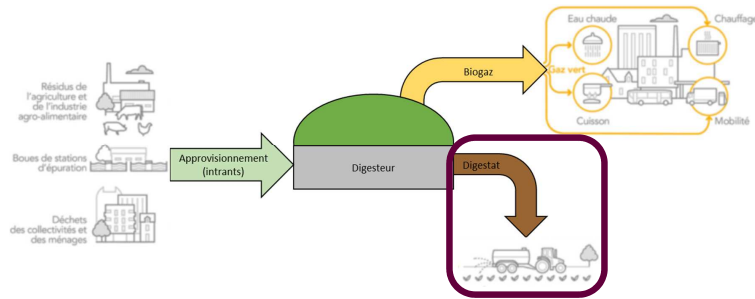


Valorisation des digestats en agriculture



L. Vieublé Gonod (AgroParisTech)

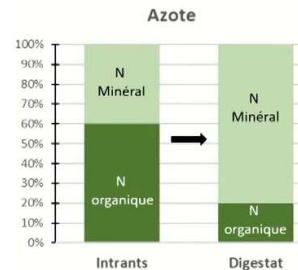
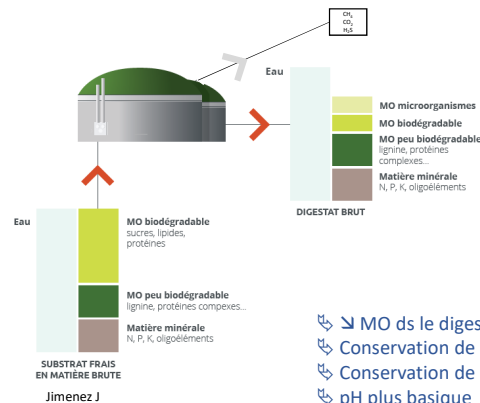


Valorisation des digestats en agriculture

- Caractéristiques des digestats
- Valeur agronomique des digestats :
 - Propriétés fertilisantes vs amendantes
 - Typologie des digestats
- Critères d'innocuité
- Risques liés à l'épandage des digestats
 - Effets sur la qualité des sols
 - Effets sur la qualité des eaux
 - Effets sur la qualité de l'air
- Bonnes pratiques d'épandage
- Aspects réglementaires liés à l'épandage des digestats

Caractéristiques des digestats

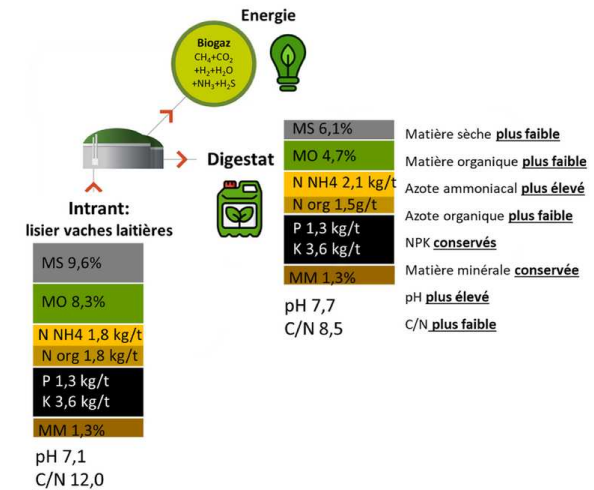
Devenir de la MO au cours de la digestion anaérobie : rien ne se perd, tout se transforme !



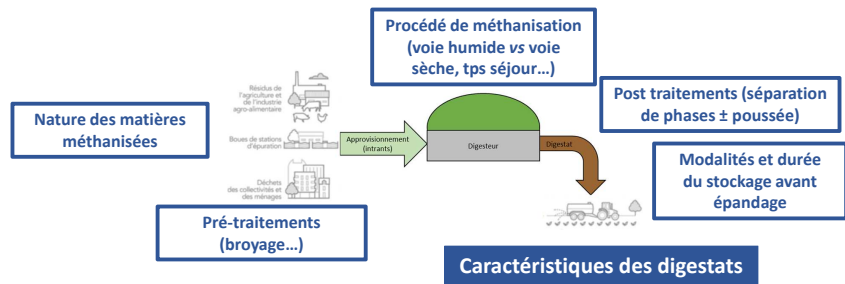
- ↘ MO ds le digestat mais ↗ stabilité (C/N plus faible)
- ↘ Conservation de l'azote mais ↗ de la fraction minérale (NH₄⁺)
- ↘ Conservation de P et K
- ↘ pH plus basique
- ↘ Taux de MS plus faible

Caractéristiques des digestats

Devenir de la MO au cours de la digestion anaérobie : exemple d'un lisier de vaches laitières



Caractéristiques des digestats



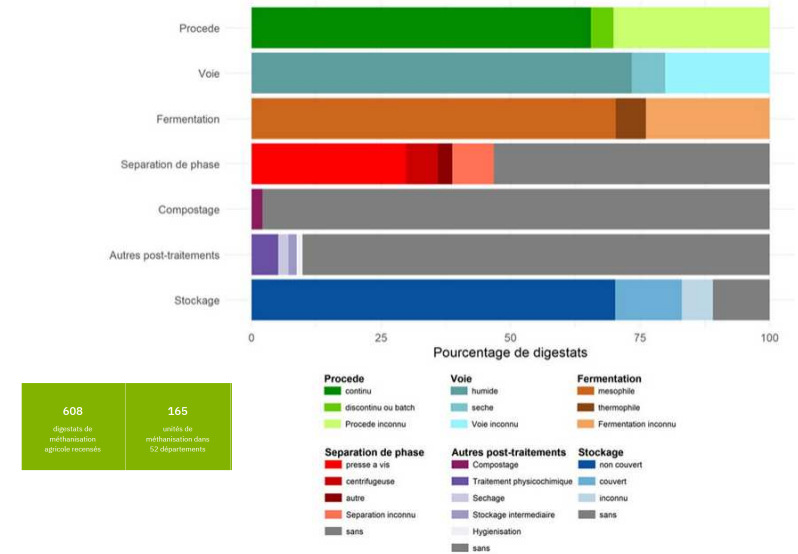
Caractéristiques des digestats



Pas UN mais DES digestats !

Caractéristiques des digestats

Conditions opératoires du méthaniseur et post traitements appliqués aux digestats



Projet Ferti-Dig

Caractéristiques des digestats

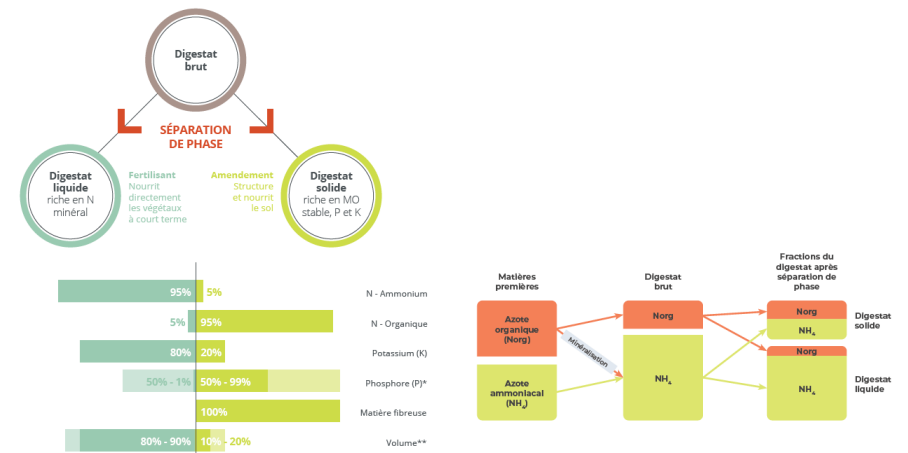
Effets du type d'intrants et du procédé de méthanisation sur la qualité des digestats

Procédé	Matières méthanisées	C/Norg	N rapidement disponible (% N m ^{aj} /N total)	P (g.kg ⁻¹ MS)	K (g.kg ⁻¹ MS)	MS (%)
Humide	Fumier, ensilage	10-12	32-50	10-12	30-70	5-7
Humide	Boues, biodéchets, IAA	8-10	38-60	15-25	10-25	3-6
Humide	Déchets alimentaires, lisier porc, FFOM	9-11	58-70	10-17	40-70	4-6
Sec	Fumiers et autres	57-63	72-75	9-10	30-35	12-15
Sec	FFOM, biodéchets	18-20	38-40	0-5	0-10	20-25
Sec	Fumiers, déchets verts	18-23	12-30	0-5	5-15	15-20

Diversité de digestats avec des propriétés différentes

Caractéristiques des digestats

Effets des post traitements sur la qualité des digestats : séparation de phases

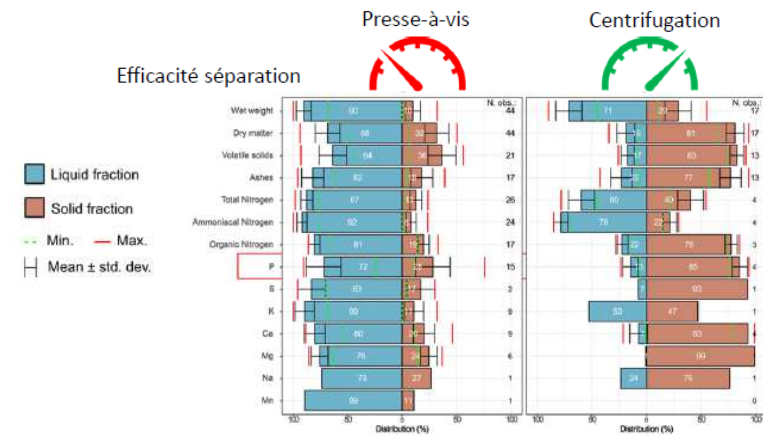


* Dépend de l'utilisation des coagulants / floculants pour la séparation de la phase solide
** Dépend de la technique utilisée

L'utilisation des digestats en agriculture Les bonnes pratiques à mettre en œuvre (2021)

Caractéristiques des digestats

Effets des post traitements sur la qualité des digestats
Séparation de phases : presse à vis vs centrifugation

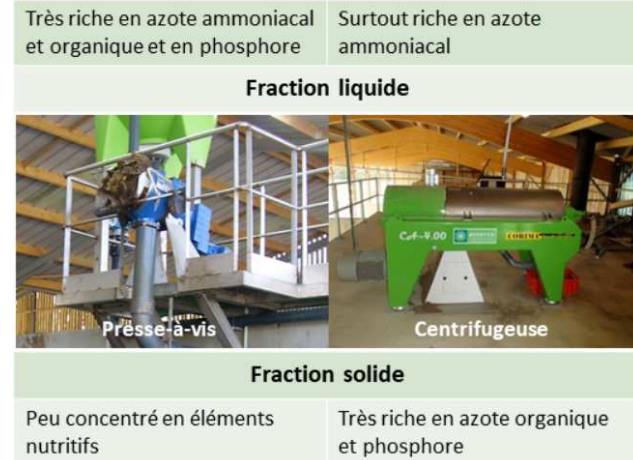


Performances de séparation : centrifugation >> presse à vis (fraction liquide ~ brute)

Guilayn et al (2020), Jimenez (ATEE, 2023)

Caractéristiques des digestats

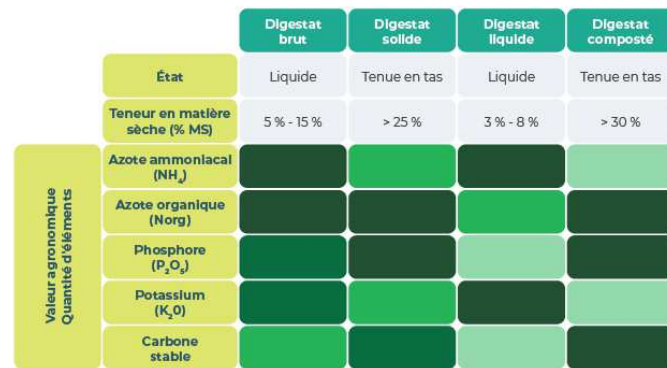
Effets des post traitements sur la qualité des digestats
Séparation de phases : presse à vis vs centrifugation



<https://fertiliser-avec-des-digestats.fr/effets-des-digestats/valeur-agronomique/>

Caractéristiques des digestats

Effets des post traitements sur la qualité des digestats



Légende : Importance de la concentration en éléments

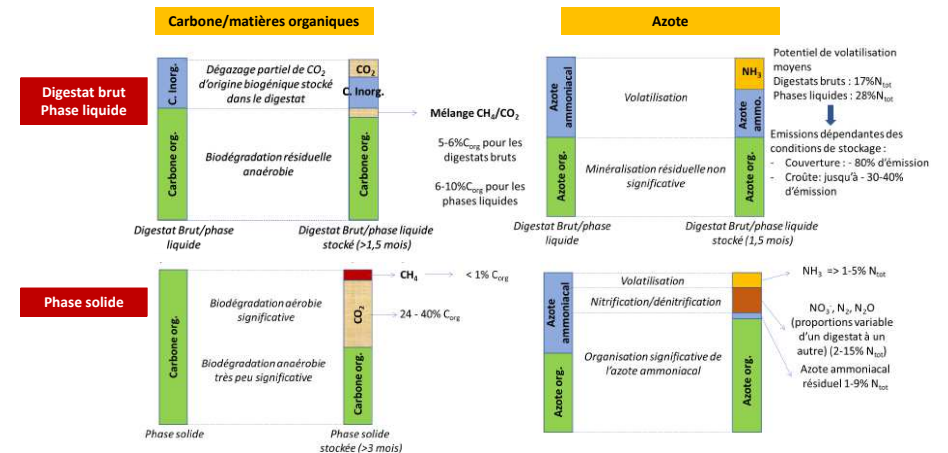
Faible présence

Présence importante

Biodéchets : du tri à la source jusqu'à la méthanisation (2021)

Caractéristiques des digestats

Effets des post traitements sur la qualité des digestats : stockage



Stockage : impact sur qualité des digestats (C et N) et émissions NH₃, GES

Stockage phase solide : résultats ~ compostage

Jimenez (ATEE, 2023)

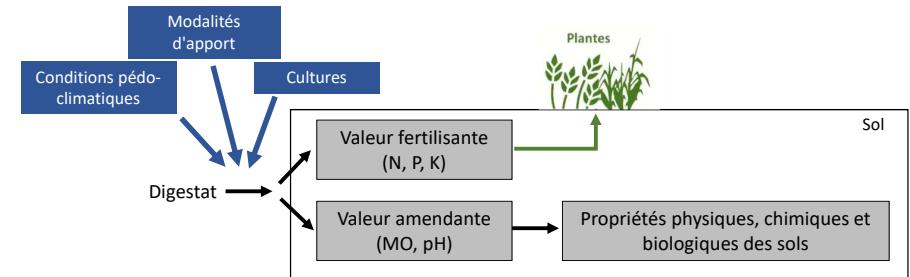
Caractéristiques des digestats

↳ Diversité ↗ de digestats avec des caractéristiques différentes (effets des intrants, procédés, des post traitements)

↳ Digestat : ≠ types de MO ± biodégradables, nutriments... → Propriétés agronomiques : effets fertilisants vs effets amendants

Valeur agronomique des digestats

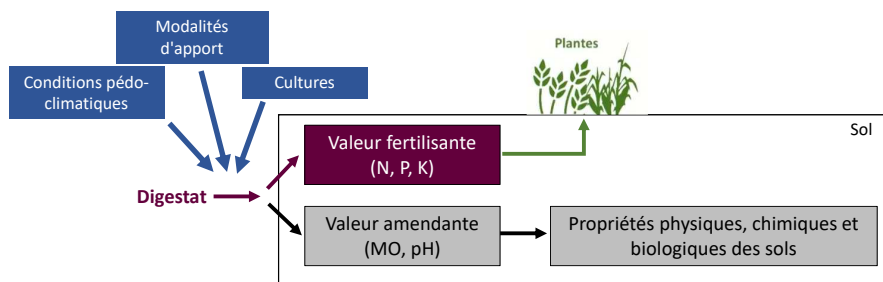
➤ Valeur fertilisante vs amendante



➤ Apport unique vs apports répétés, effets à court, moyen et long terme

Valeur agronomique des digestats

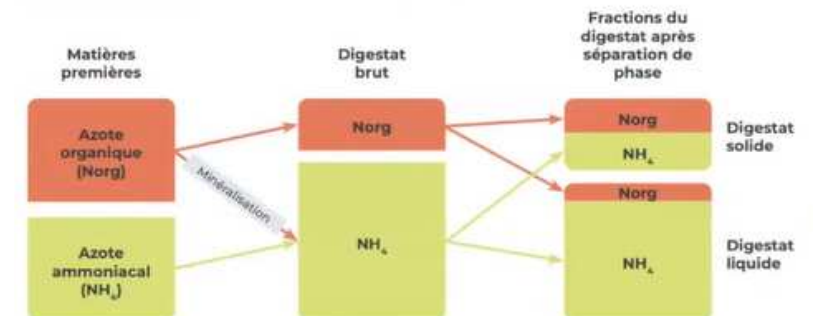
➤ Valeur fertilisante



➤ Apport unique vs apports répétés, effets à court, moyen et long terme

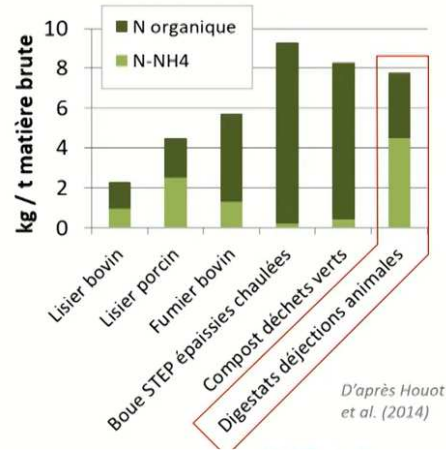
Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée : évolutions de N au cours de la méthanisation



Valeur agronomique des digestats

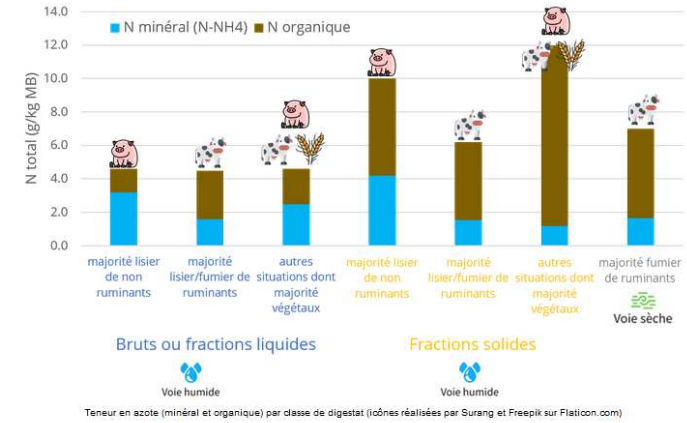
➤ Valeur fertilisante azotée : composition azotée des digestats



- Teneur totale en azote ↗ / effluents bruts
- Fraction N minéral immédiatement disponible pour les cultures ↗
- ↳ Economies d'engrais minéral surtout en cas d'intrants extérieurs

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée

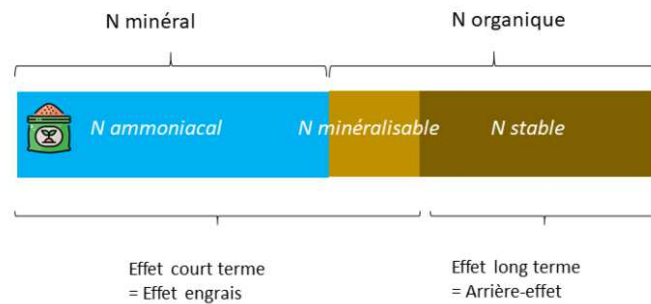


↳ Teneurs et proportions N minéral vs N organique variables dans les digestats

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée

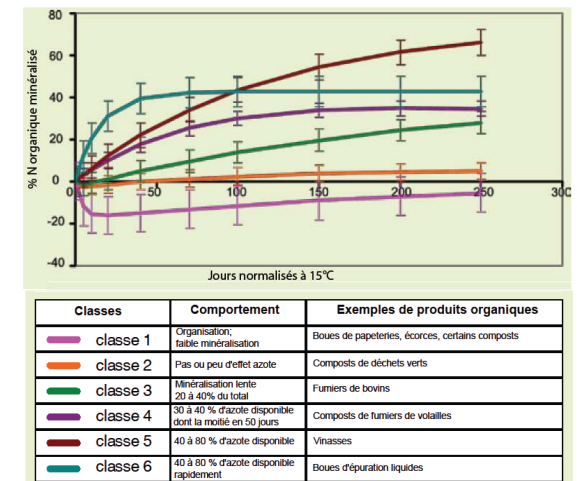
Disponibilité des éléments nutritifs



Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée

Disponibilité des éléments nutritifs

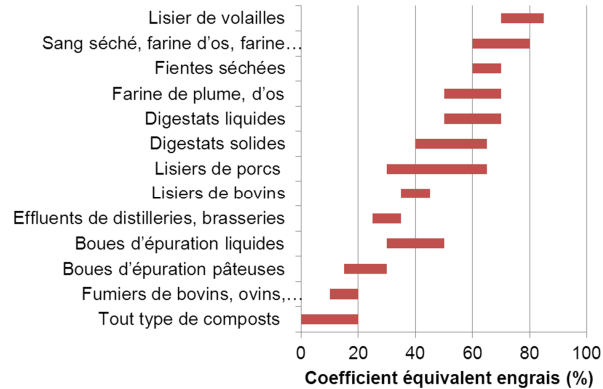


Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée au champ : coefficients équivalent N

☞ CAU (coef utilisation apparente) : (supplément de N absorbé par plantes ds traitement PRO / Témoin 0 N) / N total apporté par les PRO

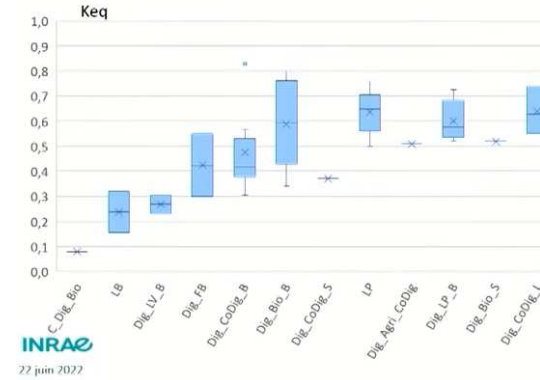
☞ Keq (coef équivalent engrais) : CAU PRO / CAU engrais minéral



D'après Gutser et al., 2005
ESCo « Elevage et Azote » 2012

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée : équivalence engrais



INRAE
22 juin 2022

☞ Méthanisation ↗ disponibilité N (compostage ↘)
☞ Valeur fertilisante directement liée à la teneur en N minéral

Code figures	Nomenclature
C-Dig-Bio	Urban_Compost_digestat_biodechets
LB	Effluent_Elevage_Lisier_bovins
Dig-LV-B	Effluent_Elevage_Digestat_Lisier_volailles_brut
Dig-FB	Effluent_Elevage_Digestat_fumier_bovins
Dig-CoDig-B	Effluent_Elevage_Digestat_co-digestion_brut
Dig-Bio-B	Urban_Digestat_biodechets_brut
Dig-CoDig-S	Effluent_Elevage_Digestat_co-digestion_solide
LP	Effluent_Elevage_Lisier_porc
Dig-Agr-CoDig	Autre_Agricole_Digestat_co-digestion
Dig-LP-B	Effluent_Elevage_Digestat_Lisier_Porc_brut
Dig-Bio-S	Urban_Digestat_biodechets_solide
Dig-CoDig-L	Effluent_Elevage_Digestat_co-digestion_liquide

Keq < 0.3
Compost digestat biodéchets
Lisier bovins
Digestat litière volaille brut

Keq 0.3-0.6
Digestat fumier bovins
Digestat codigestion EE brut/solide
Digestat biodéchet brut

Keq ≥ 0.6
Lisier porcs
Digestats agri. codigestion liq.
Digestat codigestion EE liq.
Digestat lisier porc brut
Digestat biodéchet solide (confirmer)

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée

Exercice 1

Un agriculteur breton produit un digestat brut qui se caractérise par une teneur en azote total de 3,7 g/kg de matière brute et une masse volumique de 1,1 t/m³. Quelle dose de digestat l'agriculteur doit-il épandre sur son blé en sortie d'hiver pour apporter l'équivalent de 60 kg/ha d'azote efficace (200 kg/ha d'ammonitrate) ?

Keq engrais digestat brut Bretagne céréales printemps = 0.6

Exercice 2

A combien d'azote total et d'azote efficace correspond un épandage de 25 m³/ha d'un digestat brut (N total = 3,3 g/kg, masse volumique = 1,05 t/m³) apporté sur un maïs en Lorraine ?

Keq engrais digestat brut Lorraine céréales printemps = 0.7

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante azotée

Quantité de digestat à épandre

Pour connaître la quantité d'azote efficace du digestat :

$$\text{teneur N efficace/produit brut (\%)} = \text{teneur en N total/produit brut* (\%)} \times \text{Keq N**}$$

Produits liquides

$$\text{Dose à épandre (m}^3\text{/ha)} = \text{Dose N à apporter (kg N/ha)} / \left(\text{teneur N efficace/produit brut (\%)} \times \text{masse volumique* (t/m}^3\text{)} \right)$$

Produits solides

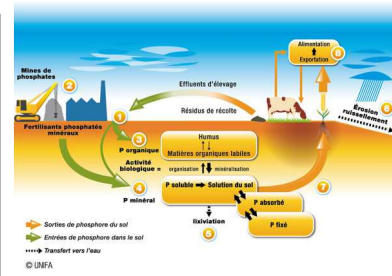
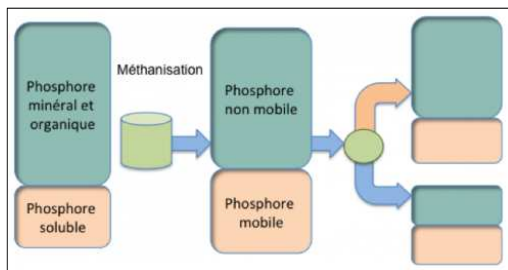
$$\text{Dose à épandre (t/ha)} = \text{Dose N à apporter (kg N/ha)} / \text{teneur N efficace/produit brut (\%)}$$

* La masse volumique et la teneur en N total/produit brut sont fournies lors des analyses en laboratoire.

** Les valeurs de Keq N sont disponibles sur les sites internet des DREAL ou DRAAF locales.

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante : évolutions du phosphore au cours de la méthanisation



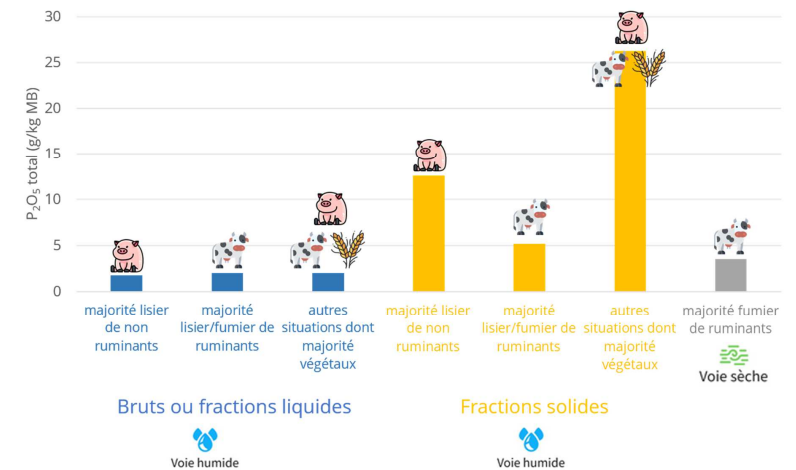
<https://fertilisation-edu.fr/cycles-bio-geo-chimiques/le-cycle-du-phosphore-p.html>

- ↳ Une partie du phosphore organique ou minéral est transformée en ions phosphates solubles ($H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}).
- ↳ La majorité des formes de phosphore reste fixée aux matières organiques, et se retrouvera donc présente dans la fraction solide.

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante phosphore

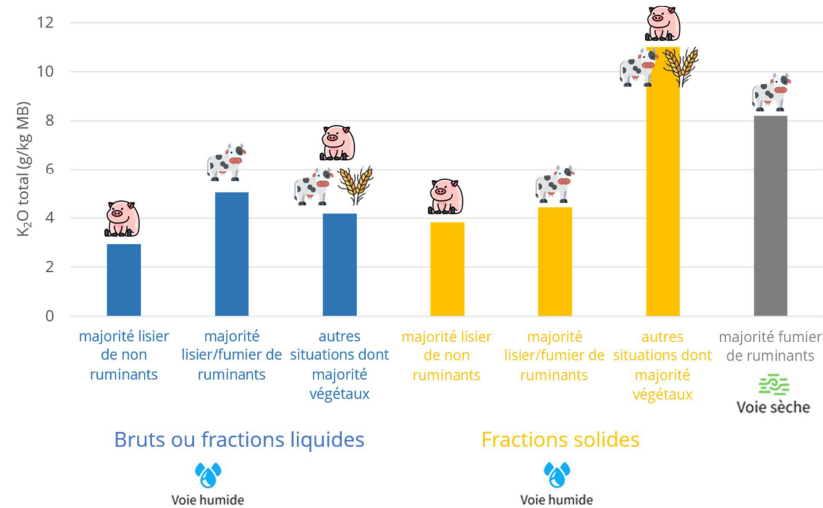
Teneur en phosphore par type de digestat



Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante potassium

Teneur en potassium par type de digestat



Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante phosphore et potassium

Exercice

Un agriculteur décide d'épandre un digestat dont les teneurs en P_2O_5 et K_2O sont de 3 % et 3,5 % respectivement. A-t-il besoin de compenser son apport de $30 m^3/ha$ sur maïs avec un engrais phosphorique et/ou potassique du commerce sachant que les exportations pour le maïs grain sont de l'ordre de $6 kg P_2O_5/tonne$, de $5.5 kg K_2O/tonne$ et que le rendement est de $10t/ha$.

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante phosphore et potassium

Pour connaître la quantité de phosphore apportée par le digestat :

$$\text{Quantité de P2O5 apportée (kg/ha)} = \text{Dose épandue (m3/ha)} \times \text{Teneur en P2O5/produit brut* (\%)}$$

Pour connaître la quantité de potasse apportée par le digestat :

$$\text{Quantité de K2O apportée (kg/ha)} = \text{Dose épandue (m3/ha)} \times \text{Teneur en K2O/produit brut* (\%)}$$

*La teneur en P2O5/produit brut et K2O produit brut sont fournies lors des analyses en laboratoire.

Un agriculteur décide d'épandre un digestat dont les teneurs en P_2O_5 et K_2O sont de 3 ‰ et 3,5 ‰ respectivement. A-t-il besoin de compenser son apport de 30 m³/ha sur maïs avec un engrais phosphorique et/ou potassique du commerce sachant que les exportations en P_2O_5 pour le maïs grain sont de l'ordre de 6 kg P_2O_5 /tonne et que le rendement est de 10t/ha.

La quantité de phosphore apportée est de :

Volume de digestat apporté x teneur en P_2O_5 = 30 x 3 = 63 kg/ha

La quantité de potasse apportée est de :

Volume de digestat apporté x teneur en K_2O = 30 x 3,5 = 90 kg/ha

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur fertilisante phosphore et potassium

Pour connaître la quantité de phosphore apportée par le digestat :

$$\text{Quantité de P2O5 apportée (kg/ha)} = \text{Dose épandue (m3/ha)} \times \text{Teneur en P2O5/produit brut* (\%)}$$

Pour connaître la quantité de potasse apportée par le digestat :

$$\text{Quantité de K2O apportée (kg/ha)} = \text{Dose épandue (m3/ha)} \times \text{Teneur en K2O/produit brut* (\%)}$$

*La teneur en P2O5/produit brut et K2O produit brut sont fournies lors des analyses en laboratoire.

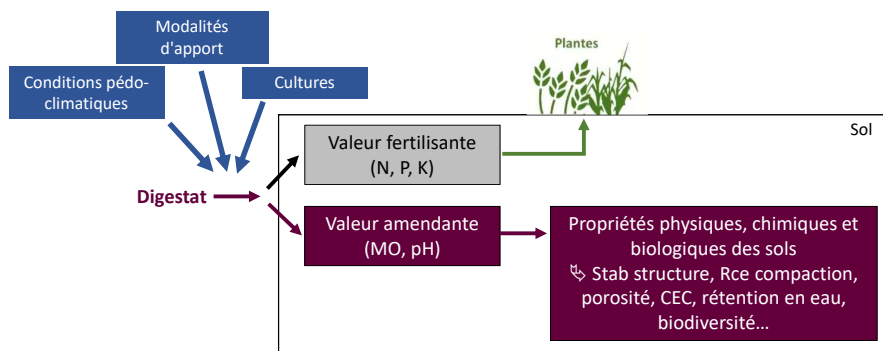
Ces quantités sont à soustraire de la dose de P ou de K à apporter. Le calcul de cette dose est à raisonner à l'échelle de la rotation en considérant les exportations des cultures.

Pour le maïs grain les exportations sont de l'ordre de 6 kg P_2O_5 /tonne. Un rendement de 10 tonnes/ha correspond à 60 kg P_2O_5 /ha. Dans cet exemple, un apport de 30 m³/ha de digestat est compatible avec l'équilibre de la fertilisation phosphatée.

Pour le maïs grain les exportations sont de l'ordre de 5,5 kg K_2O /tonne. Un rendement de 10 tonnes/ha correspond à 55 kg K_2O /ha. Dans cet exemple, un apport de 30 m³/ha de digestat est compatible avec l'équilibre de la fertilisation potassique (apports de K_2O en excès).

Valeur agronomique des digestats

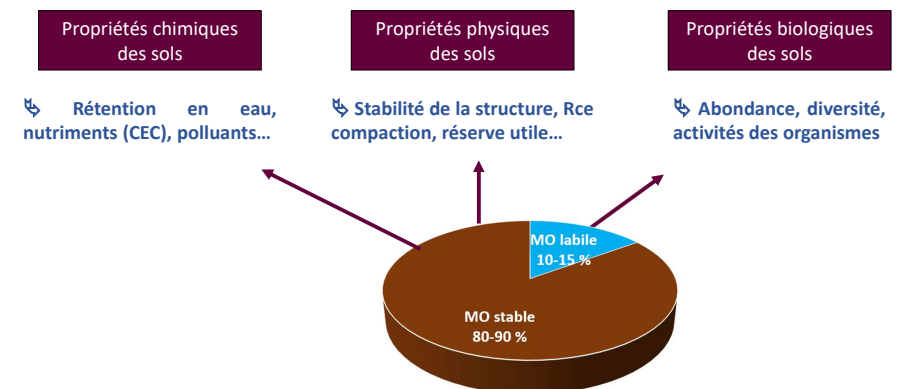
➤ Valeur amendante



➤ Apport unique vs apports répétés, effets à court, moyen et long terme

Valeur agronomique des digestats

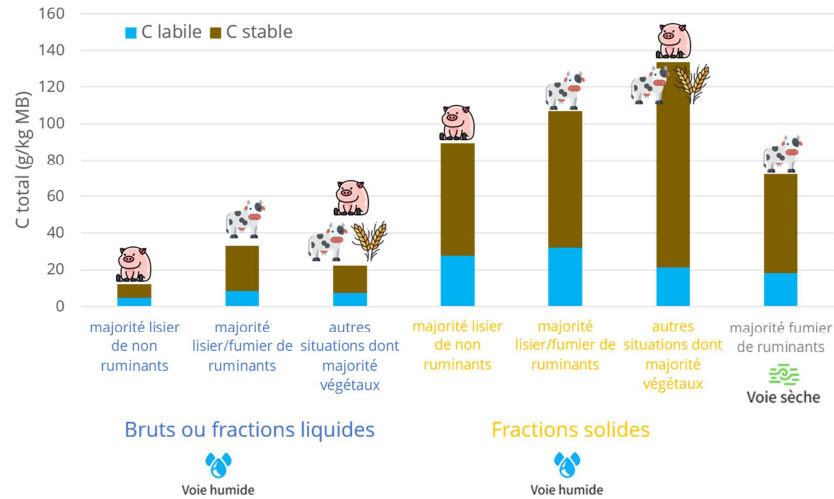
➤ Valeur amendante via apport de MO



Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur amendante

Teneur en Carbone (stable et labile) des différents types de digestats



Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur amendante : calcul de la quantité de MO apportée par les digestats

Exercice 1

Un agriculteur épand 24 m^3 de digestat liquide dont la teneur en MO est de 44,2 % et la densité de 0,941 kg/L. Combien de MO apporte t'il à son sol ?

Exercice 2

Un agriculteur épand 15 t/ha de digestat solide dont la teneur en MO est de 253 %. Combien de MO apporte t'il à son sol ?

Valeur agronomique des digestats

➤ Valeur amendante : calcul de la quantité de MO apportée par les digestats

Produits liquides

$$\text{quantité MO épandue (kg MO/ha)} = \text{volume épandu (m}^3\text{/ha)} \times \text{masse volumique* (t/m}^3\text{)} \times \text{teneur en MO/produit brut* (\%)}$$

Produits solides

$$\text{quantité MO épandue (kg MO/ha)} = \text{quantité épandue (t/ha)} \times \text{teneur en MO/produit brut* (\%)}$$

* La masse volumique et la teneur en MO/produit brut sont fournies lors des analyses en laboratoire.

Un agriculteur épand 24 m^3 de digestat liquide par ha dont la teneur en MO est de 44,2 % et la densité de 0,941 kg/L. Combien de MO apporte t'il à son sol ?

La quantité de MO apportée est de :

Volume de digestat à épandre x masse volumique x teneur en MO = $24 \times 0,941 \times 44,2 = 998 \text{ kg MO/ha}$

Un agriculteur épand 15 t/ha de digestat solide dont la teneur en MO est de 253 %. Combien de MO apporte t'il à son sol ?

La quantité de MO apportée est de :

Dose de digestat à épandre x teneur en MO = $15 \times 253/1000 = 3,795 \text{ tMO/ha}$

Valeur agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur la biodiversité des sols

Pourquoi s'intéresser à la biodiversité des sols ?

Valeur agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur la biodiversité des sols

Pourquoi s'intéresser à la biodiversité des sols ?

Sol :

➤ Habitat de nombreux organismes

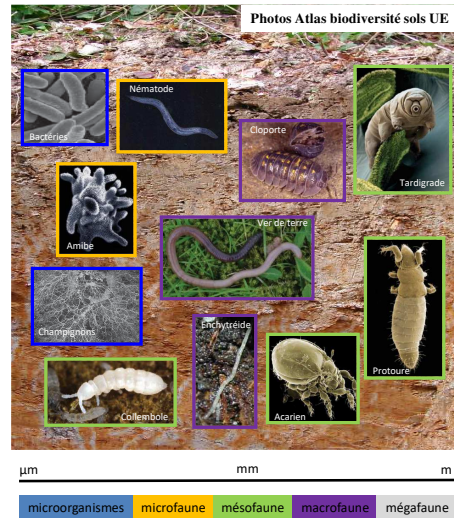
Dans 1 g de sol :

- 100 nématodes
- 50 000 algues
- 300 000 protozoaires
- 450 000 champignons
- 100 000 000 bactéries



➤ Réservoir de biodiversité....

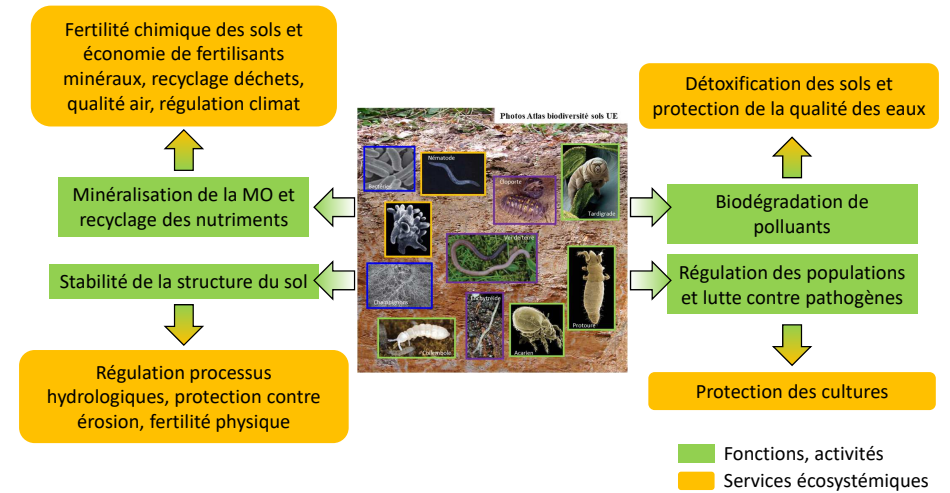
➤ Rôle clef fonctionnement du sol et nombreux services écosystémiques



Valeur agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur la biodiversité des sols

Pourquoi s'intéresser à la biodiversité des sols ?



Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

Facteurs impactant les microorganismes du sol

Travail du sol



Protection des cultures (pesticides)



Fertilisation minérale



Couverture végétale (diversité de rotation, intercultures)



Amendement organique



➤ Digestats de méthanisation ?



Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

Dispositif expérimental EFELE (SOERE PRO)



Emplacement : Le Rheu (Rennes)

Mise en place : 2012



Luvisol-redoxisol
pH 6.10

Parcelles
109 m² (12.5m X 8,7m)
4 blocs complets

Photographie aérienne du dispositif EFELE

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles



Mais fourrage: plante entière exportée
Blé: paille exportée

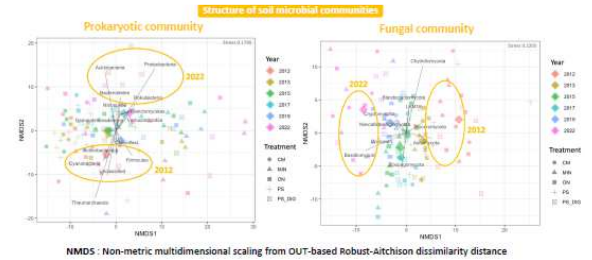
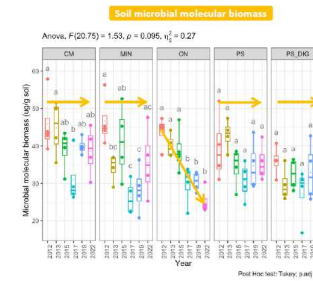
- Analyses microbiologie du sol
- Analyses physico-chimie du sol

Modalités	Fréquence d'apport
ON : Témoin sans fertilisation minérale	NA
MIN : Témoin fertilisation minérale	Tous les ans
LP : Lisier de porc	Tous les ans
DIG-LP : Digestat de lisier de porc	Tous les ans
FB : Fumier de bovins	Tous les deux ans

Mora-Salguero, D et al (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles



↪ BMM ~ après 10 ans sauf dans le traitement non fertilisé (ON) (↘ de 58% entre 21012 et 2022)

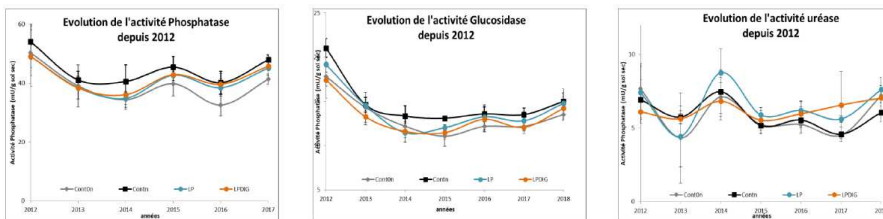
↪ Effet des traitements sur la structure des communautés microbiennes
↪ Après 10 ans d'apport, le digestat a les mêmes effets que les autres engrais organiques et mx

Mora-Salguero, D et al (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

Activités enzymatiques

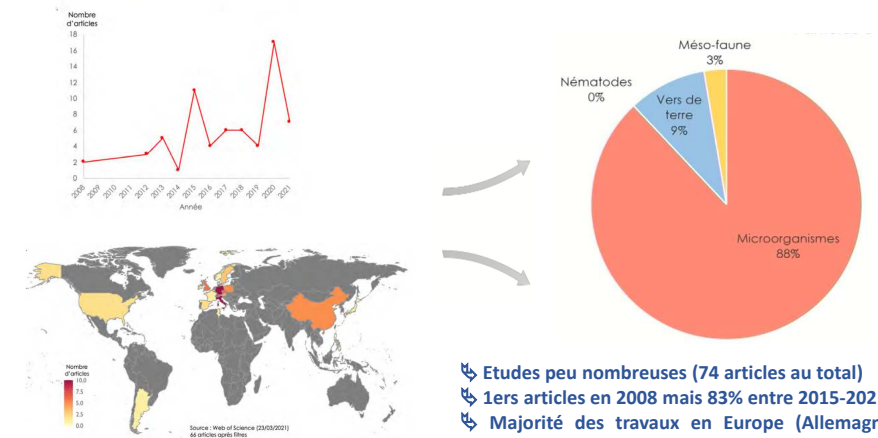


↪ Peu d'effets des traitements sur les act enz
↪ Pas d'effets écotoxiques

Quels impacts des digestats sur la vie du sol ? Mougin, C., Cheviron, N., Moindard, V., Houot, S. (2020)

Valeur agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur la biodiversité des sols



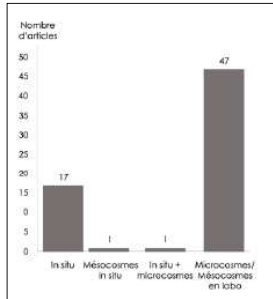
↪ Etudes peu nombreuses (74 articles au total)
↪ 1ers articles en 2008 mais 83% entre 2015-2021
↪ Majorité des travaux en Europe (Allemagne, Italie) et Chine
↪ Etudes focalisées sur les microorganismes des sols

Karimi et al. (2023)

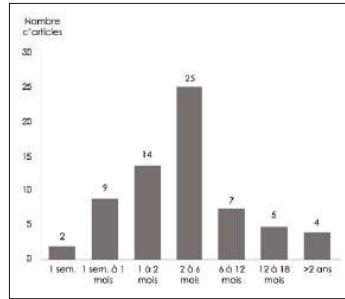
Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

Type d'approche expérimentale



Durée des études



- 2/3 des études en conditions de laboratoire, principalement à court terme (<6 mois après apport)
- Manque d'études à long terme *in situ*, en conditions pédoclimatiques réelles

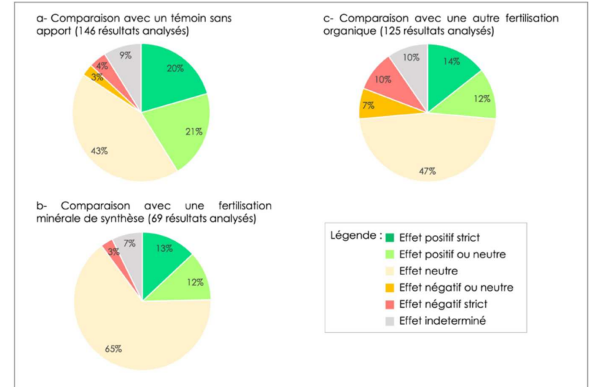
Karimi et al. (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

➤ 23 paramètres microbiens analysés

Type	Paramètres microbiologiques	Nombre d'articles	Paramètres analysés par article
Biomasse	Biomasse microbienne	32	X
	Abondance microbienne	3	X
	Abondance bactérienne	11	X
	Abondance fongique	12	X
Diversité	Diversité bactérienne (Shannon)	10	X
	Diversité fongique (Shannon)	5	X
	Diversité archéenne (Shannon)	2	X
	Diversité de la communauté microbienne	3	X
Structure	Structure de la communauté bactérienne	8	X
	Structure de la communauté fongique	4	X
	Structure de la communauté archéenne	2	X
	Structure de la communauté microbienne	2	X
Activité	Current metabolic (qCO ₂)	9	X
	Activité hydrolitique fluoresceine d'acétate	4	X
	Activité déphosphatase	10	X
	Activité phosphatase alcaline	12	X
	Activité phosphatase acide	10	X
	Activité métrichloroformate	8	X
	Activité protéase	5	X
	Activité uréase	5	X
	Activité oxydase	3	X
	Activité catalase	2	X
Indice	Diversité microbienne (Shannon, indice de Shannon, structure)	7	X

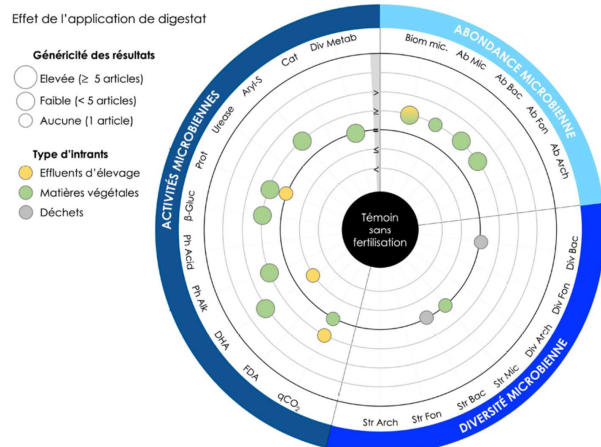


- Effets majoritairement neutres ou positifs des digestats / aux 3 groupes témoins sur abondance, diversité et act microbiennes
- Effets négatifs ds 7% des cas / témoin sans apport, 3% / fertilisation minérale et 17% / autre fertilisation organique

Karimi et al. (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

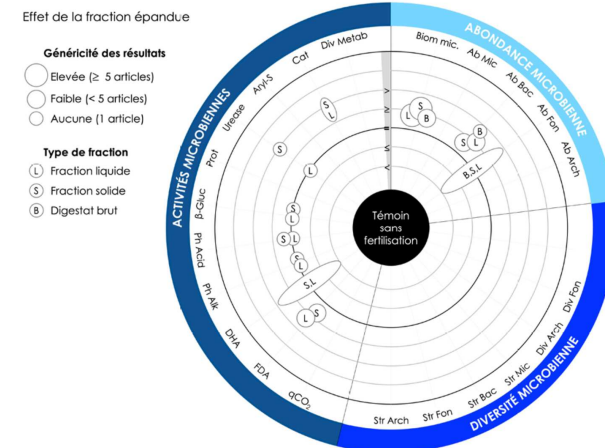


- Peu d'études, peu de types de digestats étudiés
- Effets neutres ou positifs des digestats

Karimi et al. (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

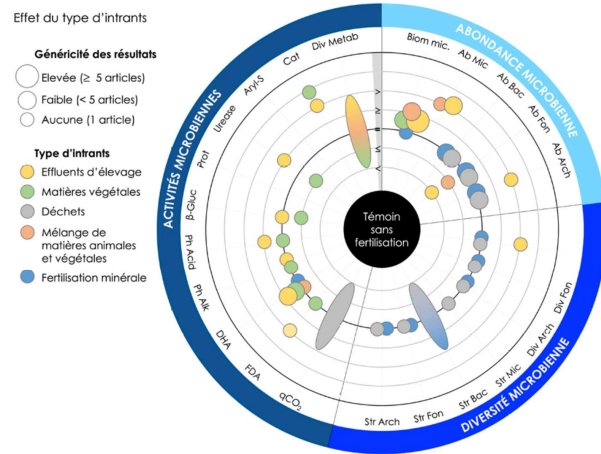


- Pas de différence significative d'impact entre les digestats solides, liquides et bruts sur l'abondance et les activités microbiennes (pas de données diversité)

Karimi et al. (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles

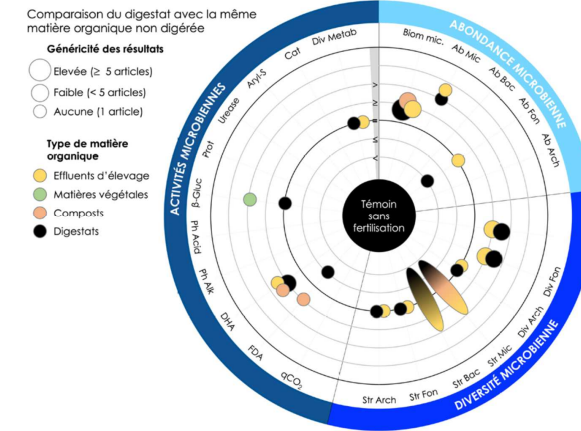


↪ Pas d'effet clair du type d'intrants sur les paramètres biologiques (effets variables)

Karimi et al. (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles



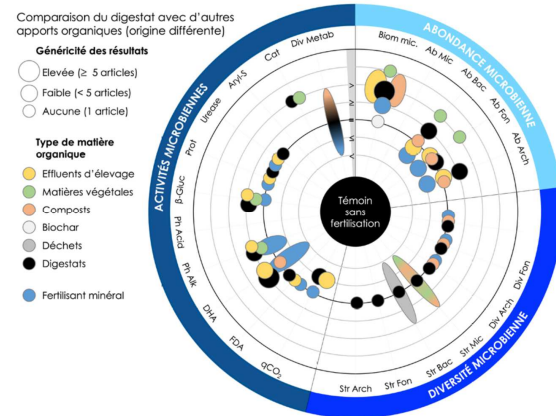
↪ Effets négatifs ou moins positifs par rapport à la MO non digérée sur l'abondance fongique, l'act. hydrolytique du diacétate de fluorescéine et l'act β Glu (mais peu d'études)

↪ Moins d'impacts de la forme de la MO apportée au sol sur les autres paramètres microbiens

Karimi et al. (2023)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les microorganismes des sols agricoles



↪ Effets des digestats / autres fertilisants organiques ~ sur l'abondance, la diversité et les act. microbiennes

Karimi et al. (2023)

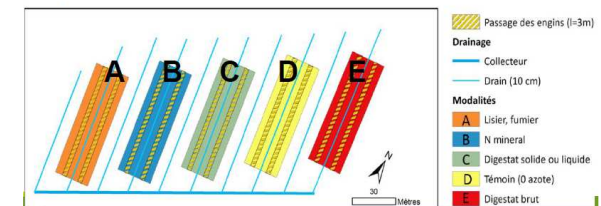
Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les vers de terre

Essai MétaMéth, INRA Nouzilly : comparaison différents modes de fertilisation

Système	Parcelle	Fertilisation	Amendement
un agriculteur avec élevage bovin	A	Lisier	Fumier
un agriculteur sans élevage	B	N minéral	/
élevage bovin et méthaniseur avec séparation de phase	C	Digestat liquide	Digestat solide
Parcelle témoin	D	/	/
élevage bovin et méthaniseur	E	Digestat brut	Digestat brut

5 systèmes = 5 parcelles (24 x 75 m)



Quels impacts des digestats sur la vie du sol ? Mougin, C., Cheviron, N., Moinard, V., Houot, S. (2020)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les vers de terre

Évaluation de la mortalité à court terme des vers de terre (nbre de Vdt.m⁻²)

Type de produit épandu	Nbre de VdT morts en surface (/m ²)	Nbre total de VdT	% mortalité
Fertilisation minérale	0	68	0
Digestat liquide	2.7	138	2
Digestat brut	1.5	82	1.8
Lisier de bovin laitier	1.7	126	1.3



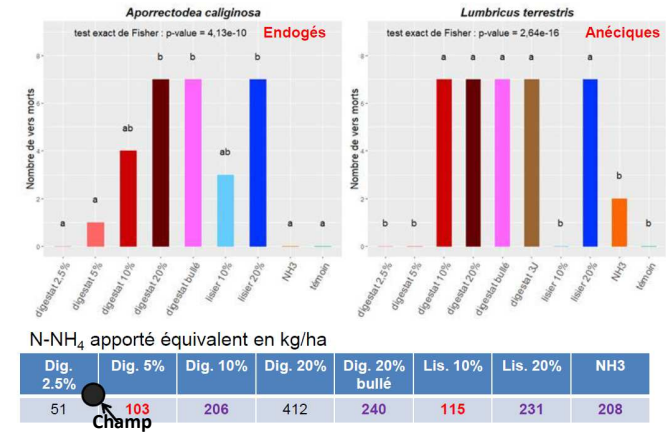
- Mortalité principalement d'anéctiques adultes
- Mortalité qui dépend du type de digestat et observable également après application de fumiers ou lisiers
- 2% max de la population 1h après épandage

Moinard et al (2021), site projet Ferti-Dig

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les vers de terre

Test écotoxicologiques en conditions contrôlées (boîtes Pétri)



- Toxicité du digestat et du lisier : NH₃ et NH₄⁺ ne st pas des facteurs explicatifs suffisants

Quels impacts des digestats sur la vie du sol ? Mougin, C., Cheviron, N., Moinard, V., Houot, S. (2020)

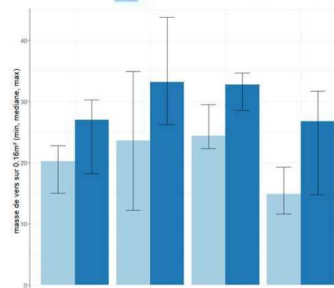
Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les vers de terre

Biomasse VdT

7 jours avant épandage (light blue)

14 jours après épandage (dark blue)



➤ Après 14 jours : pas de différences significatives entre parcelles amendées et témoin fertilisé → résilience rapide

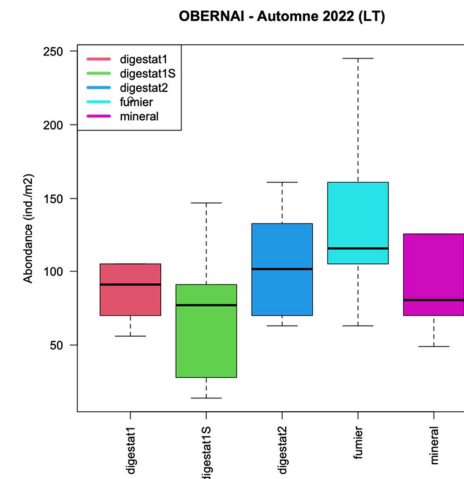
	Dig Brut	Dig Liquide	Lisier	N min
Dose (T/ha)	12	23	23	
N tot (kg/ha)	57	99	64	40
N-NH ₄ (kg/ha)	48	56	47	30

Quels impacts des digestats sur la vie du sol ? Mougin, C., Cheviron, N., Moinard, V., Houot, S. (2020)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effets des digestats sur les vers de terre

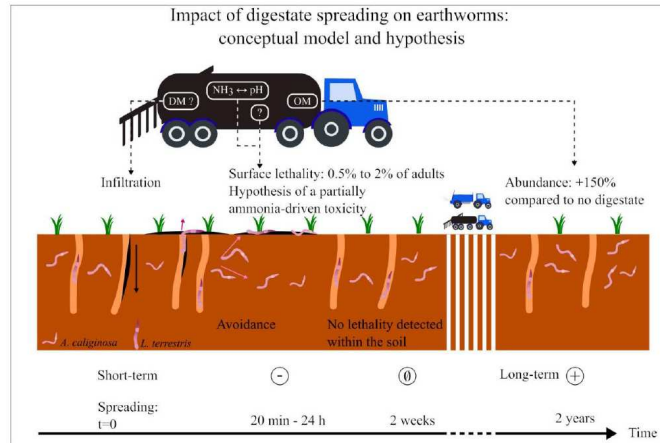
Abondance VdT (1 an après épandage)



- 1 an après épandage : fumier > digestats, fertilisation minérale pour abondance, biomasse VdT, diversité VdT (≠ MO)
- Pas d'effets toxiques des digestats

Valorisation agricole des digestats

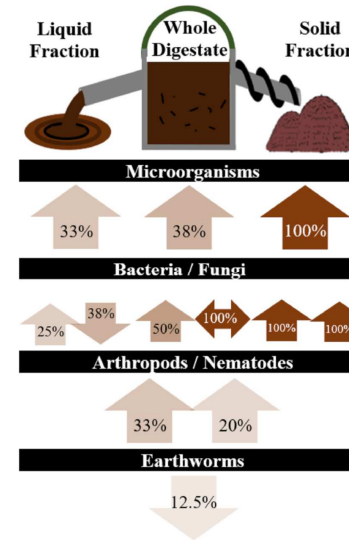
➤ Effets des digestats sur les vers de terre



Moinard et al (2021)

Valorisation agricole des digestats

➤ Effets des digestats sur les organismes des sols agricoles



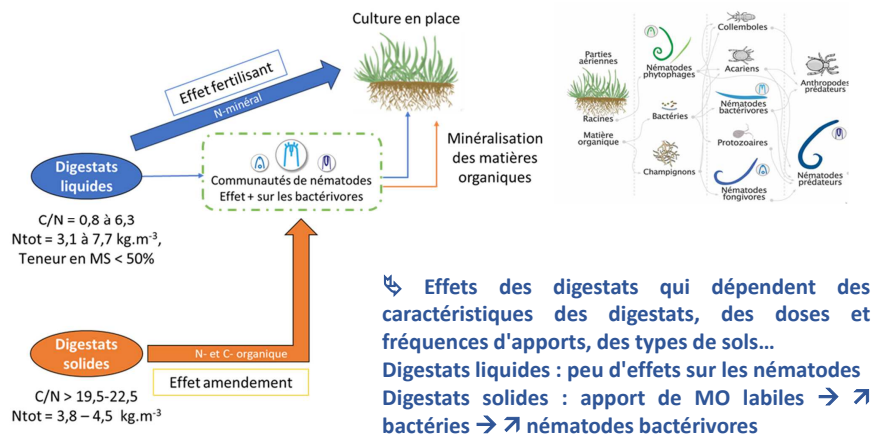
Effet du digestat et de ses fractions sur l'abondance des groupes de biotes du sol (% d'études indiquant l'effet sur l'ensemble des études incluant cette mesure).

↳ Difficultés à comparer les différents travaux (≠ digestats : cf par la variation des matières premières et des méthodes de production, ≠ sols...)

Van Midden et al (review, 2023)

Valorisation agricole des digestats

➤ Effets des digestats sur les nématodes du sol (abondance, diversité, groupes trophiques)

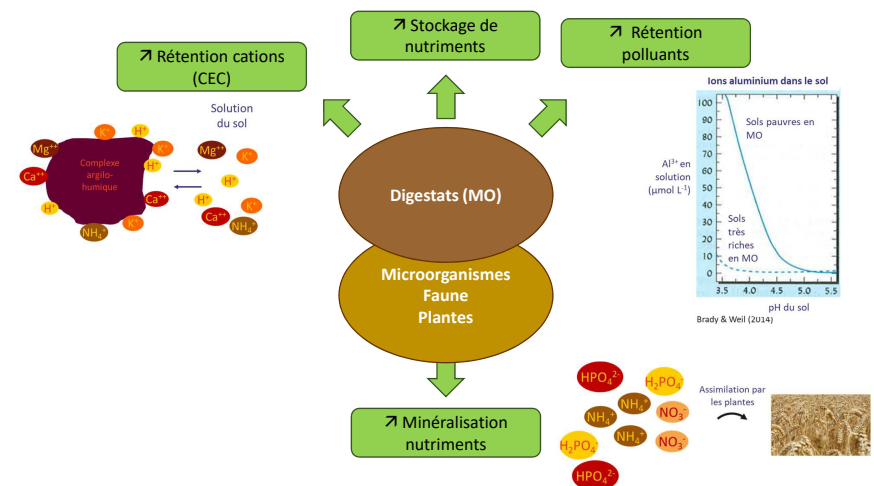


↳ Effets des digestats qui dépendent des caractéristiques des digestats, des doses et fréquences d'apports, des types de sols...
 Digestats liquides : peu d'effets sur les nématodes
 Digestats solides : apport de MO labiles → ↑ bactéries → ↑ nématodes bactérivores

Site projet Ferti-Dig

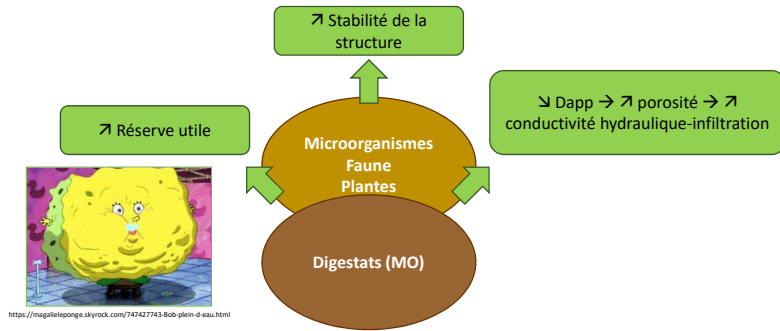
Valorisation agricole des digestats

➤ Effet des digestats sur les propriétés chimiques (fertilité chimique) des sols



Valorisation agronomique des digestats

➤ Effet des digestats sur les propriétés physiques (fertilité physique) des sols



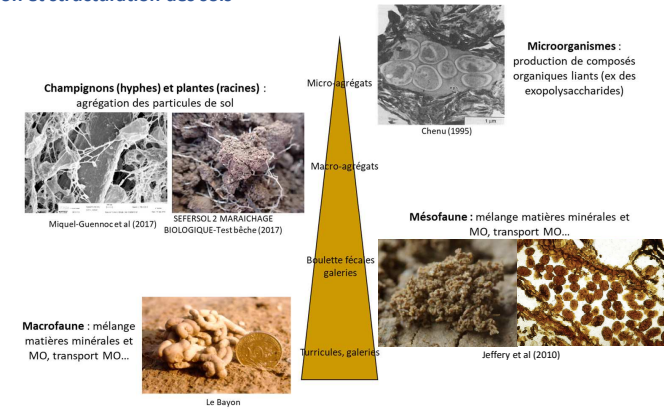
↔ Effets directs vs indirects

↔ Effets court terme (temporaires) vs moyen-long-terme

Valorisation agronomique des digestats

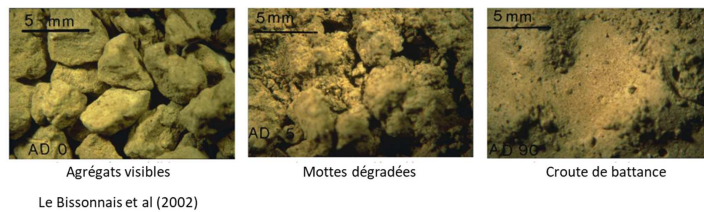
➤ Effet des digestats sur les propriétés physiques (fertilité physique) des sols

➤ Agrégation et structuration des sols



Valorisation agronomique des digestats

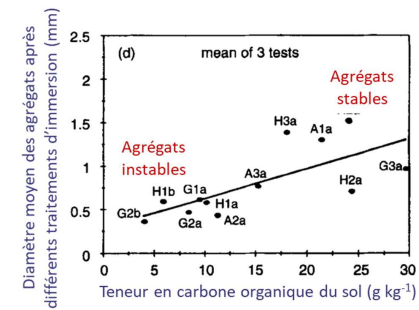
➤ Effet des digestats sur les propriétés physiques (fertilité physique) des sols



Valorisation agronomique des digestats

➤ Effet des digestats sur les propriétés physiques (fertilité physique) des sols

➤ Stabilité de la structure des sols

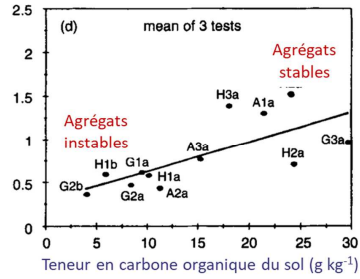


Le Bissonnais et Arrouays (1997)

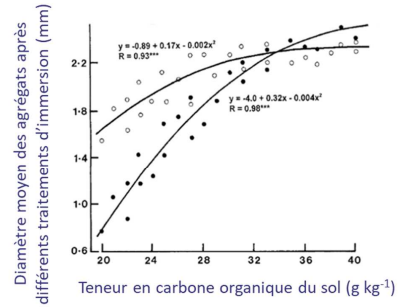
Valorisation agronomique des digestats

➤ Effet des digestats sur les propriétés physiques (fertilité physique) des sols

➤ Stabilité de la structure des sols



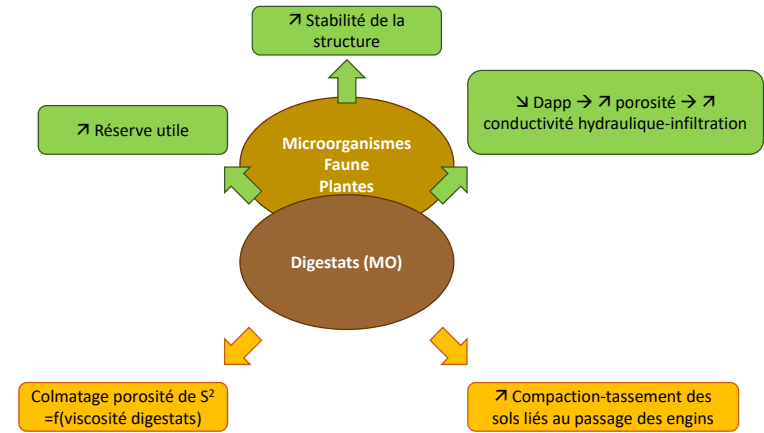
Le Bissonnais et Arrouays (1997)



Haynes (2000)

Valorisation agronomique des digestats

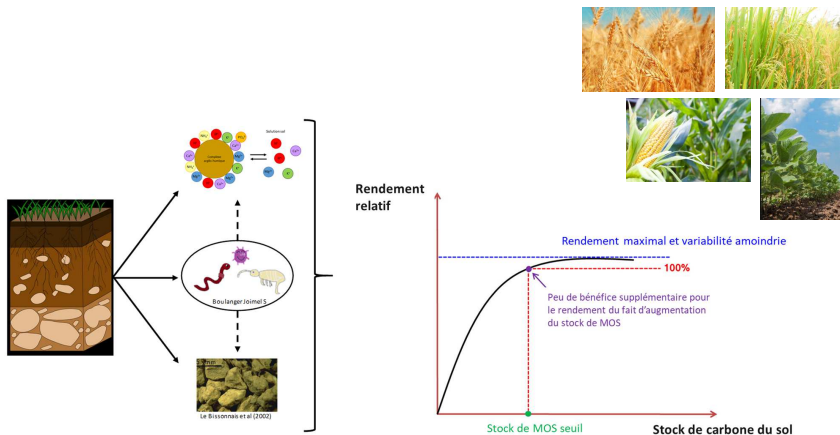
➤ Effet des digestats sur les propriétés physiques (fertilité physique) des sols



↳ Effets modulés par les caractéristiques des digestats, la dose et la fréquence des épandages, le type de sol, les pratiques agronomiques associées (W du sol...), la saison et les conditions météorologiques...

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effet des digestats sur les rendements (service de production)



Zhang et al. (2016)

Valorisation agronomique des digestats

➤ Effet des digestats sur le stockage de C (à plus long terme)

↳ Cf Cours-TD digestats et stockage de C

Valeur agronomique des digestats

- ↳ Diversité ↗ de digestats avec des propriétés différentes
- ↳ Effets agronomiques : effets fertilisants, effets amendants
- ↳ Besoin de développer des typologies de digestats et des classes d'effets / propriétés agronomiques

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

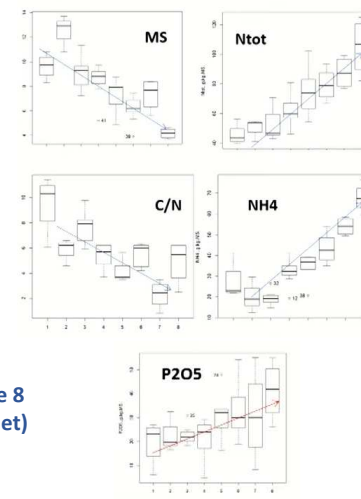


Données sites agricoles: 72 sites (AAME)

8 Classes de digestats

Digestats bruts 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



- ↳ Effet fertilisant ↗ de la classe 1 à la classe 8
- ↳ Effet amendant a tendance à ↘ (mais - net)



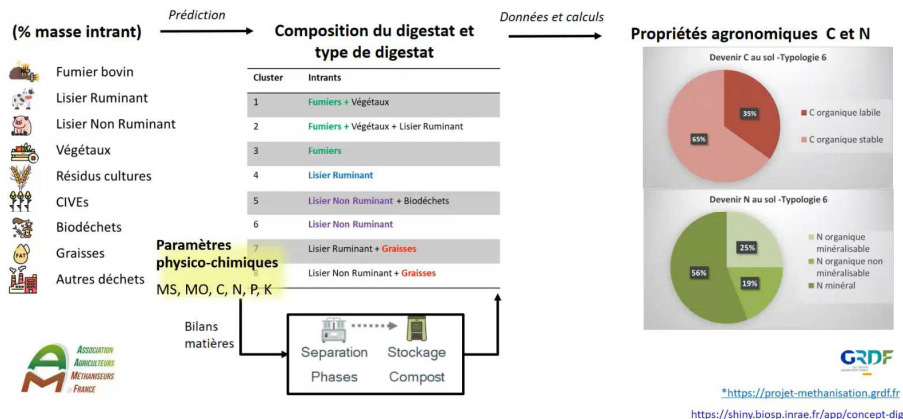
Jimenez et al (Projet Concept-Dig, ATEE 2023)

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

- ↳ Développement d'un outil en libre accès pour prédire la composition des digestats à partir des intrants

https://shiny.biosp.inrae.fr/app_direct/concept-dig/



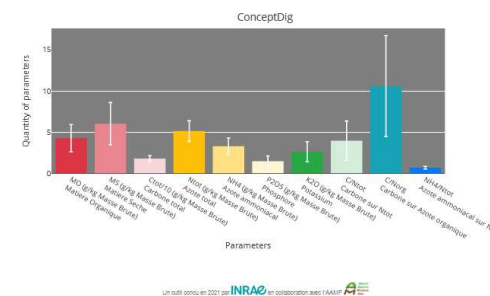
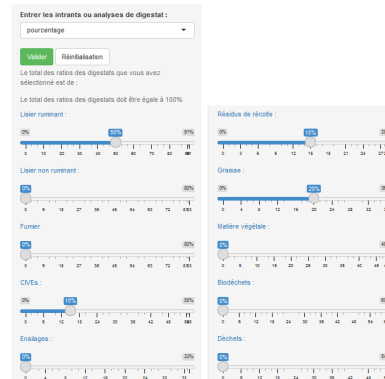
Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

- ↳ Développement d'un outil en libre accès pour prédire la composition des digestats à partir des intrants

https://shiny.biosp.inrae.fr/app_direct/concept-dig/

Caractérisation des intrants (% , t ou résultats d'analyses si disponibles)



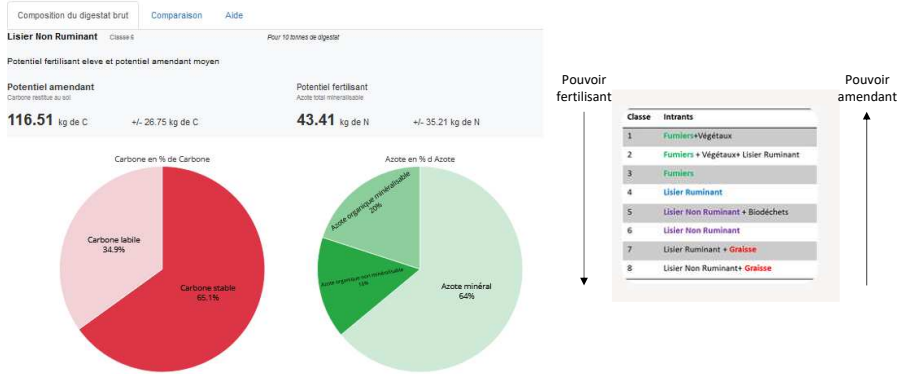
Jimenez et al (Projets Concept-Dig, Ferti-Dig)

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

🔗 Développement d'un outil en libre accès pour prédire la composition des digestats à partir des intrants

https://shiny.biosp.inrae.fr/app_direct/concept-dig/



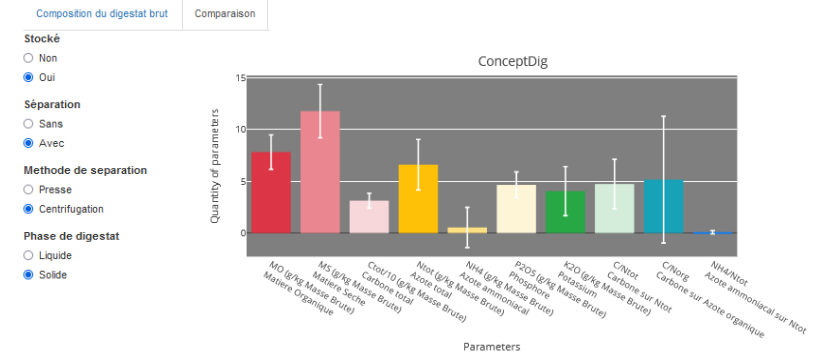
Jimenez et al (Projets Concept-Dig, Ferti-Dig)

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

🔗 Développement d'un outil en libre accès pour prédire la composition des digestats à partir des intrants

https://shiny.biosp.inrae.fr/app_direct/concept-dig/



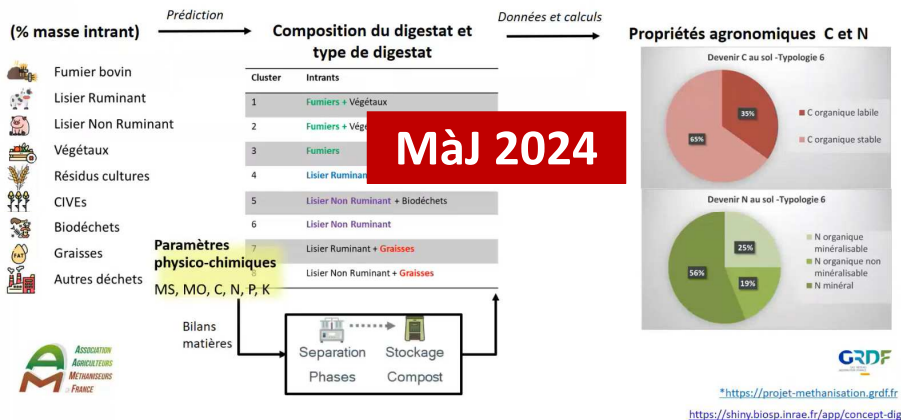
Jimenez et al (Projets Concept-Dig, Ferti-Dig)

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

🔗 Développement d'un outil en libre accès pour prédire la composition des digestats à partir des intrants

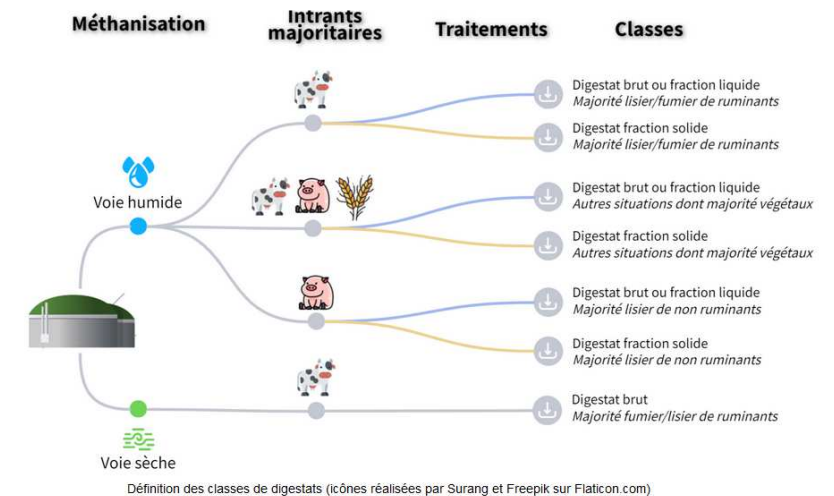
https://shiny.biosp.inrae.fr/app_direct/concept-dig/



*<https://projet-methanisation.grdf.fr>
<https://shiny.biosp.inrae.fr/app/concept-dig>

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

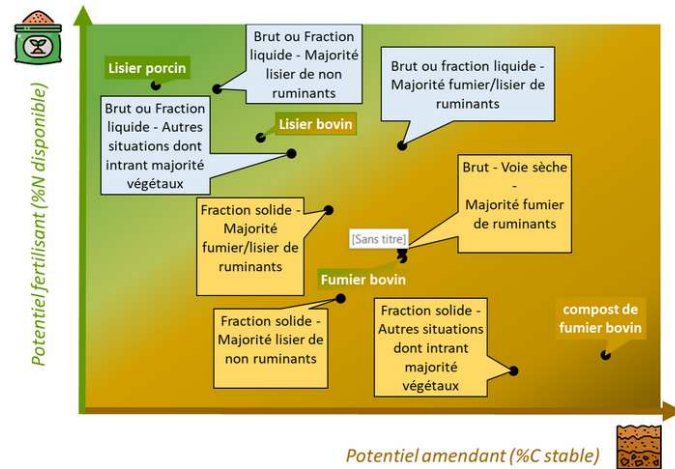


Jimenez et al (Projet Ferti-Dig)

Valeur agronomique des digestats

Typologie des digestats

Positionnement des classes de digestats selon leur potentiel amendant et fertilisant

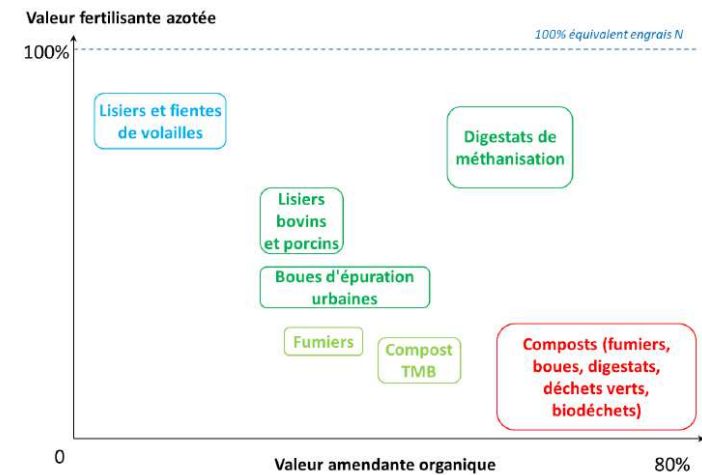


Positionnement des classes de digestats selon leur potentiel amendant (%C stable) et fertilisant (%N disponible) (icônes réalisées par Farm Equipment et Environment sur FlatIcon.com)

Valeur agronomique des digestats

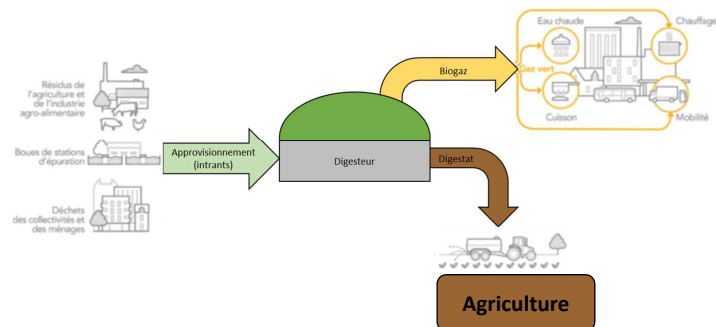
Typologie des digestats

Comparaison du potentiel amendant et fertilisant des digestats par rapport à d'autres PRO



Houot et al (2014)

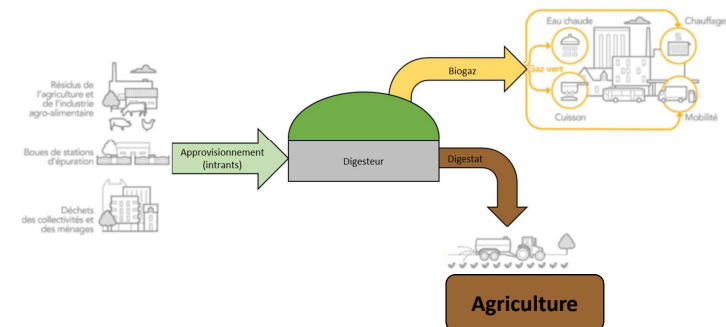
Valorisation des digestats en agriculture



Effets agronomiques

- Intérêt pour les sols et/ou les cultures
- Propriétés fertilisantes vs amendantes

Valorisation des digestats en agriculture



Effets agronomiques

- Intérêt pour les sols et/ou les cultures
- Propriétés fertilisantes vs amendantes

Critères d'innocuité

Critères d'innocuité

Impacts du traitement des boues sur les pathogènes

Treatment	Reduction*		
	Bacteria	Viruses	Parasites
Anaerobic digestion ^a	1-2	1	0
Aerobic digestion	1-2	1	0
Composting	2-3	2-3	2-3
Air drying ^b	2-3	1-3	1-3
Lime stabilization	2-3	3	0

*Scale: 0=<10% reduction; 1=99% reduction; 2=99.9% reduction; 3=99.99% reduction.

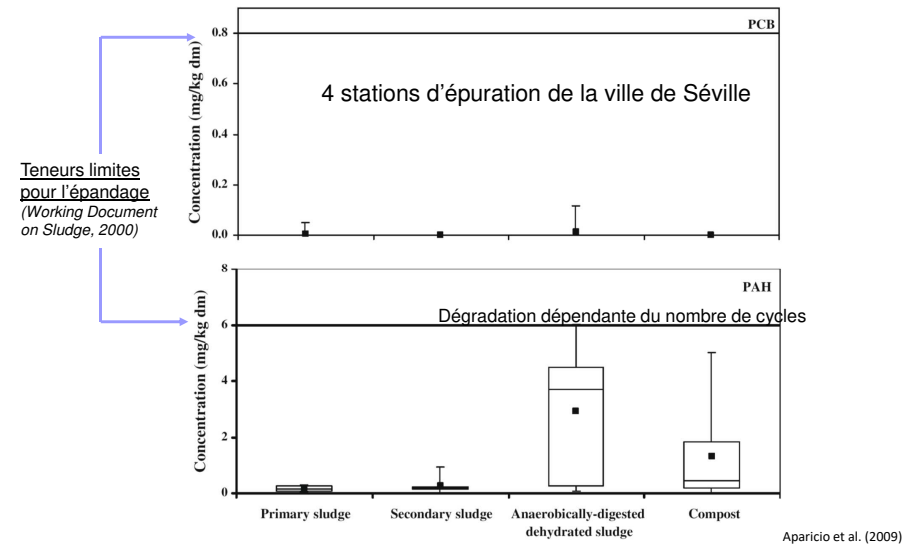
^a Mesophilic temperatures (27–37 °C) assumed.

^b Effects depend on moisture levels.

Données de Ward et al. (1984) – Extrait de Venglovsky et al. (2006)

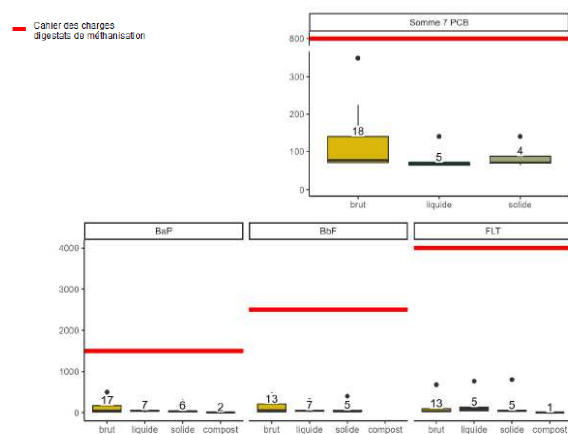
Critères d'innocuité

Impacts du traitement des boues sur les micropolluants organiques



Critères d'innocuité

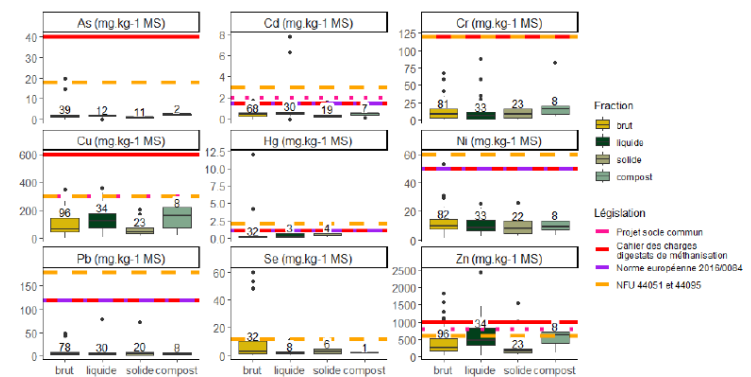
Teneurs en micropolluants organiques dans les digestats : réglementation



Jimenez (ATEE, 2023)

Critères d'innocuité

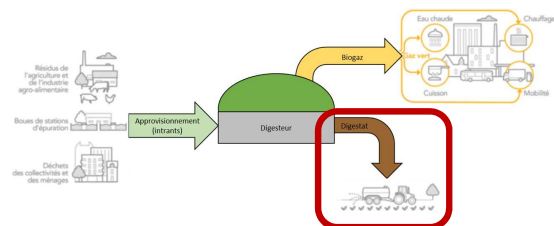
Teneurs en ETM dans les digestats : réglementation



Données Ferti-Dig (ADEME, GRDF, en cours)

Jimenez (ATEE, 2023)

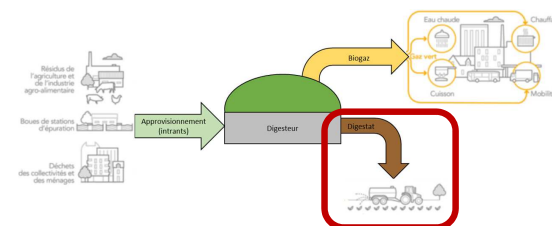
Risques liés à l'épandage des digestats



Effets sur la qualité des sols

- **Apport de contaminants**
 - Agents biologiques (parasites, agents pathogènes ...)
 - Contaminants chimiques organiques
 - Contaminants chimiques inorganiques (métaux)
- **Tassement**

Risques liés à l'épandage des digestats

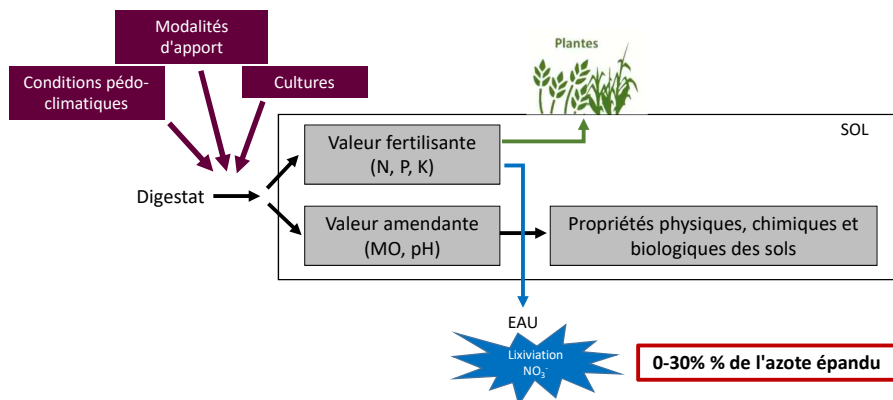


Effets sur la qualité des eaux

- **Lixiviation de NO_3^-**

Risques liés à l'épandage des digestats

➤ Effets sur la qualité des eaux

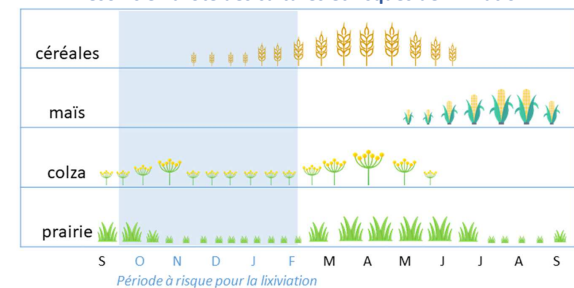


Risques liés à l'épandage des digestats

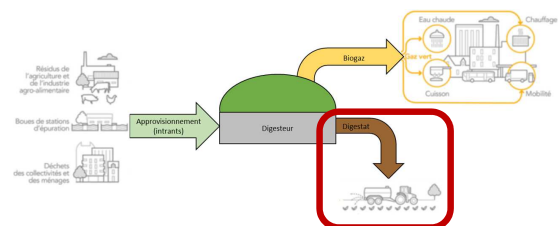
➤ Effets sur la qualité des eaux

- Caractéristiques des digestats
- Dose apportée
- Type de sol
- Pratiques agricoles : durée des intercultures et présence ou non de cultures intermédiaires...
- Conditions météorologiques à l'épandage
- Période d'apport / besoin des cultures...

Besoins en azote des cultures et risques de lixiviation



Risques liés à l'épandage des digestats

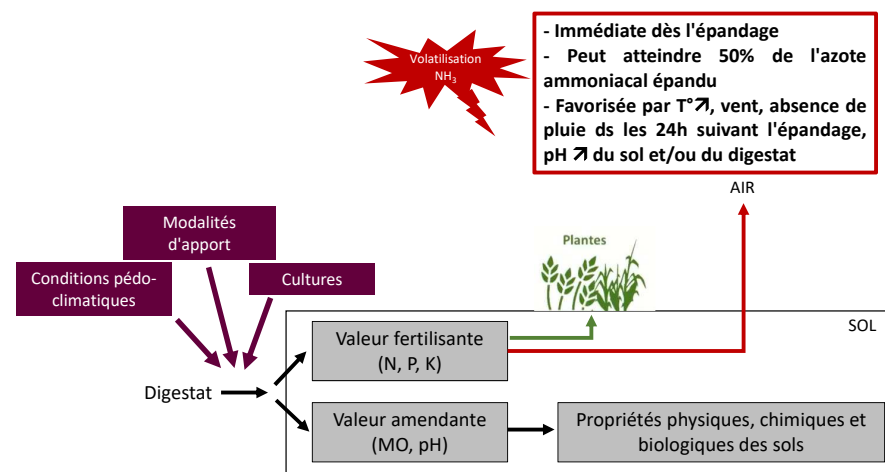


Effets sur la qualité de l'air

- Volatilisation de NH_3
- Emissions de CH_4 , N_2O ...
- Odeurs

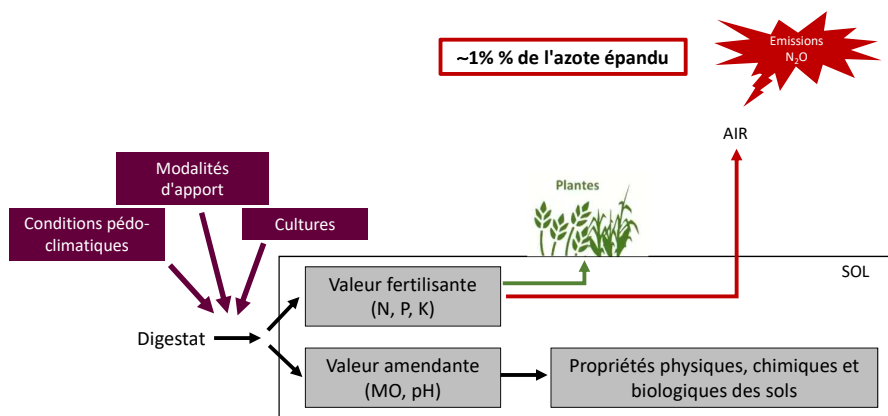
Risques liés à l'épandage des digestats

➤ Effets sur la qualité de l'air



Risques liés à l'épandage des digestats

➤ Effets sur la qualité de l'air



Risques liés à l'épandage des digestats

Effets sur la qualité des sols

- Apport de contaminants
 - Agents biologiques (parasites, agents pathogènes ...)
 - Contaminants chimiques organiques
 - Contaminants chimiques inorganiques (métaux)
- Tassement

Effets sur la qualité de l'air

- Volatilisation de NH_3
- Emissions de CH_4 , N_2O ...
- Odeurs

Effets sur la qualité des eaux

- Lixiviation de NO_3^-

➤ Risques qui peuvent être réduits par la mise en place de bonnes pratiques

Bonnes pratiques d'épandage

- Raisonner les doses (N, P, MO) à apporter comme fertilisant (connaissances caractéristiques des digestats, des sols, des besoins des cultures)



- Adapter les périodes d'apport - Faire coïncider les apports aux besoins des cultures

- Adapter les pratiques pour limiter les pertes par volatilisation (enfouissement...)

- Prendre en compte les conditions météorologiques (volatilisation de NH₃)

- Adapter le matériel utilisé

Bonnes pratiques d'épandage

Comment limiter la volatilisation de NH₃ ? Utilisation du matériel adéquat

<p>Enfouisseurs de cultures, à dents ou à disques Réalisation simultanée de l'incorporation du digestat et du travail du sol</p>	<p>S'utilisent généralement en l'absence de culture</p> <p>Force de traction importante</p>	<p>Pertes par volatilisation (en % de l'azote ammoniacal)</p> <p>< 5%</p>	<p>Rampes à patin avec des sabots plaqués au sol qui écartent la végétation pour placer le digestat (ou le lisier) au sol</p>	<p>Sur cultures ou prairies</p> <p>Envergure de 7,5 à 30 m Bon débit de chantier Peu de puissance de traction supplémentaire par rapport aux modèles à pendillard</p>	<p>10-15%</p>
<p>Épandeurs avec éléments d'injection à disques espacés de 20 cm. Créent un sillon étroit de 4 à 6 cm de profondeur ou est injecté le digestat</p>	<p>Spécifique aux prairies</p> <p>Largeur de travail limitée (6 à 7 m) - Débit de chantier assez faible</p>	<p>5-10%</p>	<p>Rampes à pendillards</p>	<p>Apports sur cultures</p> <p>Grande envergure, jusqu'à 36 m Débit de chantier élevé</p>	<p>15-20%</p>

Buse palette
rendement : 35 qx/ha

Pendillard
Rendement : 43 qx/ha

Apport de 20 m³ de digestat sur orge d'hiver en AB



L'utilisation des digestats en agriculture Les bonnes pratiques à mettre en œuvre (2021)

Bonnes pratiques d'épandage

Comment limiter le tassement des sols ?

➤ Travailler dans de bonnes conditions (sol humide plus sensible au tassement que sol sec)

➤ Choisir un matériel adapté : **épandage sans tonne (pour les produits liquides), utilisation de matériels différenciés pour le transport (du méthaniseur à la parcelle) et l'épandage (dans la parcelle)**



Épandeur sans tonne, SlurryKat Ltd (Site projet Ferti-Dig)



Chantier décomposé transport/épandage, Fliegl (Site projet Ferti-Dig)



L'utilisation des digestats en agriculture Les bonnes pratiques à mettre en œuvre (2021)



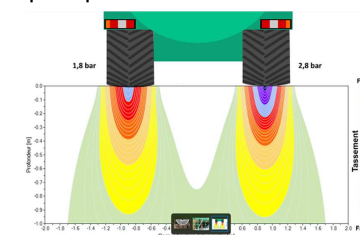
Bonnes pratiques d'épandage

Comment limiter le tassement des sols ?

➤ Réduire la P des pneus (lorsque l'épandage sans tonne n'est pas faisable)

Contraintes exercées sur le sol à différentes profondeurs par les pneus d'une tonne à lisier de 20 m³ en fonction de leur pression :

- 1,8 bar pression optimisée pour les travaux au champ
- 2,8 bar pression recommandée sur route



➤ Gérer ses passages ds la parcelle en cas d'impossibilité d'épandre les digestats dans de bonnes conditions (cf disponibilité du matériel, conditions météorologiques, besoins des cultures...) : **limiter la surface impactée avec guidage par satellite.**

Bonnes pratiques d'épandage

↳ Existence de guides



Carton et al (2021), projet Ferti-Dig

Aspects réglementaires liés à l'épandage des digestats

➤ Retour au sol des digestats encadré par ≠ types de réglementations :

- Une réglementation visant à encadrer la qualité agronomique et l'innocuité sanitaire du digestat, et qui s'adresse au producteur du digestat ;
- Une réglementation qui vise le milieu récepteur des digestats (exploitations agricoles), qui introduit des exigences supplémentaires pour l'épandage des digestats dans certaines zones.

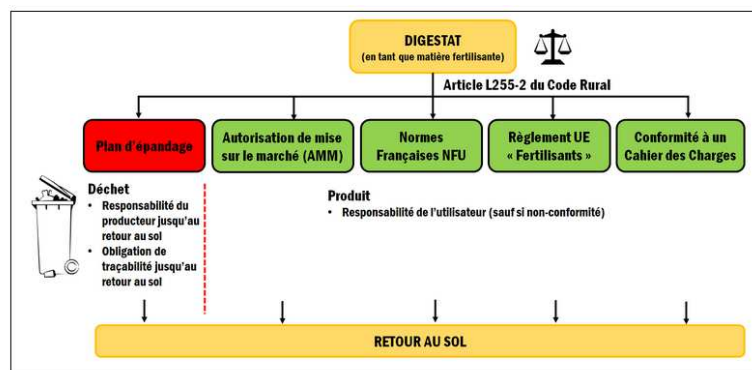
↳ Arrêtés ICPE (autorisation, enregistrement ou déclaration), réglementation sur les sous-produits animaux (vérification de critères biologiques), Directive Nitrates en zone vulnérable

↳ Toutes ces réglementations imposent une traçabilité, des analyses et encadrent l'utilisation des digestats.

➤ Cadre réglementaire en cours d'évolution, avec la sortie des arrêtés dits "Socle Commun" qui vont encadrer les critères de qualité agronomique et d'innocuité à respecter pour toutes les matières fertilisantes et supports de culture (MFSC)

Aspects réglementaires liés à l'épandage des digestats

➤ Statut déchet vs produit ?



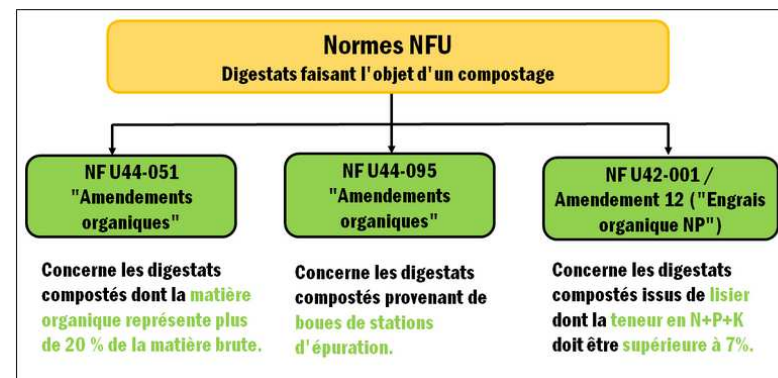
↳ Par défaut : digestat de méthanisation = statut de déchet en France → plan d'épandage (document synthétique qui détaille les caractéristiques des parcelles pouvant faire l'objet d'un apport d'effluent organique et décrit les conditions d'épandage en fonction des réglementations auxquelles l'exploitation est soumise (réglementation ICPE et nitrates par exemple).

↳ Dans certains cas : statut de produit (valeur marchande)

<https://www.infometha.org/pour-aller-plus-loin/reglementation-et-normes/valorisation-du-digestat-en-france-aspects>

Aspects réglementaires liés à l'épandage des digestats

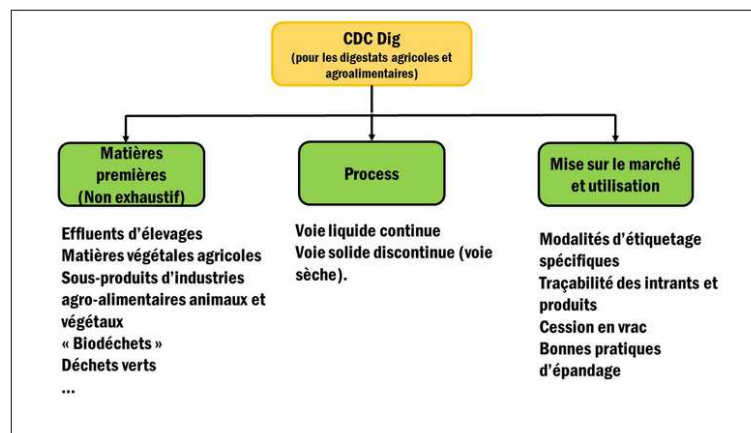
Normalisation NFU : les digestats compostés



<https://www.infometha.org/pour-aller-plus-loin/reglementation-et-normes/valorisation-du-digestat-en-france-aspects>

Aspects réglementaires liés à l'épandage des digestats

Conformité au cahier des charges Dig



<https://www.infometha.org/pour-aller-plus-loin/reglementation-et-normes/valorisation-du-digestat-en-france-aspects>

Conclusion

- Grande diversité de digestats avec des propriétés amendantes et/ou fertilisantes qui dépendent des caractéristiques des intrants, du procédé de méthanisation, des pré et post-traitements, des modalités de stockage... → réduction de l'utilisation d'engrais, maintien et restauration des teneurs en MO dans les sols agricoles, stockage de C... (intérêts économiques, environnementaux...)
- Présence potentielle de contaminants biologiques, organiques et minéraux
- Les milieux récepteurs ne sont pas des poubelles ! Valorisation des digestats en agriculture possible uniquement si les digestats ont un intérêt pour les sols et/ou les cultures et répondent à des critères d'innocuité
- Filière encadrée d'un point de vue réglementaire
- Besoin de développer des typologies de digestats et des guides de bonnes pratiques pour aider les utilisateurs et limiter les risques environnementaux et sanitaires
- Besoin d'études supplémentaires pour étudier les effets des digestats que la qualité des sols et pour assurer la pérennisation de la filière (balance bénéfices-risques)