

Apport de matières organiques exogènes en agriculture : indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote

G. Lashermes¹, S. Houot¹, B. Nicolardot², V. Parnaudeau², B. Mary², T. Morvan³, R. Chaussod⁴, M. Linères⁵, L. Metzger⁶, L. Thuriès⁷, C. Villette⁸, A. Tricaud⁹, M.L. Guillotin¹⁰

(1) INRA, EGC, 78850 Grignon ; (2) INRA, Agronomie 02000 Laon et 51000 Reims ; (3) INRA, SAS, 29000 Quimper ; (4) INRA, MGS, 21000 Dijon ; (5) INRA, TCEM, 33 Villenave d'Ornon ; (6) RITTMO, 68740 Nambtsheim ; (7) Phalippou-Frayssinet, 81240 Rouairoux, et CIRAD, UPR Relier 34398 Montpellier ; (8) LDAR, 02000 Laon ; (9) SAS, 45 Ardon ; (10) LCA, 17074 La Rochelle Cedex 9.

L'évolution des sols et de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques, notamment vis-à-vis de leur fonction de production agricole, est étroitement liée à leur **statut organique**, c'est-à-dire à la quantité et à la qualité de leurs matières organiques (MO). Actuellement les teneurs en matière organique des sols ont tendance à baisser dans certaines régions de France. Cette diminution a pour conséquence la dégradation des fonctions nutritionnelles des sols (baisse du potentiel de minéralisation et de fourniture d'azote minéral aux plantes, diminution de la capacité d'échange cationique...), de leurs propriétés physiques (diminution de la réserve en eau, déstabilisation de la structure et risque d'érosion...) et biologiques (perte d'activités et de diversité biologiques...). On attribue également une fonction environnementale aux sols pour leur capacité à stocker du carbone via l'augmentation de leurs teneurs en matière organique.

L'apport de matières organiques exogènes (MOE), autres que les résidus de culture, est une des actions possibles pour entretenir ou restaurer, voire augmenter les teneurs en MO des sols. Ces MOE sont en général des déchets issus d'activités agricoles, urbaines ou industrielles ou des produits issus de leur traitement. Leur valeur amendante, capacité à augmenter les teneurs en MO des sols, et leur valeur fertilisante azotée sont 2 points majeurs de leur valeur agronomique qui justifient leur recyclage en agriculture. Tous deux sont très variables en raison de l'importante hétérogénéité des caractéristiques des MOE. Le développement d'indicateurs pour mieux les prévoir permettrait d'améliorer la gestion des apports de MOE.

Actuellement, les MOE sont caractérisées au laboratoire par deux méthodes normalisées : (i) le **fractionnement biochimique de la matière organique** (norme **XP U 44-162**) qui permet d'estimer la capacité à induire du stockage de matière organique dans les sols à long terme. Jusqu'aujourd'hui, 2 indicateurs sont disponibles (ISB et Tr-CBM) construits sur un petit nombre de MOE et qui donnent des valeurs parfois divergentes, voire aberrantes ; (ii) l'étude des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote des MOE au cours **d'incubations en conditions contrôlées** dans un sol (norme **XP U 44-163**) qui caractérisent l'effet à court et moyen termes des MOE sur les sols. Aucun guide à l'interprétation des résultats obtenus n'est proposé dans la norme qui permettrait, entre autres, d'évaluer la valeur fertilisante azotée des MOE.

Les objectifs de cette étude financée par l'ADEME étaient de :

- constituer une **base de données** de caractéristiques analytiques d'un nombre suffisant de MOE pour une exploitation par des outils statistiques ;
- proposer un **nouvel indice** sur la base des données rassemblées permettant de prévoir les potentialités de **stockage de carbone** liées à l'usage des produits ;
- construire une **classification des MOE** pour renseigner l'utilisateur sur la valeur fertilisante azotée des MOE à court et moyen termes.

Un résumé étendu des résultats de l'étude est présenté ici. Le rapport complet est disponible auprès de l'ADEME (Convention 0475C0078).

Base de données

La **base de données** constituée rassemble les caractéristiques analytiques de **506 MOE** d'origines variées (Tableau 1) : teneurs en C et N, fractions biochimiques (XP U 44-162) et cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote (XP U 44-163).

Tableau 1 : Répartition des MOE de la base de données selon leur origine ou le procédé de fabrication.

| | | | |
|---|----|--|----|
| <i>Fumiers*</i> | 5 | <i>Composts*</i> | 13 |
| Fumiers de bovins | 29 | Composts d'ordures ménagères | 80 |
| Fumiers de volailles | 12 | Boues compostées | 61 |
| Fumiers de porcs | 7 | Composts de biodéchets | 39 |
| Fumiers d'ovins | 1 | Fumiers compostés | 37 |
| <i>Lisiers*</i> | 6 | Composts de déchets végétaux | 28 |
| Lisiers de bovins | 1 | Lisiers compostés | 20 |
| Lisiers de porcs | 7 | Fientes compostées | 6 |
| <i>Fientes*</i> | 7 | | |
| Boues issues du traitement biologique du lisier | 4 | Engrais organiques | 7 |
| Sous-produits traitement biologique du lisier | 4 | Engrais organo-minéraux | 4 |
| <i>Boues*</i> | 5 | Amendements organiques | 7 |
| Boues séchées thermiquement | 15 | Matières animales | 10 |
| Boues urbaines | 15 | Matières végétales (marcs, tourteaux...) | 22 |
| Boues chaulées | 10 | Mulchs | 8 |
| Boues agro-industrielles | 8 | Ordures ménagères chaulées | 2 |
| Boues de papeterie | 2 | Produits non définis précisément | 15 |
| Boues avec co-produit non compostées | 2 | Digestats | 7 |

* origine non précisée pour ces MOE

Indicateur de stabilité de la matière organique

Un **indicateur de stabilité de la matière organique (ISMO)** des MOE est proposé. Cet indicateur représente la proportion de C organique des MOE s'incorporant à long terme à la MO du sol. Il exprime la **potentialité de stockage du carbone des MOE** dans les sols. Il est défini grâce aux données d'incubation. Le modèle mathématique suivant (Thuriès et al., 2001) peut être ajusté aux cinétiques d'évolution du C résiduel dans le sol (Fig. 1) :

$$Tr(t) = y_0 + a e^{-bt} + (100 - y_0 - a) e^{-dt} \quad (1)$$

avec Tr le pourcentage de C restant dans le sol, $y_0 > 0$, b et d les constantes de vitesse de dégradation des compartiments a et $(100 - y_0 - a)$, respectivement. La proportion de C organique des MOE s'incorporant à long terme à la MO du sol est définie comme étant égale à Tr lorsque la vitesse de dégradation du C résiduel atteint 2% du C restant dans le sol pendant 92 jours au laboratoire, c'est-à-dire lorsque $Tr(t + 92) = 0.98 Tr(t)$.

Ce taux de 2% pendant 92 jours au laboratoire correspond à la vitesse de dégradation moyenne de la matière organique du sol pendant 1 an au champ (Recous et Balesdent, 1997 ; Coleman et Jenkinson, 1999).

L'indicateur ISMO est ensuite déterminé par confrontation des proportions de C résiduel calculées précédemment aux caractéristiques analytiques des MOE. Nous avons utilisé un sous-échantillon de 83 MOE pour lesquelles les cinétiques de minéralisation étaient plus longues que défini dans la norme XPU 44 163 (durée > 140 jours pour 74 MOE) ou présentaient un très fort potentiel de minéralisation du C (9 MOE). La meilleure régression linéaire obtenue selon la méthode des moindres carrés partiels est la suivante :

$$ISMO = 44.5 + 0.5SOL - 0.2CEL + 0.7LIC - 2.3Cm_3 \quad (2)$$

où SOL , CEL et LIC sont les fractions organiques¹ telles que définies dans la méthode du fractionnement biochimique (XPU 44 162) exprimées en pourcentage de la MO des MOE et Cm_3 est la proportion de C de la MOE minéralisée après 3 jours d'incubation (XPU 44 163) exprimée en pourcentage du C organique de la MOE. L'indicateur ISMO est exprimé en pourcentage du C organique de la MOE.

La variance expliquée par cette relation est de 84 %. Si l'on omet la variable Cm_3 , c'est-à-dire si l'on considère seulement les fractions biochimiques et les teneurs en C et N des MOE, la variance expliquée n'est que de 55 %. Ceci signifie que les fractions biochimiques déterminées par la méthode Van Soest (notamment la fraction soluble) ne permettent pas de bien caractériser la fraction de MO facilement biodégradable au sein des MOE. La mesure de cette fraction biodégradable par le suivi de sa minéralisation reste nécessaire.

¹ SOL = « soluble », CEL = « cellulose », LIC = « lignine + cutine ».

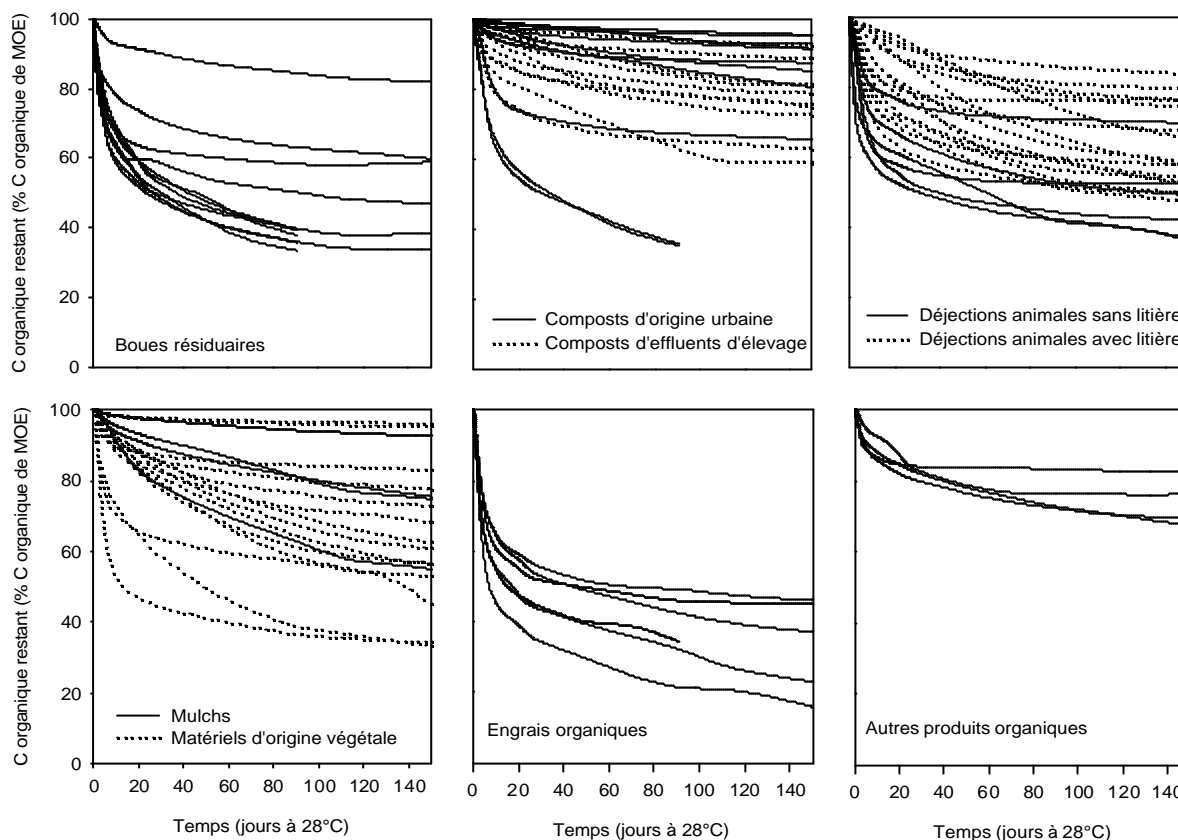


Figure 1 : Cinétiques d'évolution du C résiduel des MOE au cours des incubations en conditions contrôlées de laboratoire à 28°C.

Le fractionnement biochimique et le suivi des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote des MOE sont souvent mis en œuvre pour caractériser les MOE valorisées en agriculture. *ISMO* pourra donc être facilement calculé. On peut imaginer que la variable Cm_3 puisse être remplacée par une mesure de respirométrie en temps court du type AT4 (C-CO₂ dégagé pendant 4 jours par un produit) pressenti dans les projets de directive compost au niveau européen.

L'indicateur *ISMO* est exprimé en pourcentage de C organique de la MOE. Pour évaluer la valeur amendante d'un produit appliqué au champ (en matière brute), l'utilisateur devra tenir compte de la teneur en matière organique de la MOE et de sa teneur en matière sèche. Exprimé par rapport à la matière brute du produit, l'indicateur devient $ISMO_{MB} = ISMO * MO * MS$ où *MO* et *MS* sont respectivement les teneurs en matière organique (g g⁻¹ matière sèche) et en matière sèche (g g⁻¹ matière brute) ; $ISMO_{MB}$ est exprimé en pourcentage de la matière brute.

Cet indicateur se montre plus robuste que les 2 précédents indicateurs définis dans la norme XPU 44-162, il est moins sensible à de faibles variations des paramètres nécessaires à son calcul.

Les valeurs de l'indicateur ont été calculées pour les 440 MOE les mieux caractérisées de la base de données (Fig. 2). Des mesures expérimentales de proportions de MOE incorporées à la MO des sols ont été recherchées. Elles restent peu nombreuses. Les valeurs de l'indicateur *ISMO* calculées par la relation (2) semblent élevées par rapport aux quelques données expérimentales trouvées. Ce travail de validation doit être poursuivi.

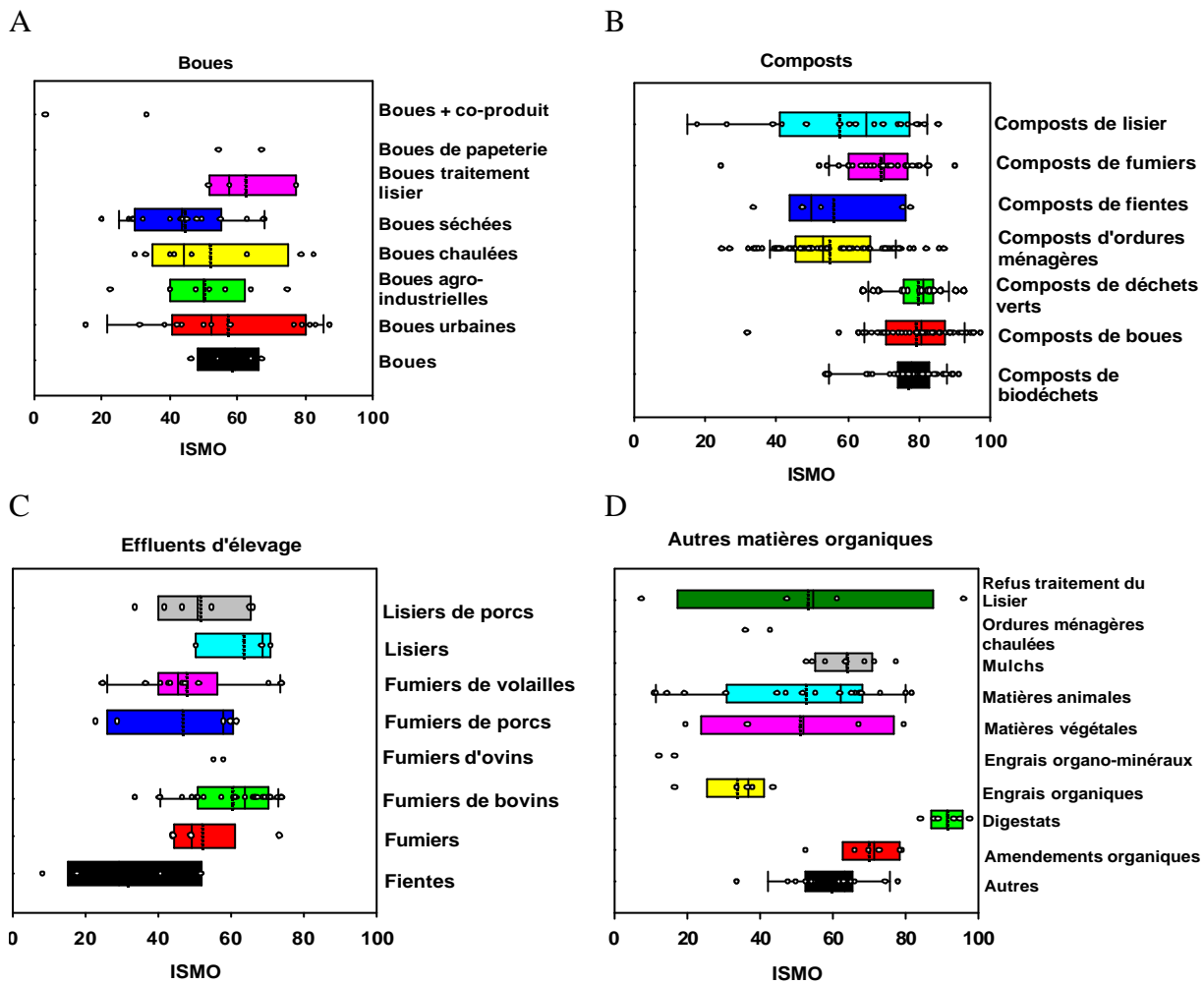


Figure 2 : Distribution des valeurs de l'indicateur *ISMO*, calculé par l'équation 2 pour différents types de MOE. (A) les boues, (B) les composts, (C) les effluents d'élevage et (D) les autres produits organiques. La limite gauche de la boîte est définie par le 1^{er} quartile, la limite droite par le 3^{ème} quartile, la médiane est représentée par le trait fin qui partage la boîte, la moyenne par le trait en pointillés. Les valeurs extrêmes ne sont pas prises en compte.

Définition de classes de disponibilité d'azote

Par rapport à la base de données totale, seules les MOE renseignées pour l'ensemble des analyses ont été sélectionnées. Cet ensemble de données comprenait une majorité de produits compostés : une suppression aléatoire d'une partie de ces composts a permis d'équilibrer le jeu de données. Au final, **6 classes de comportement de minéralisation de l'azote organique des MOE** ont été définies à partir d'un sous-échantillon de 273 MOE, ainsi que les critères permettant de classer les MOE vis-à-vis de cette minéralisation d'azote (Tableau 2). Ces classes ont été définies sur la base des résultats de minéralisation de l'azote organique des MOE au cours d'incubation en conditions contrôlées. Pour définir les MOE appartenant aux différentes classes, les relations entre la minéralisation du N organique et les caractéristiques physico-chimiques des MOE ont été étudiées en utilisant des **analyses factorielles multiples (AFM)** couplées à des classifications ascendantes hiérarchiques. La méthode statistique d'AFM est adaptée au traitement de données qui sont relatives à un ensemble d'individus décrits par plusieurs groupes de variables (Escofier & Pagès, 1998). Deux groupes de variables sont considérés :

- les **9 variables de composition des MOE** : teneurs en carbone organique (Corg), en azote organique (Norg), et en matière organique (MO) (exprimées en % MS) rapport carbone sur azote organique (C_o/N_o) et 5 fractions biochimiques (soluble SOL, hémicellulose HEM, cellulose CEL, lignine LIC et cellulose brute CEW, exprimées en % MO) ;
- un **groupe de 2 variables de minéralisation** : quantités de N minéralisé (ou organisé) lors de la décomposition des MOE, enregistrées à 14 jours ou 91 jours d'incubation à 28°C, exprimées en g N kg⁻¹ MS (notées respectivement N14 et N91) ;

La disponibilité de l'azote au sein des classes varie d'un fort potentiel de minéralisation d'azote (classe 1) à un risque d'immobilisation durable de l'azote (classe 6). Ces classes sont définies sur la base des teneurs en azote des produits mais également des fractions biochimiques CEL, LIC et SOL. **Des valeurs indicatives de disponibilité du N organique des MOE sont proposées allant de + 60 kg N t⁻¹ MS (classe 1) à - 5 kg N t⁻¹ MS (classe 6).**

Ces classes définissent la disponibilité de l'azote organique des MOE. Dans la pratique, il faudra donc ajouter à la « valeur fertilisante organique » indicative donnée dans le tableau 2, la quantité d'azote minéral présent dans le produit frais au départ *a priori* immédiatement disponible. Cependant, il ne faut pas négliger les risques de perte par volatilisation de la fraction minérale présente sous forme ammoniacale, si la MOE n'est pas enfouie immédiatement après l'apport.

Les classes donnent donc une valeur indicative de la disponibilité de l'azote organique à laquelle il faut ajouter la quantité d'azote minéral présent dans le produit initialement. Cette valeur indicative présente l'avantage de pouvoir être obtenue assez rapidement puisqu'elle repose sur les résultats de caractérisation chimique et biochimique des MOE. Une caractérisation plus fine de la valeur azotée des MOE peut toujours être obtenue par la mesure complète des cinétiques de minéralisation d'azote, beaucoup plus longue à mettre en oeuvre.

Les types de MOE définis *a priori* d'après leur nom (boue, fumier, composts...) sont distribués dans ces différentes classes, ce qui montre bien l'importance d'un minimum de caractérisation chimique pour pouvoir prédire le comportement au champ des MOE.

Conclusions et Perspectives

Deux nouveaux outils sont donc disponibles pour caractériser et prévoir le comportement des MOE au champ : (i) l'indicateur *ISMO* permet de prévoir la valeur amendante à long terme des MOE ; (ii) les classes de valeur fertilisante azotée des MOE. Ces indicateurs devraient être intégrés dans la normalisation des amendements organiques (en cours à l'AFNOR, comité U44A).

Trois points devraient être mis en œuvre dans la poursuite du travail :

- **Compléter la base de données** : il faut poursuivre la construction de la base de données. Certaines familles de MOE sont sous-représentées, d'autres MOE sont mal connues. Un fichier type de description des MOE pourrait être défini qui devrait être complété au moment de la demande d'analyse.
- **Mettre en œuvre l'utilisation de « modèles agronomiques » pour caractériser le potentiel de stockage de C des MOE.** Deux modèles, STICS-résidus (Nicolardot et al., 2001) et ROTH-C (Coleman et Jenkinson, 1999) pourraient être utilisés. Une telle démarche a été entreprise en collaboration avec l'unité Infosol (INRA Orléans) pour ROTH-C. Un travail est en cours entre EGC et l'unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons et SAS de Rennes pour tester l'utilisation d'un modèle plus mécaniste CANTIS (Garnier et al., 2003), décrivant le devenir du C et N après apport de MOE. L'utilisation de CANTIS nous permettra de tester différentes hypothèses de flux de transformation de C et N dans le sol après apport de MOE. La transcription des transformations les plus vraisemblables dans le module STICS-résidus devrait permettre son paramétrage pour l'ensemble des MOE.
- **Rechercher des données expérimentales ou des sites expérimentaux pour valider l'indicateur ISMO.**

Références bibliographiques

- BALESDENT J. & RECOUS S., 1997. Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français. *Can. J. Soil. Sci.*, **77**, 187-193.
- COLEMAN K. & JENKINSON D.S., 1999. RothC-26.3. A model for turnover of carbon in soil : model description and users guide. ISBN 0951 4456 85.
- ESCOFIER B. & PAGES J., 1998. Analyses factorielles simples et multiples, Objectifs, méthodes et interprétation. DUNOD, Paris, 284 p.
- GARNIER P., NEEL C., AITA C., RECOUS S., LAFOLIE F., MARY B., 2003. Modelling Carbon and Nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *Europ. J. Soil Sc.*, **54**, 555-568.
- NICOLARDOT B., RECOUS S. & MARY B., 2001. Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*, **228**, 83-103.
- THURIES L., PANSU M., FELLER C., HERRMANN P. & REMY J.C., 2001. Kinetics of added organic matter decomposition in Mediterranean sandy soil. *Soil Biol. Biochem.*, **33**, 997-1010.

Tableau 2 : Typologie du comportement de minéralisation de N des MOE basée sur les caractéristiques chimiques et biochimiques des MOE : teneur en N organique (N_{org}) exprimée en pourcentage de la matière sèche (% MS), fractions cellulose (CEL), lignine (LIC) et soluble (SOL), exprimées en pourcentage de la matière organique (% MO). N14 et N91 représentent la quantité de N minéralisé après respectivement 14 et 91 jours d'incubation à 28°C.

| Analyses | | | | | Prédictions de la disponibilité du N de la MOE | | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------------|-----------|--|--|-------------------------|-------------------------------|--|-------------------------|-------------------------------|----------------|---|
| Clés de détermination | | | | | Incubation (28°C) | N minéral environ 2 mois après épandage ^a | | | N minéral environ 1 an après épandage ^a | | | Classification | |
| N_{org} | CEL | LIC | SOL | N_{org} | N minéral à 14 j (N14) N minéral à 91 j (N91) | Fourchette de Variation | Valeur de Référence | MOE mal classées ^b | Fourchette de Variation | Valeur de Référence | MOE mal classées ^b | Classe | Dynamique de N dans le sol |
| % MS | % MO | % MO | % MO | % MS | g N kg ⁻¹ MS | kg N t ⁻¹ MS | kg N t ⁻¹ MS | % | kg N t ⁻¹ MS | kg N t ⁻¹ MS | % | | |
| > 9 | - | - | - | - | N14 = 40 N91 = 40 | = 40 | 60 | 14 | = 40 | 60 | 0 | 1 | Potentiel de minéralisation de N très fort |
|] 6.5 ; 9] | - | - | - | - | 20 = N14 = 30 25 = N91 = 40 | [20 ; 30] | 30 | 18 | [25 ; 40] | 30 | 18 | 2 | Potentiel de minéralisation de N fort |
| = 6.5 | = 40 | = 20 | >70 | - | 0 = N14 = 10 0 = N91 = 15 | [0 ; 10] | 5 | 5 | [0 ; 15] | 10 | 11 | 4 | Potentiel de minéralisation de N moyen à faible |
| = 6.5 | = 40 | = 20 |] 45 ; 70] | > 3 | 0 = N14 = 15 10 = N91 = 25 | [0 ; 15] | 10 | 4 | [10 ; 25] | 15 | 7 | 3 | Potentiel de minéralisation de N moyen |
| = 6.5 | = 40 | = 20 |] 45 ; 70] | = 3 | -10 = N14 = 5 -5 = N91 = 5 | [-10 ; 5] | 0 | 1 | [-5 ; 5] | 0 | 2 | 5 | Potentiel de minéralisation de N faible Risque d'immobilisation de N |
| | | =20 | = 45 | - | | | | | | | | | |
| | | > 20 | - | - | | | | | | | | | |
| = 6.5 | > 40 | - | - | - | -10 = N14 = 0 -10 = N91 = 0 | [-10 ; 0] | -5 | 0 | [-10 ; 0] | -5 | 0 | 6 | Risque d'immobilisation de N |

^a Les quantités de N minéralisé ou immobilisé prédites pour les dates 2 mois et 1 an après épandage correspondent aux quantités de N minéralisé ou immobilisé observées lors d'incubation en conditions contrôlées, respectivement 14 jours et 91 jours après l'apport de la MOE. Les incubations en conditions contrôlées se déroulent à 28°C, à humidité constante proche de la capacité au champ et sur des MOE sèches et broyées. Dans le cadre de cette étude, seule une correction de l'influence de la température était possible : les durées de 2 mois et 1 an au champ indiquées sont donc des estimations (équivalentes à 14 et 91 jours à 28°C), obtenues par modification de l'échelle de temps en prenant en compte les différences de température entre le champ et le laboratoire.

^b Pourcentage de MOE pour lesquelles la quantité d'azote minéralisé risque de ne pas être comprise dans la fourchette de variation (± 5 kg N t⁻¹ MS) indiquée. Cette estimation a été réalisée à partir d'un sous-échantillon de la base contenant 273 MOE réparties de façon équilibrée entre les types définis *a priori* d'après leur nom (boue, fumier, composts...).