

QUELS PARAMETRES INFLUENCENT LA MINERALISATION DE L'AZOTE DANS LES SUBSTRATS DE CULTURE ORGANIQUES HORS-SOL ?

Cannavo Patrice¹, Benbrahim Mohammed², Valé Matthieu³, Bresch Sophie⁴, Guénon René¹,
Recous Sylvie⁵,

¹EPHOR, AGROCAMPUS OUEST, 49045 Angers, France

²RITMO Agroenvironnement, ZA Biopôle, 37 rue de Herrlisheim, CS 80023, F-68025 Colmar Cedex,
France

³AUREA, F-45160 Ardon, France

⁴CDHR Centre-Val de Loire, Domaine de Cornay, 45590 Saint-Cyr-en-Val

⁵UMR FARE, INRA / URCA, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2 Esplanade R. Garros,
51100 Reims, France

1. Introduction

Afin d'être capable de prédire la minéralisation de l'azote (N) d'engrais organiques dans les substrats de culture hors-sol, il est nécessaire d'identifier les paramètres influant sur la minéralisation et de modéliser leurs effets. De nombreux travaux ont été réalisés sur la minéralisation de l'azote organique des sols et des matières fertilisantes organiques dans un contexte agricole (Nicolardot et al., 2001 ; Lashermes et al. 2010). Les paramètres identifiés dans la littérature sont les caractéristiques des sols (texture, pH, ...) et des matières fertilisantes organiques (rapport C/N, fractions biochimiques, ...), ainsi que la température et l'humidité dont les lois d'action sont regroupées dans le concept de jours normalisés (Mary et al., 1999 ; Valé, 2006). Il n'existe quasiment aucune référence scientifique sur la minéralisation de l'azote organique dans les substrats hors-sol. Les premiers travaux réalisés par AUREA AgroSciences semblaient indiquer que les paramétrages des fonctions définies pour les sols agricoles n'étaient pas applicables pour les substrats hors-sol (amplitude de température et humidité plus importante, variations plus brutales, optimum de minéralisation différent) (Valé, 2012). De plus, la nature même des substrats hors-sol fait que les caractéristiques à prendre en compte sont spécifiques aux substrats : nature des constituants (tourbe, fibre, écorce...), granulométrie, pH, faible activité biologique, communautés microbiennes spécifiques. Les travaux menés dans le projet CASDAR OptiFaz ont pour objectif de modéliser la minéralisation de l'azote organique en prenant en compte (1) la température et l'humidité (via le concept des jours normalisés), (2) les caractéristiques du substrat et des engrais organiques, et (3) l'activité biologique des mélanges substrats-engrais organiques. L'objectif du présent article est de caractériser les cinétiques de libération de l'ammonium (NH₄⁺) et du nitrate (NO₃⁻), en fonction des facteurs cités précédemment, et d'initier une première démarche de modélisation de la minéralisation de l'azote organique.

2. Matériels et méthodes

Une expérimentation en laboratoire a été mise en œuvre, et porte sur des incubations en conditions contrôlées. Ces incubations avaient pour objectif de suivre la minéralisation de l'azote organique de deux engrais : un engrais à dominante animale (E1), et un engrais contenant des matières premières 100% d'origine végétale (E2). Ces engrais ont été apportés dans 4 substrats différents, notés T1, T2, T3, T4. Il n'y avait pas de plante dans cet essai.

Les incubations ont été réalisées à 4 températures différentes (4°C, 20°C, 28°C, 40°C) croisées avec 3 humidités (pF 1.7, 2.5 et 3) afin de pouvoir définir des lois d'actions de la température et de l'humidité, en relation avec les caractéristiques des engrais et des substrats. Au total, nous avons 96 modalités et 3 répétitions pour chacune des modalités.

Les caractéristiques initiales des propriétés physico-chimiques des engrais et des substrats ont été mesurées (tableaux 1 et 2, respectivement). L'incubation a duré 49 jours, au cours de laquelle les mesures suivantes ont été réalisées (à 0, 3, 7, 14, 28 et 49 jours) : teneurs en N-NO₃⁻, N-NH₄⁺ (extraits à l'eau, selon les pratiques producteurs maraîchers), et quantification des gènes ammonitrifiants. Toutefois, ce dernier paramètre a été mesuré uniquement à 3, 28 et 49 jours dans certaines conditions d'humidité et de température.

Tableau 1 – Caractéristiques des engrais organiques

Engrais	MO (% MS)	N _{orga} (%MS)	C/N	ISMO ¹ (%)	K total (%)	Mg total (%)	P total (%)
E1	58.9	6.5	3.8	12	5.2	0.6	3.5
E2	72.8	6.2	5.1	4	4.1	0.5	1.9

¹ Indice de stabilité de la matière organique

Tableau 2 – Caractéristiques des substrats

Substrat	Composition	MO (%MS)	C _{orga} (%)	C/N	N _{min} (g/kg)	pH eau	CE (mS/cm)	Dispo air (% vol) ¹	RFU ² (% vol)
T1	Tourbe noire	68.7	34.4	30.9	0.39	6.8	0.7	8.0	29.8
T2	Tourbe blonde et noire, fibre coco	69.1	34.5	31	0.38	6.7	0.7	5.7	26.4
T3	Tourbe blonde, coco, écorces	90.9	45.4	65.9	0.03	7.3	0.6	35.6	19.2
T4	Tourbe blonde, coco, compost	71.3	35.6	27.2	0.25	6.5	0.6	10.6	24.7

¹ Disponibilité en air = porosité totale – teneur en eau à -1 kPa de succion

² Réserve facilement utilisable = teneur en eau à -1 kPa de succion - teneur en eau à -10 kPa de succion

3. Résultats et discussion

3.1 Impact des facteurs agro-environnementaux sur les cinétiques de minéralisation

Une analyse ANOVA a été menée afin d'identifier les facteurs significativement impliqués dans la minéralisation de l'azote organique. Les résultats sont présentés dans la figure 1 et montrent que la production de N minéral est dépendante du substrat, de l'humidité et de la température (premier niveau d'interaction significatif). Le type d'engrais n'est pas dans le premier niveau d'interaction significatif. Il se trouve en effet que les 2 engrais ont des compositions biochimiques très proches (Tableau 1). Ils avaient pourtant été choisis comme *a priori* différents en raison de leurs origines (végétale vs animale).

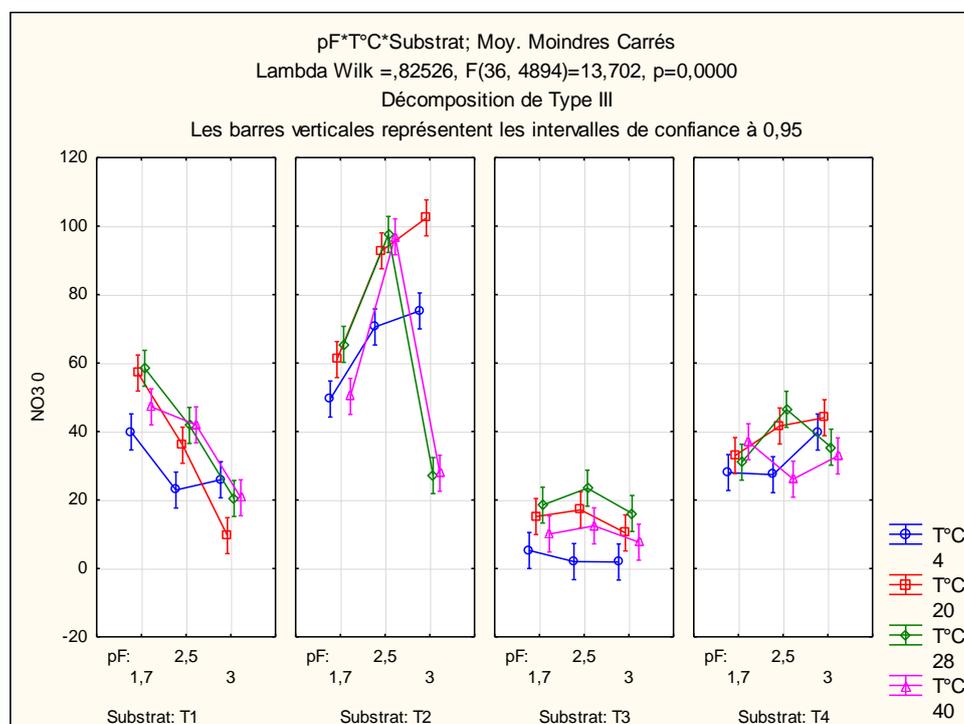


Figure 1 – Analyse ANOVA des facteurs substrat, engrais, température, humidité sur la minéralisation de l'azote organique

La minéralisation nette de l'azote résulte d'une combinaison de cinétiques de production de N-NH_4^+ et de N-NO_3^- . Selon les substrats et les conditions de température et d'humidité, ces cinétiques sont assez contrastées. L'effet du type de substrat sur la minéralisation nette de N est présenté à la figure 2. Les cinétiques sont présentées en situation de « confort » d'humidité (pF 1.7) et de température (28°C) pour les micro-organismes. Les courbes de minéralisation nette totale de l'azote (figure 2A) exprimées en fonction de l'azote apporté par l'engrais, sont la somme des courbes de production de NH_4^+ (figure 2B) et de NO_3^- (figure 2C).

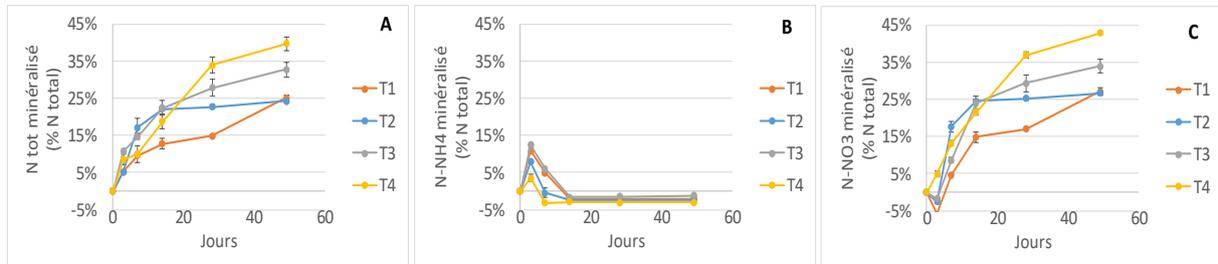


Figure 2 – Effet du substrat sur la minéralisation nette de l'azote : azote minéral total (A), N-NH_4^+ (B), et N-NO_3^- (C), exprimés en fonction de l'azote apporté par l'engrais. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard (n=3)

Au bout de 49 jours les substrats T3 et T4 produisent le plus d'azote minéral (32.7 et 39.7 % de l'azote apporté). Les substrats T1 et T2 convergent vers la même valeur (24.2%). Les cinétiques d'accumulation de N-NH_4^+ sont relativement comparables avec un pic observé au bout de 3j et une disparition après 14j. Le substrat T4 est celui présentant la moindre accumulation de N-NH_4^+ , suggérant que les micro-organismes ammonitrifiants sont davantage actifs que dans les 3 autres substrats. Au cours des 3 premiers jours, une diminution nette du nitrate est observée, correspondant à un phénomène d'organisation nette du N-NO_3^- , dans les substrats T1, T2 et T3 (figure 2C). Un facteur possible d'explication est le ratio C/N de l'engrais qui est supérieur à 25 (Tableau 2), seuil à partir duquel l'organisation nette de l'azote est possible.

Dans la suite de l'article, les effets de l'humidité et de la température du substrat sont présentés seulement pour les substrats T1 et T4 contrastés, c'est-à-dire ceux présentant la plus forte et la plus faible minéralisation totale de l'azote, respectivement. La figure 3 présente l'effet de l'humidité à température fixe de 28°C dans les substrats T1 (figure 3A, 3B, 3C) et T4 (figure 3D, 3E, 3F).

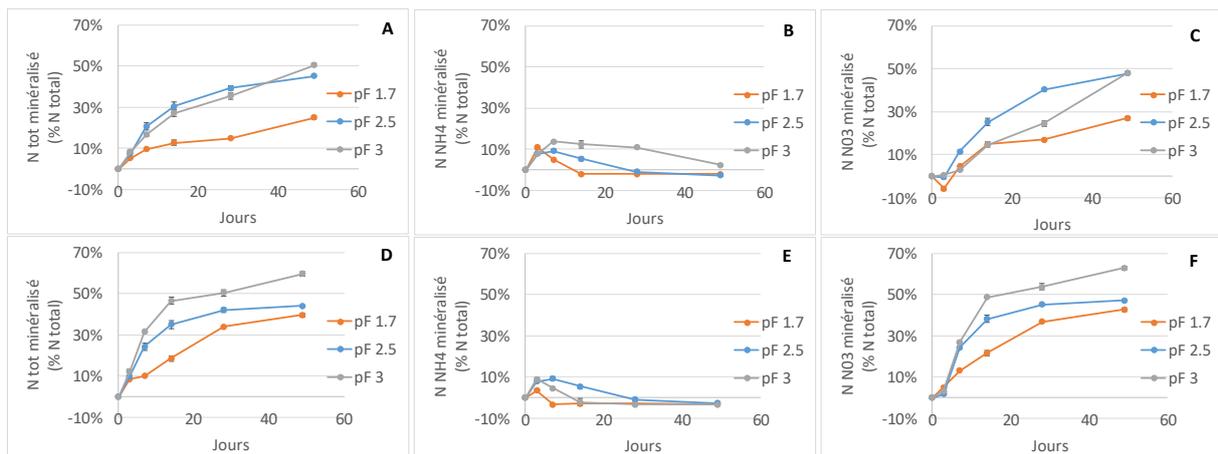


Figure 3 – Effet de l'humidité du substrat T1 sur la cinétique de minéralisation nette totale d'azote (A), de N-NH_4^+ (B), et de N-NO_3^- (C). Effet de l'humidité du substrat T4 sur la cinétique de minéralisation nette totale de l'azote (D), de N-NH_4^+ (E), et de N-NO_3^- (F). La température d'incubation est de 28°C . Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard (n=3)

Un gradient de minéralisation de l'azote est observé, en fonction de l'humidité (figure 3A et 3D) : plus le substrat est sec, plus la minéralisation de l'azote est importante. Ce gradient est beaucoup plus net pour le substrat T4. La baisse d'humidité se traduit par une augmentation de la production de NH_4^+ , en

raison d'une baisse probable de la nitrification. Ceci est plus fortement marqué pour le substrat T1, où on note une production nette de N-NH_4^+ pendant toute l'incubation, en particulier à pF3 et au-delà de 28 jours. Le substrat à base de tourbe noire T1 serait donc plus sensible à la dessiccation et impacterait davantage la nitrification.

L'impact de la température sur la minéralisation de l'azote des substrats T1 et T4 est présenté figure 4. L'humidité de référence choisie ici est pF2.5.

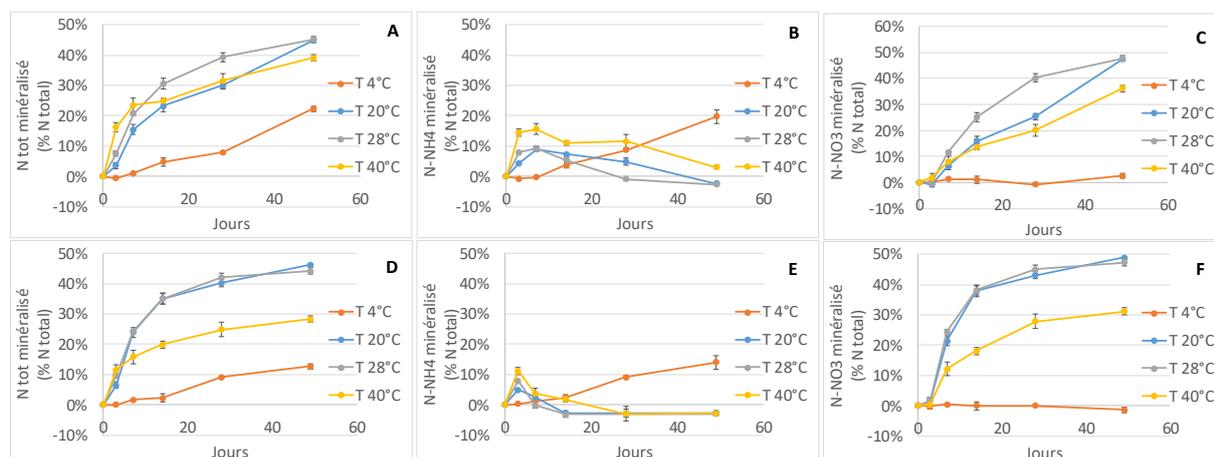


Figure 4 – Effet de la température sur la cinétique de minéralisation nette totale (A), de N-NH_4^+ (B), et de N-NO_3^- (C) du substrat T1. Effet la température sur la cinétique de minéralisation nette totale (D), de N-NH_4^+ (E), et de N-NO_3^- (F) du substrat T4. L'humidité d'incubation est à pF 2.5. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard (n=3)

La minéralisation de l'azote est la plus importante lorsque les températures d'incubation sont de 20 et 28°C (figure 4A et 4D). Pour ces 2 températures, les substrats T1 et T4 obtiennent une valeur comparable au bout de 49j (45.2%), néanmoins pour T1, l'azote total minéralisé à 20°C est inférieur à celui obtenu à 28°C entre 0 et 28j (figure 4A). Ces résultats sont cohérents avec la littérature scientifique où il est admis que cette gamme de température est optimale pour l'activité d'ammonification et de nitrification. Lorsque la température est de 4°C, la minéralisation de l'azote est la plus faible. Ceci étant, la production de NH_4^+ est bien réelle (figure 4B et 4E), où une croissance continue est observée. En revanche il n'y a pas de nitrification à cette température (figure 4C et 4F). A 40°C, minéralisation totale est moins importante qu'à 20 et 28°C, et en particulier pour le substrat T4 (figure 4D) ; elle reste néanmoins supérieure à celle de la température de 4°C. Les micro-organismes en charge de la minéralisation et de la nitrification sont moins tolérants aux températures élevées. Cette baisse de production affecte le processus de nitrification, tout comme à 4°C, mais dans une moindre mesure. Il y a davantage de N-NH_4^+ minéralisé qu'à 20 et 28°C, mais cette production tend à décroître au cours de l'incubation (contrairement à 4°C). Ainsi le substrat T1 présente une moins bonne aptitude à la nitrification que le substrat T4.

3.2 Impact des facteurs agro-environnementaux sur l'activité biologique des substrats

L'analyse de l'activité biologique des substrats a concerné la quantification des gènes de bactéries oxydant l'ammonium. Ce suivi a été réalisé à pF3 à deux températures (20°C et 40°C) ainsi qu'à pF 1,7 à une seule température. Les résultats ont montré que les substrats contiennent des bactéries nitrifiantes en quantité différente. Le substrat T3 présente une quantité de bactéries égale à 6,5 (log de nombre de copie par gramme de matière brute), soit environ 18 % de moins que les 3 autres substrats. A l'opposé, les engrais ne contiennent pas de bactéries nitrifiantes. Le nombre de copies de gènes de ces bactéries ne dépend pas du type d'engrais mais dépend des conditions d'incubations (pF et température). De manière générale, l'augmentation de la température semble réduire la quantité de ces bactéries (figure 5B et Figure 5C). De même, l'effet de la température semble dépendre des conditions d'humidité (Figure 1A et Figure 5C).

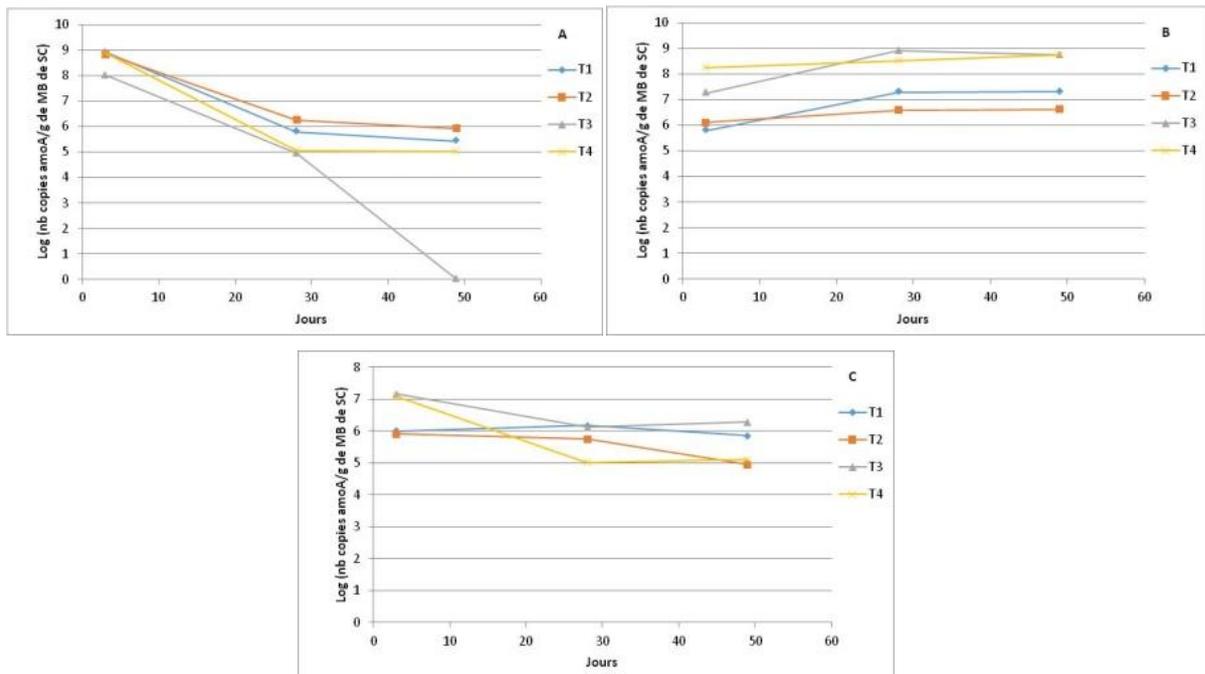


Figure 5 – Effet des conditions d’incubation sur les quantités de bactéries oxydant l’ammonium dans les quatre substrats de culture. (A) Evolution à pH 1,7 et à 40°C. (B) Evolution à pH 3 et à 20°C. (C) Evolution à pH 3 et à 40°C.

3.3 Conséquences pour la modélisation de la minéralisation de l’azote dans les substrats

Les résultats d’incubation montrent non seulement des effets liés à la température et à l’humidité, mais aussi des cinétiques particulières en fonction du type de substrat. La modélisation de la minéralisation doit permettre de restituer au mieux ces cinétiques observées.

Plusieurs modèles de minéralisation de l’azote existent dans la littérature scientifique, et ont été établis pour des sols. Parmi ceux-ci, les équations de cinétique du premier ordre sont les plus souvent utilisées (Cannavo et al., 2008). Les cinétiques de minéralisation issues des substrats vont être modélisées à partir de l’équation suivante :

$$N = A * [1 - e^{-K*t}] \quad \text{eq. [1]}$$

Avec N la part d’azote minéral total minéralisé exprimé en % de l’azote apporté, A le paramètre de calage (%), K la constante de minéralisation de l’azote (j^{-1})

$$K = B * f(H) * f(T) \quad \text{eq. [2]}$$

Avec B le paramètre de calage, f(H) et f(T) les fonctions de correction de l’humidité H (v/v) et de la température T (°C) du substrat, respectivement.

Pour chacune des 96 modalités les valeurs de A et de K seront déterminées, puis il s’agira d’analyser s’il y a une relation entre K et H d’une part (fonction f(H)) et K et T, d’autre part (fonction f(T)). Dans les sols et d’un point de vue mathématique, les effets humidité et température sont multiplicatifs. Des interactions entre ces paramètres sont possibles, ce qui nécessitera approfondissement des formalismes des fonctions f(H) et f(T).

Enfin, le formalisme des cinétiques de minéralisations proposé dans l’équation [1] concerne l’azote minéral total minéralisé. Nous avons montré dans cet article que les cinétiques de minéralisation nette de $N-NH_4^+$ et de $N-NO_3^-$ étaient différentes. Un travail de modélisation de la minéralisation de ces 2 composés azotés sera mis en œuvre afin de mieux prendre en compte les processus de minéralisation et de nitrification.

4. Conclusion et perspectives

Les résultats de cette étude montrent que les substrats, par leurs propriétés bio-physico-chimiques singulièrement différentes des sols, présentent une aptitude à la minéralisation et à la nitrification spécifique à la nature du substrat. Parce qu'il existe autant de substrats qu'il existe de formulations de mélange, la prédiction de la minéralisation de l'azote nécessite de prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques des substrats.

L'impact de l'humidité et de la température sur la constante de minéralisation K doit être désormais étudié. Les fonctions de correction de température et d'humidités utilisées dans les sols, sont généralement un produit de ces 2 fonctions, sans prise en compte d'interactions. Aussi, la modélisation de la minéralisation nette de N-NH_4^+ d'une part et de N-NO_3^- d'autre part, est nécessaire pour mieux prendre en compte les processus de minéralisation et de nitrification.

L'outil d'aide à la décision qui sera développé dans ce projet devra intégrer ces améliorations afin de développer des formalismes de prédiction de la minéralisation de l'azote. Cet outil sera testé sur des données acquises *in situ* en condition de culture dans des centres expérimentaux partenaires du projet. Dans ces centres ont été suivis les paramètres température et humidité en lien avec l'azote minéralisé dans le substrat, et ce dans des contextes de cultures variés et représentatifs des secteurs d'activité concernés. Ils se répartissent sur plusieurs sites d'expérimentation couvrant les filières plantes ornementales (fleurs, arbustes, plantes aromatiques pour l'amateur) et plants maraîchers biologiques en mottes (mini-mottes ou mottes pressées) avec des durées de cycle de culture variables.

Remerciements

Ce projet est financé par le CASDAR (2017-21) et labellisé par le RMT Fertilisation et Environnement.

Références bibliographiques

- Cannavo, P., Recous, S., Parnaudeau, V., Reau, R. (2008) Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils. *Advances in Agronomy* 97, 131-174
- Lashermes G, Nicolardot B, Parnaudeau V., Thuriès L, Chaussod R, Guillot ML, Linères M, Mary B, Metzger L, Morvan T, Tricaud A, Villette C, Houot S. (2010) Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*, 101, 157-164
- Mary B, Beaudoin N, Justes E et Machet J (1999) Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science* 50: 549-566
- Nicolardot B, Recous S, et Mary B (2001) Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil* 228: 83-103
- Painter H A. (1970) A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganisms. *Water Res.*, 4, 393-450
- Sakai H (1959) Effect of temperature on nitrification in soils, *Soil Science and Plant Nutrition* 4, 159-162
- Valé M. (2006) - Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol *in situ*, sous divers pédoclimats et systèmes de cultures français. Thèse de doctorat, Spécialité : Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes, INP ENSAT 443 p.
- Valé M. (2012) - Activité biologique et engrais organiques dans les sols et substrats : principes agronomiques et outils analytiques. SAS Laboratoire. Intervention journées Techniques ASTREDHOR (19/01/2012), 45 p.