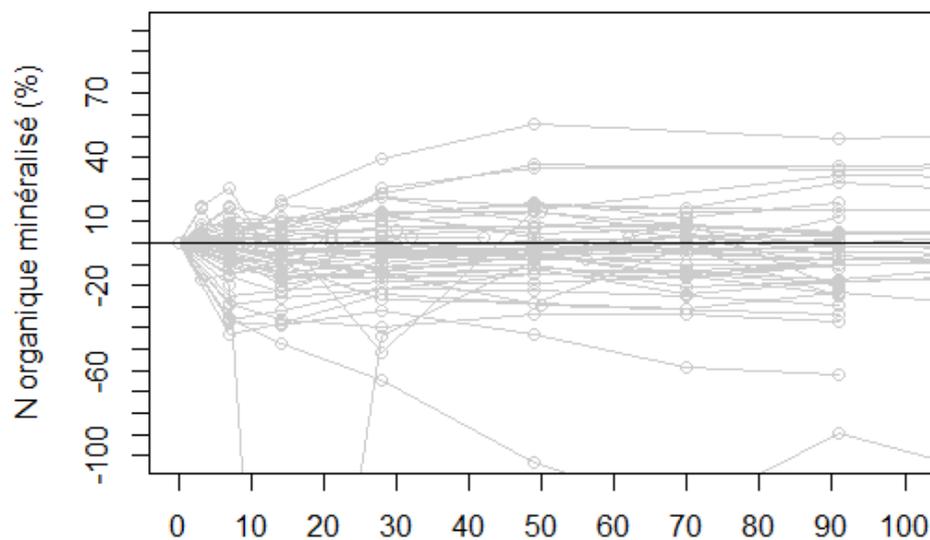
D'après Houot et al. (2014)

Minéralisation de l'azote organique en laboratoire

- Forte variabilité entre digestats, pas de comportement identifié selon le type de digestat, hormis si beaucoup de lisier de porc (+ minéralisation)
- **Contribution variable de l'azote organique des digestats à la valeur fertilisante azotée à court terme**

 Minéralisation au champ peut être différente de celle au labo !

Minéralisation de l'azote organique des digestat



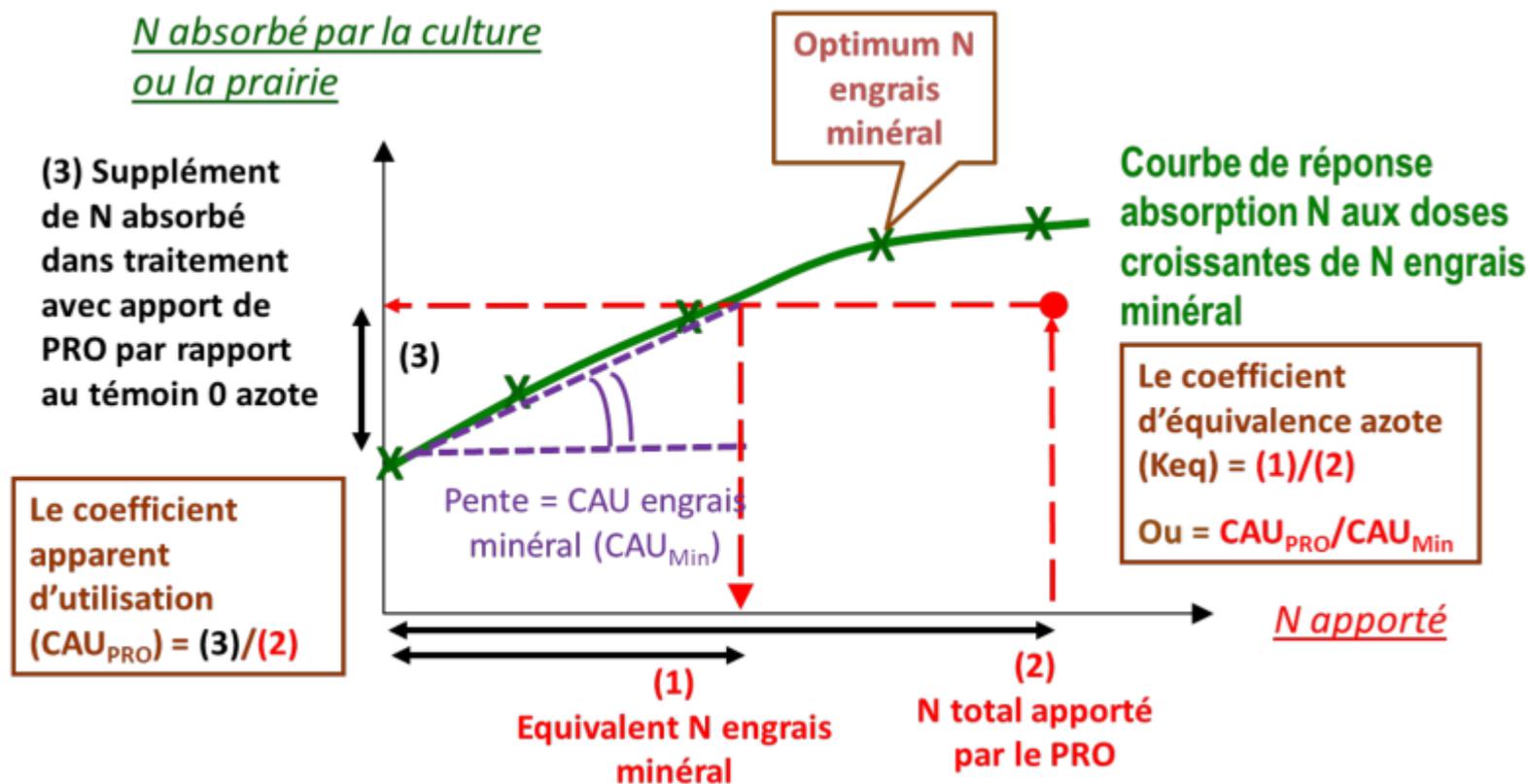
↑ Forte minéralisation
 Faible minéralisation
 Faible immobilisation
 ↓ Forte immobilisation

Minéralisation de l'azote organique de 48 digestats (élevage, urbain, territorial, brut, liquide...)

Données internes ECOSYS

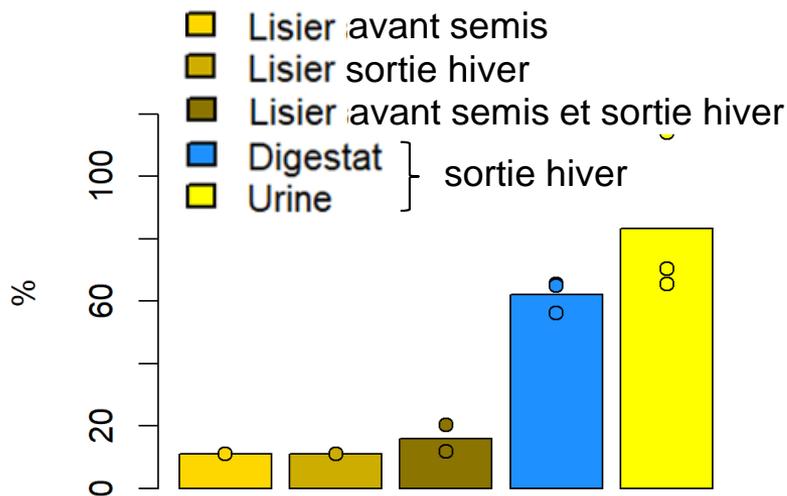
Détermination de la valeur fertilisante azotée au champ

- Coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) et coefficient d'équivalence engrais (KEQ)

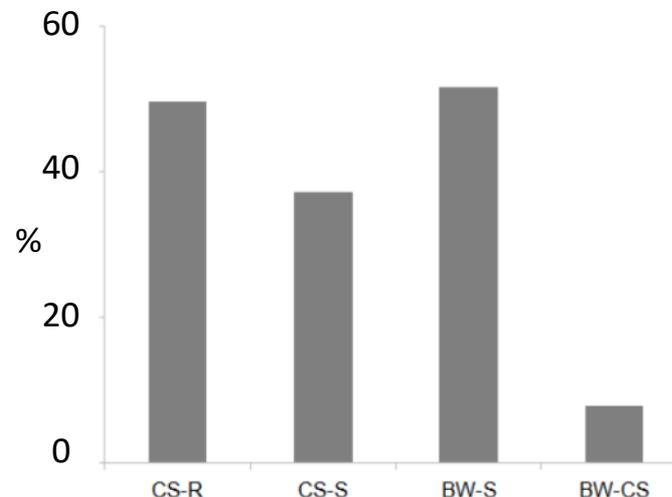


KEQ N : Quelques essais « Ile de France »

CS-R : élevage brut
 CS-S : élevage solide
 BW-S : biodéchets solide
 BW-CS : biodéchets compostés

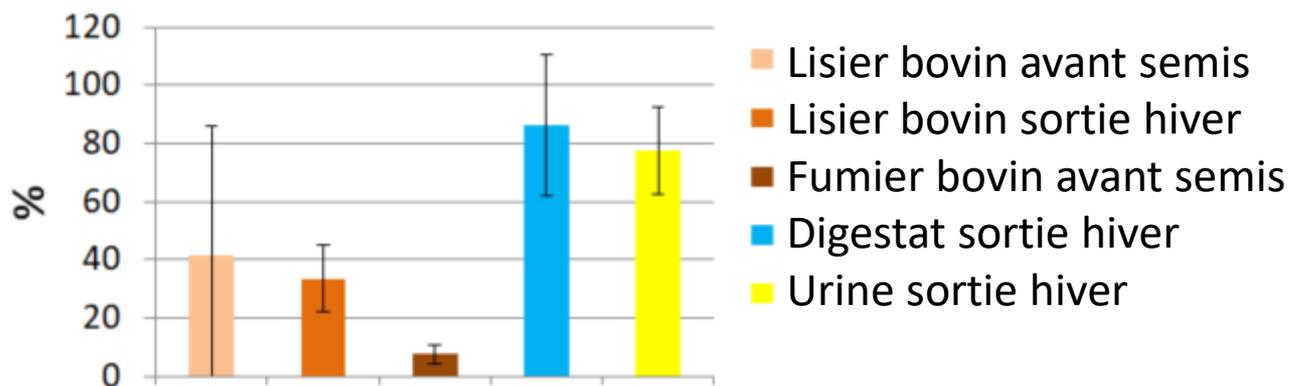


Essai LEADER Saclay 2018
Digestat brut de biodéchets sur blé



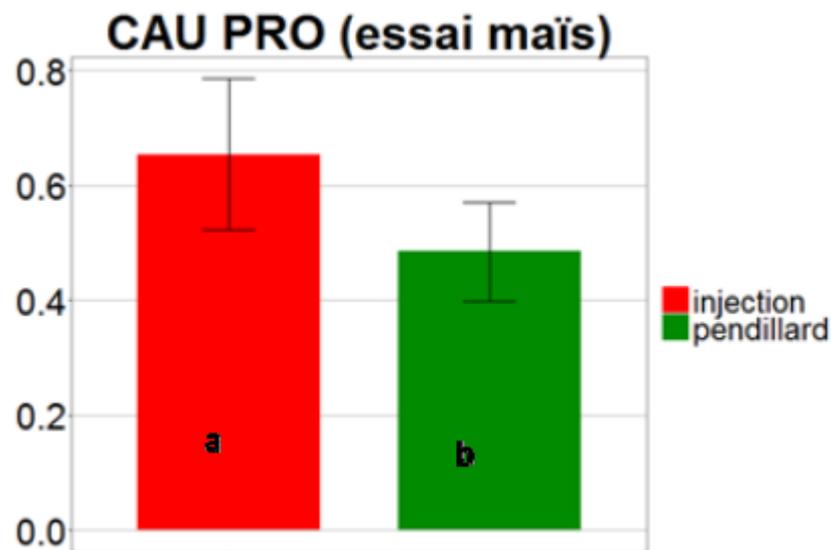
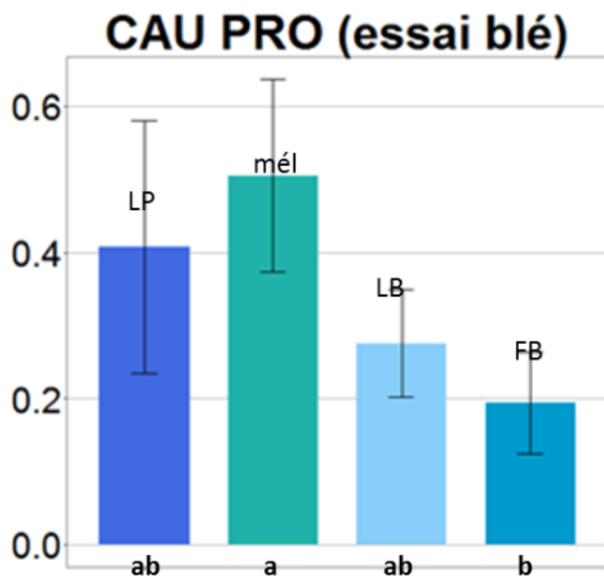
Essai maïs Grignon, adapté de Askri (2015)

Essai LEADER Saclay 2019
Digestat brut de biodéchets sur colza



Valeur azotée et teneur en azote ammoniacal

- Nombreux essais chambre d'agriculture de Bretagne
 - Valeur azotée au champ fortement corrélée à la teneur en azote ammoniacale
 - Importance de l'enfouissement pour réduire la volatilisation

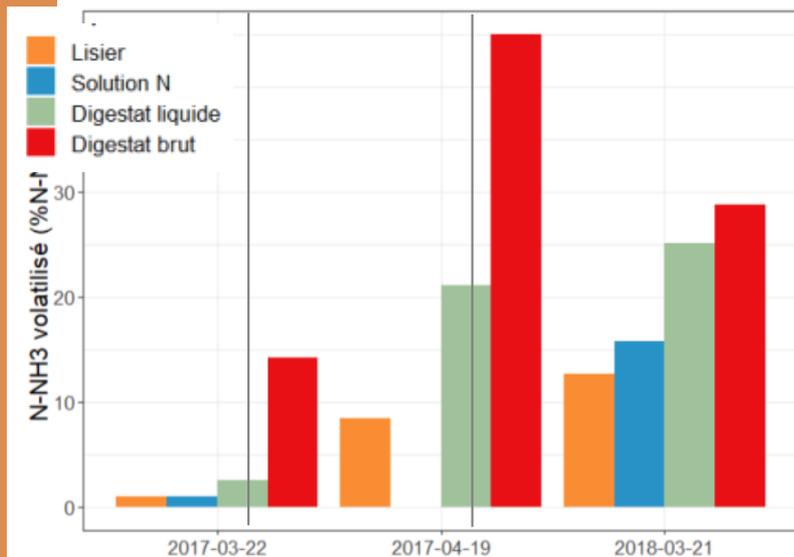


Decoopmann et al. (2017)

$$\text{CAU} = 0,137 + 0,007 \times \text{N-NH}_4/\text{N total} - 0,017 \times \text{C/Norganique} \quad (R^2 = 0,56)$$

Valeur azotée et volatilisation ammoniacale

- Valeur fertilisante azotée à court terme fortement liée à la teneur en azote ammoniacale, généralement élevée → **importance de limiter la volatilisation** :
 - Préférer l'enfouissement, a minima l'épandage au pendillard
 - Eviter les apports avec météo défavorables (température, vent...)
 - Digestat liquide moins sensible que digestat brut (+ infiltration, - volat)
 - Digestat solide en surface très sensible à la volat, mais généralement moins de N ammoniacal dans ces digestats
 - Phénomènes beaucoup plus importants en sols calcaires



Données internes ECOSYS
(Métametha thèse V. Moinard)

Illustration des pertes N par volat
Apport 20 m³/ha de digestat sur orge hiver AB



Buse palette
rendement :
35 qx/ha

Pendillard
Rendement
43 qx/ha



Bilan KEQ N

- Variabilité des KEQ N selon les cultures, le mode d'apport, l'année climatique, le type de digestat, le sol... :
 - Digestat liquide plus efficace (+ NH₄, + infiltration : – sensible à la volat)
 - Apport plus efficace si enfoui immédiatement (ou injecté)
 - Apport plus efficace si pas de vent, frais, pluie aussitôt après, sur sols non calcaires
 - Apport plus efficace au plus près des besoins des cultures

| Culture | Mode d'apport | KEQ N |
|------------------|-------------------------|-----------|
| Maïs grain | Enfoui avant semis | 0.5 – 0.9 |
| Blé sortie hiver | Enfoui avant semis | < 0.2 ? |
| | En culture sortie hiver | 0.2 – 0.7 |
| Colza | Enfoui avant semis | 0.3 - 0.6 |
| | En culture sortie hiver | 0.5 - 0.7 |

Compilation de quelques valeurs de KEQ min-max pour les digestats bruts ou liquides

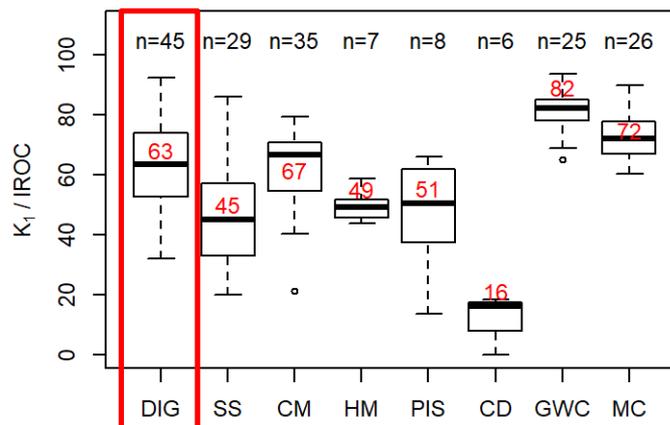
Askri (2015), Decoopman et al., (2017)

Données internes ECOSYS...

Valeur amendante – matière organique

- Valeur amendante (capacité à augmenter la MO du sol), dépend :
 - Teneur en carbone organique du digestat
 - Stabilité du carbone
- Perte de carbone pendant la méthanisation : réduction de 50 % environ de la teneur en carbone par rapport aux intrants
- Peu (pas ?) de données d'essais au champ longue durée pour caractériser l'efficacité de stockage du carbone des digestats
- Estimation de la stabilité du carbone basée sur des analyses labo
 - Variable et intermédiaire entre boues et composts
 - Résultats similaires entre différentes fractions (brut, solide, liquide)

Coefficient isohumique de différentes matières organiques ≈ fraction de carbone qui intègre la matière organique du sol au bout d'un an



DIG : Digestat
 SS : Boue d'épuration
 CM : Fumier bovin
 HM : Fumier de cheval
 PIS : Lisier porcin
 CD : Fientes
 GWC : Compost déchets verts
 MC : Compost de fumier

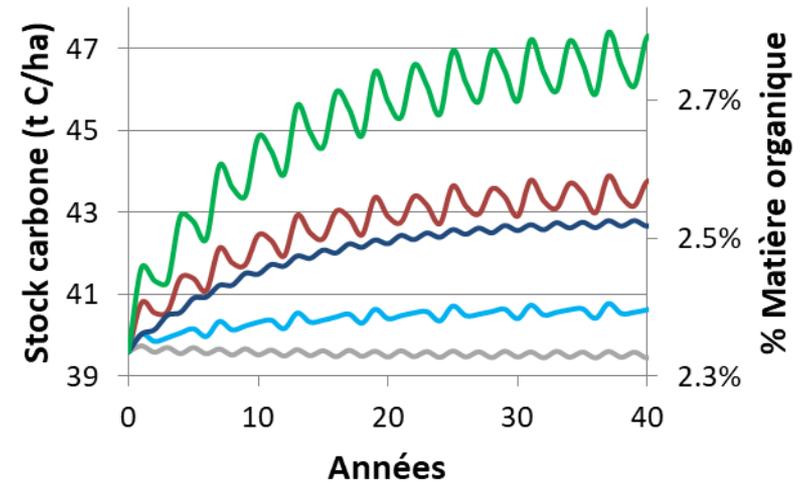
Levasseur et al (2020)

Valeur amendante – simulation des effets d’apports répétés

- Digestat solide avec le plus de potentiel de stockage de carbone
- Effet non négligeable d’apports répétés de certains digestats bruts (et liquides) tous les ans (*Tambone et al., 2019*)

| Type | C (%) | K ₁ (%) | C humifié pour 20 t/ha (t C/ha) |
|-----------------------------|-------|--------------------|---------------------------------|
| Digestat brut élevage | 2 | 74 | 0,3 |
| Digestat brut biodéchets | 0,5 | 65 | 0,07 |
| Digestat solide territorial | 8 | 66 | 1,1 |
| Compost déchets verts | 12 | 82 | 2,0 |

Exemple digestats projet PSDR PROLEG

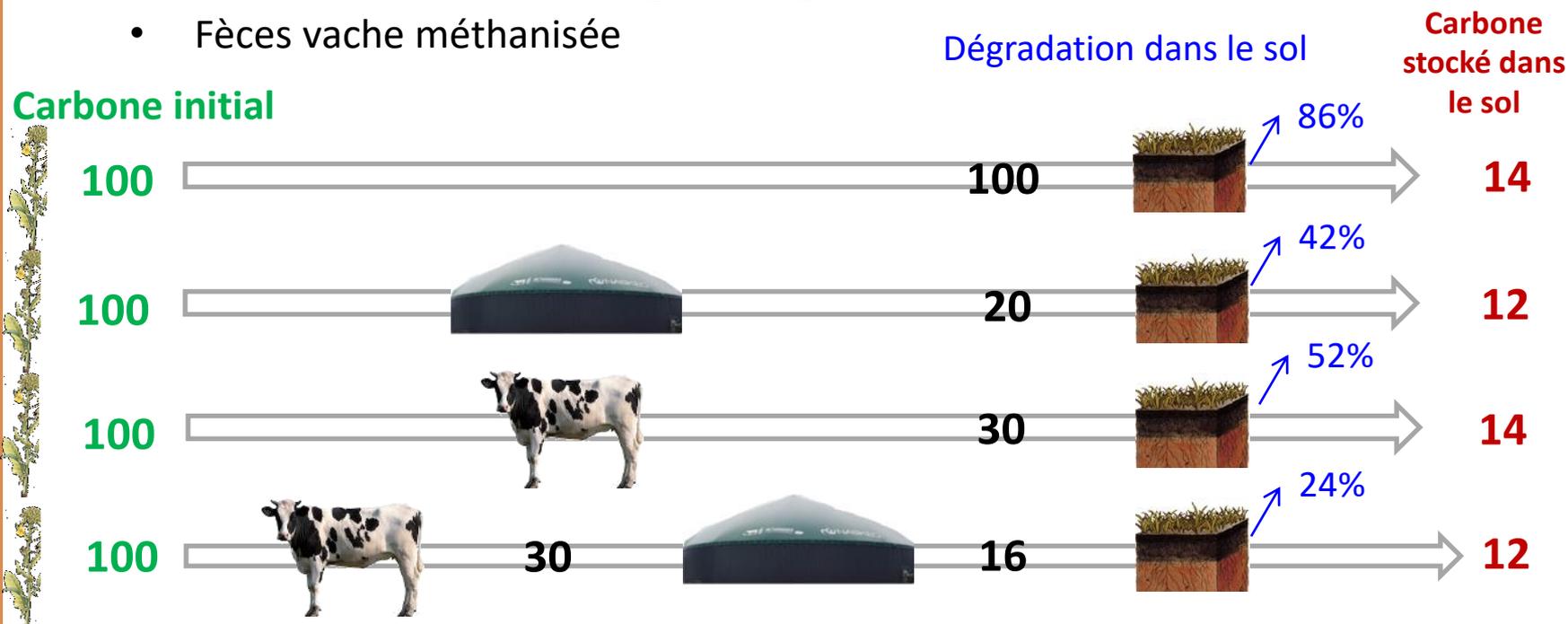


— témoin
— digestat brut 1 an/3
— digestat solide 1 an/3
— digestat brut tous les ans
— compost 1 an/3

Simulation d’apports répétés de digestat et de compost avec AMG

Bilan carbone du sol de la méthanisation

- Comparaison de 4 scénarios de retour au sol (*Thomsen et al., 2013*)
 - Biomasse végétale brute
 - Biomasse végétale méthanisée
 - Fèces vache (biomasse végétale digérée)
 - Fèces vache méthanisée



En considérant les pertes de carbone lors de la digestion des ruminants et/ou la méthanisation, peu de différences sur le C stocké dans le sol

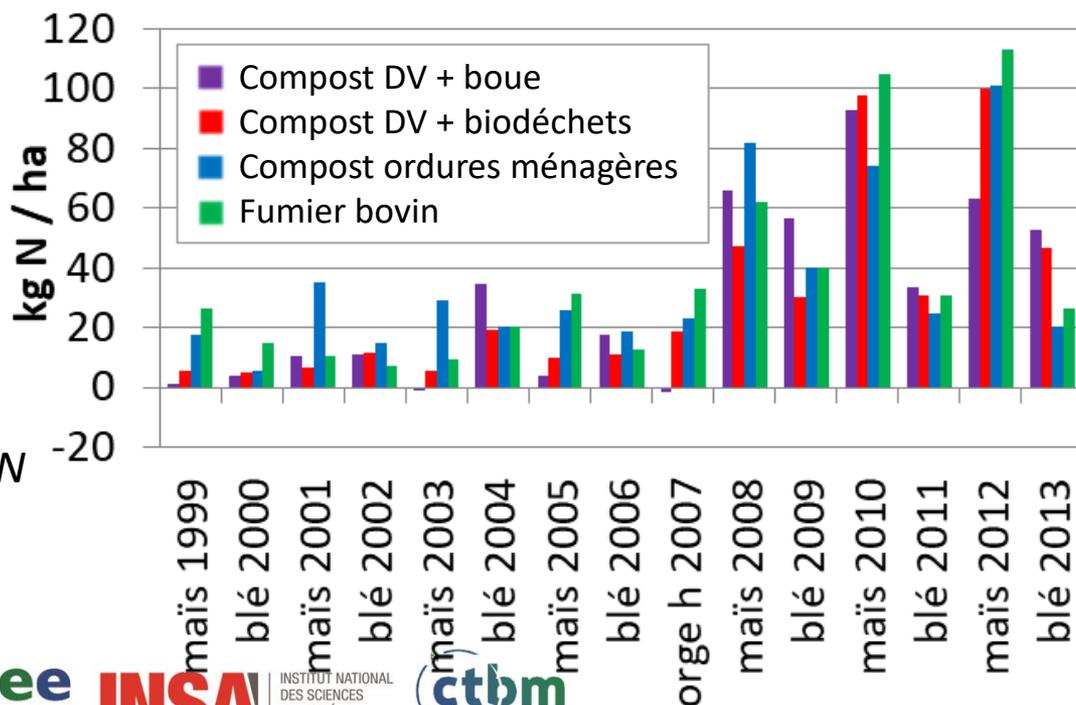
Valeur fertilisante azotée à long terme

- A long terme : augmentation de la matière organique des sols, **augmentation de la fourniture d'azote du sol par minéralisation**
- Pas d'essai de long terme avec digestat permettant de le mettre en évidence : rapprochement avec d'autres essais PRO :
 → Jusqu'à + 100 kg N/ha minéralisé après 15 ans d'apport

*Essai QualiAgro (78) –
apport de composts ou
fumier bovin tous les 2 ans
à 4 t C/ha*

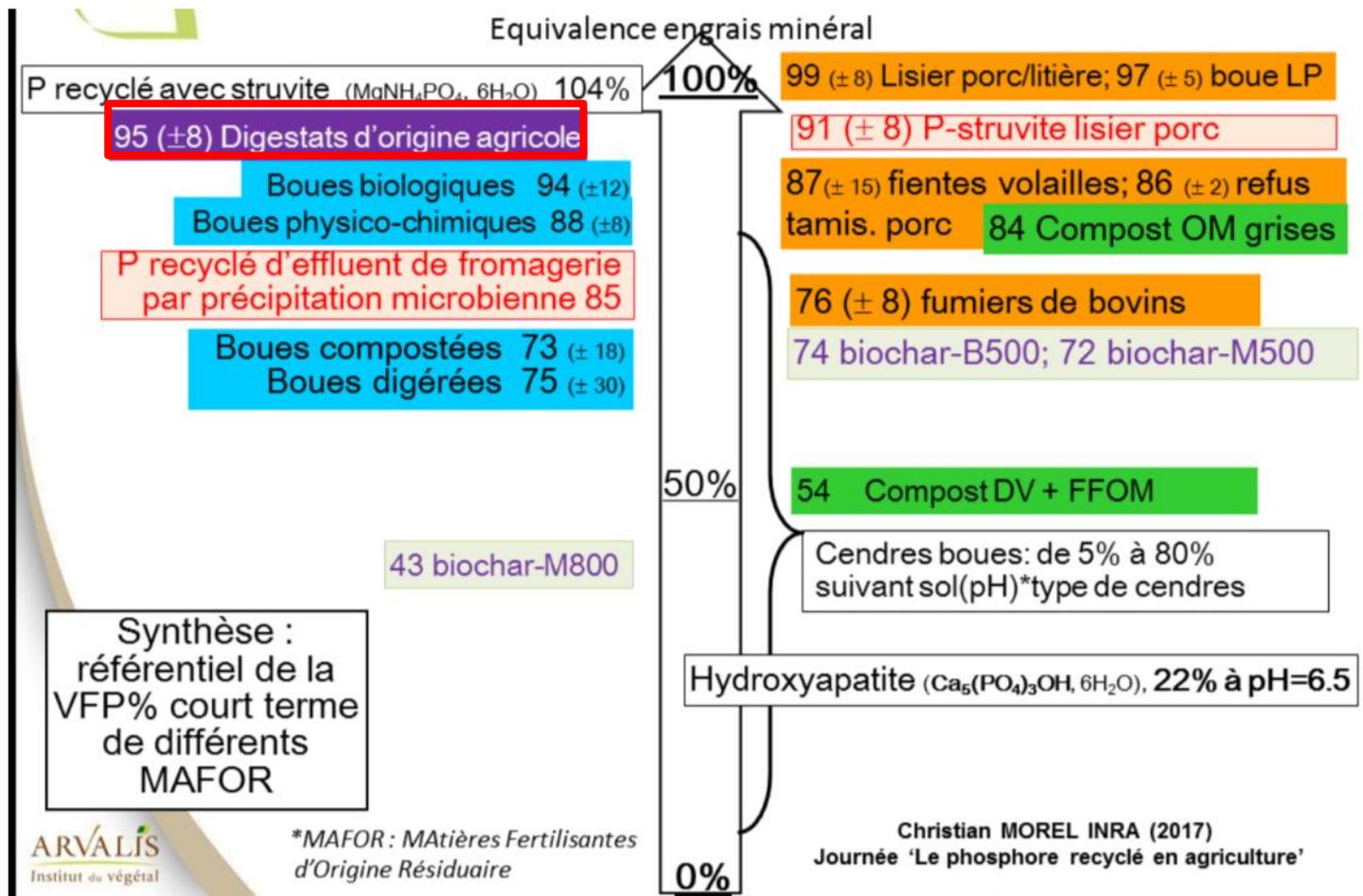
** sur la période absorption N
des cultures (essai N+)*

Surplus de minéralisation par rapport au témoin *



Valeur fertilisante P

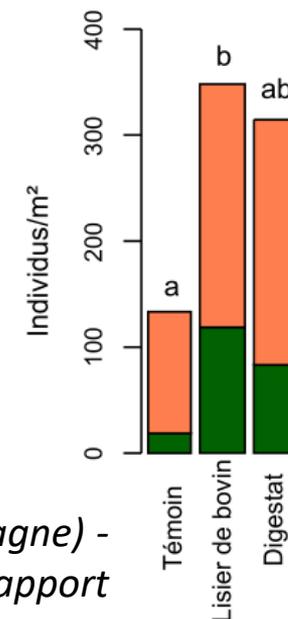
- Efficacité P des digestats \approx P engrais minéral (*Jordan-Meille et al., 2017*)



Effets sur la vie du sol

Microparcelles - Lombrics

■ Spécimens adultes
■ Jeunes spécimens



*Essai Scheyern (Allemagne) -
Résultats après 3 années d'apport*

- **Microfaune du sol** (vers de terre...) (*Burmeister et al., 2010*) :
 - Effet positif à long terme en comparaison à une absence de fertilisation organique (due à l'↑ matière organique)
 - Peu de différences par rapport à des apports de lisier
 - Effet négatif possible à court terme sur les vers (toxicité NH_3 ?)
- **Autres effets sur la biologie du sol** (*Moller, 2015*) :
 - Augmentation de l'activité biologique par rapport à un système sans apport de PRO
 - Peu d'effets ou effets variables par rapport à un système avec apport de PRO non méthanisés
 - Effets à long terme du fait de quantités moindres de matière organique dans le digestat et de sa moindre accessibilité ?

Plan

- Introduction
- Variabilité des digestats
- Valeur fertilisante azotée et volatilisation ammoniacale
- Valeur amendante à long terme
- Valeur fertilisante P et autres effets des digestats
- Conclusion

Bilan – exemples d'apports de digestats et autres PRO

Apport à 30 t/ha



Seulement des exemples, forte variabilité, importance de l'analyse !

| PRO | N (kg/ha) | N rapidement disponible (%) | P ₂ O ₅ (kg/ha) | K ₂ O (kg/ha) | C humifié (t/ha) |
|--------------------------|-----------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------|
| Digestat élevage brut | 120 | 50-70 % | 50 | 90 | 0,7 |
| Digestat élevage liquide | 120 | 50-80 % | 40 | 100 | 0,3 |
| Digestat élevage solide | 120 | < 30 % | 100 | 70 | 1,9 |
| Lisier bovin | 70 | < 50 % | 40 | 80 | 0,4 |
| Fumier bovin | 170 | < 25 % | 90 | 200 | 1,7 |
| Compost DV | 250 | < 5 % | 120 | 150 | 3 |

- Digestat brut : globalement + effet fertilisant N que les autres PRO, effet amendant non négligeable en cas d'apports répétés
- Digestat liquide : encore + fertilisant N, effet amendant négligeable sauf en cas d'apports très réguliers
- Digestat solide : proche d'un fumier
- Tous digestats : apports non négligeables de PK

Conclusion

- Grande variabilité des digestats selon les intrants et le process
→ Importance de l'analyse du digestat
- Valeur fertilisante azotée à court terme fortement dépendante de la teneur en azote ammoniacale
→ Importance de limiter la volatilisation ammoniacale (enfouissement, bonnes conditions météo...)
- Valeur fertilisante P équivalente aux engrais minéraux
- Valeur amendante + élevée que les matières entrantes :
compense la perte de carbone lors de la méthanisation ?
- Peu d'effets ou effets variables sur les propriétés biologiques et physiques du sol par rapport aux mêmes matières non méthanisées, bénéfiques comparés à des systèmes sans apport
- Importance de considérer les effets des modifications de systèmes liées à la méthanisation (CIVE...)

Merci de votre attention

