

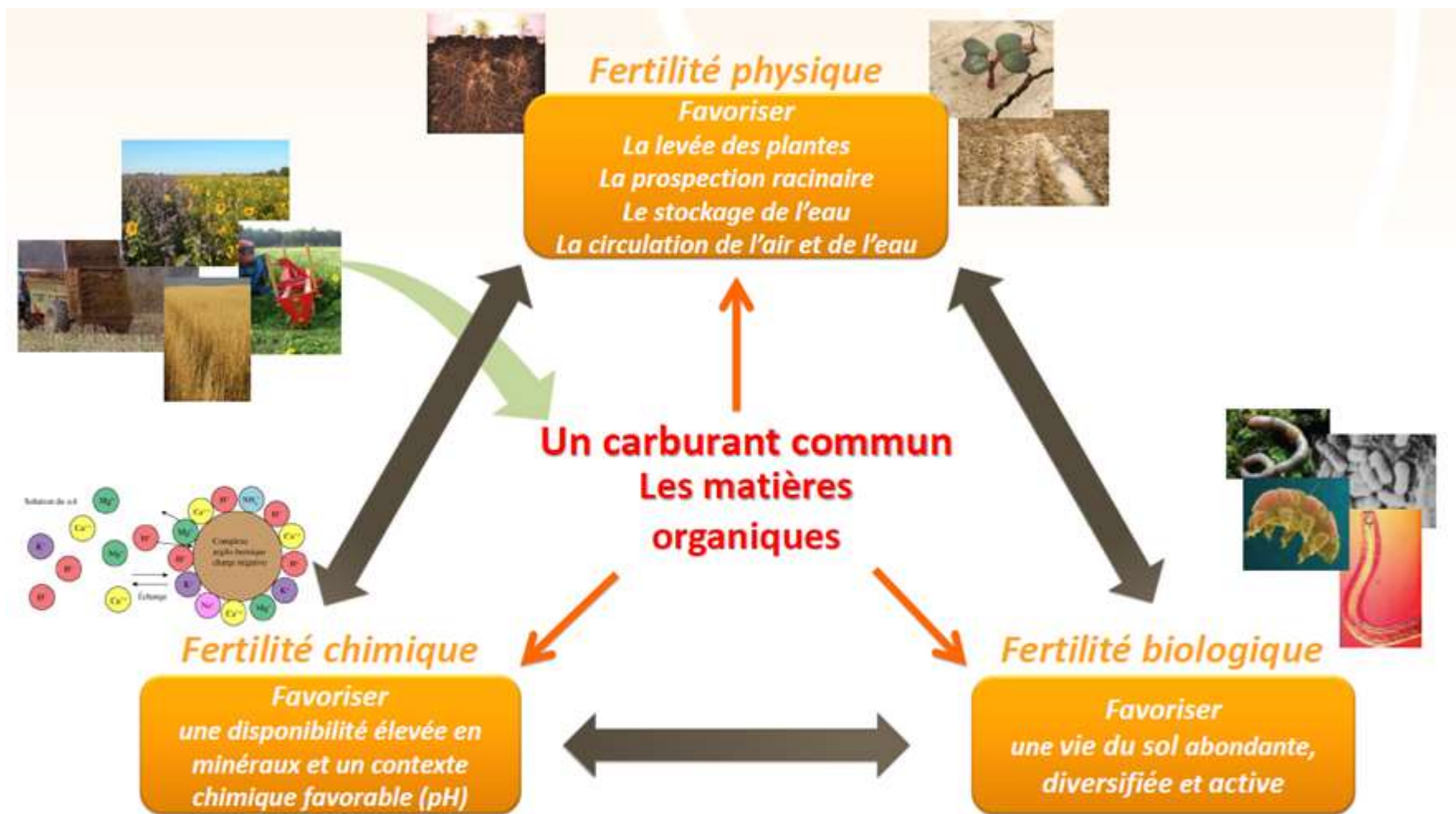
La fertilité des sols



- Les composantes de la fertilité d'un sol
- Valeur amendante et fertilisante d'un engrais organique
- Caractéristiques des MOS : C/N, ISMO, composition
- Les clés du stockage des engrais de ferme- pertinence de la séparation de phase
- Choix d'un engrais de ferme et sa période d'épandage en fonction de la culture à fertiliser
- Choix du matériel adapté à l'épandage

Les composantes de la fertilité d'un sol

C'est le sol qui nourrit la plante !




Les trois composantes de la fertilité sont en interaction permanente

Les quatre niveaux de la pyramide de la santé des plantes imaginée par John Kempf

(source AdvancingEcoAg.com)



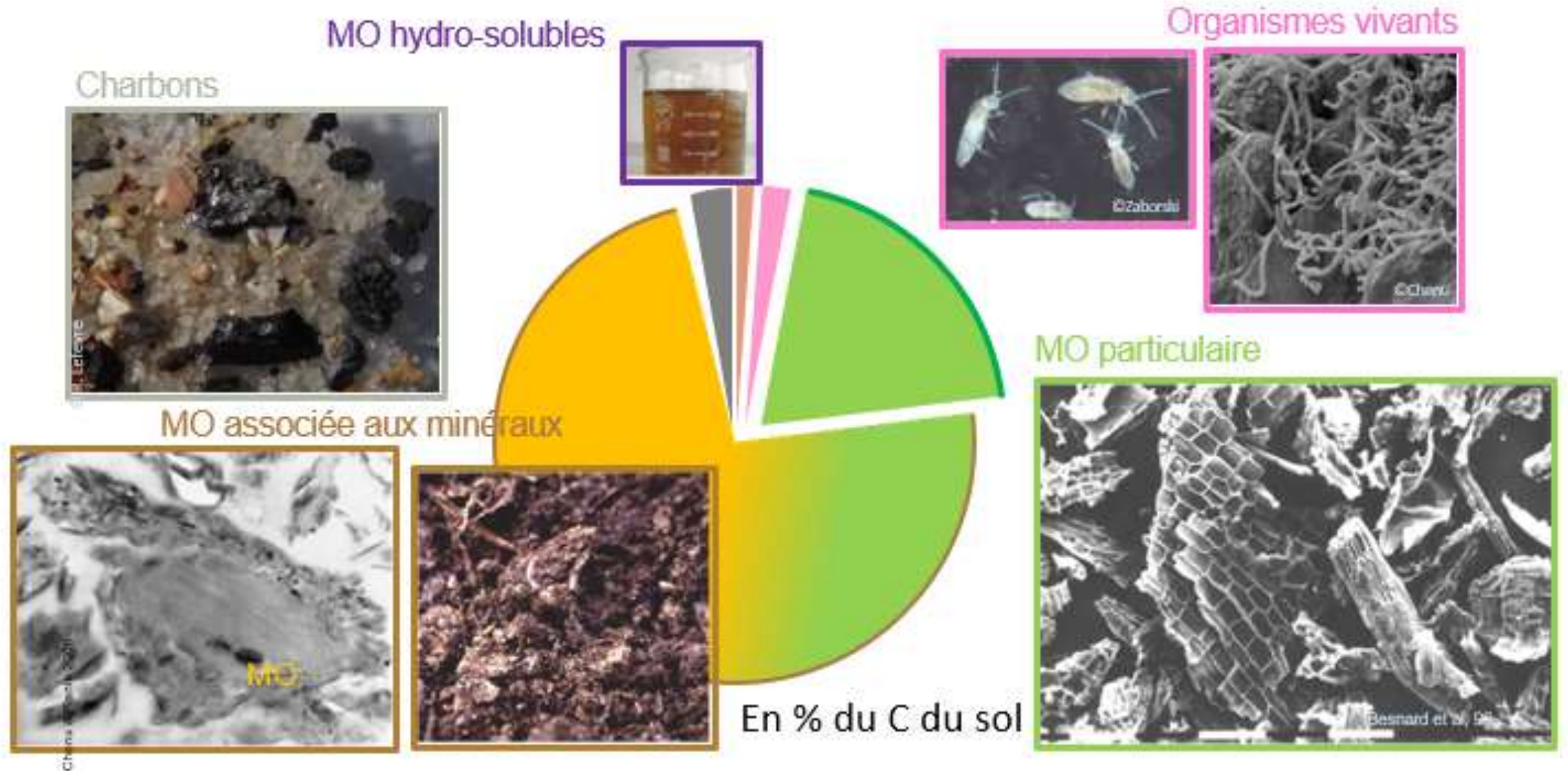


Matières organiques dans les sols :
qu'est-ce que c'est ?



Matières organiques du sol = l'ensemble des composés organiques du sol.
Tout ce qui est ou a été vivant

Un ensemble hétérogène et complexe





Pour résumer, les matières organiques des sols :

Un continuum de composés organiques en cours de biodégradation

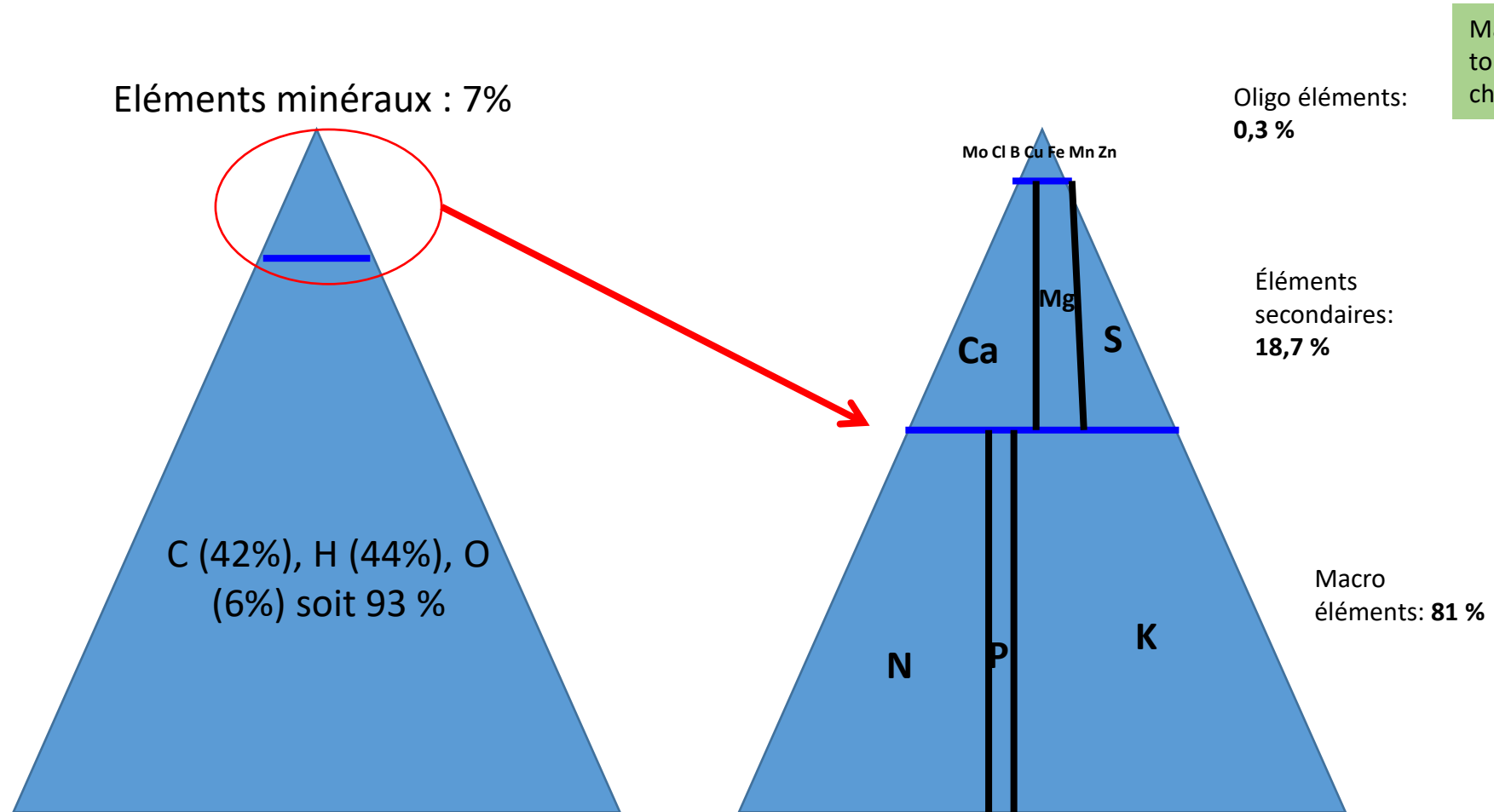
Une diversité de processus et de facteurs contrôlent la dynamique du carbone, d'importance relative différente à court et à long terme.

La diversité des flux d'apports de biomasse aux sols et celle des flux de minéralisation expliquent les stocks de carbone contrastés selon les usages, pratiques, climats et types de sols.

La fertilisation d'un sol c'est surtout de la biologie.



Les éléments minéraux dans la plante (en % de la MS)

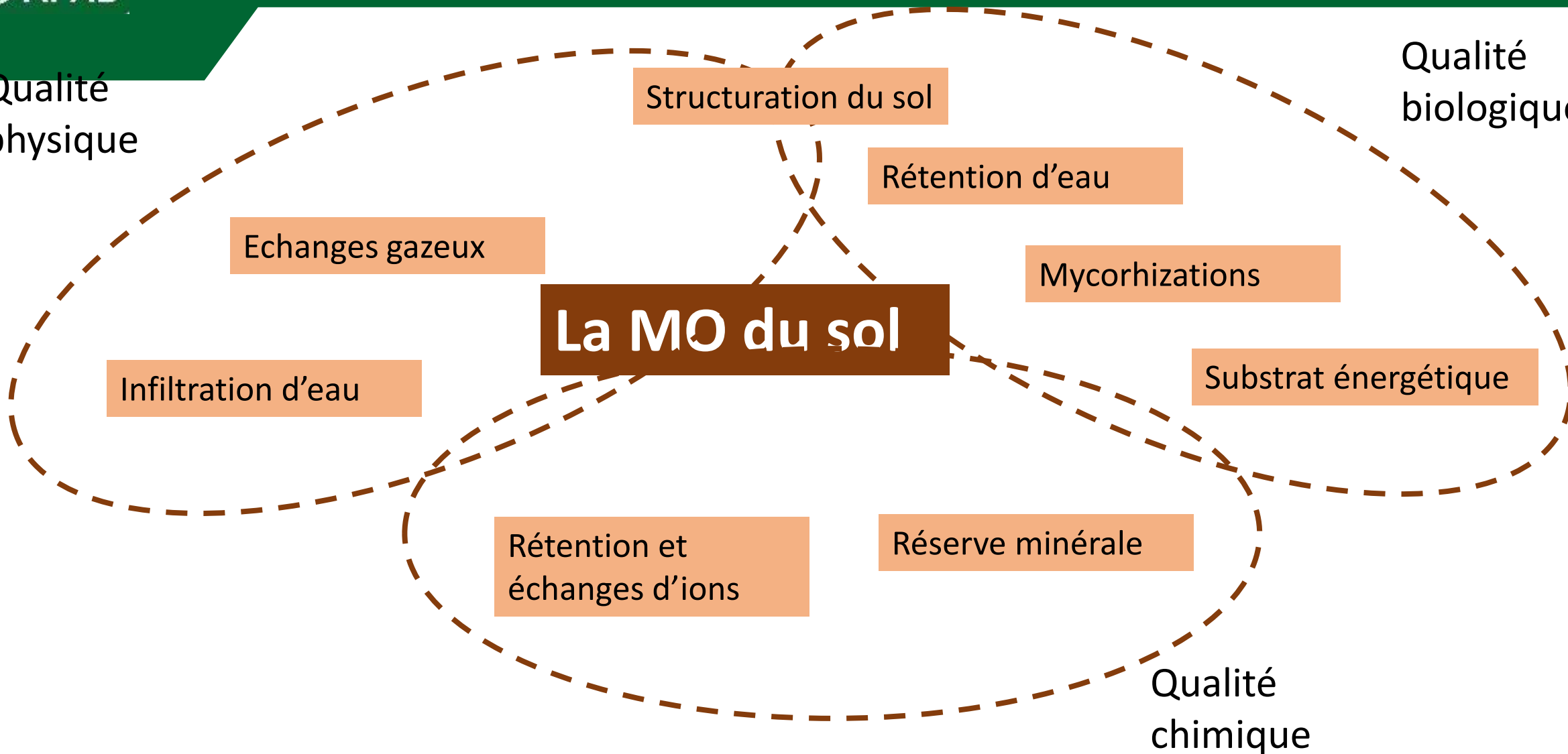


3 éléments minéraux : CO_2 (haute densité de semis), H_2O (rétention hydrique), O_2 (fissuration biologique par les racines) : ils sont gratuits et indispensable.



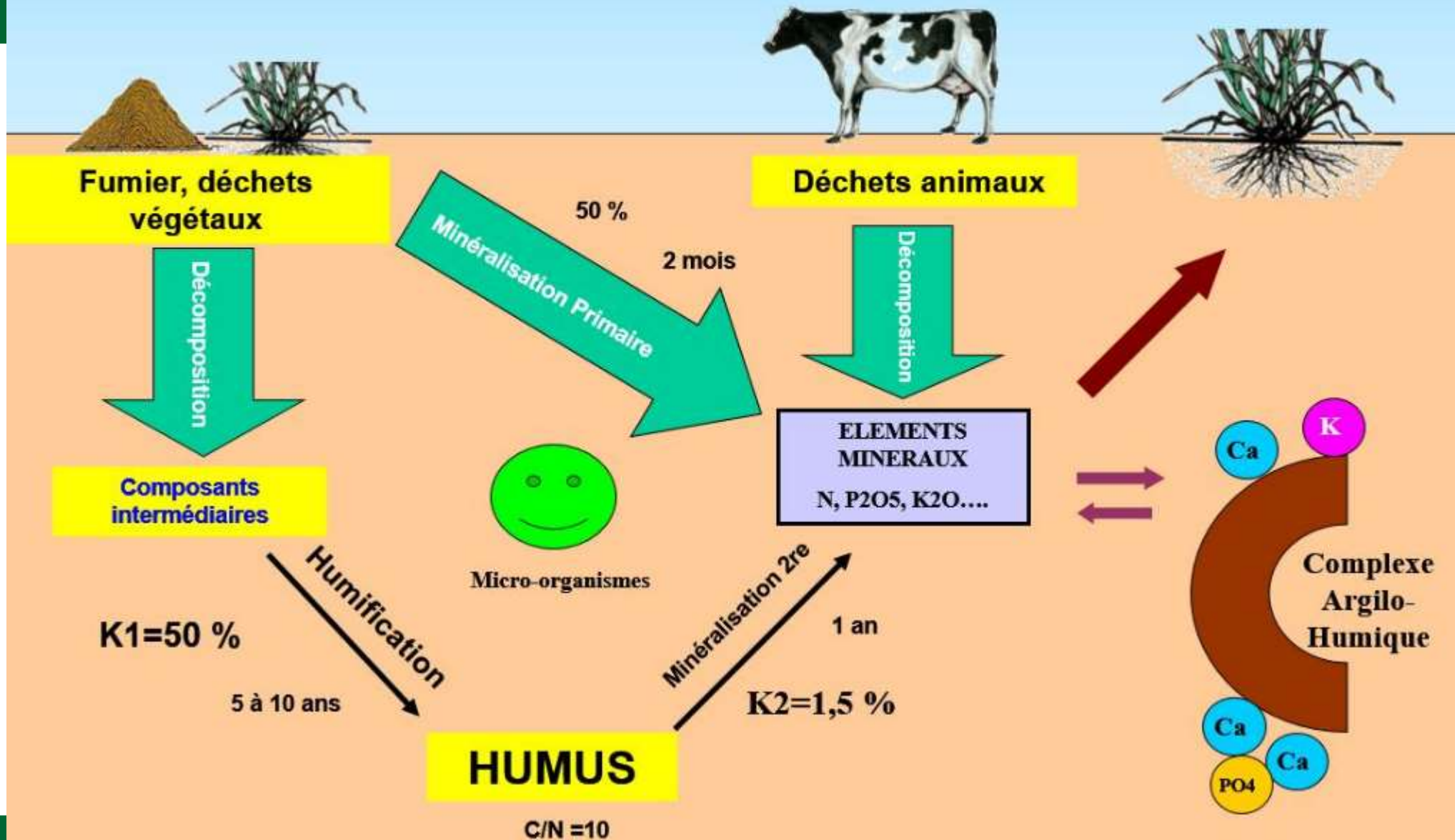
Qualité physique

Qualité biologique



Qualité chimique

Cycle de la matière organique et « économie circulaire »

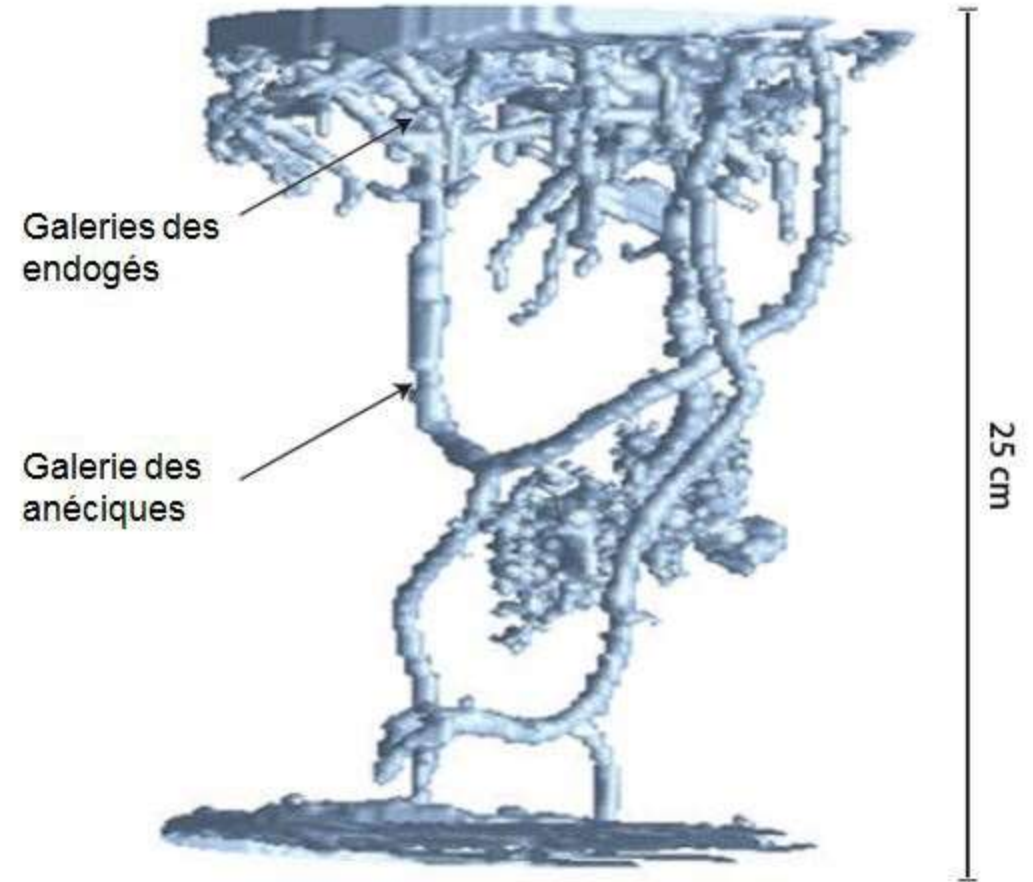
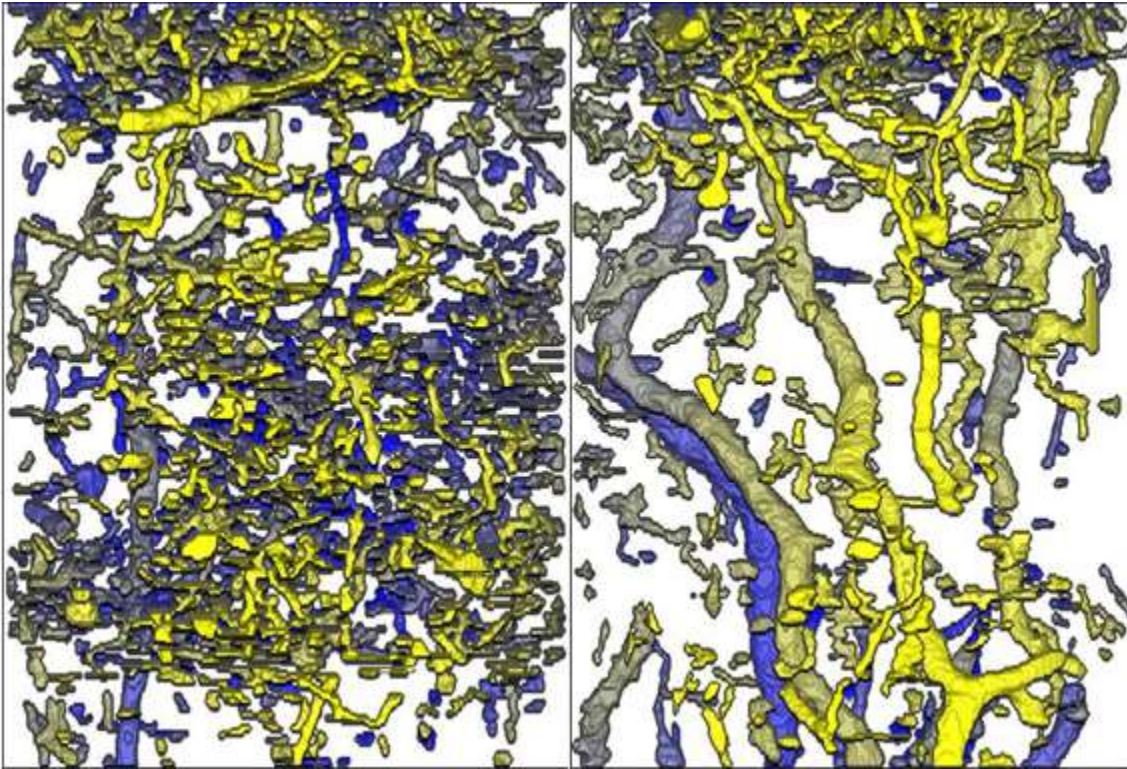


Les vers de terre



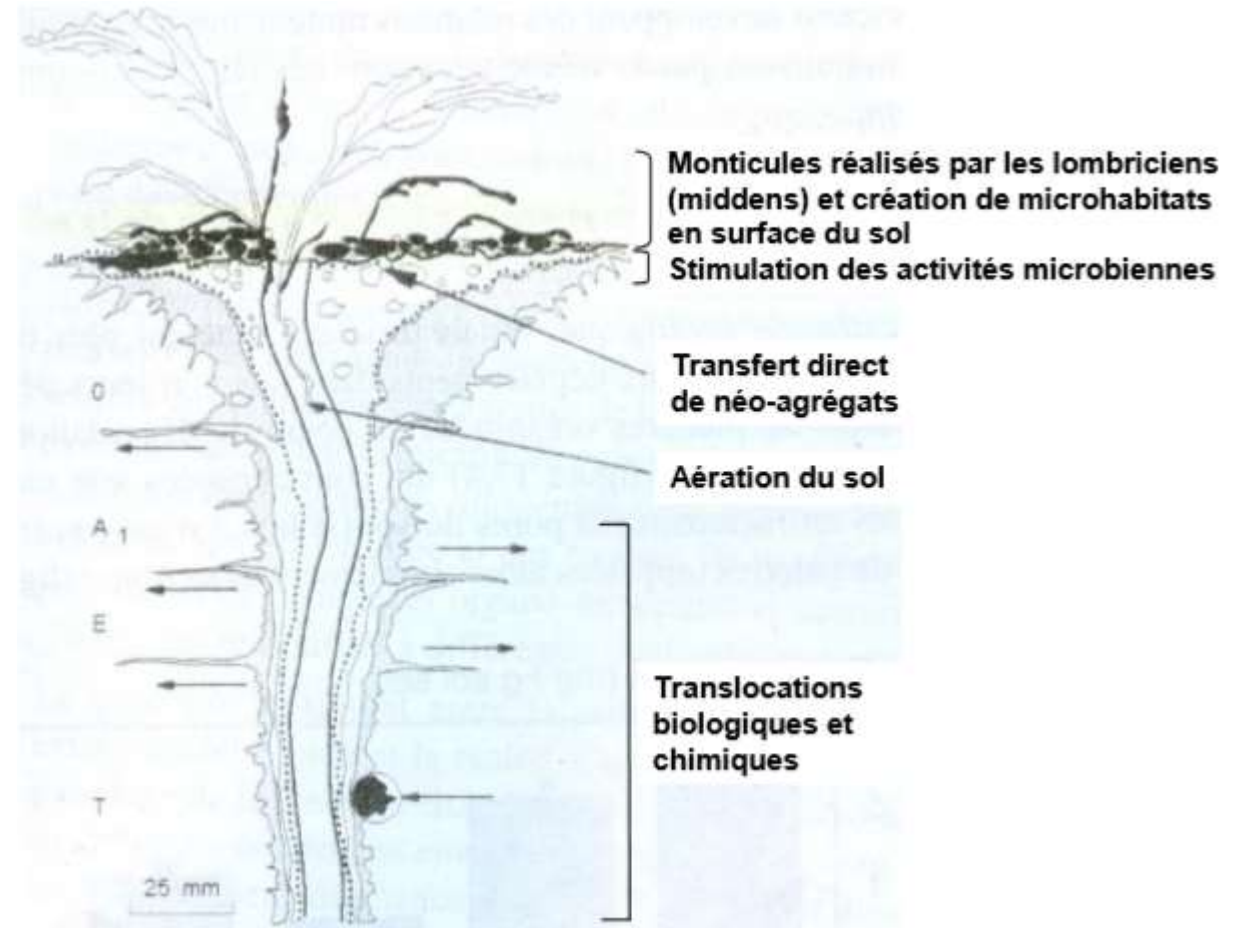
Les outils les plus modernes pour travailler le sol avec une consommation nulle de gasoil à l'ha.





Guénola Pérès, in Jeffery et al., 2010

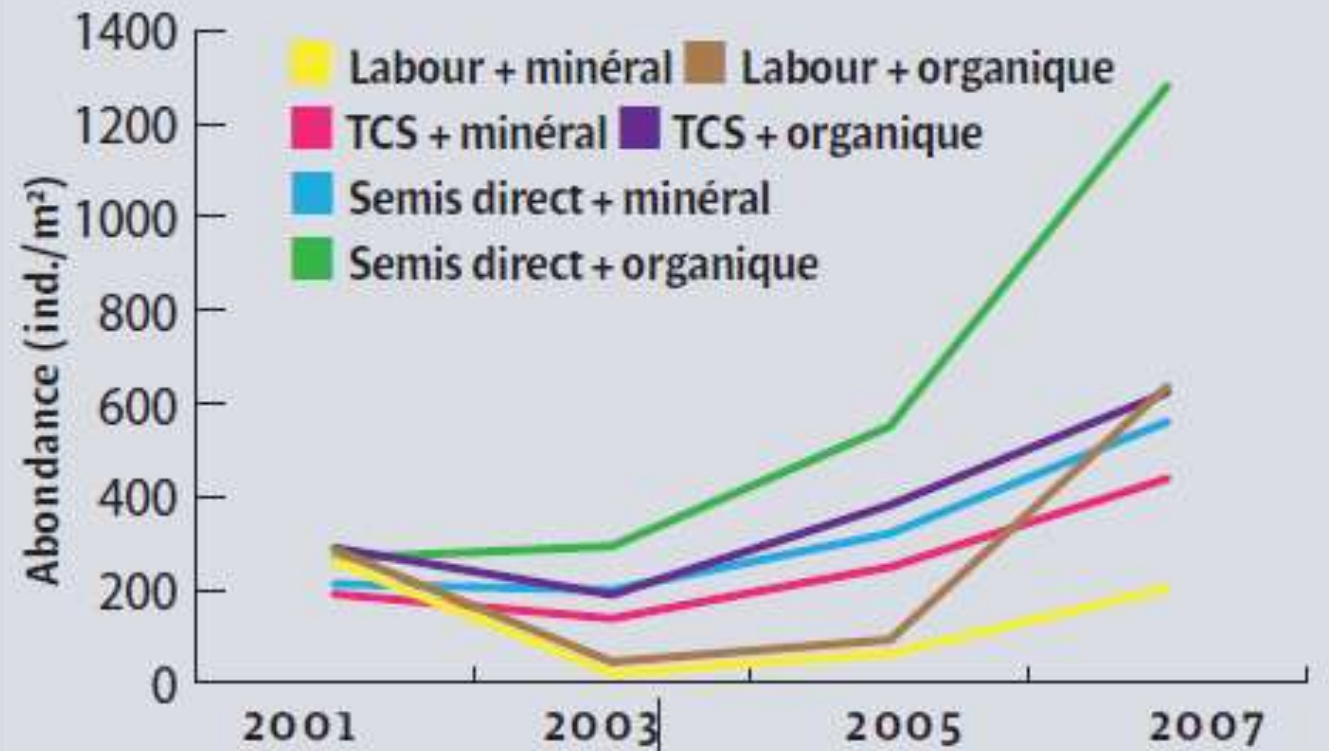
La présence de turricules et de galeries améliore la qualité des eaux de percolation collectées à 45 cm de profondeur (adsorption et dégradation des molécules organiques et éléments dissous). La stimulation de l'activité microbienne peut aussi favoriser la biodégradation des pesticides.





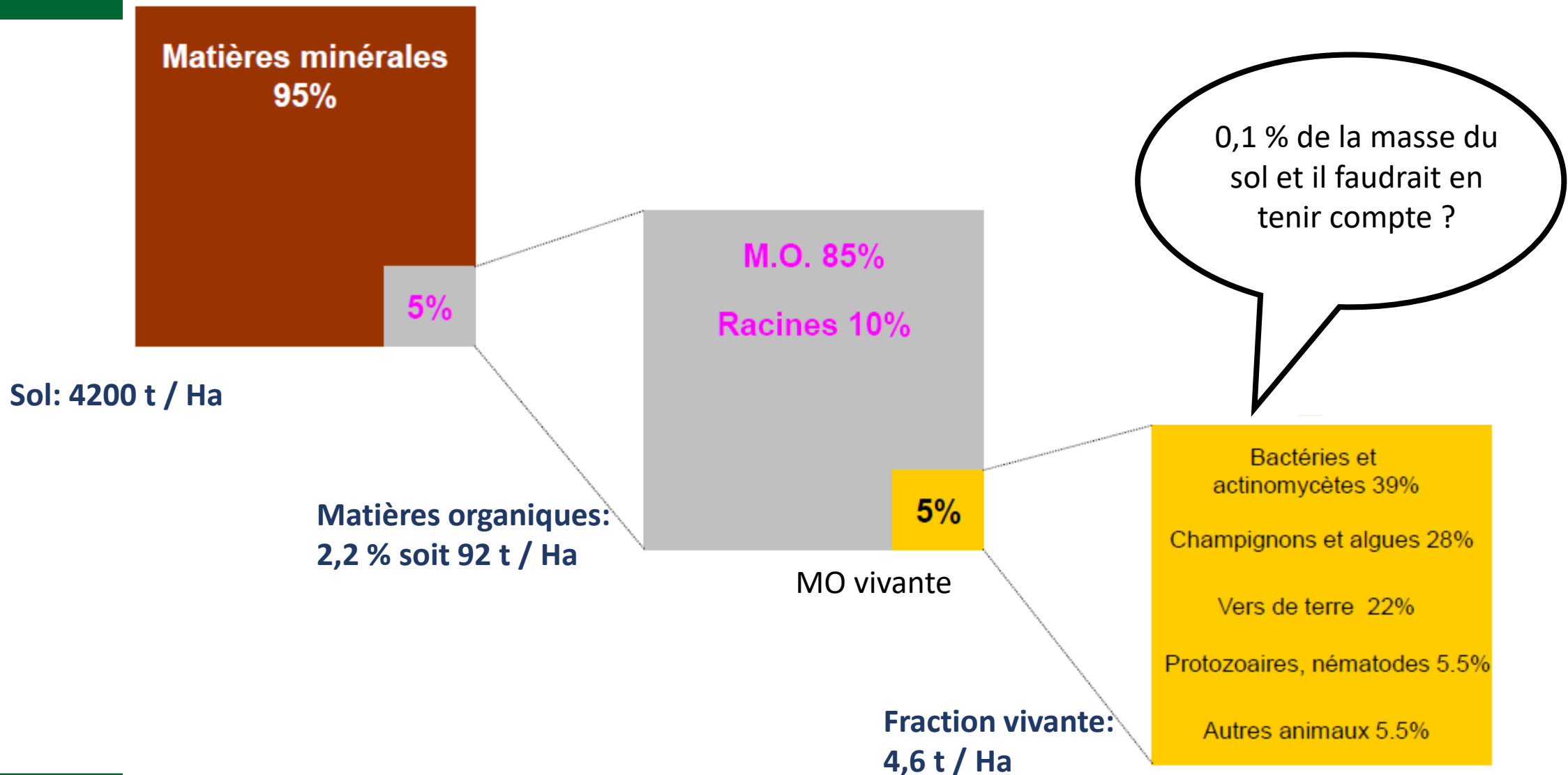
Les lombrics ne sont que la partie émergente de l'iceberg de la vie biologique des sols.
 Si ces organismes sont impactés, c'est tout le reste qui l'est aussi.
 Conclusion : il y a un impact positif à apporter régulièrement des matières organiques au sol.
 L'augmentation des ressources alimentaires au travers de l'apport de PRO est stimulante pour l'activité biologique, même s'il y a perturbation de l'habitat.
 Il est aussi indispensable d'avoir une structure de sol aérée avec une bonne circulation de l'eau et de l'oxygène.

ÉVOLUTION DES POPULATIONS DE LOMBRICS EN FONCTION DU TRAVAIL DU SOL ET DE LA FERTILISATION



SOURCE: CA BRETAGNE - STATION DE KERGLÉHENNEC





Plusieurs méthodes pour mesurer le C

	Normalisation	Essais interlabo et agrément du M.A.A.	Précision des résultats	Commentaire
Carbone organique par spectrométrie proche infra-rouge	NF EN ISO 17184		- +	Nécessité de disposer de nombreuses mesures de référence pour établir une calibration. Prise en compte partielle des effets "matrice". Peu adaptée aux mesures de faibles teneurs.
Matière organique par calcination	NF EN 15935		-	Biais lié à la perte d'eau de constitution des minéraux argileux
Carbone selon la méthode Walkley Black			- +	Rendement faible et inconstant
Carbone selon la méthode Anne	NF ISO 14235	X	+ +	Rendement peut-être plus faible pour les fortes teneurs
Carbone organique par combustion sèche	NF ISO 14235	X	+ +	Incertitudes plus importantes pour les sols carbonatés

Pour calculer une teneur en matière organique à partir d'une teneur en carbone organique:

Les normes prévoient des facteurs de conversion:

-ISO10694: de 1.7 à 2

-ISO 14235 : de 1.7 à 2.5

Dans la pratique, les facteurs retenus sont le plus souvent compris entre 1.7 et 1.75.

L'origine de ce coefficient est peu documentée. Il peut être attribué à vanBemmelen (1890), à Emil von Wolff (1864), voire à Carl Sprengel (1826).

Son usage s'est généralisé malgré de nombreuses études montrant qu'il serait trop bas pour la plupart des sols et que des valeurs de 1,9 ou 2,0 seraient plus exactes.

Définitions (Mustin, 1987) :

- **La matière organique est définie comme la matière spécifique des êtres vivants végétaux et animaux :**
 - Riche en carbone (+/-50%) = **matière carbonée**,
 - C, H, O, N = 95% de la matière vivante
 - 5 autres macroéléments : S, P, K, Ca, Mg,
 - Une vingtaine d'oligoéléments (Cu, Fe, Mn, Zn, Co, Mo etc...), présents à de faibles concentrations < 0,1% matière sèche

Grande diversité fonctionnelle pour différents états de transformation des MO du sol :

Source : B. Mary, INRA

Type de MO	Fonctions
Matière Organique Vivante (1.5 à 2.5 tC/ha)	Brassage / Transformation des MO
Matière Organique Fraîche (0 à 4 tC/ha)	Substrat énergétique et de croissance / fertilité chimique
Matière Organique Transitoire (2 à 4 tC/ha)	Substrat énergétique / fertilité chimique / fertilité physique
Matière Humique (35 tC/ha)	Fertilité physique / fertilité chimique (réservoir)

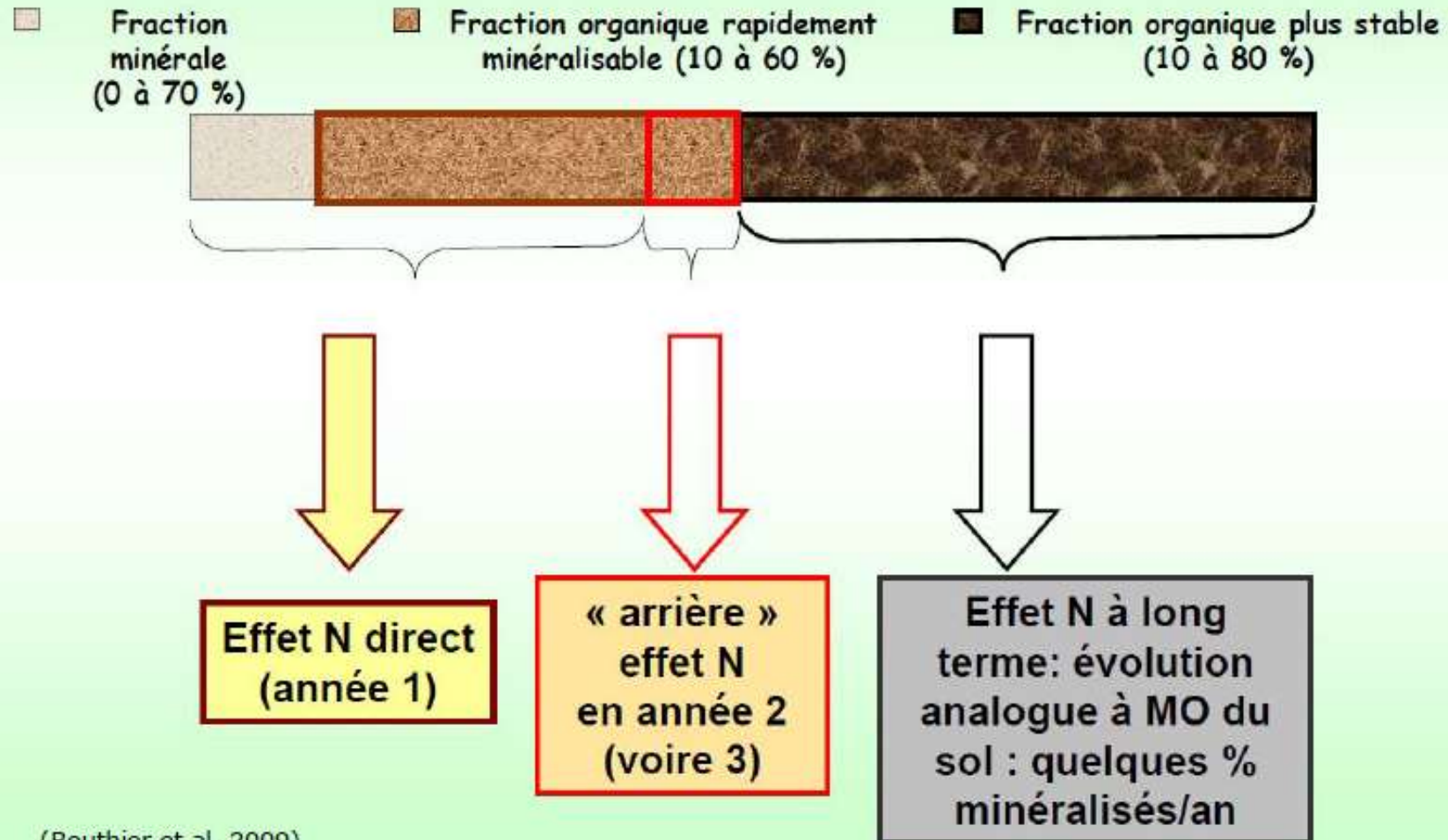


Contenu « normal » d'un sol de Grande Culture
pour les différentes qualités de MO du sol
(Argilo-limoneux)

<p>10-15% <u>MO particulaire ou « libre »</u></p> <p><u>EFFETS</u> : nutrition de la faune et microflore Interaction avec la culture <i>COURT et MOYEN TERME</i></p>	<p>2.5% <u>MO vivante</u> (Biomasse Microbienne)</p> <p><i>TRES COURT TERME</i></p>
<p>80-85% <u>MO humifiée ou « liée »</u></p> <p><u>EFFETS</u> : physiques : structure, stabilité rétention en eau, <i>LONG TERME</i></p>	<p>2.5% <u>MO potentiellement minéralisable</u> (énergie + nutrition)</p> <p><i>TRES COURT TERME</i></p>

Valeur amendante et fertilisante d'un engrais organique

Formes d'azote dans les PRO et disponibilité dans le temps pour les cultures



(Bouthier et al, 2009)

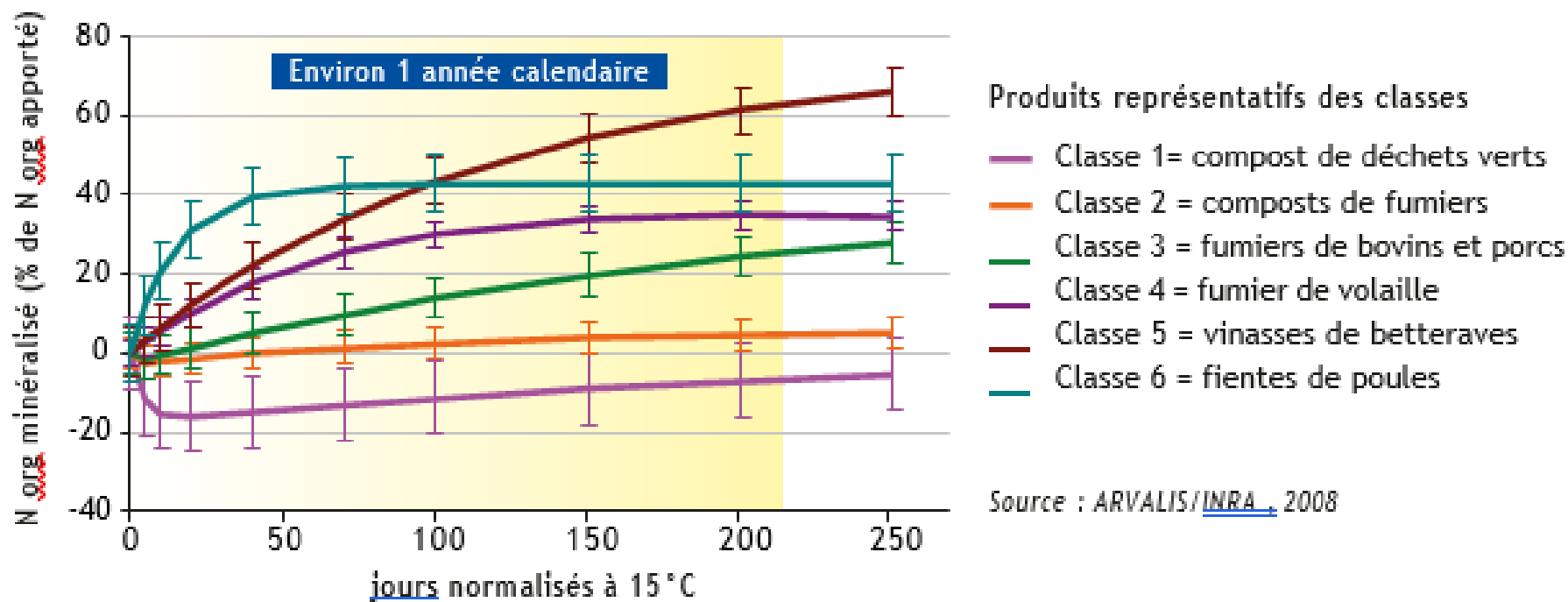


Figure 1 : Cinétiques de minéralisation de l'azote organique des PRO

Que devient l'azote des produits organiques après épandage ?

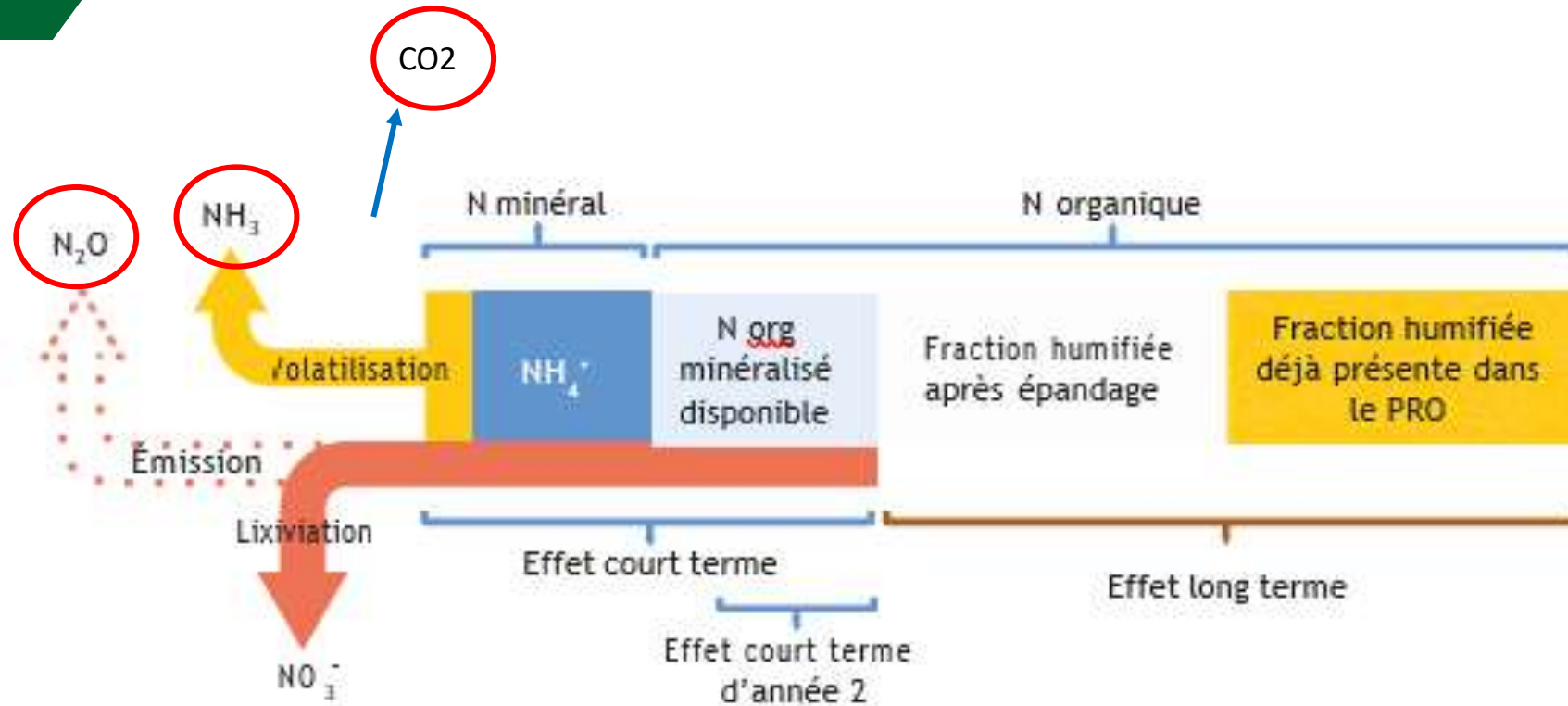
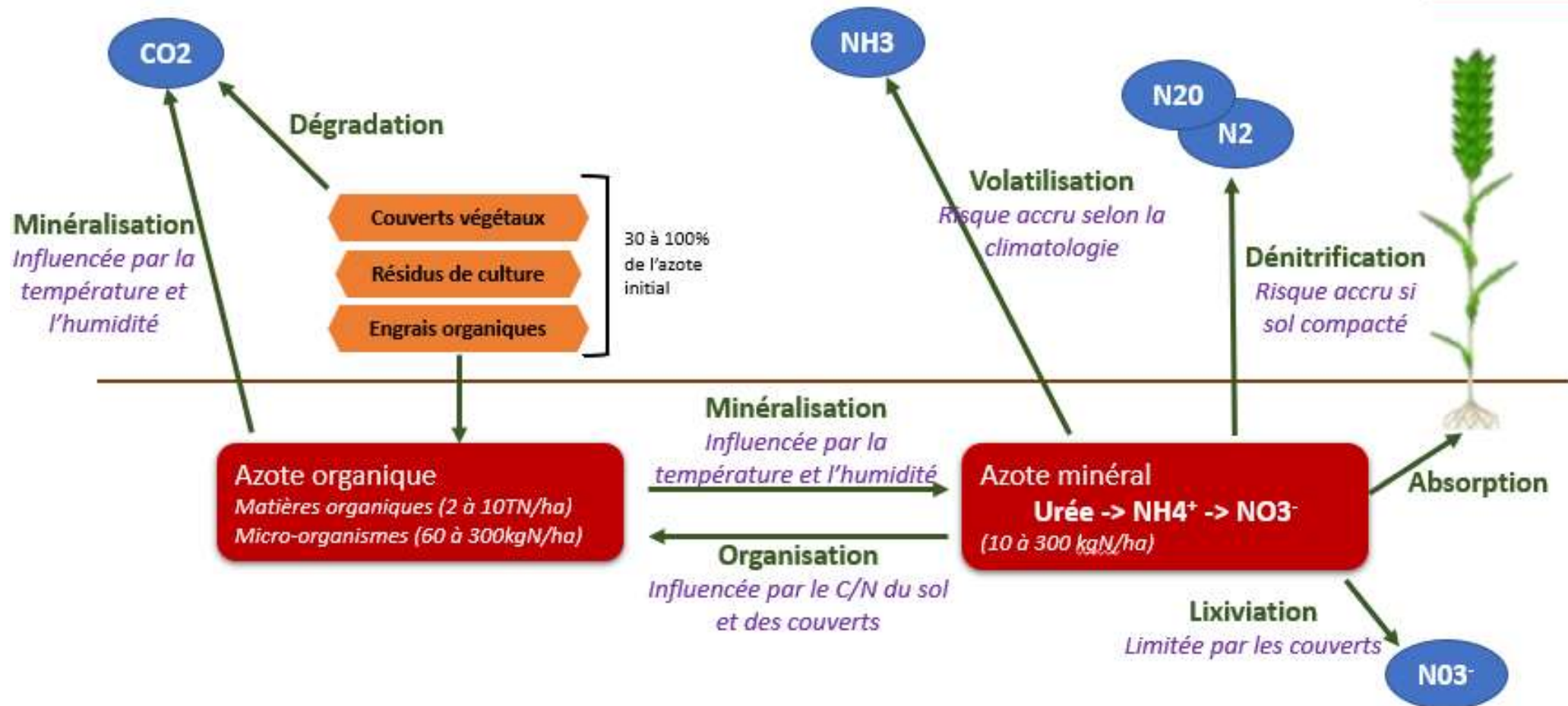
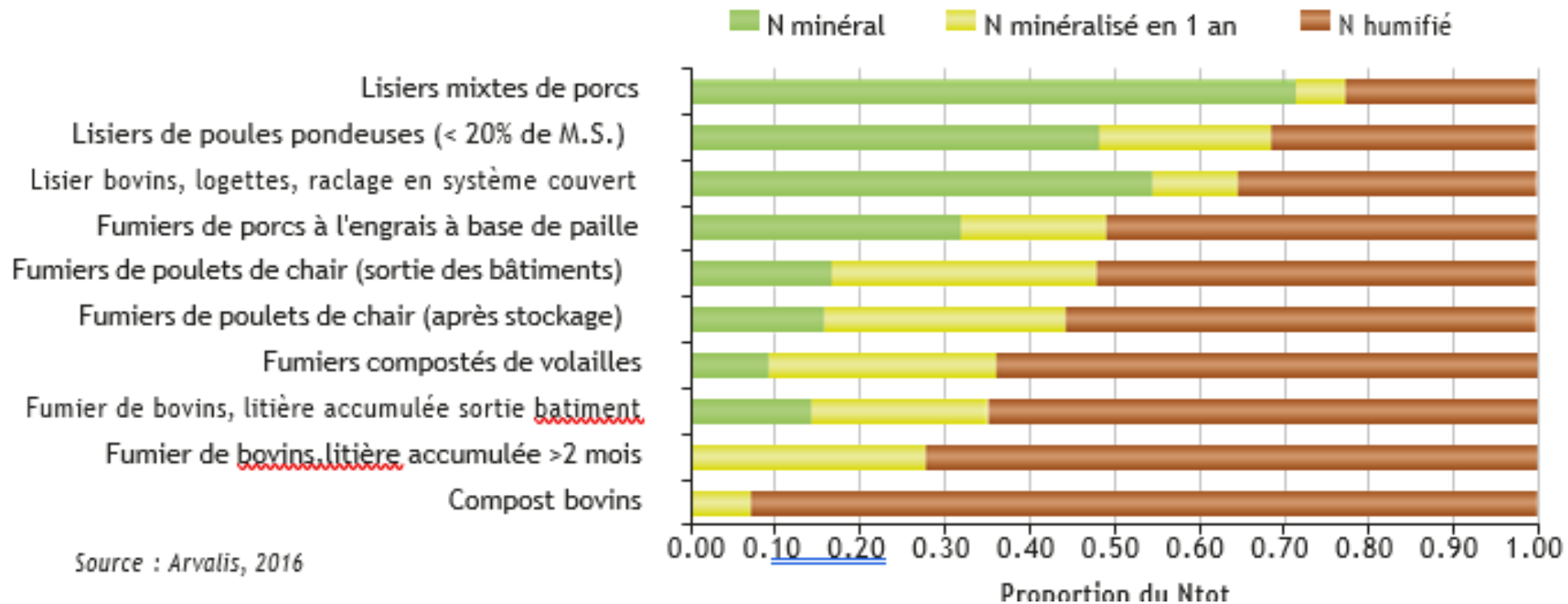


Schéma du devenir de l'azote des PRO après épandage

La fertilisation azotée

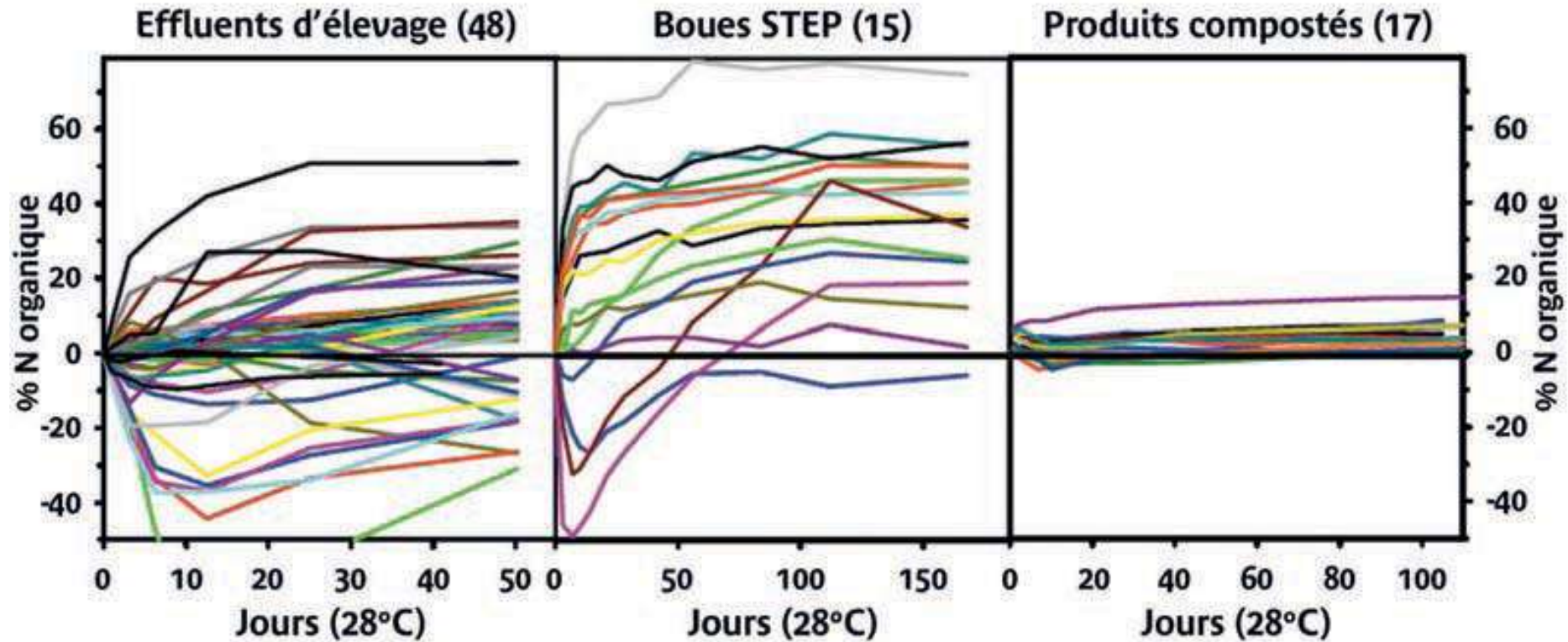
Cycle de l'azote





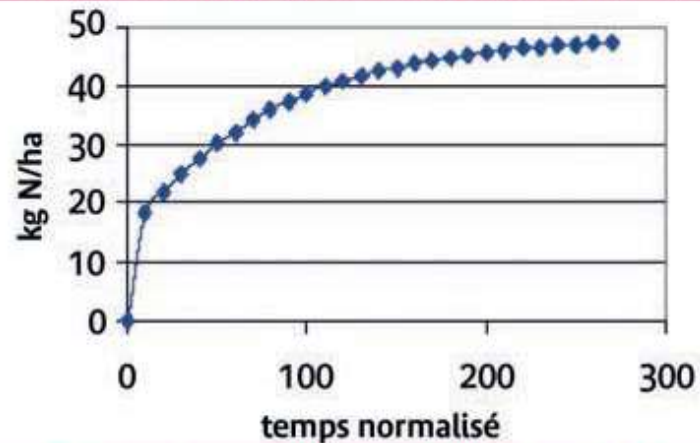
Impossible de prédire le comportement des produits !

Les effluents d'élevage, les boues de STEP, les lisiers, plus ou moins carbonés, dont l'évolution peut aisément partir dans tous les sens ;
 Les composts, produits évolués, reflètent un comportement beaucoup plus prévisible mais les retours azotés sont beaucoup plus faibles, voire quasi nuls

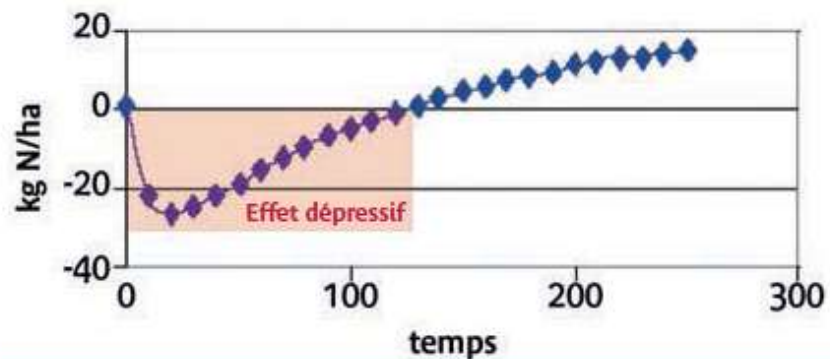


EXEMPLES DE CINÉTIQUES DE MINÉRALISATION DE PRO PRISES EN COMPTE DANS LE LOGICIEL AZOFERT

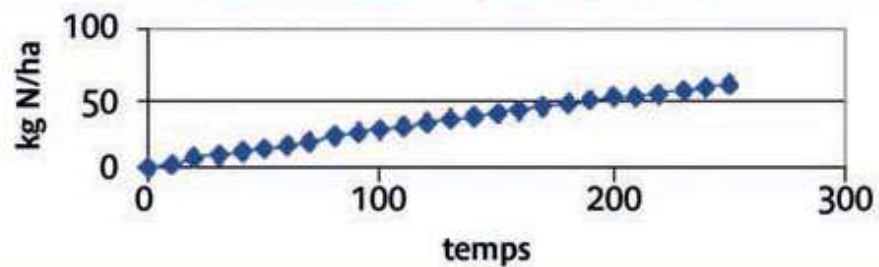
Vinasses, 3 t/ha ; 2,4 % N dont 0,08 N minéral



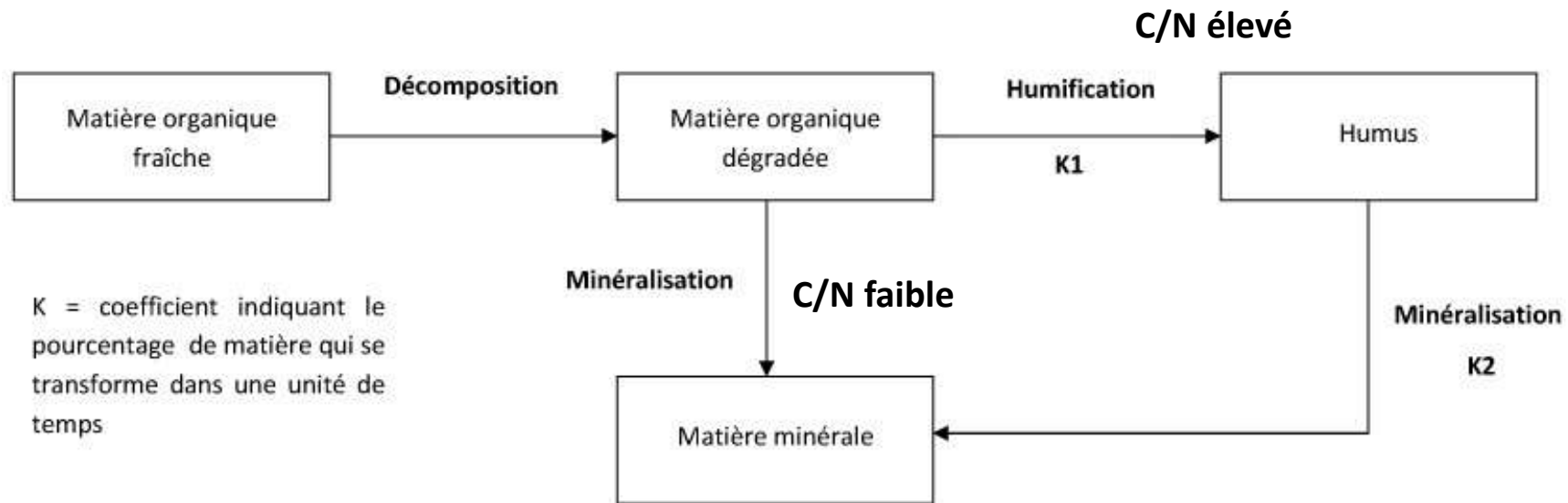
Fumier bovin pailleux 30 t/ha ; 0,39 % N



Fumier bovin déc.; 30 t/ha ; 0,6 % N



Évolution de la matière organique

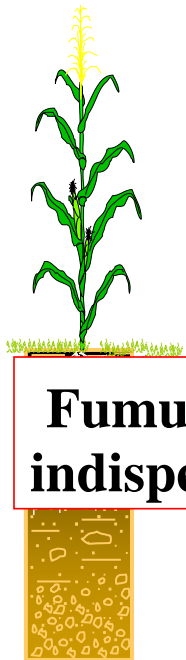


- Les valeurs des coefficients K1 et K2 sont dépendantes de :
 - La température du sol
 - L'humidité
 - L'oxygénation
 - Le pH
 - La vie du sol.
- Le coefficient K1 est très dépendant du rapport C/N:
 - Lisier à C/N faible : K1 faible
 - Fumier à C/N élevé : K1 élevé

- Pour estimer le coef K2, 3 méthodes reconnues:
 - Le modèle Roth C: Besoin de nombreuses mesures sur le terrain pour l'estimer
 - Le modèle Simeos AMG: La formule de calcul est:
 - $K2 = 10200 / ((A + 100) * (CaCO3 + 600))$ Elle prend donc en compte la texture + CaCO3. Le contexte climatique et l'intensité du travail sont pris en compte mais sans que l'on sache de quelle façon (la boîte noire !). Et on ne peut accéder facilement à leur outil.
 - Le modèle Dupuis Hénin: c'est le plus simple et le plus ancien
- Conclusion: ceux qui ont travaillé à la comparaison obtiennent des résultats assez similaires !

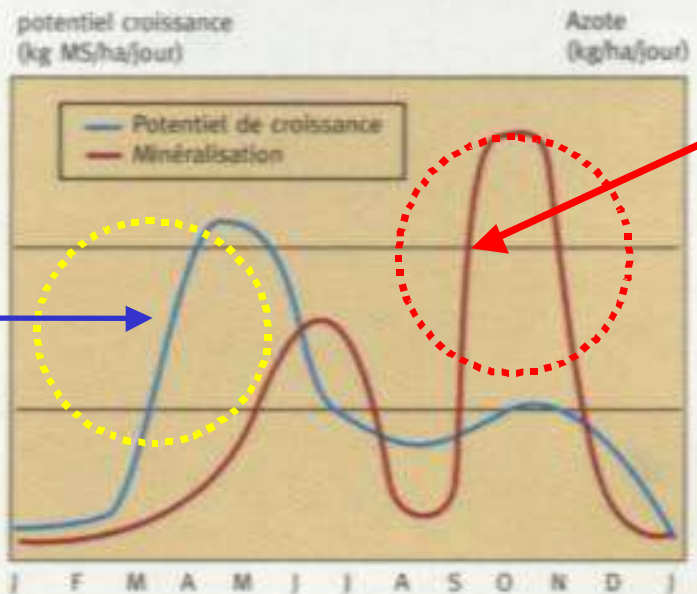
- 3500 t de terre / Ha à 2% d'humus : 70 t d'humus
- 2 % se minéralisent / an soit : 1400 kg d'humus « disparaît ».
- Avec 5% d'azote en moyenne dans l'humus, ce sont 70 unités qui sont libérées
- Avec 3 % d'humus, ce sont 105 unités de libérable !!

La courbe de minéralisation de l'azote dans le sol en milieu naturel



Fumure indispensable

Une minéralisation pas toujours en phase avec le potentiel de croissance



**Couverture active
Obligatoire
Ou
Résidus à C/N ↗**

Courbe rouge : minéralisation
Courbe bleu : besoin des plantes

- Sous prairie en automne, on constate une minéralisation intense de l'azote (courbe rouge). Le sol est chaud et humide (retour des pluies).
- Le lessivage sera maximum sous céréale : le sol est nu, le travail intensif pour le semis accélère la minéralisation et les plantules sont incapables de capter l'azote.

- 1400 kg de perdu / an, il faut donc fournir au sol :
 - 7 t de MS de paille ou 8 t de paille (85% de MS)
 - 14 t de MS d'engrais vert ou 70 t d'engrais vert (20% de MS)
 - 7 t de MS de fumier ou 35 t de fumier frais (20% de MS)
- D'où l'importance de ne pas « brûler » (=oxyder) sa MOF car on peut vite perdre de l'humus.

Caractéristiques des MOS : C/N, ISMO, composition

$\frac{C}{N}$ → Quantité de Carbone
 → Quantité d'Azote

$C=1/1,72=0,58$
 $C/N=0,58/0,072$

ETAT ORGANIQUE

Matière organique (%)*	1.0			1.2-1.4	Faible
------------------------	-----	--	--	---------	--------

* MO=carb.org × 1.72

souhaitable

Azote total (%):	0.072
------------------	-------

Rapport C/N		8.1		8-12	Satisfaisant
-------------	--	-----	--	------	--------------

Décomposition de la MO:

Rapide

Lente

souhaitable

Rapport C/N normal, transformation de la matière organique satisfaisante.

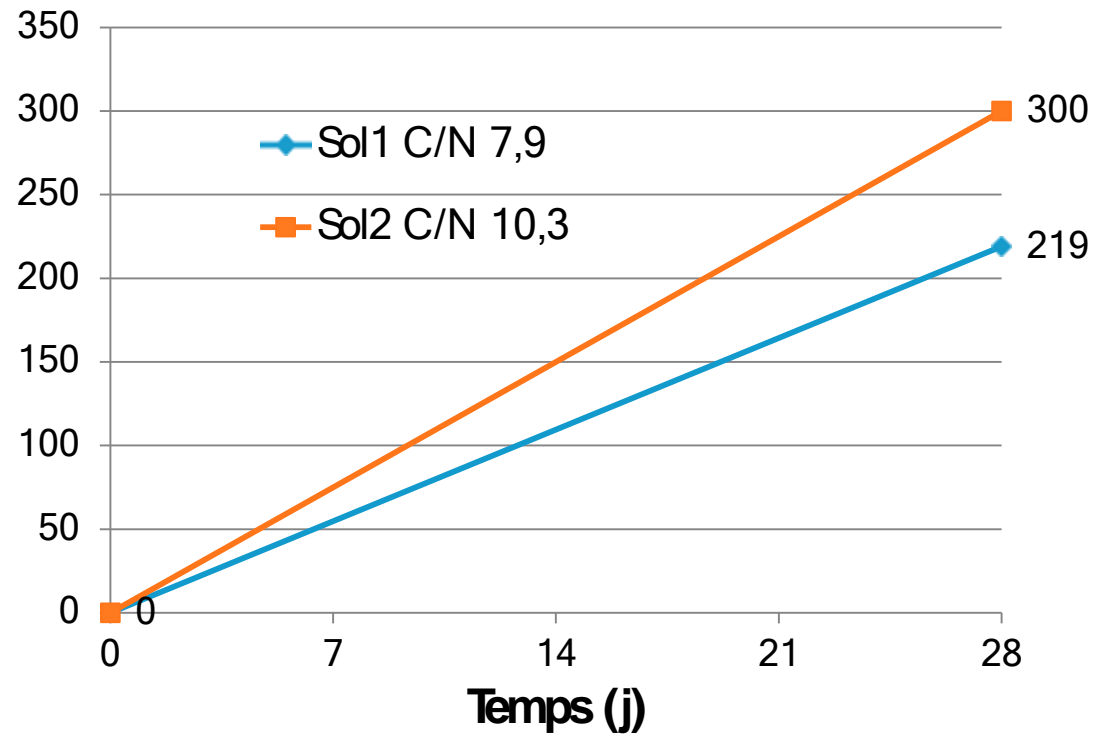
Sol 1 : C = 9.1 g/kg N = 1.15 g/ kg;
C/N = 7.9

Sol 2 : C = 9.0g/kg N = 0.88 g/ kg;
C/N = 10.3



Incubation et
minéralisation
potentielle
carbone azote

**Carbone
minéralisé
(mg/kg)**



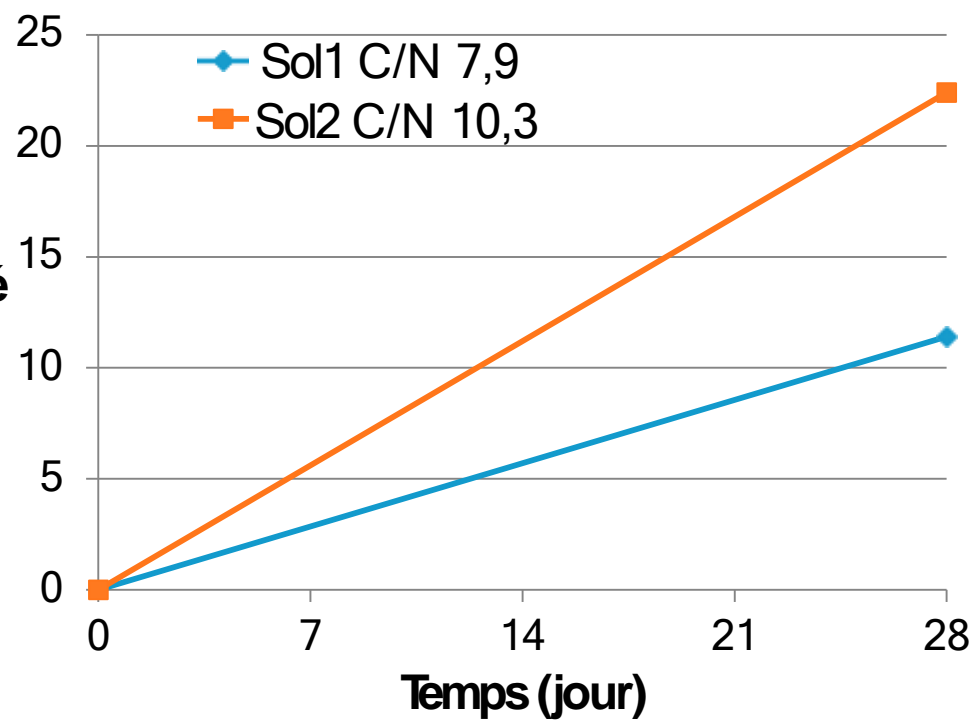
On
imaginerait
l'inverse !

AZOTE

(NO₃, NH₄)

Incubation et
minéralisation
potentielle
carbone azote

Azote
minéralisé
(mgN/kg)



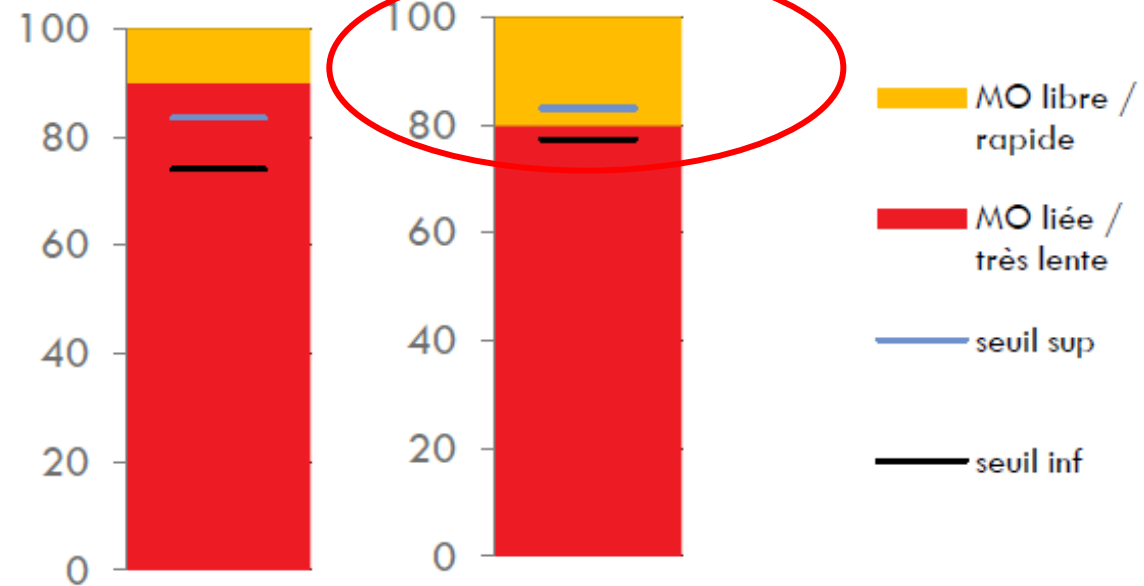
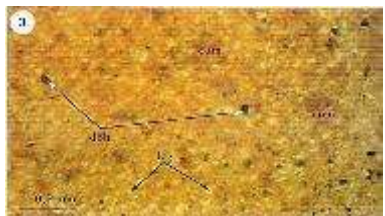
- Explication : La MO du sol 1 est déjà plus transformée et stabilisée que dans le sol 2



• Sol 1 C/N = 7.9

• Sol 2 C/N = 10.3

Equilibre MO libre et MO liée
(% de la MO totale)



- Les MOS sont en majorité très anciennes, stabilisées biologiquement et physiquement,
- Le C/N de la MO totale caractérise ce qui s'est passé dans les 50 à 100 dernières années => pas assez sensible pour du conseil à court terme
- Il faut connaître le taux de MO labile ou ISMO (Indice de stabilité)

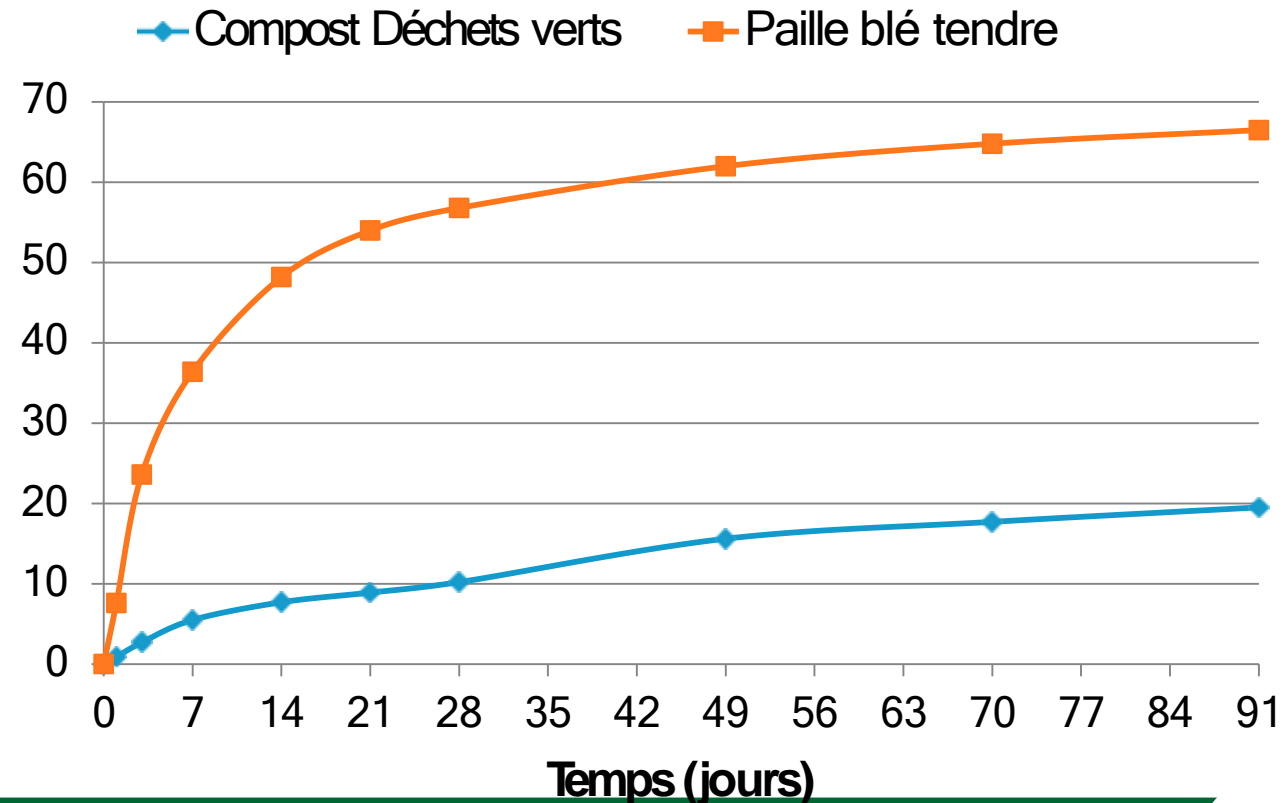
Relation entre C/N et minéralisation du carbone ? :

ex : Paille de blé tendre C/N = 105

Compost de déchets Verts C/N = 12,7

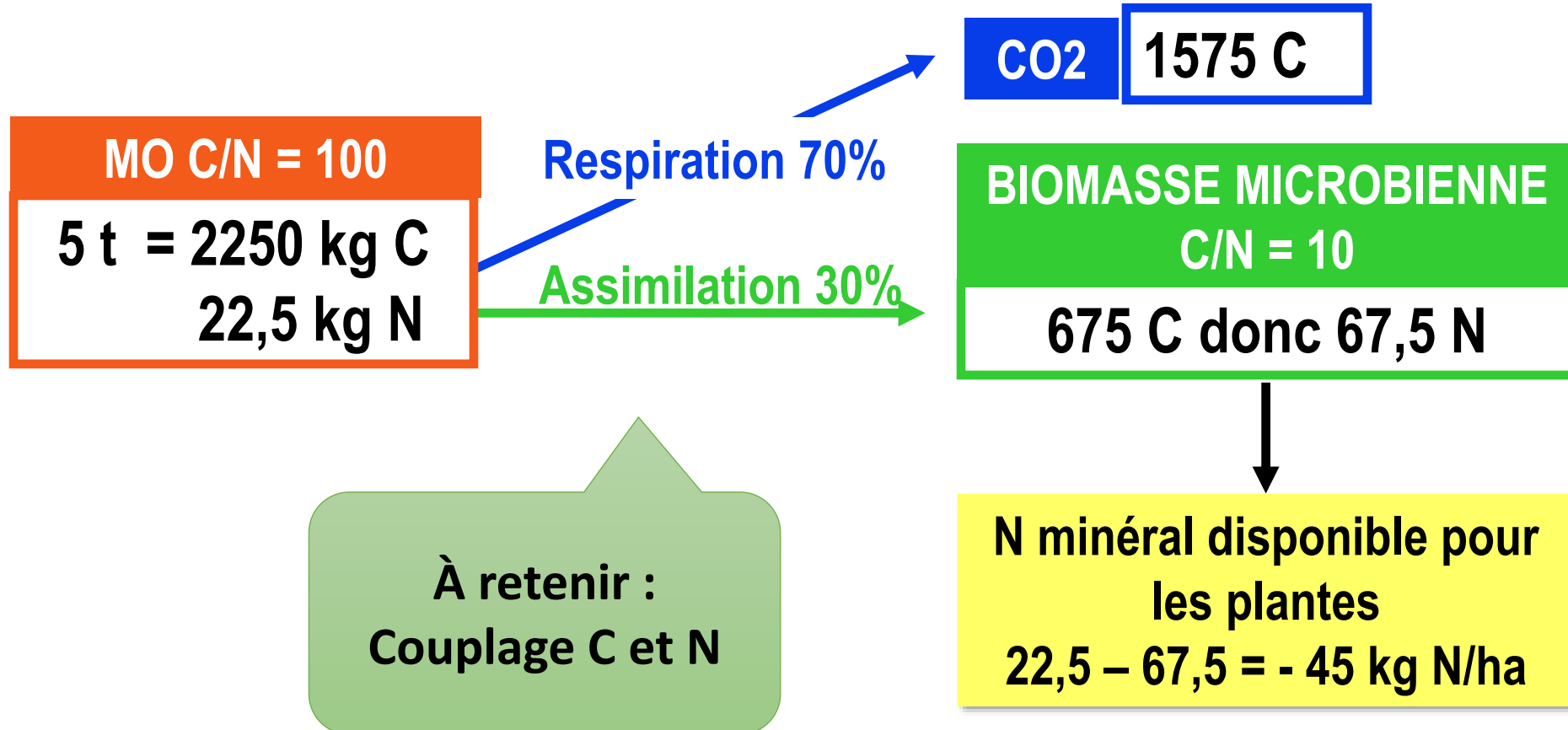


**Carbone
minéralisé (en
%C apporté)**



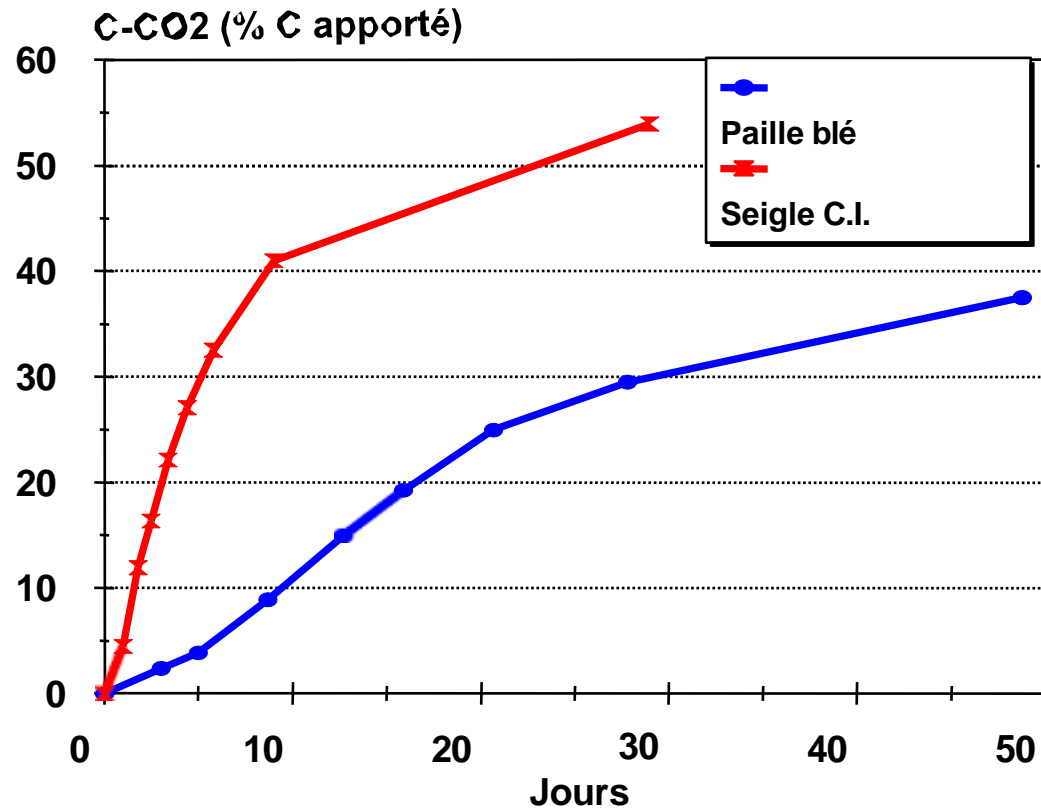
Minéralisation des matières organiques

Source de carbone (énergie) pour la biomasse microbienne - assimilation du carbone doit s'accompagner d'une assimilation de l'azote

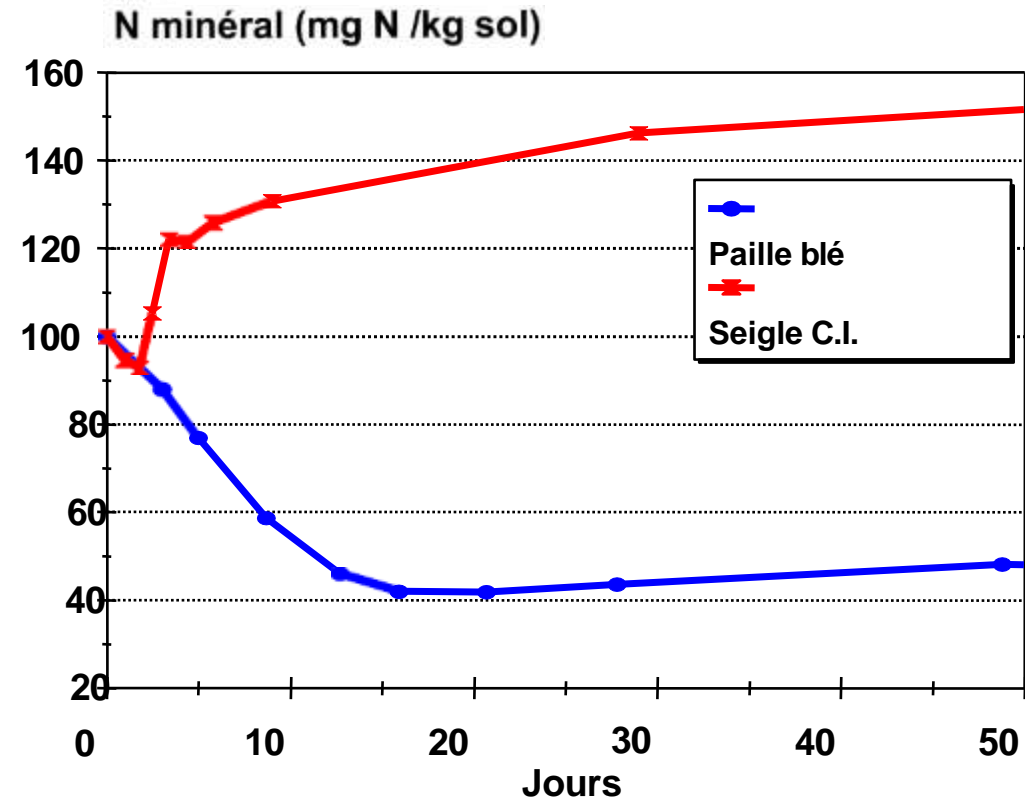


minéralisation dépendant de la température et de l'humidité

Minéralisation cumulée C



Azote minéral dans le sol

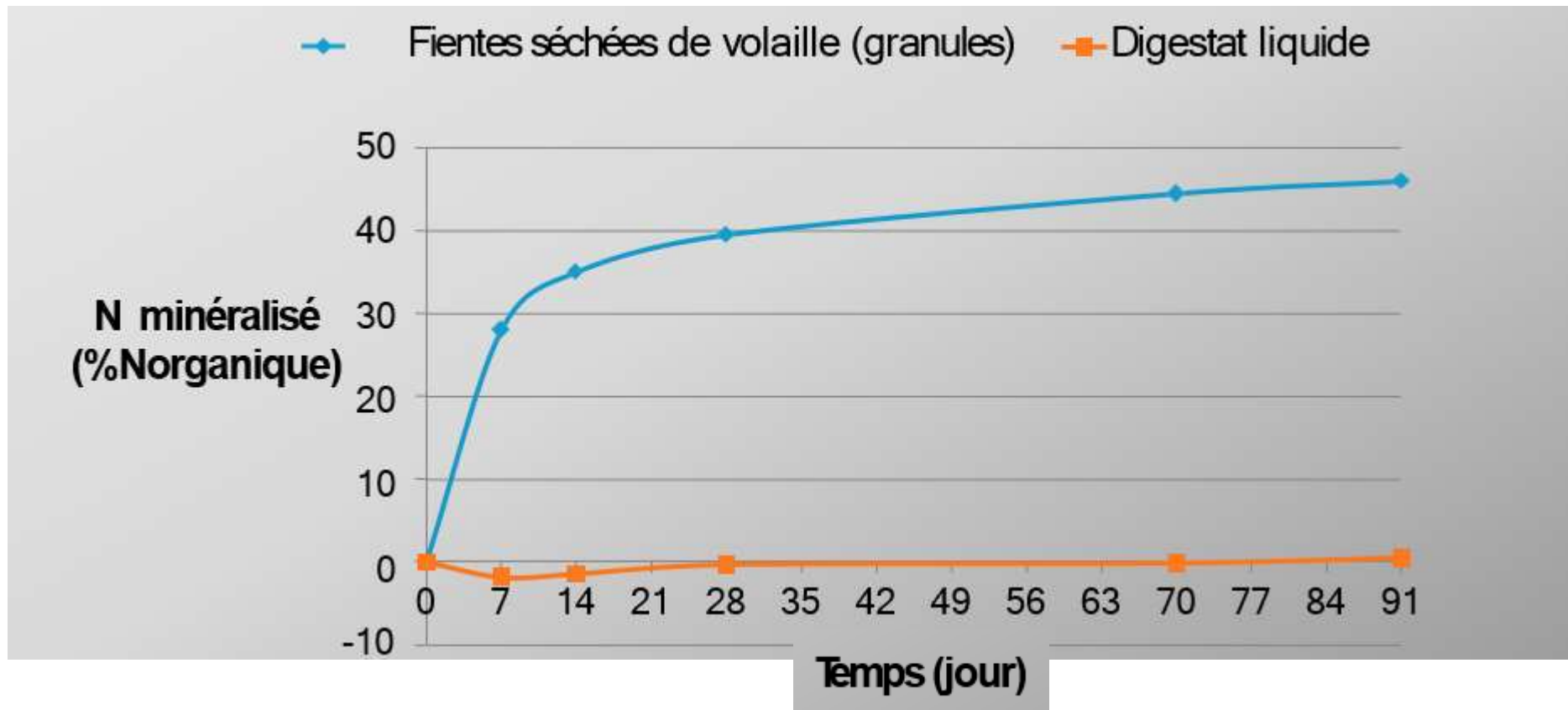


Le type de résidu (qualité chimique) et leur C:N influence la dynamique de décomposition et la minéralisation nette N

Robin, 1993

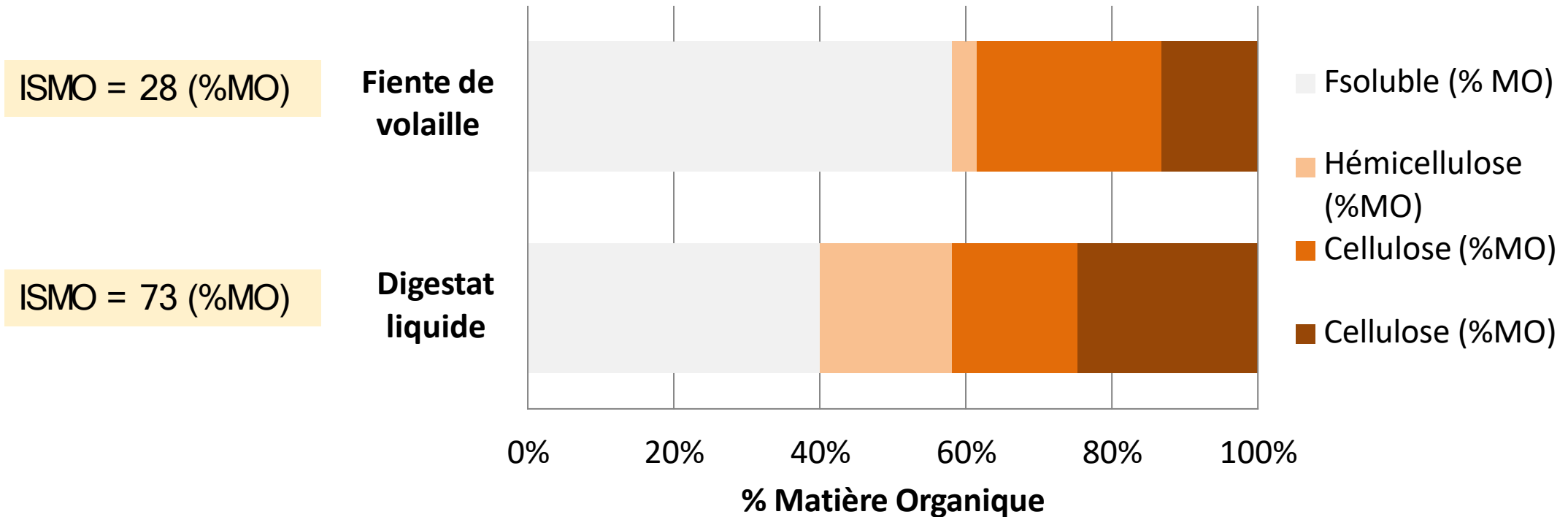
Relation entre C/N et minéralisation de l'Azote ? :

ex : Fientes séchées C/N = 6.9 versus Digestat liquide : C/N = 7.5



Plus de composés organiques récalcitrants dans le digestat !

Fractionnement Biochimique (selon FD U44-162)



- Pas de relation directe entre C/N et teneur en lignine des produits
- Le point commun entre la matière organique d'un sol, d'un compost ou d'un digestat de méthanisation:
transformation biologique => MO stabilisée
- Si matière non transformée, elle connaît une forte biodégradabilité à cause de sa teneur en fraction soluble (sauf si forte teneur en lignine : écorce, bois de cœur etc..)

- Pour former de la MO stable avec les plantes, c'est l'ensemble biomasse racinaire + exsudats racinaires qui est prépondérant ! Pas la biomasse aérienne !!
- Le principal levier est de faire de la photosynthèse pour stimuler la vie microbienne et stocker du carbone !
- Et il est nécessaire d'avoir un ratio C/N/P/S correct:
100/8/2/1,5: Vigilance en sol calcaire et là où le phosphore et soufre manquent !

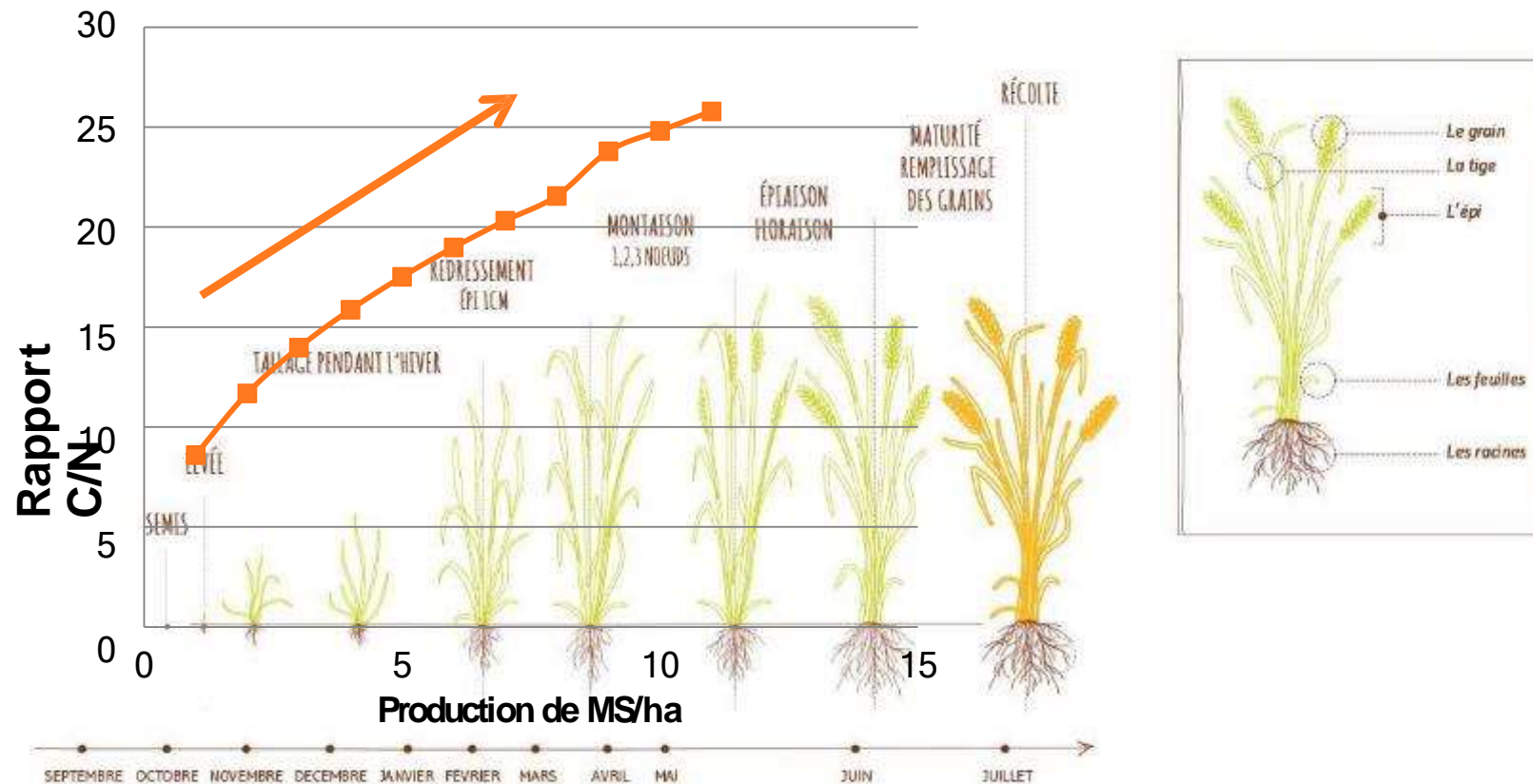
L'apport des couverts

- Dans un végétal, le carbone varie très peu (42 % de la MS)
- C'est l'azote qui évolue (espèce et stade) pour donner un rapport C/N différent en fonction du stade



Plus le végétal « vieillit », et plus l'azote est dilué (qualité des fourrages) et donc plus son C/N augmente

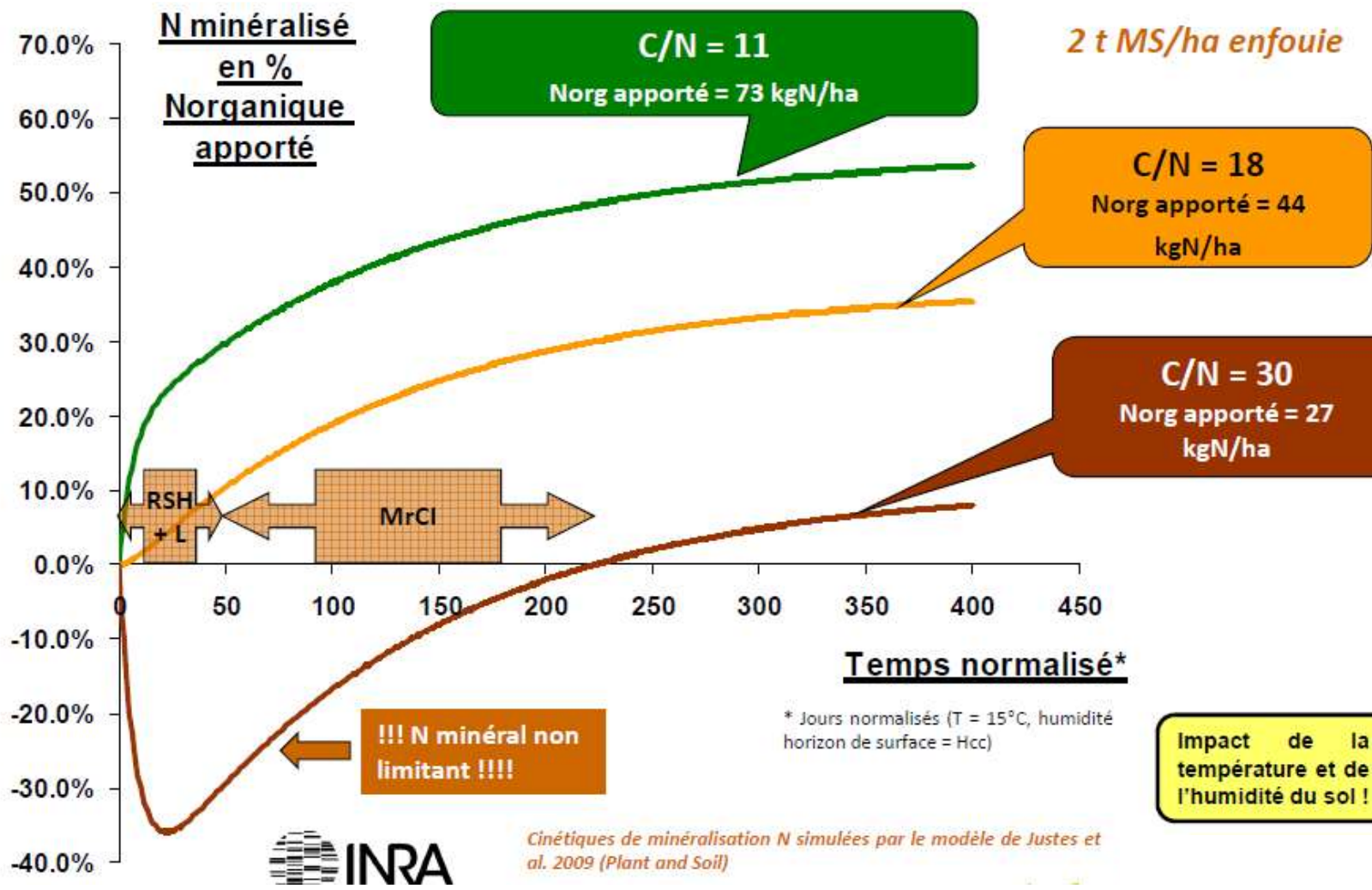
Le rapport C/N d'une plante augmente au cours de sa croissance

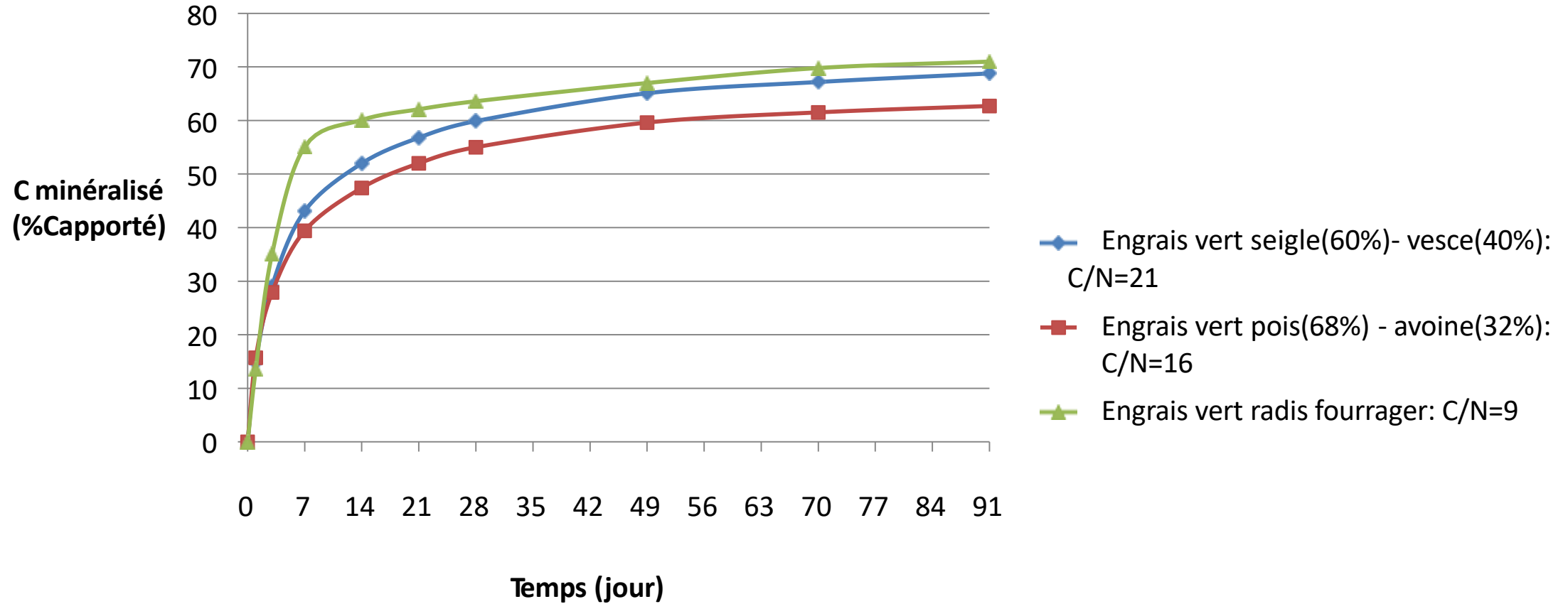


Source : Vivescia

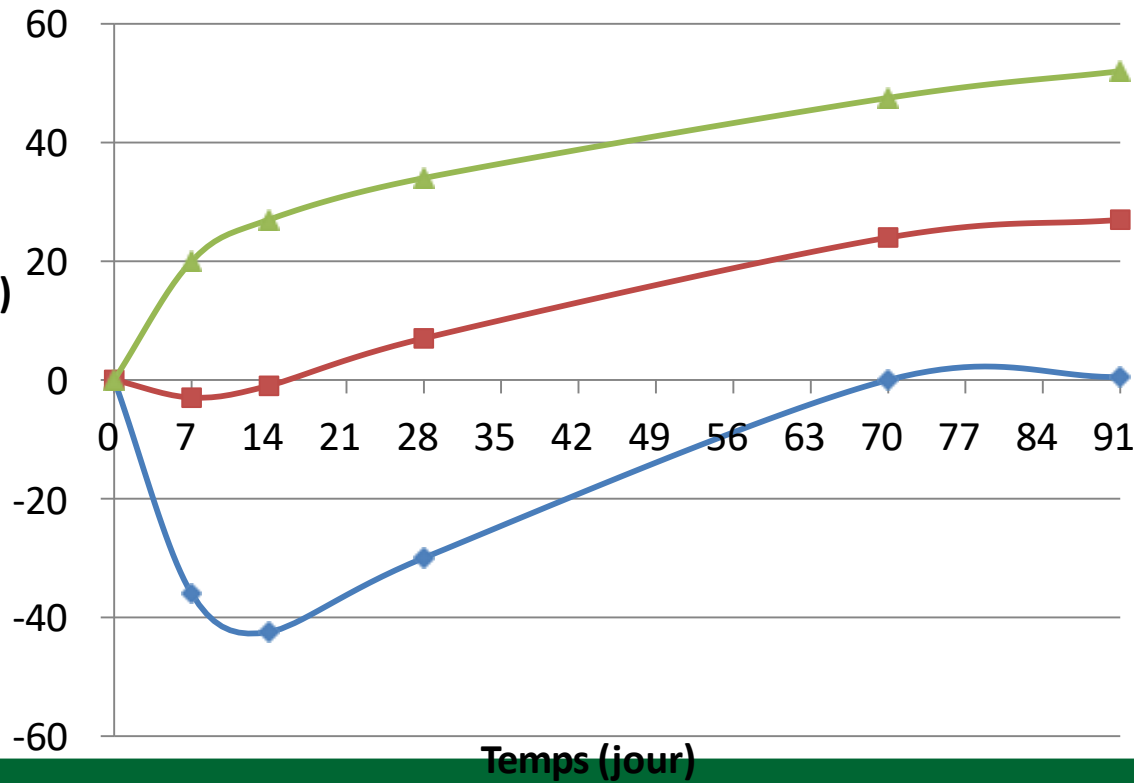
- Application de la Loi de dilution pour l'évolution du C/N du blé avec C = 46% MS

Conséquence du rapport C/N





N minéralisé
(en %Norganique apporté)



- ◆ Engrais vert seigle(60%)- vesce(40%): C/N=21
- Engrais vert pois(68%) - avoine(32%): C/N=16
- ▲ Engrais vert radis fourrager: C/N=9



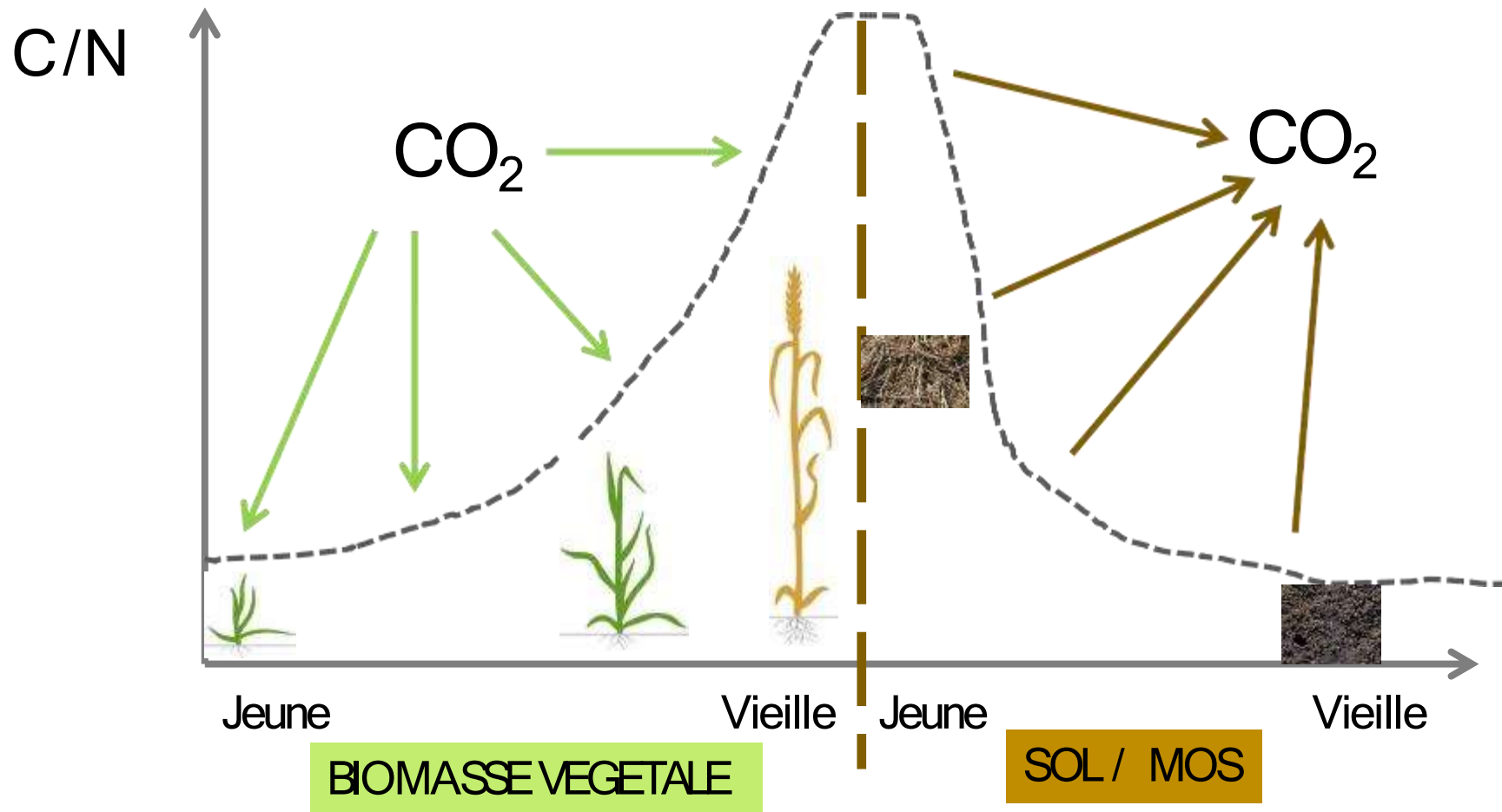
- Matière végétale = matière brute, NON TRANSFORMÉE
- Forte biodégradabilité quel que soit le rapport C/N (sauf matériaux riches en lignine : écorce, bois de cœur etc..) mais conséquence sur disponibilité de N :
- $C/N < 15$: l'azote sera disponible pour la culture
- $15 < C/N < 20$: l'azote sera en grande partie immobilisée, mais une petite partie restera disponible pour la culture
- $C/N > 20$: l'azote sera en grande partie immobilisée, pas disponible pour la culture

- **A RETENIR**

3 facteurs sont nécessaire pour la faim d'azote :

1. La MO est très digestible (= fraîche, = avec du carbone énergétique, nutritif pour la biologie du sol).
2. La MO a un C/N élevé (> 20).
3. Le sol n'est pas capable de fournir l'azote pour la biodégradation de la MO **et** pour la culture.

C/N : Mise en perspective avec la dynamique des MO dans le sol



- Si la matière organique a été transformée => **NON DIGESTIBLE**
 - Sol :
 - vie du sol => C/N = 10 : majorité de MO stabilisée
 - C/N pas critère satisfaisant pour juger du court et moyen terme
 - Nécessite analyse biologique : Fractionnement des MOS, BM-C
 - Produit organique (compostage, méthanisation,...): quel que soit le C/N proche de 10: équilibre immobilisation N / minéralisation de N
- Si la matière organique n'est pas transformée (couverts, résidus végétaux, animaux) => **TRES DIGESTIBLE**
 - C/N < 15 = fort stimulant activité biologique + très forte disponibilité de N
 - $15 < C/N < 20$: fort stimulant activité biologique et neutre disponibilité (minéralisation ou immobilisation en fonction du contexte sol)
 - C/N > 20 = fort stimulant activité biologique et immobilisation de l'azote du sol

- Utilisé seul, ce critère de qualité a ses limites : les recherches montrent que la disponibilité de l'azote dépend davantage de la localisation de cet élément dans les différentes fractions biochimiques (solubles, hémicellulose, cellulose, lignine) que du rapport C/N global du produit.
- L'ISMO (Indice de Stabilité des Matières Organiques) est un indicateur, mis au point par l'INRA, qui représente le pourcentage de matière organique stable rapporté à son taux de matière organique totale. Il donne donc une indication sur la quantité de matière organique permettant de reconstituer le stock humique du sol. Plus l'ISMO est élevé, plus l'amendement sera stable dans le sol.

Combien faut-il de MO dans les sols... ... cultivés ?



Carbone/Argile = 10% OU MO/Argile = 17%

- Une exigence **minimale** pour une qualité des sols durables
- Un objectif de séquestration **réaliste et nécessaire** du point de vue agronomique

SVI (MO/Argile) = 24%

- L'optimum pour résistance et résilience maximales
- Atteignable et atteint dans tous les systèmes de culture suisses

Objectifs déjà incorporés dans le memento agricole suisse

Mais sur le terrain, la vaste majorité en est très loin.

Exemples...



Article N° : 1683