



# LE DIGESTAT, C'EST TOUT POURRI ? QUELQUES BASES SUR LA MÉTHANISATION

Université négaWatt 2019

11 Octobre 2019

Christian Couturier

Un processus de transformation de la matière organique complexe en molécules simples

- Absence d'oxygène : procédé « anaérobie »
- Phénomène naturel : gaz de marais, de fumier, intestin : « digestion »



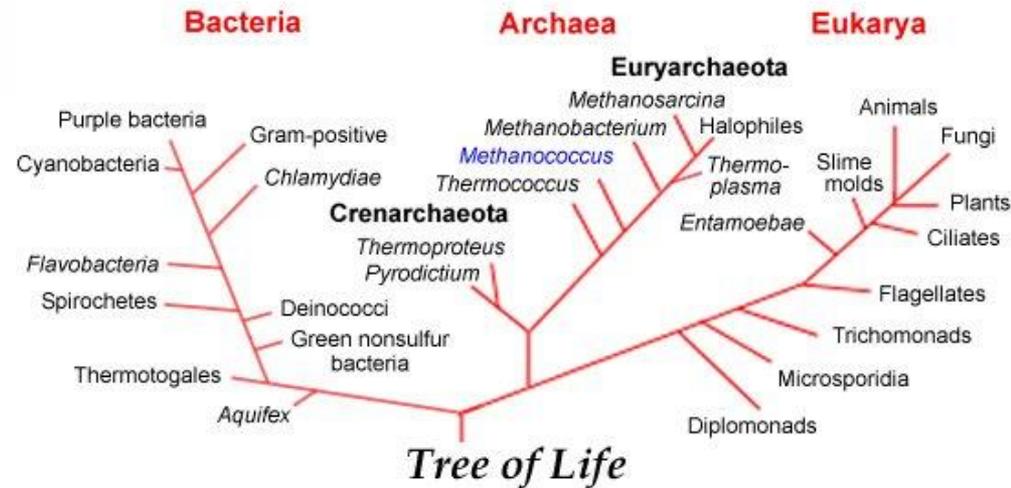
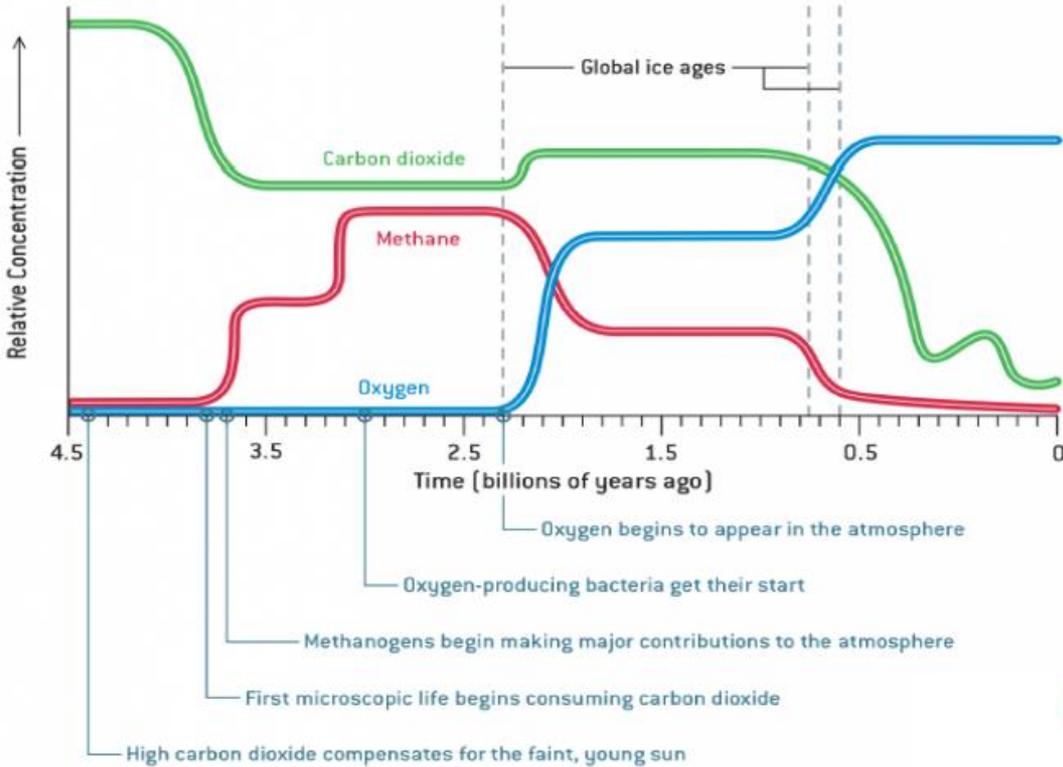
Les voies aérobies :

- $MO + \text{microorganismes (bactéries aérobies)} + O_2 \rightarrow CO_2$  (forme oxydée du carbone) + chaleur

Les voies anaérobies :

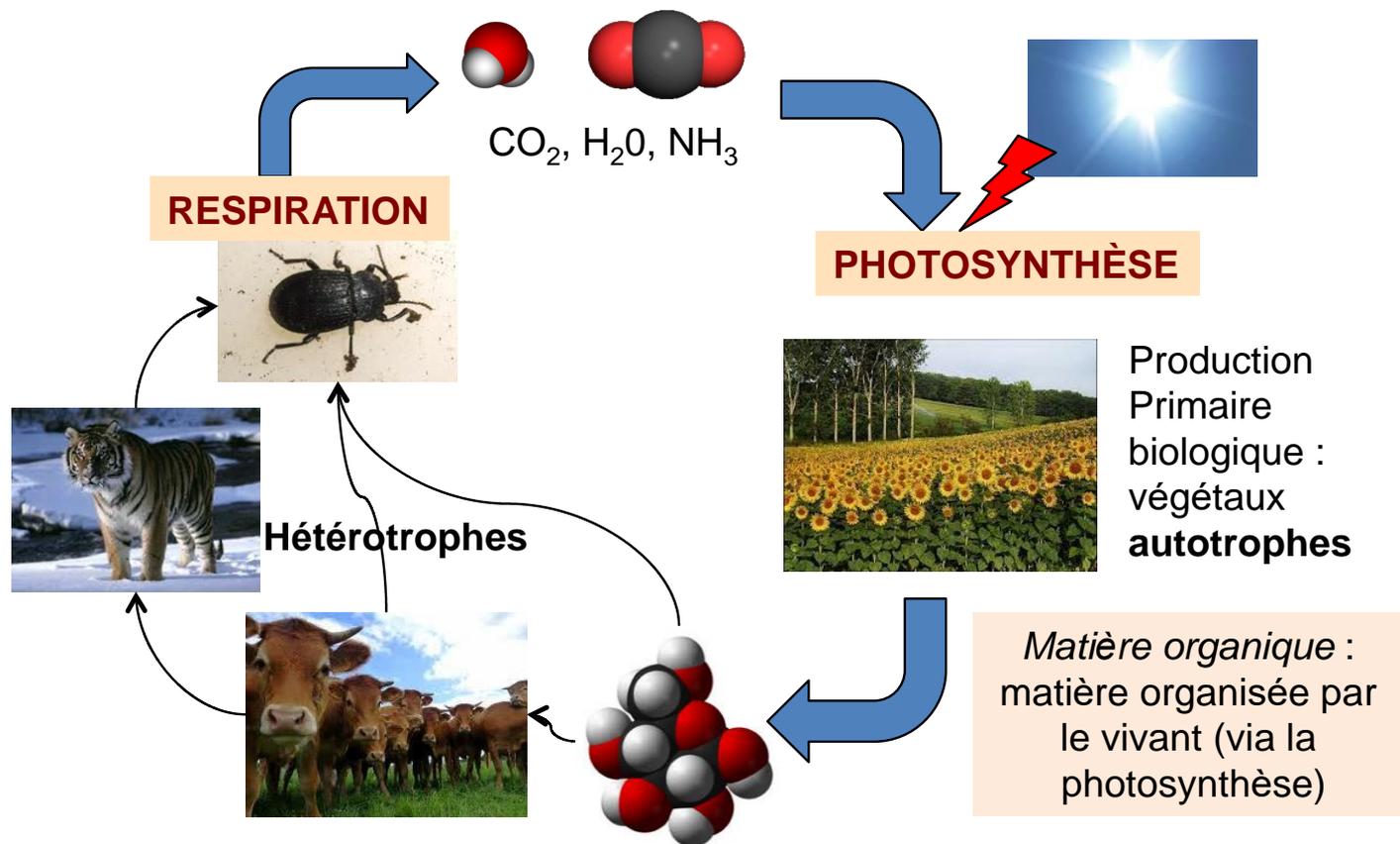
- $MO + \text{microorganismes (archées)} \rightarrow CH_4$  (forme réduite du carbone) + peu de chaleur
- $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{énergie}$

=> La méthanisation permet de récupérer de l'énergie sous une forme exploitable : le gaz méthane



# Qualité agronomique et matière organique

La matière organique est la matière "organisée" par le phénomène du vivant à partir des éléments minéraux dont les principaux sont le gaz carbonique et l'eau.



Protides, glucides, lipides (hydrates de carbone) :  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$

*La matière organique joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement des sols. Elle contribue à assurer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques.*

## Stabilité de la structure du sol

- Mode d'assemblage des constituants du sol (agrégats)
- Stabilité = résistance de cette structure aux agents de dégradation
- Liée à la teneur en matière organique : formation des complexes organo-minéraux stables et résistants (argilo-humique par exemple)

## Résistance à la compaction

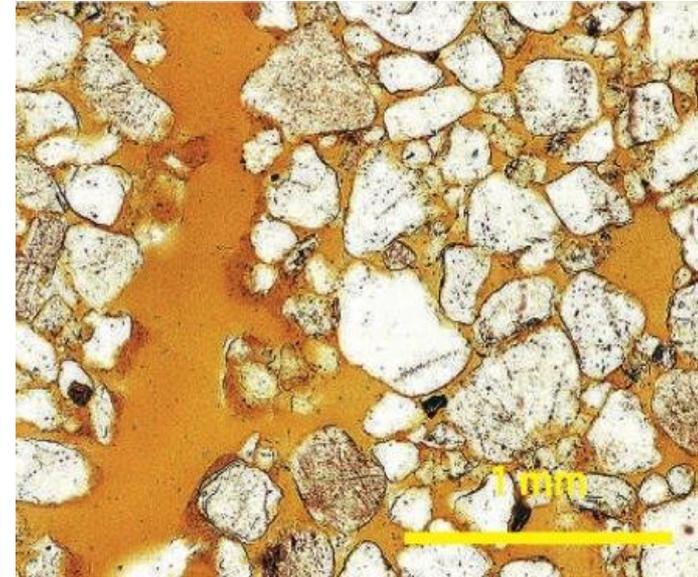
- Compaction (passage des engins) : réduit la circulation des fluides dans le sol
- MO : augmente la résistance à la déformation et l'élasticité

## Porosité du sol

- Vides occupés par l'eau et l'air
- Macroporosités (eau libre) : permet circulation des fluides, implantation des racines
- Mésoporosités, microporosités : eau utilisables par les plantes

## Capacité d'échange cationique

- Pouvoir de fixation des cations ( $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^+$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ...) de la matière organique
- Complexes organo-minéraux = réservoir de cations échangeables

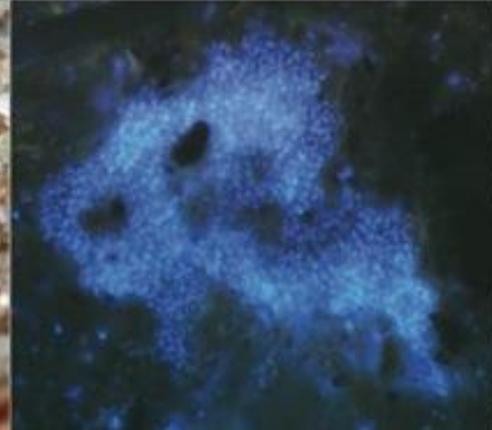
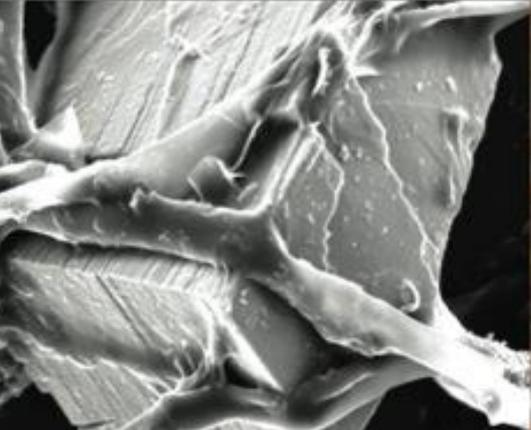
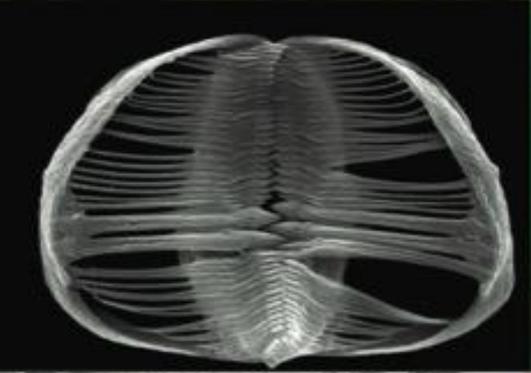
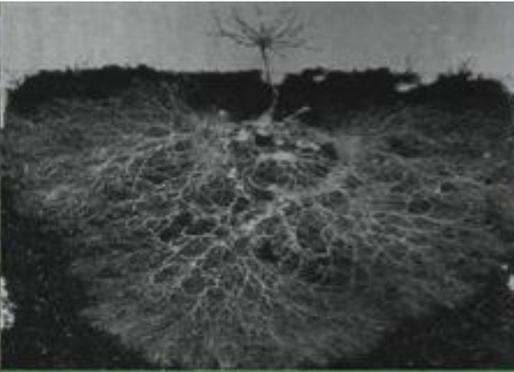


Porosité d'un sol, en jaune (source : European atlas of soil biodiversity, JRC 2010)

# Quel est le rôle de la matière organique ?

Q4

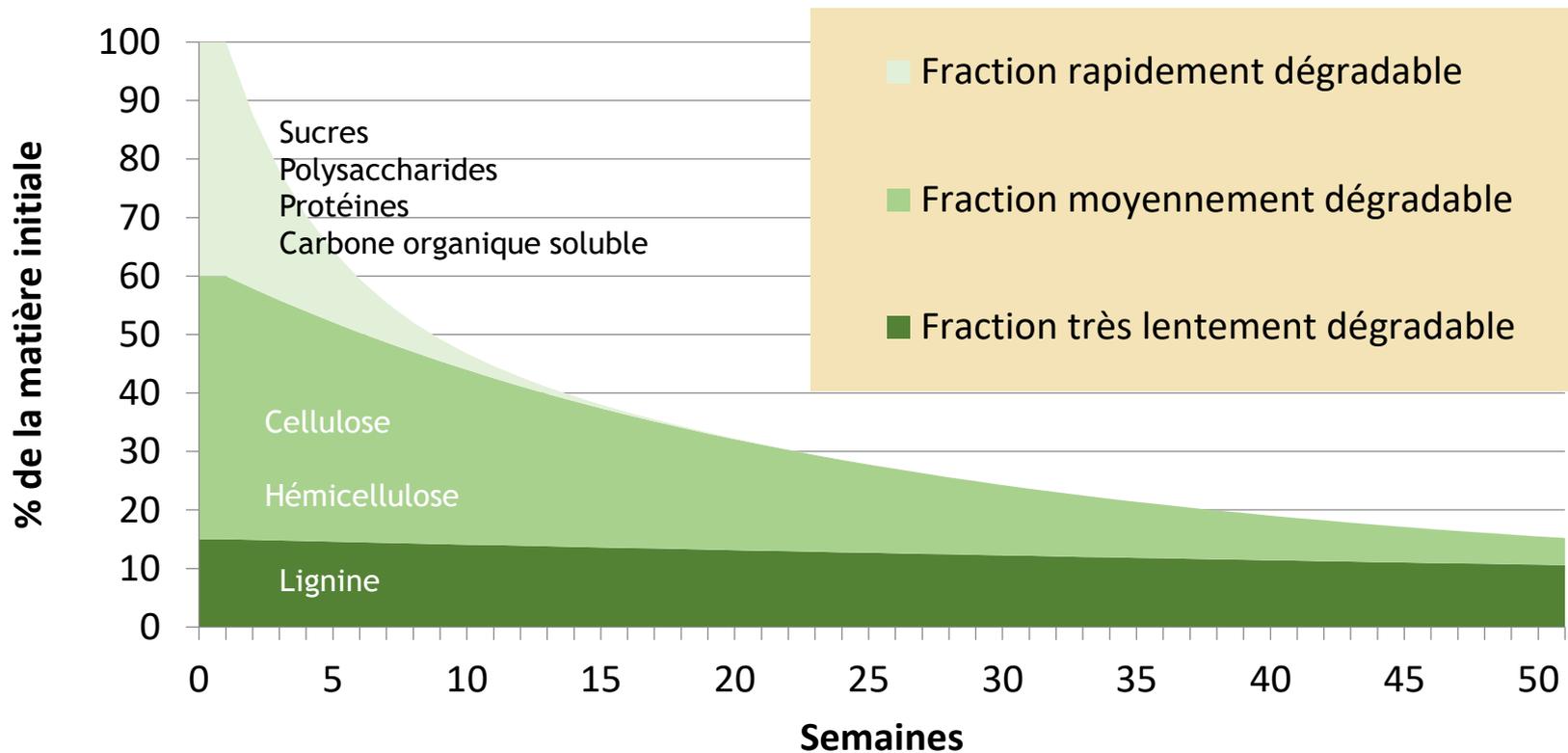
8



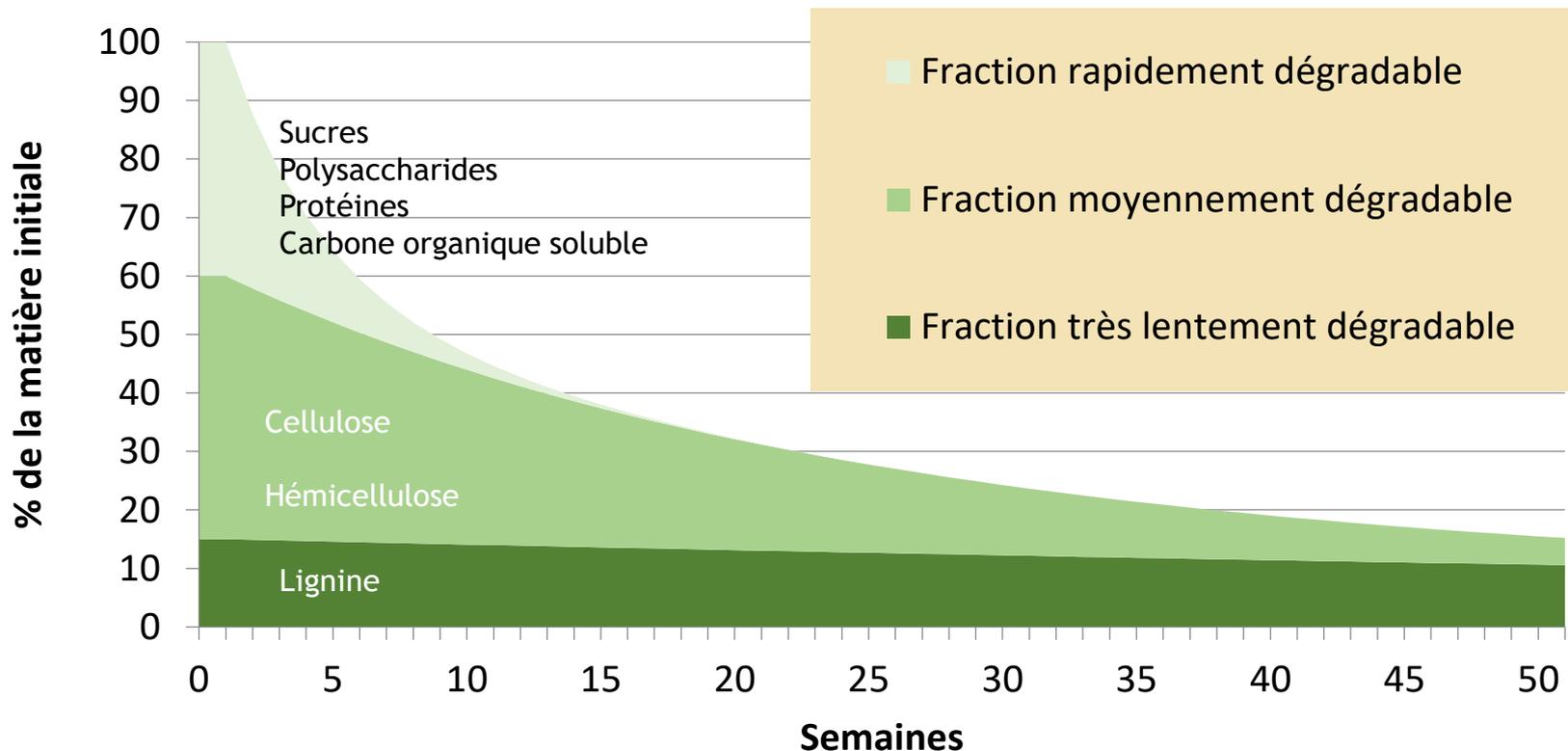
*La matière organique labile représente la fraction facilement biodégradable, à l'inverse de la matière organique stable, lentement biodégradable. Le carbone labile alimente les organismes vivants du sol et est indispensable au bon état biologique de celui-ci.*

- MO labile = fraction la plus aisément biodégradable ou digestible
- Principale source d'énergie des organismes du sol
  - 1 g de sol = 10 Mds de micro-organismes, 1 ha = 1 tonne de vers de terre
  - Nécessité de fournir un flux constamment renouvelé de carbone labile
- Pratiques permettant d'améliorer la fourniture de carbone labile :

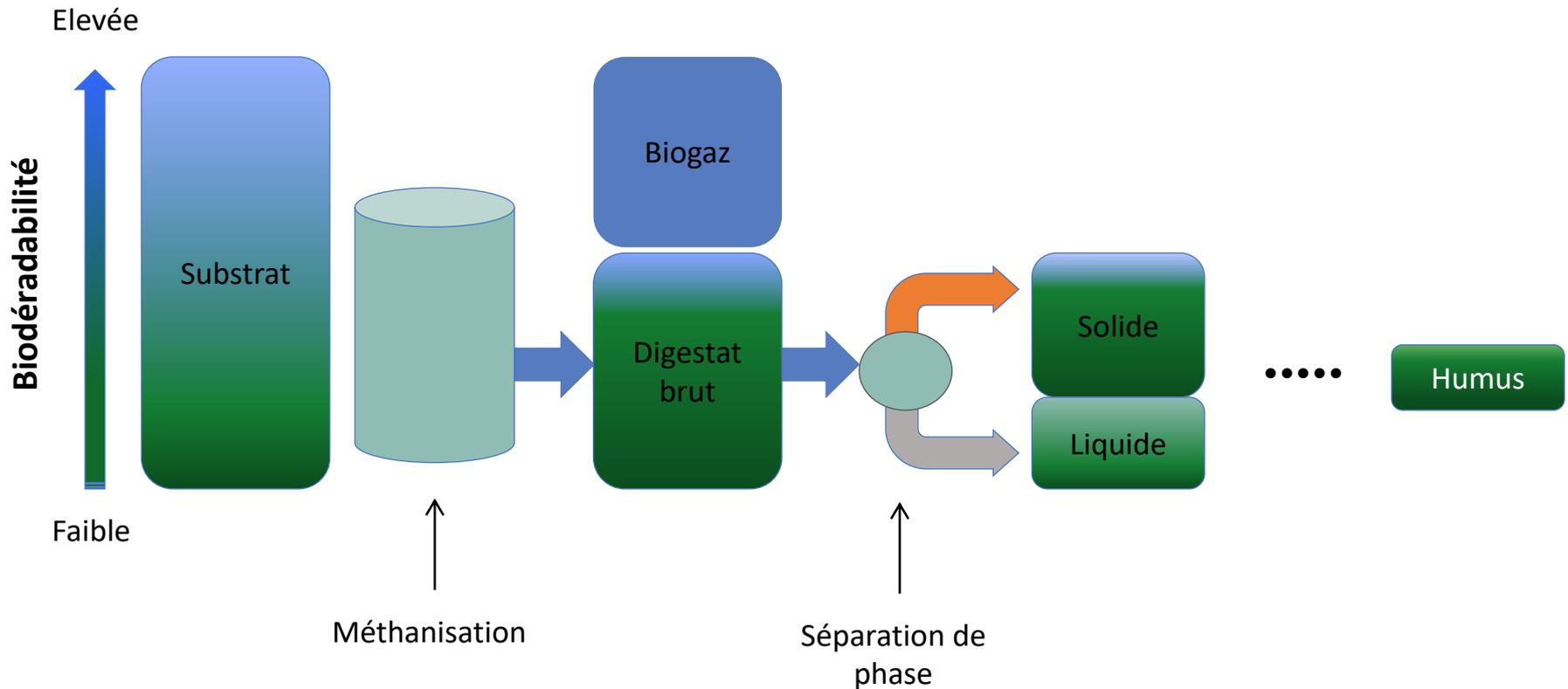
<i>Favorable</i>	<i>Défavorable</i>
Conserver les résidus de culture	Exporter les résidus de culture
Planter des couverts permanents,	Laisser les sols nus
Réduire le travail du sol voire le supprimer,	Labourer, travailler du sol en profondeur
Apporter de la matière organique exogène	Chauler



# Comment évolue la matière organique apportée au sol ?



*La matière organique résiduelle dans le digestat, va évoluer et dans le sol ou au cours d'une phase de maturation, sous l'action des microorganismes. Une partie va se dégrader, et une autre partie se réorganiser pour former de l'humus.*



# Le digestat est-il suffisamment stable ? Est-il au contraire une "matière morte" ?

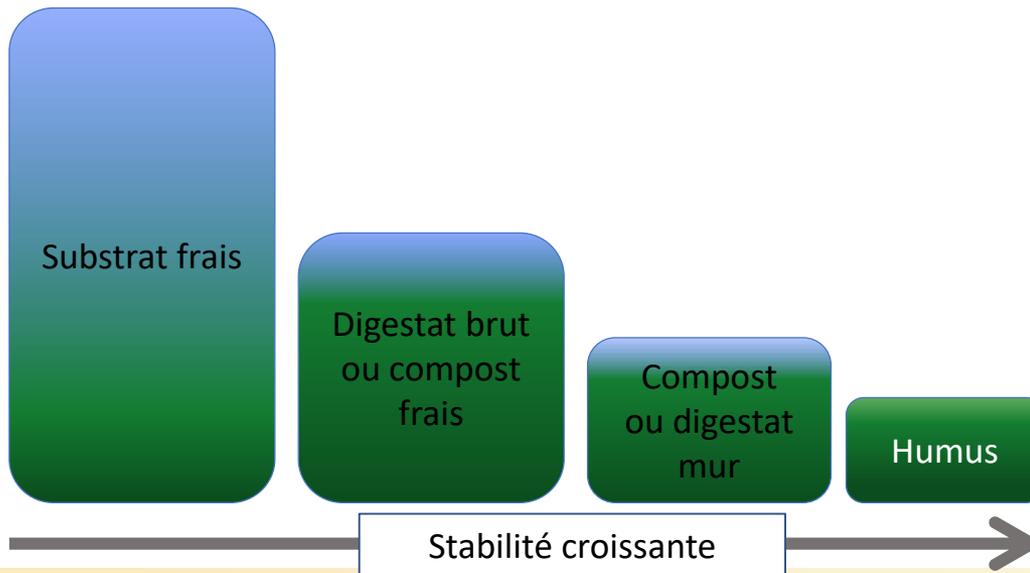
Q22

13

*Un digestat "frais" n'est pas complètement stabilisé et contient encore de la matière labile, qui participe à la vie du sol. Si l'on veut éviter une reprise de fermentation, il est nécessaire de lui faire subir une étape de maturation. Dans ce cas, le digestat mur ne possède que de la matière stable, qui contribue à former l'humus du sol.*

## ▪ Indicateurs

- ISMO : Indice de Stabilité de la Matière Organique

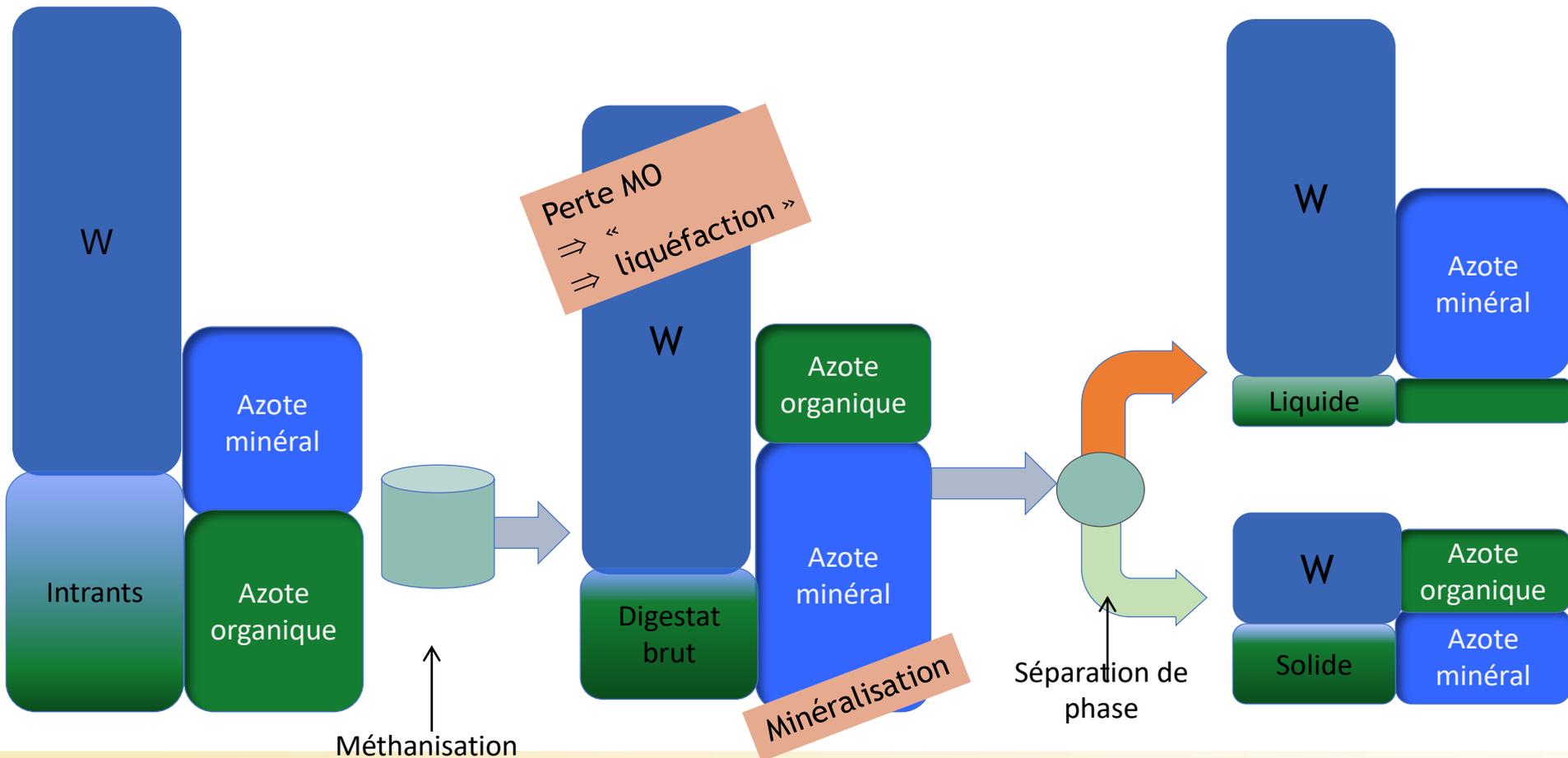


# Quelle est la différence entre le digestat et les effluents d'élevage ?

Q23

14

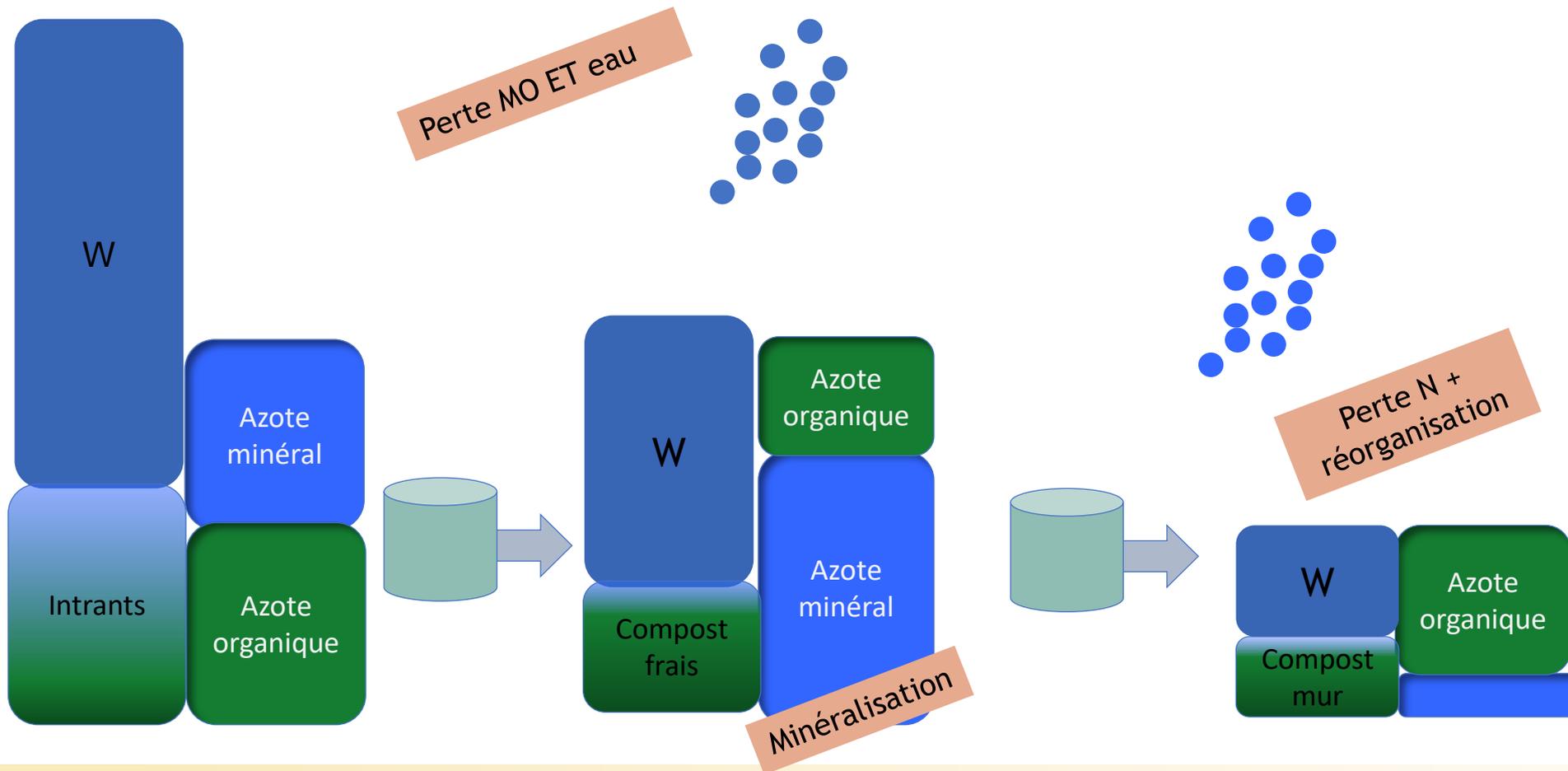
*Le digestat possède des caractéristiques proches de celles des effluents d'élevage : généralement un digestat liquide est assimilable à un lisier, et un digestat solide à un fumier. Les digestats stabilisés s'apparentent pour leur part à un compost.*



$[CH_2O] + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{chaleur} \Rightarrow$  élévation de température  $\Rightarrow$  assèchement

Phase thermophile

Phase de séchage et de maturation



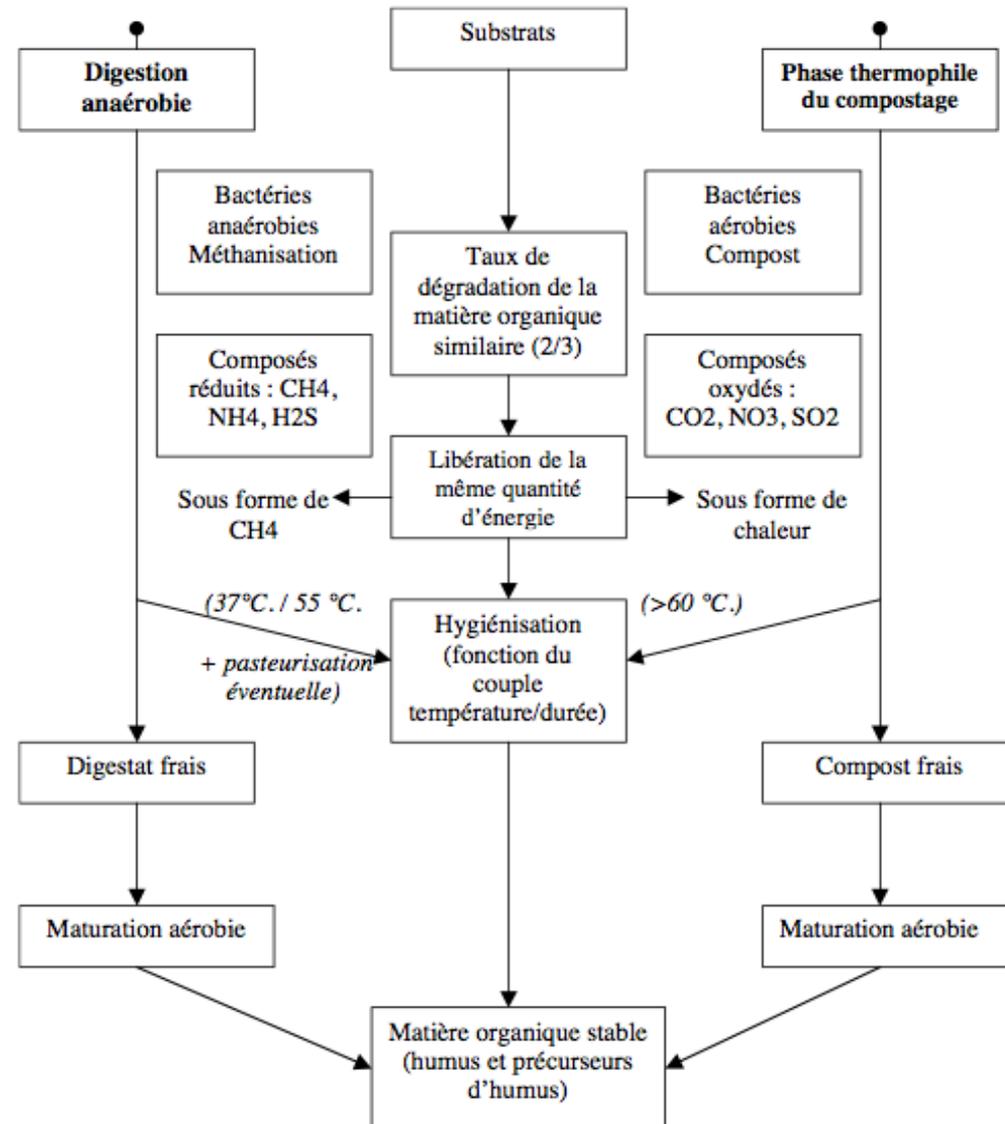
*Le compost et le digestat résultent de la décomposition de la matière organique sous l'action de microorganismes. Leurs propriétés sont voisines, malgré quelques importantes différences.*

## Bilan d'énergie

- $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{chaleur} \Rightarrow$  élévation de température  $\Rightarrow$  assèchement
- $\text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4$  : conservation de l'énergie initiale  $\Rightarrow$  pas d'évaporation

## Azote

- Phase décomposition seule (méthanisation ou phase thermophile du compostage)  $\Rightarrow$  libération N sous forme minérale
- Si maturation (quasi systématique pour compostage et occasionnelle pour méthanisation) : réorganisation N, mais pertes (importantes si C/N faible : 35% de perte en compostage fumier de bovins)



# Est-ce plus pertinent de faire de la méthanisation que du compostage ?

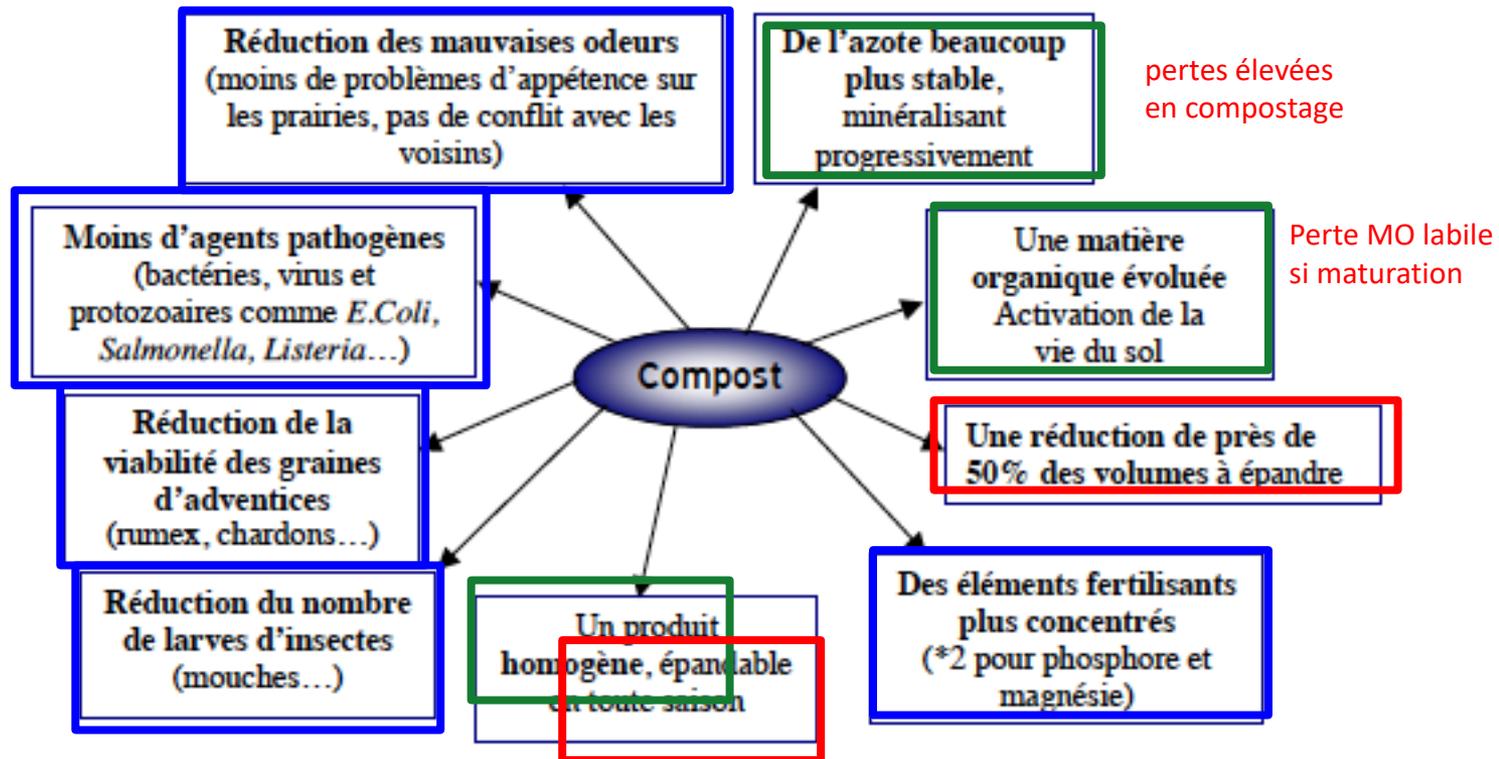
Q26

17

Lorsque le choix entre compostage et méthanisation se pose, la méthanisation offre l'intérêt de produire de l'énergie pour une qualité agronomique similaire. Elle est donc plus pertinente du point de vue environnemental, notamment pour les gaz à effet de serre, et au moins aussi pertinente sur le plan agronomique. Mais le contexte joue un rôle essentiel.

## Pourquoi composter ?

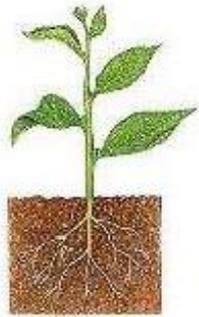
Bilan énergétique du compostage < 0



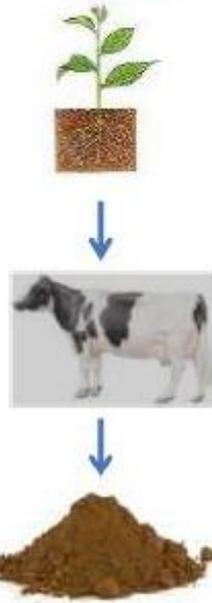
# Quel impact de la méthanisation sur la MO stable ?

S. Houot,  
D'après Thomsen, 2013

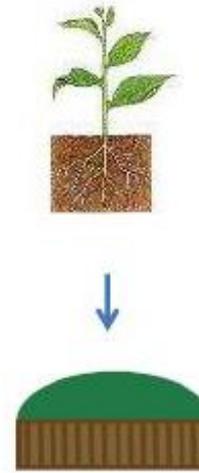
Fourrage incorporé directement au sol



Fourrage digéré par des animaux et restitué au sol sous forme d'effluents



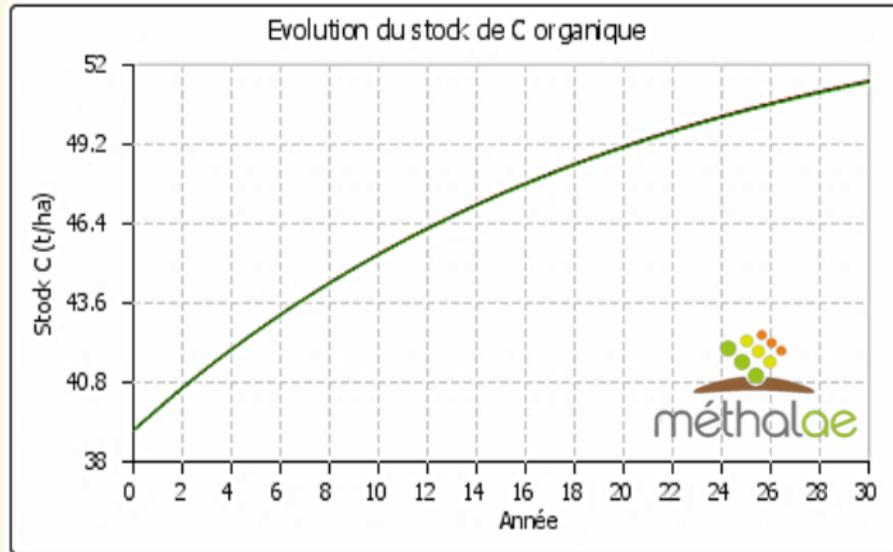
Fourrage digéré via méthanisation et restitué au sol sous forme de digestat



Fourrage digéré par des animaux et effluents d'élevage digérés via méthanisation



Carbone restitué au sol	100%	30%	20%	16%
Carbone dégradé dans le sol	86%	52%	42%	24%
ISMO	14%	48%	58%	76%
Carbone humifié	14%	14%	12%	12%



- Scénario avant méthanisation
- Scénario après méthanisation

## Systeme :

- Maïs/Blé/Orge printemps
- Sol limono-argileux
- Labour : 2 ans/3
- MO : 2,3 - 2,6 %

## Situation initiale

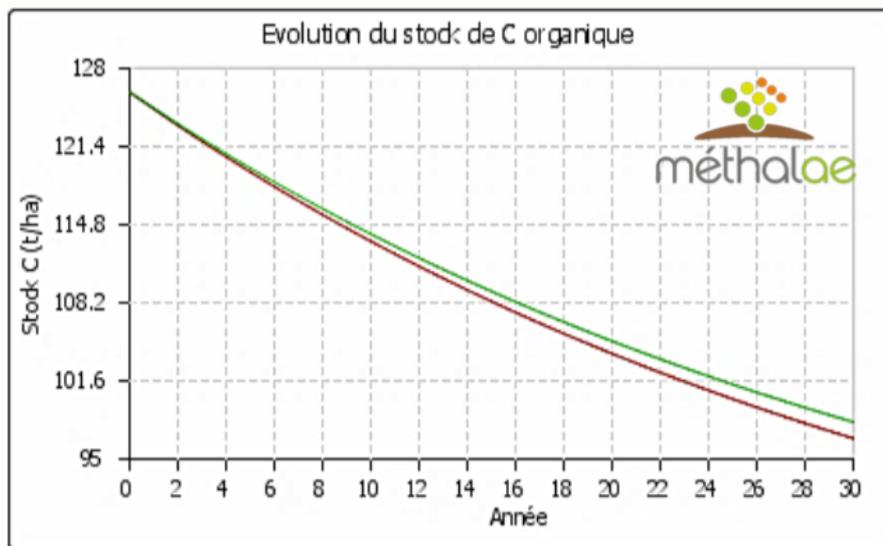
- Fumier b. pailleux 1an/2



## Situation après méthanisation

- Digestat solide 1an/2

✓ Pas d'impact du changement d'engrais organique



- Scénario avant méthanisation
- Scénario après méthanisation

## Systeme :

- Colza/Blé/Orge/Pois protéa
- Sol argilo limoneux calcaire
- Labour 25 cm 1an/2
- CIPAN
- MO : 5,1 - 5,6 %

## Situation initiale

- Compost de fumier 1an/2



## Situation après méthanisation

- Digestat solide 1an/2

- ✓ Déstockage du C orga dû à la forte quantité de départ, le travail du sol régulier et l'exportation systématique des pailles
- ✓ Moins de perte de MO par la méthanisation que le compostage



- Scénario avant méthanisation
- Scénario après méthanisation

## Systeme :

- Colza/blé/tournesol/blé
- Sol argileux
- TCS : 2 ans/3
- MO : 2,3 - 2,6 %

## Situation initiale

- Rotation céréale de 4 ans
- CIPAN avant tournesol
- Apport de fiente de volaille avant colza



## Situation après méthanisation

- Remplacement CIPAN par CIVE
- Implantation sarrazin à la place de tournesol
- Retour de digestat en échange de la CIVE

- ✓ Malgré l'export des parties aériennes de la CIVE, Chaumes + racines > MS de la CIPAN
- ✓ Retour du digestat suite à la digestion de la CIVE

*Pour augmenter le carbone des sols, il faut surtout diminuer les processus de dégradation de la matière organique, et apporter de la matière organique stable*

## **Augmentation**

- Faible activité biologique : N peu disponible, MO peu labile
- Sol sec
- Rendements élevés
- Non labour, travail simplifié
- Apport important de MO stable
- Exportations de MO limitées

## **Diminution**

- Forte activité biologique (N disponible, MO labile),
- irrigation
- Rendements faibles
- Travail du sol, labour
- Faible apport de MO stable

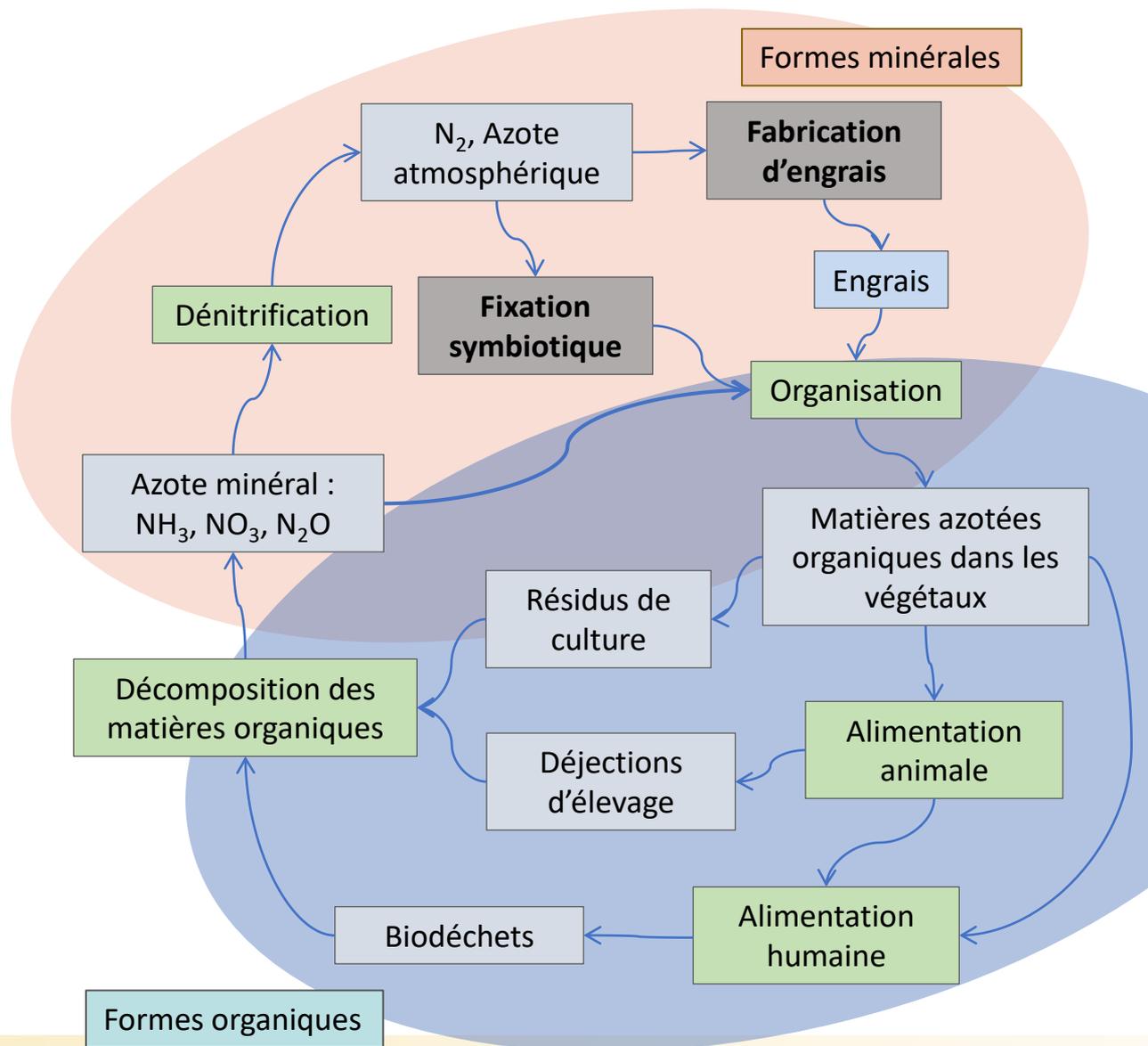
*On ne peut pas avoir tous les facteurs positifs en même temps. Rendements élevés => N disponible => alimente process de dégradation de la MO du sol*

*Digestat : le process de décomposition est opéré hors champs (pas de phénomènes de faim d'azote), on restitue la MO stable (qui va moins contribuer directement à l'activité biologique ; pas de priming effect), et du N minéral qui va augmenter les rendements (et donc l'activité biologique indirectement) L'effet global (modélisation SIMEOS/AMG) dépend de nombreux paramètres (type de sol, successions culturales, itinéraires techniques) et il existe le plus souvent des solutions pour le rendre positif.*

*L'effet systémique importe plus que l'effet direct.*

# Cycle des nutriments

L'azote provient des engrais ou des matières organiques. Il doit passer par une phase minérale pour que les racines des plantes puissent l'absorber. L'azote organique est ensuite à nouveau minéralisé à plus ou moins longue échéance. Lors de ce cycle, des fuites peuvent se produire dans l'air ou dans l'eau.



Légende :

Mécanisme

Matières

## Nitrogénase

- Capacité de convertir le diazote atmosphérique ( $N_2$ ) en ammonium ( $NH_3$ )

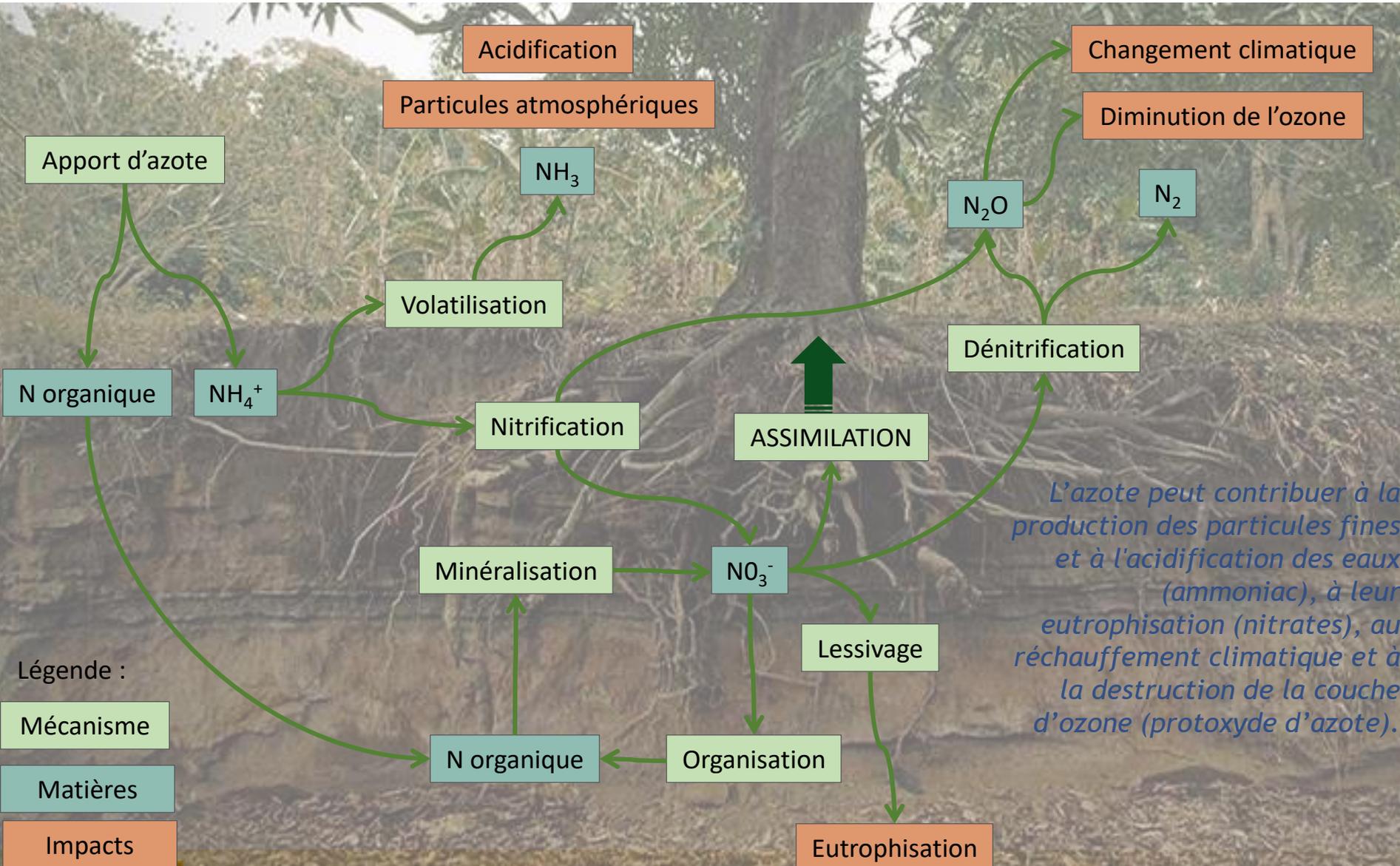
## Fixation libre

- azotobacter, certaines bactéries anaérobies, certaines cyanobactéries...

## Fixation symbiotique

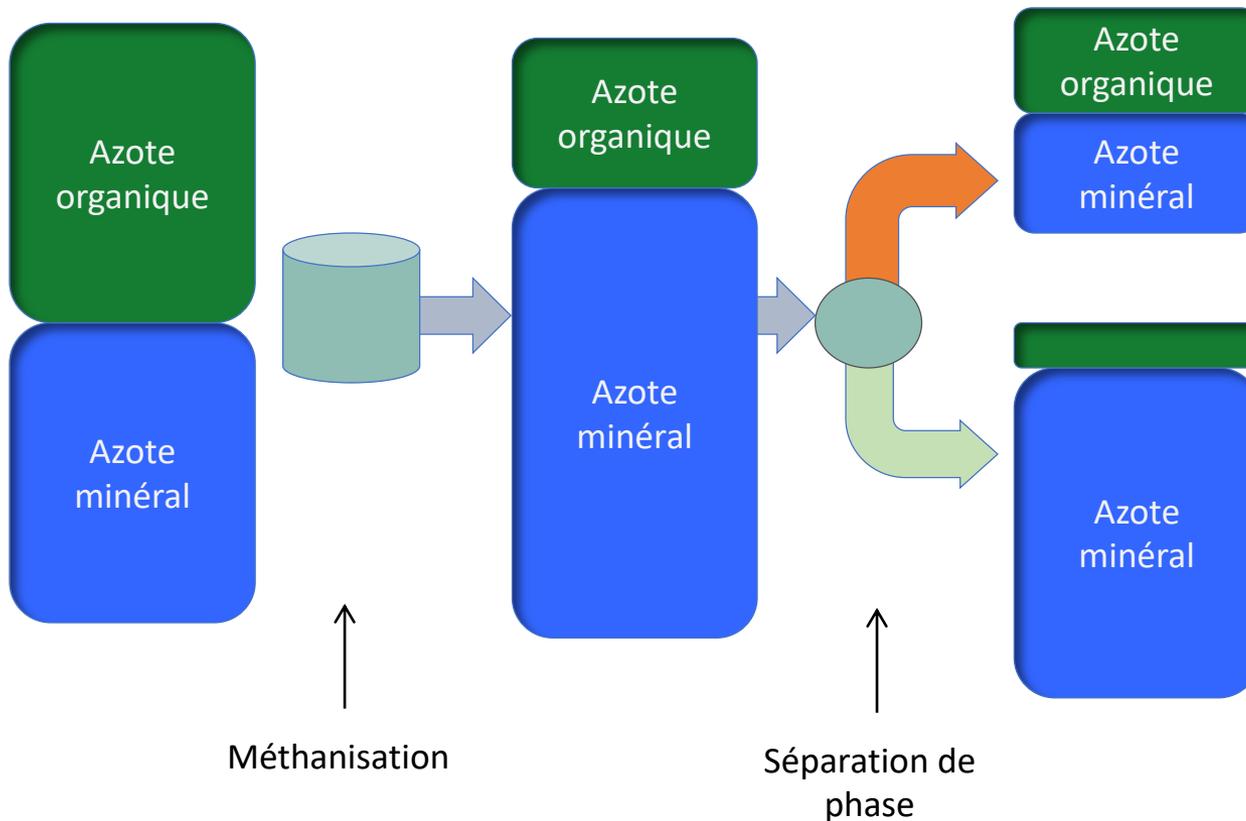
- co-dépendance bactérie / végétal
- Rhizobium (bactérie chimio-organotrophe aérobique stricte) avec des légumineuses (nodules) : pois, haricots, lentille, soja, arachide, fève, féverole, lupin, luzerne, trèfle, acacia, robinier, lotus ...
- Frankia (bactérie actinomycète) avec des non légumineuses : aulne...





- Légende :
- Mécanisme
  - Matières
  - Impacts

*Les matières minérales sont intégralement conservées au cours de la méthanisation. Elles évoluent vers des formes plus solubles, qui peuvent encore être modifiées lors des étapes de traitement des digestats.*



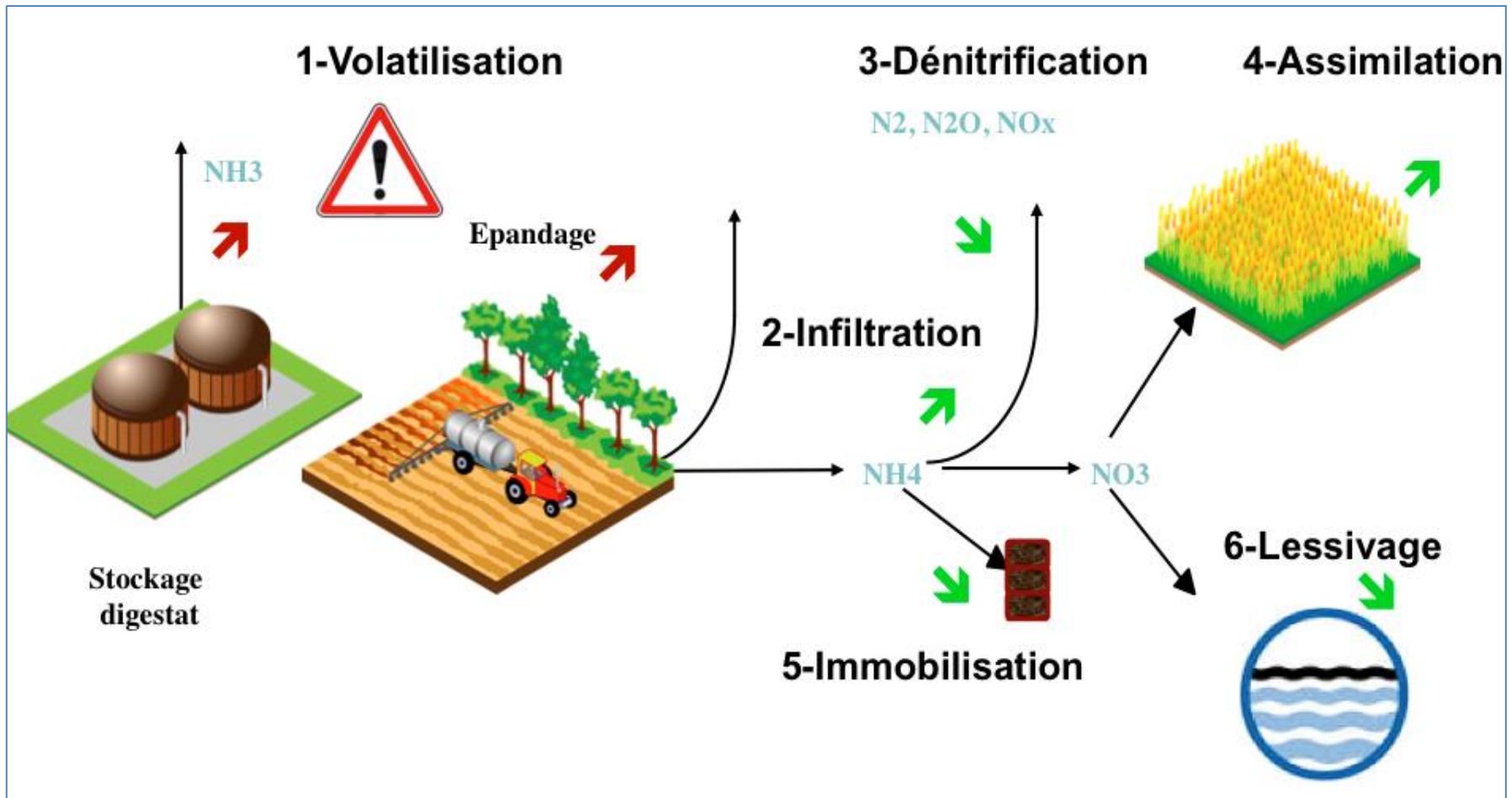
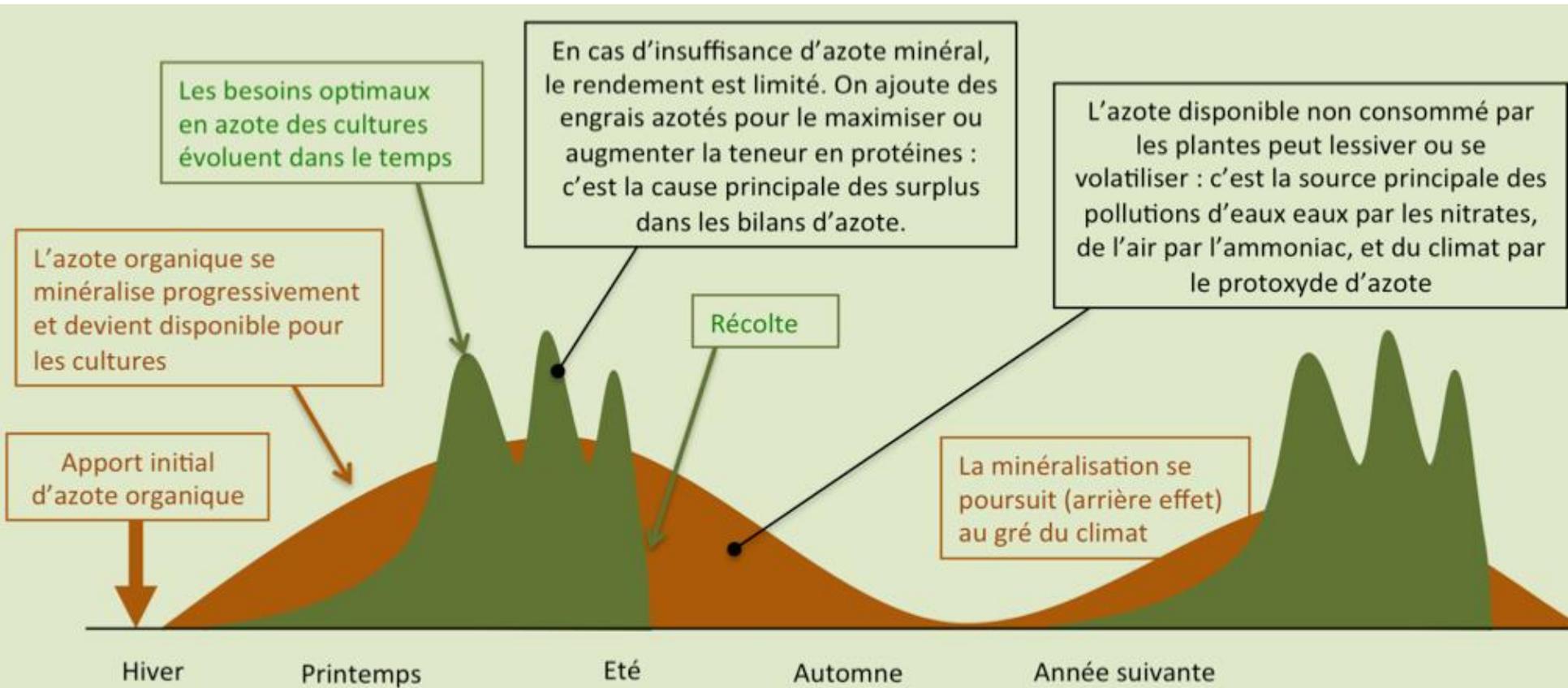


Illustration de l'augmentation et la réduction des risques d'émissions de polluants liés à la méthanisation

*La méthanisation propose plusieurs moyens d'améliorer la gestion de l'azote sur un territoire. Elle peut donc faire partie des réponses apportées dans une zone vulnérable aux nitrates.*



*Dépend du contexte et de la façon dont est conduite la méthanisation. La méthanisation offre plusieurs leviers de réductions de la pression azotée, mais peut également présenter dans certaines conditions un risque pour un territoire en zone vulnérable.*

<i>Menace</i>		<i>Opportunité</i>
		Exportation du digestat, traitement de N
		Meilleure gestion de N et réduction consommation N minéral
Augmentation apports N exogènes (biodéchets)		<i>(menace nulle si ces déchets sont déjà utilisés localement ; ou si contribuent à diminuer besoins en N de synthèse)</i>
Intensification des productions agricoles (cultures énergétiques) : augmentation besoins en N		<i>(pratique rejetée ; si besoins augmentent, pertes peuvent diminuer)</i>
Augmentation du cheptel		<i>(pas de corrélation directe)</i>
Diminution du temps de pâture		<i>(pas de corrélation directe)</i>

## Polluants –contaminants - innocuité

*Une part importante des pathogènes est abattue au cours de la méthanisation. Les populations méthanogènes développées au cours du procédé sont comparables à celles qui sont naturellement présentes dans le système digestif des animaux.*

- **Présence de population microbiologiques communes et naturelles**
  - Flore intestinale présente dans les systèmes digestifs des animaux, vitale car responsable du mécanisme de la digestion
  
- **En cas de présence d'agents pathogènes (virus, bactéries, parasites) :**
  - Destruction plus ou moins importante selon Température x temps de séjour
  - Effet « assainissant » : division par 10 ou 100 (log 2, log 3) en mode mésophile classique ; généralement suffisant
  - Effet hygiénisant : nécessite température plus élevée (55° C x 15 jours, 70° C x 1 heure...) ; nécessaire en cas de contamination ou de risque particulier
  - Méthanisation interdite pour certains produits (destruction obligatoire)

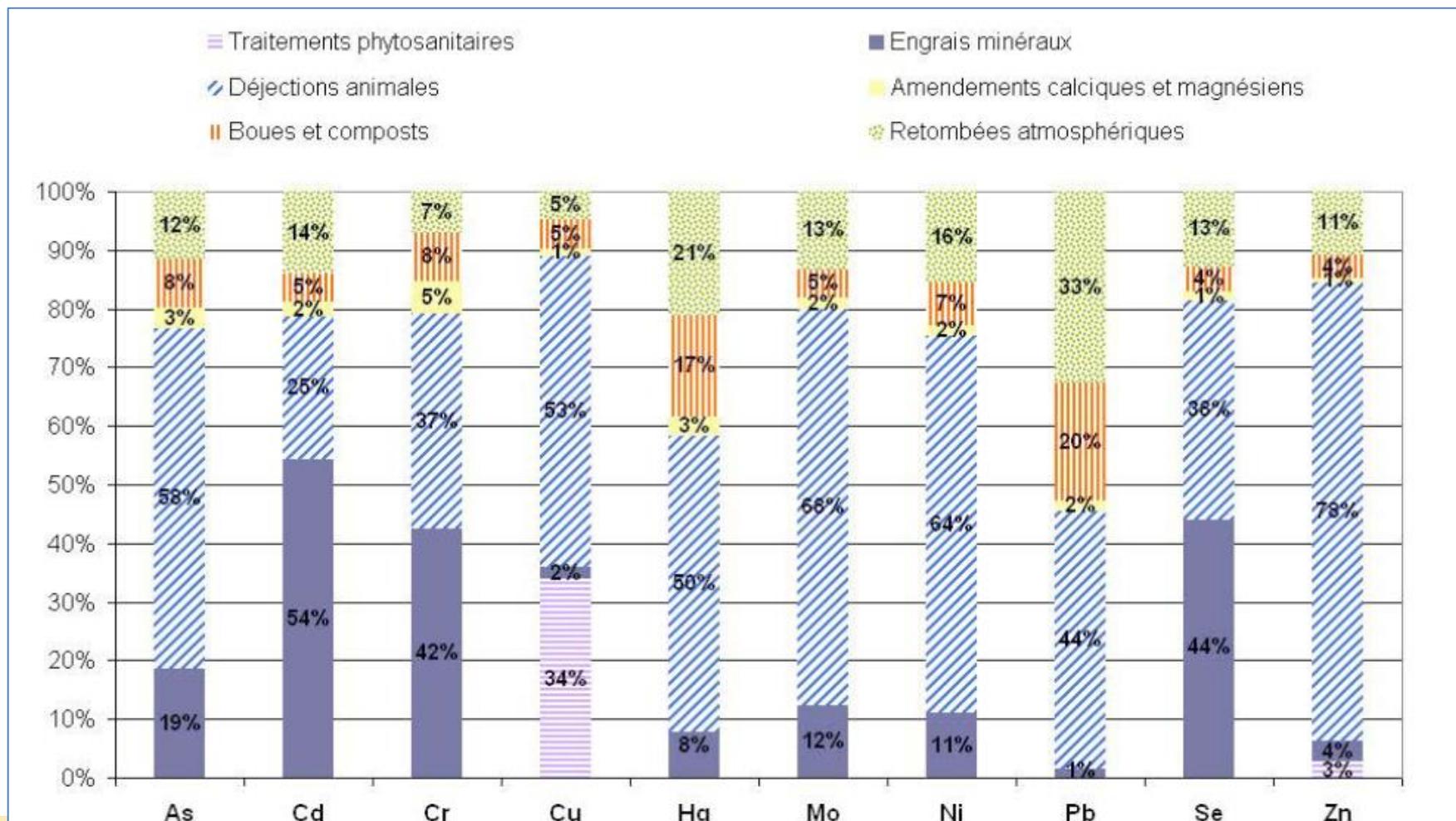
*Malgré un effet assainissant de la digestion, l'épandage du digestat peut présenter des risques. Ceux-ci peuvent être maîtrisés par une exploitation appropriée de l'unité de méthanisation, et par une éventuelle évolution des pratiques d'élevage.*

- **Risque accru si :**
  - Incorporation de matière à risque jusqu'à présent non épandues
  - Transmission entre les élevages en cas de plan d'épandage collectif (prairies, cultures fourragères)
  
- **Opportunité**
  - Peut participer à l'amélioration sanitaire des pâturages sur un territoire
  
- **Prévention des risques :**
  - Gestion des intrants
  - Techniques de digestion, traitement thermique, post-compostage
  - Pratiques d'épandage (enfouissement rapide)
  - Modification des pratiques de prophylaxie animale
  - Organisation de la logistique (éviter le croisement de flux)

*La méthanisation permet de réduire les besoins en produits phytosanitaires, en dégradant les graines introduites dans le digesteur (effluents d'élevage, menue paille). Elle joue également un rôle direct, en dégradant les pesticides présents dans les intrants.*

- **Abattement partiel des produits phytosanitaires lors de la digestion**
  - Direct : élimination de certaines molécules
  - Indirect : réduction du pouvoir germinatoire des graines d'adventices présentes dans les déjections d'élevage, les résidus de culture et les menues pailles

*La digestion anaérobie n'a pas d'impact sur la quantité totale de métaux : tous les métaux introduits dans le méthaniseur sont donc présents dans le digestat en sortie.*



*Sauf incorporation dans le digesteur d'intrants non adaptés, le risque de pollution aux éléments métalliques n'est pas augmenté.*

- **Maintien du flux, augmentation de la concentration en ETM**
  - Pas d'augmentation des flux (en kg / an) mais augmentation de la concentration mesurée en g / kg de MS du fait de la diminution de la MS
  
- **Modification de la spéciation (forme chimique)**
  - Immobilisation (par adsorption, complexation, précipitation...) sous forme insoluble, sur une durée plus ou moins longue donc réduction de la biodisponibilité
  - La majorité des ETM se retrouve dans la fraction solide
  - Effet de long terme inchangé
  
- **Pas d'impact avéré de l'épandage du digestat sur les sols et les cultures**
  
- **Prévention du risque : gestion des apports**
  - Diminution des apports par les engrais, les phytosanitaires et l'alimentation des animaux
  - Contrôle de la qualité des intrants non agricoles

## Questions sociétales

Qu'est-ce que la monoculture et quel est le problème ?

- Cultiver petit nombre d'espèces année après année sur une même surface ; intérêt : simplicité de l'assolement
- Entraîne épuisement des éléments nutritifs, et spécialisation des ravageurs et risque de résistance

Réponse : non

- Pas de soutien aux cultures énergétique (pas de prime)
- Limite à 15% des cultures dédiées

## Qu'est-ce que l'intensification et quel est le problème ?

- Intensification = augmentation de la production / ha (rendement) ou par heure de travail (productivité) ou par quantité d'énergie consommée
- Agriculture dite « intensive » (ou conventionnelle) : basée sur recherche de rendement élevé grâce à moyens mécaniques et aux intrants
- Entraîne diminution du nombre d'emplois et pollutions (phytosanitaires, pollutions azotées)

## Réponse : « oui » mais positivement

- Pas d'incitation aux cultures dédiées
- Encouragement des CIVE (pour le biométhane) donc augmentation de la production à l'hectare sans augmenter les intrants => forme d'intensification positive

## Qu'est-ce que l'élevage intensif et quel est le problème ?

- Monogastriques (porcs et volailles) et bovins lait : forte densité d'animaux en bâtiments fermés (zéro pâturage, « hors sol »), achats d'aliments hors exploitation agricole
- Pas de « lien au sol » : la quantité d'aliments n'est pas produite localement, les quantités de nutriments dans les déjections d'élevage sont très supérieures aux besoins des cultures de l'exploitation => principal mécanisme de création des excédents structurels

## Réponse : non

- La méthanisation ne détruit pas l'azote => ne permet pas d'augmenter les effectifs d'animaux sans augmenter l'excédent structurel d'azote
- Effet indirect en cas de traitement complémentaire permettant d'exporter : mais coût prohibitif de cette solution

## Pourquoi des « fermes à 1000 vaches » et quel est le problème ?

- Intensification de l'élevage laitier pour « gagner en compétitivité » : augmentation de la production par tête, alimentation très énergétique (maïs soja), diminution des dépenses (zéro pâturage) et de la main d'œuvre (alimentation automatisée)
- Incompatible avec le pâturage donc avec la préservation des prairies ; utilisation de terres arables pour nourrir le troupeau au détriment des productions de grains comestibles par les humains (maïs, soja)

## Réponse : non ou indirectement

- Le choix du « zéro pâturage » est fait en amont du choix de la méthanisation, il est plus structurant
- Le chiffre d'affaires dégagé par la vente de lait est très supérieur à celui dégagé par la vente de biogaz (sous forme d'électricité ou de biométhane)

Exemple pour une ferme de 400 vaches

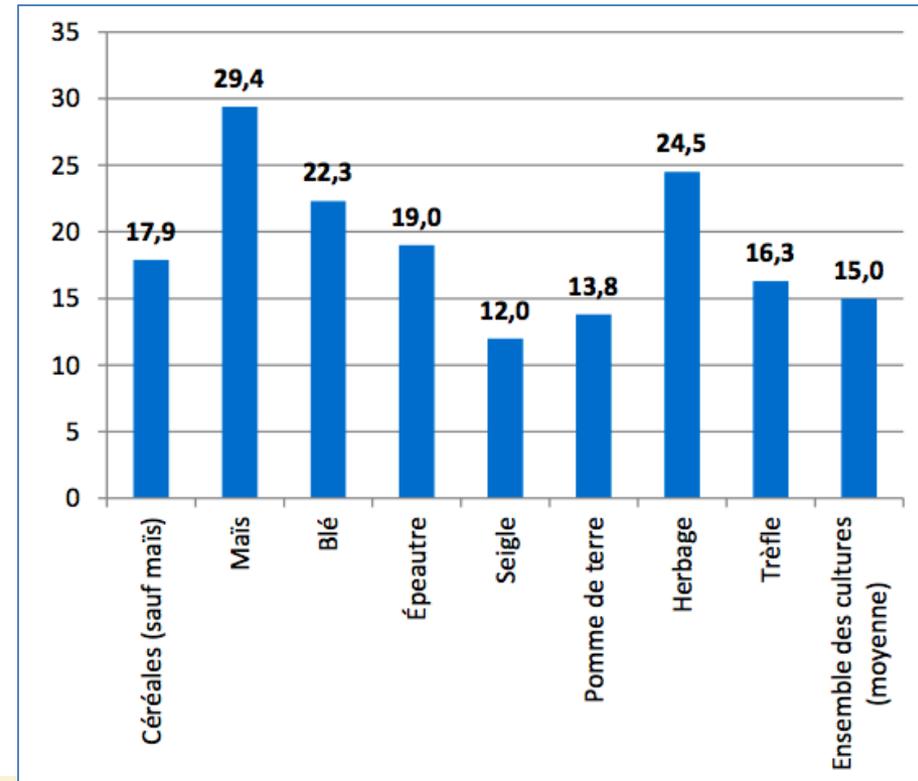
LAIT	ENERGIE
10.000 litres de lait / vache	22 m <sup>3</sup> de lisier / vache
4 millions de litres	180.000 m <sup>3</sup> de méthane = 1800 MWh = 20 m <sub>3</sub> CH <sub>4</sub> / heure
350 € / 1000 litres	125 € / MWh
1.400.000 €	150.000 €

## Quel est le problème ?

- L'apport d'azote sous forme minéral est considéré comme un facteur de fragilisation des plantes sur le long terme
- Mais il permet d'améliorer significativement les rendements, donc de réduire les surfaces nécessaires à production égale
- Effet CASI positif (Changement d'Affectation des Sols Indirect)

## Réponse : oui

- En France, première unité de méthanisation agricole chez un agriculteur bio (F. Claudepierre)
- Compatibilité sous réserve de la nature des intrants (respect cahier des charges AB)

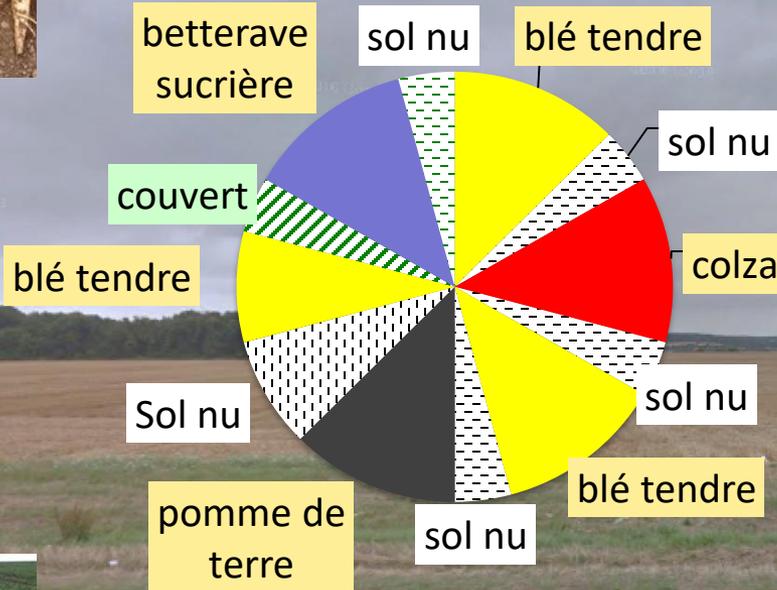


## Guillaume Rocquecourt

- Près de Montdidier, Somme
- 170 ha de grandes cultures



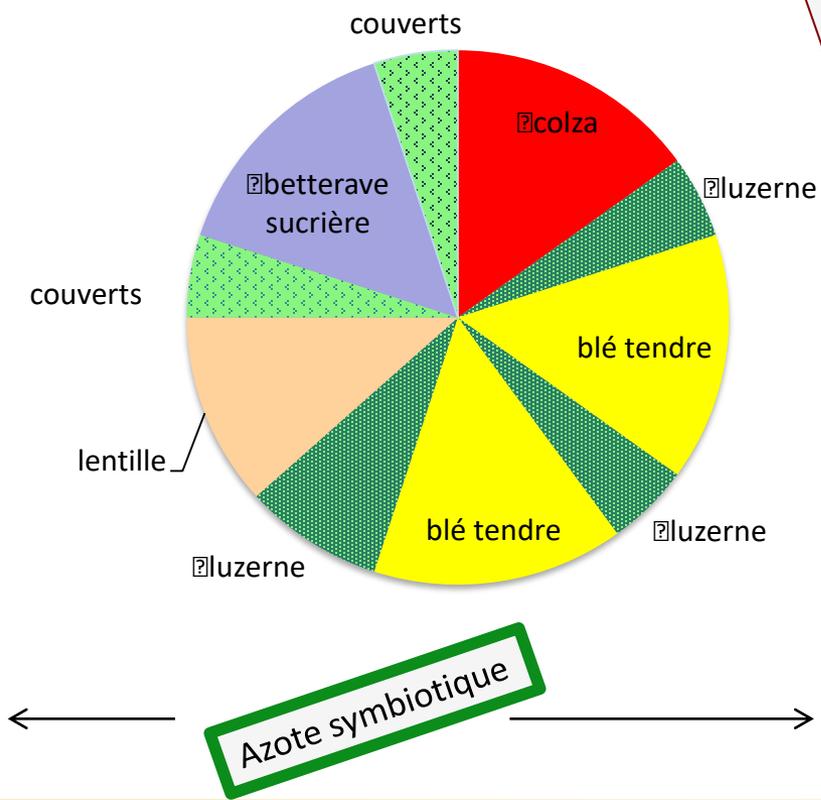
# 2010 : un système conventionnel ...



# 2015 : passage à l'agriculture de conservation



Bandes enherbées fleuries (infrastructures agro-environnementales)



Engrais vert



Légumineuses alimentation humaine

Azote symbiotique

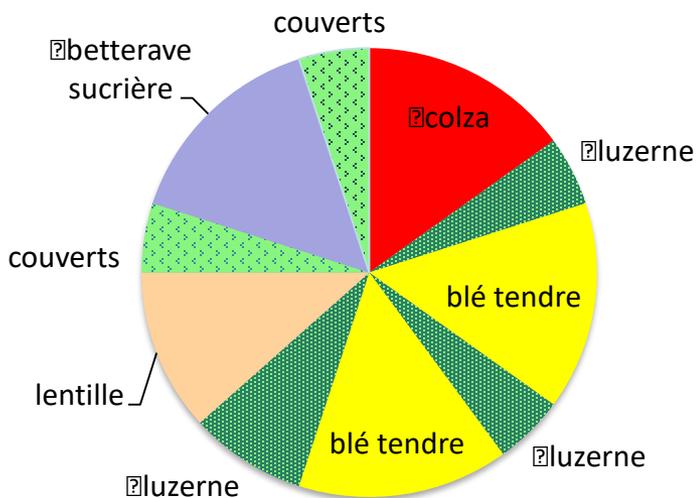


- Valorisation des couverts et de la luzerne : stockage carbone, fixation azote
- Optimisation recyclage azote et phosphore : diminution engrais, maintien rendement
- Elimination graines d'adventice (menues pailles) : réduction besoins de désherbage



20% paille  
50% couverts  
100% luzerne

Collets betterave, issues de silos...



Méthanisation

Energie

Nutriments





Azote, phosphore, énergie, phytosanitaires



Production primaire



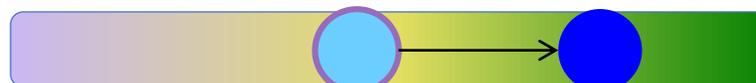
Fonctionnalités naturelles



Intrants (NPK, énergie)



Résilience changement climatique



Impacts environnementaux



Diversification et synergies



## Aurélie et Nicolas Robin

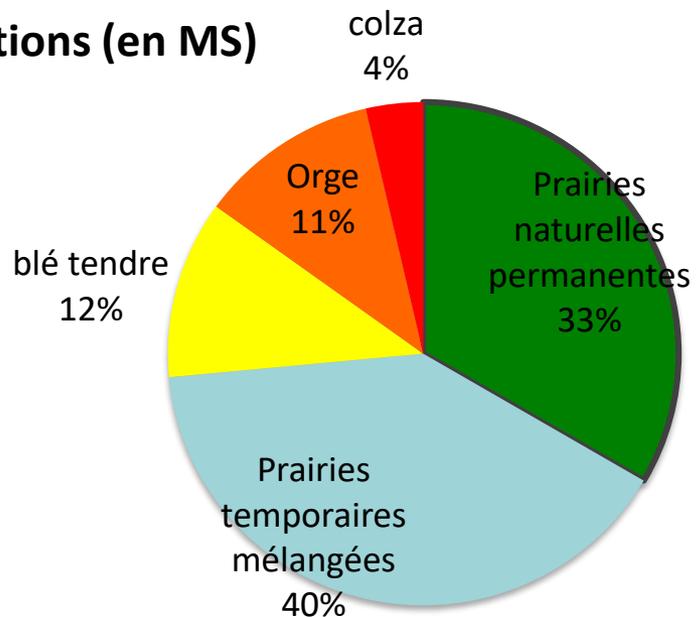
- 70 Charolaises,
- 125 ha de cultures et prairies, 1/3 de prairies naturelles



# Un système polyculture élevage classique

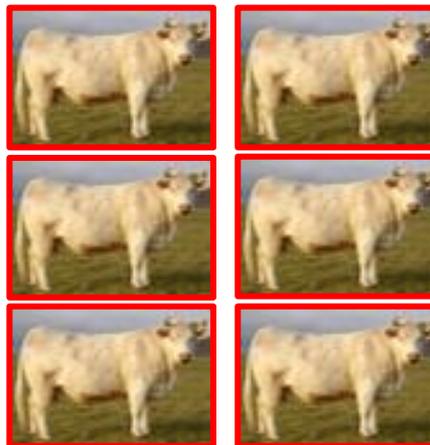


## Productions (en MS)



Viande

Cultures de vente (céréales)

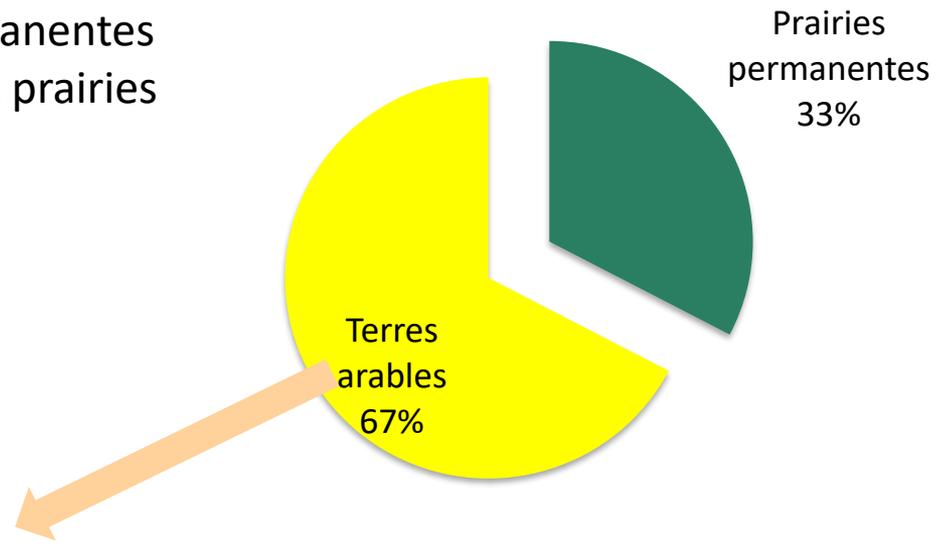
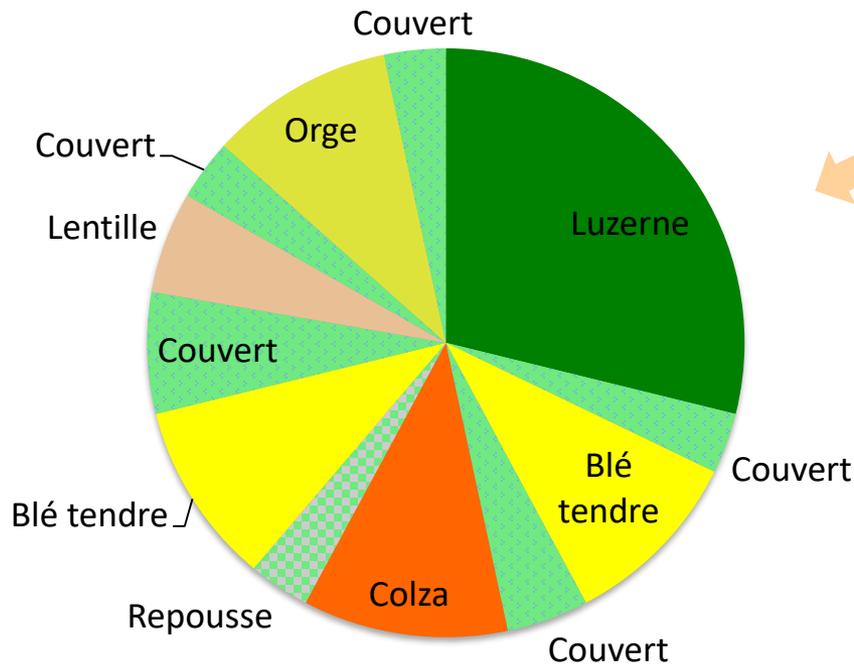


42 ha prairie permanente + 42 ha de prairie temporaire								
22ha	Ensilage							
20ha	Foin + ensilage						pâturage	
12ha	Foin				pâturage			
30ha	pâturage							
	M	A	M	J	J	A	S	O



- Division par 2 du nombre de vaches allaitantes
- Maintien de la surface de prairies permanentes
- Terres arables : conversion partielle des prairies temporaires en cultures
- Conversion AB

## Assolement



# Une autre gestion du système fourrager



- Augmentation durée pâturage et optimisation gestion de l'herbe
- Suppression concentrés et diminution fourrages
- Mais les étés secs...
- ...imposent de constituer des stocks d'herbe de conservation...
- ...qui sont utilisés soit comme fourrages soit pour la méthanisation selon le contexte

Viande



Cultures de vente (céréales)



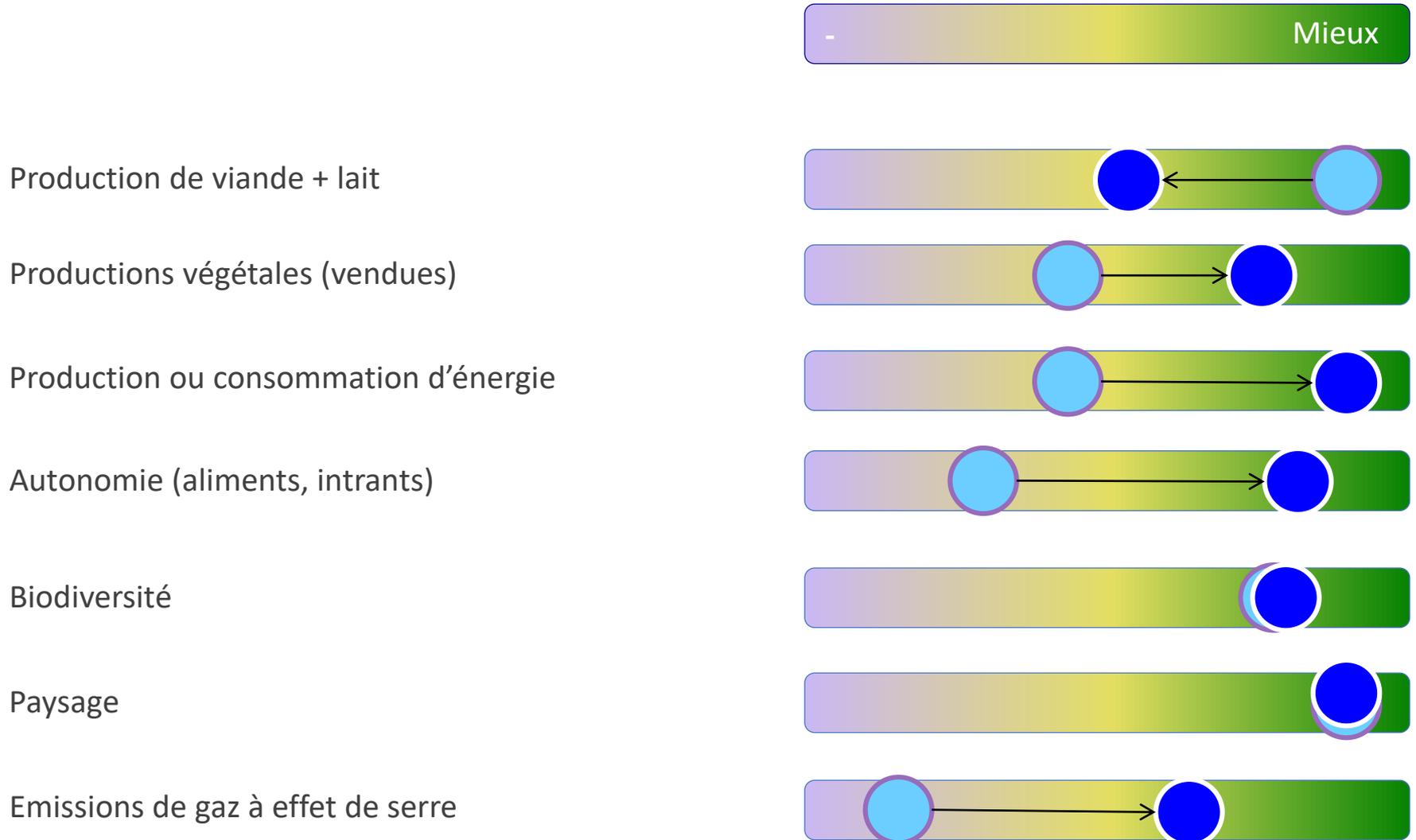
**42 ha prairie permanente + 20 ha de luzerne dans la rotation**

20ha	Luzerne									
8ha	Foin						Foin			
8ha							pâturage			
26ha	pâturage									
	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N

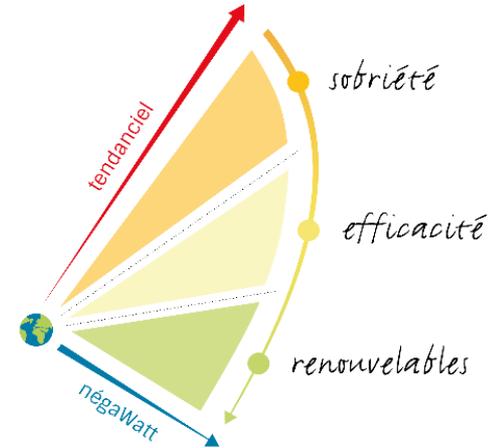
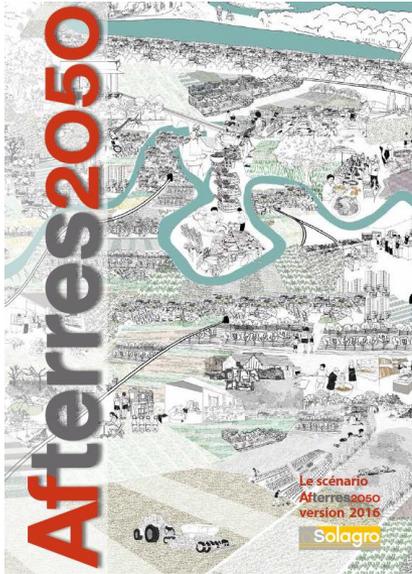


Apports en méthanisation	tMB
Fumier	150
Paille	64
Herbe	100
CIVE	400
<b>Total</b>	<b>710</b>



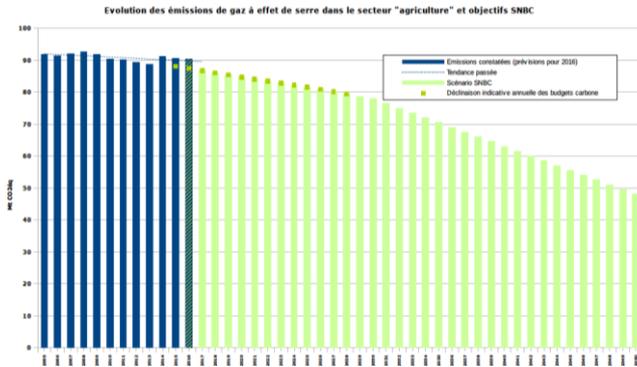


## Scénarios de transition énergétique et agricole



## SNBC

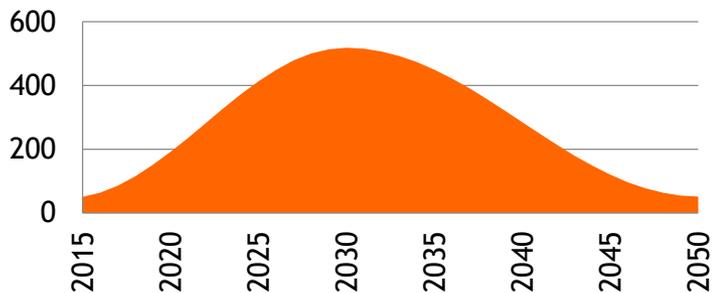
LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE pour le CROISSANCE VERTE Indicateurs de résultats - agriculture



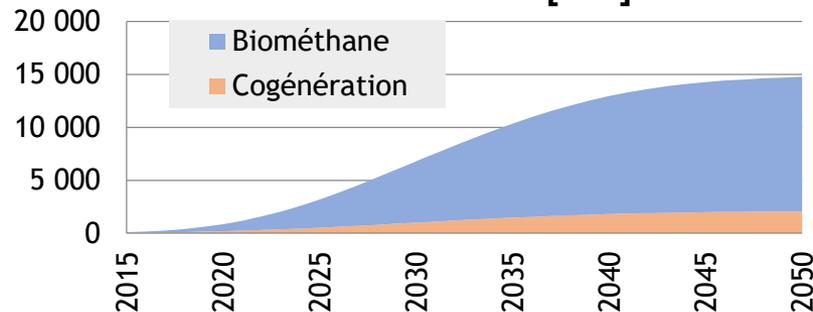
## ADEME – Vision 2035-2050



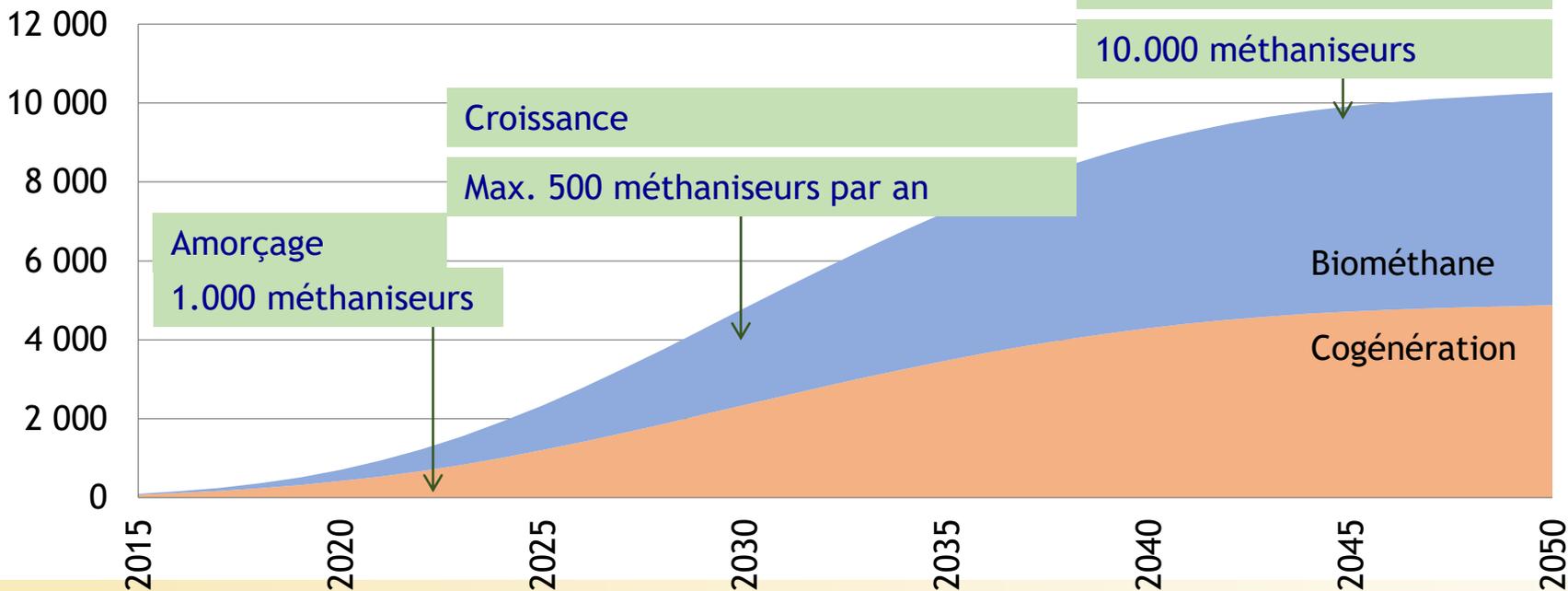
Nombre de nouvelles unités par an



Puissance cumulée [MW]



Parc cumulé [Nombre]



## Intérêt de la planification du développement des réseaux avec mutualisation des coûts de développement ( S3REnR gaziers )

