



HAL
open science

Optimisation de la fertilisation azotée organique dans les supports de culture horticoles

Patrice Cannavo, Mohmmed Benbrahim, Matthieu Valé, Sophie Bresch,
Marie-Anne Joussemet, Olivier Yzebe, Sylvie Recous, René Guénon

► To cite this version:

Patrice Cannavo, Mohmmed Benbrahim, Matthieu Valé, Sophie Bresch, Marie-Anne Joussemet, et al..
Optimisation de la fertilisation azotée organique dans les supports de culture horticoles. *Innovations Agronomiques*, 2023, 88, pp.1-14. 10.17180/ciag-2023-vol88-art01 . hal-04311791

HAL Id: hal-04311791

<https://hal.inrae.fr/hal-04311791>

Submitted on 28 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Optimisation de la fertilisation azotée organique dans les supports de culture horticoles

Cannavo Patrice¹, Benbrahim Mohammed², Valé Matthieu³, Bresch Sophie⁴, Joussemet Marie-Anne⁵, Yzebe Olivier⁴, Recous Sylvie⁶, Guénon René¹

¹Institut Agro, EPHOR, 49000, Angers, France

²RITMO Agroenvironnement, ZA Biopôle, 37 rue de Herrlisheim, CS 80023, CEDEX, 68025 Colmar, France

³AUREA AGROSCIENCES, 45160 Ardon, France

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

⁵Est Horticole, 28 rue du Chêne, 88700 Roville-aux-Chênes, France

⁶Université de Reims Champagne Ardenne, INRAE, FARE, UMR A 614, 51100 Reims, France

Correspondance : patrice.cannavo@institut-agro.fr

Résumé

Afin d'être capable de prédire la minéralisation de l'azote d'engrais organiques dans les substrats de culture hors-sol, il est nécessaire d'identifier les facteurs influant sur la minéralisation et de modéliser leurs effets. Il n'existe pas à ce jour de modèle de minéralisation de l'azote organique appliqué aux substrats hors-sol. Les travaux menés dans le projet CASDAR OPTIFAZ avaient pour objectif de proposer un outil prédictif pour le raisonnement de la fertilisation organique en conduite hors-sol en prenant en compte la température et l'humidité, les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du substrat et des engrais organiques, et enfin d'évaluer l'activité biologique des mélanges substrats-engrais organiques. A partir d'incubations en conditions contrôlées sur 4 substrats et 2 engrais organiques majeurs issus du commerce, il a été possible de modéliser les cinétiques de minéralisation de l'azote organique. Dans l'avenir, le comportement spécifique des substrats incite à élargir la gamme de couples engrais-substrats étudiés pour donner plus de robustesse aux modèles mis en œuvre. Enfin, le rôle de la plante et de ses effets sur la minéralisation de l'azote organique devra être caractérisé et modélisé.

Mots clés : température, humidité, constante de minéralisation, substrat horticole, modélisation

Abstract: Optimization of organic nitrogen fertilization in horticultural growing media

In order to predict nitrogen mineralization of organic fertilizers in soilless growing media, it is necessary to identify the factors influencing mineralization and to model their effects. Currently, there is no model available to predict organic nitrogen mineralization applied to soilless growing media. The work carried out in the CASDAR OPTIFAZ project aimed at proposing a predictive tool for the reasoning of organic fertilization in soilless management by taking into account the temperature and moisture, as well as the physical, chemical and biological characteristics of the growing media and of the organic fertilizers, and the biological activity of the growing media-organic fertilizer mixtures. After incubations under controlled conditions of 4 different growing media and 2 common commercial organic fertilizers, it was possible to model the kinetics of organic nitrogen mineralization. In the future, the specific behaviour of the growing media encourages to widen the range of fertilizer- growing media couples studied to give more robustness to the implemented models. Finally, the plant and its effects on the mineralization of organic nitrogen should be characterized and modelled.

Keywords: temperature, moisture, mineralization rate, growing media, modelling

Introduction

Les consommateurs se préoccupent de la qualité des aliments qu'ils consomment et de l'impact environnemental de leur production. La demande de produits issus de l'agriculture biologique s'est sensiblement accrue au cours des dernières années (Jerkebring, 2015). Ainsi, les engrais organiques représentent une alternative durable aux engrais minéraux de synthèse. Dans la production conventionnelle hors-sol, la plante se développe dans un volume limité de substrat organique se traduisant par un pouvoir tampon limité (en eau, température et nutriments notamment). Ces substrats sont biologiquement stables en raison de matières organiques résistantes à la biodégradation. L'introduction de fertilisants organiques nécessite une adaptation des pratiques car les fertilisants organiques doivent d'abord être minéralisés par le microbiote du substrat avant d'être assimilés par la plante. Ainsi, une activité microbienne satisfaisante dans les substrats est essentielle pour atteindre cet objectif (Caldwell, 2005).

De telles spécificités impliquent de pouvoir proposer à la profession horticole des outils de prédiction de l'azote minéralisé, adaptés à la variabilité des engrais et des substrats organiques disponibles sur le marché. En particulier, une simulation précise de la minéralisation de l'azote du sol est cruciale pour améliorer la gestion de l'azote afin i) de faire correspondre le moment de l'apport d'engrais et les doses avec la demande en azote des cultures, ii) de maximiser l'efficacité économique et iii) de minimiser les pertes d'azote minéral dans l'environnement. Par conséquent, l'enjeu pour l'horticulture biologique est de parvenir à une meilleure connaissance de la disponibilité de l'azote après la fertilisation organique, pour une synchronisation optimale de la disponibilité de l'azote avec la demande en azote des cultures (Burnett et al. 2016 ; Tittarelli et al. 2017).

Aujourd'hui, il y a un manque évident de données de référence sur la dynamique de minéralisation des engrais organiques en culture hors-sol. Nous avons fait l'hypothèse que certains formalismes établis pour prédire la minéralisation de l'azote organique dans les sols pourraient être repris et adaptés dans le contexte des cultures hors-sol (Ma et Shaffer, 2001 ; Nicolardot et al., 2001).

L'objectif du projet OptiFaz, porté par Astredhor, était de développer des outils d'analyse et de pilotage de la fertilisation organique adaptés aux conditions hors-sol et permettant d'accompagner les fabricants, techniciens et producteurs dans leur pratique. Plus spécifiquement, il s'agissait de (1) caractériser et modéliser la dynamique de minéralisation de l'azote des fertilisants organiques hors-sol pour un certain nombre d'engrais et de supports de culture, (2) développer des indicateurs de terrain à destination des producteurs pour le pilotage de la fertilisation organique en conditions *in situ*, et (3) proposer un outil prédictif pour le raisonnement de la fertilisation organique en conduite hors-sol. Ce projet a été réalisé en l'absence de plantes.

Les partenaires du projet étaient des instituts techniques (Astredhor, ITAB), des stations d'expérimentation (CDHRC, Est Horticole, GRAB, CIVAM Bio), un laboratoire d'analyse des sols et des substrats (Aurélia AgroSciences), un centre de ressources technologique (RITTMO Agroenvironnement), une unité de recherche (unité EPHor, Institut Agro Rennes-Angers) et un lycée d'horticulture et de paysage à Roville-aux-Chênes.

1. Matériels et Méthodes

1.1 Sélection des couples engrais/substrat

A partir de la constitution d'une base de données des caractéristiques des engrais et des substrats issus du commerce, une sélection de couples engrais-substrat a été opérée de manière à étudier les divers facteurs supposés impacter la minéralisation : (1) pour les substrats, il s'agit de l'usage cultural, des constituants et de la granulométrie ; (2) pour les engrais, il s'agit de l'origine (animale, végétale, mixte), du procédé de fabrication (compostage, granulation), et de la granulométrie. Les compositions des substrats et engrais choisis sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques des substrats, notés S1, S2, S3 et S4

	S1	S2	S3	S4
Usage professionnel	Plantes fleuries et plante à massif	Plantes maraîchères en mottes ou en plateaux	Conteneur arbres et arbustes	Plantes maraîchères en mottes ou en plateaux
Densité apparente (g cm ⁻³) ¹	0,18	0,20	0,12	0,18
Porosité totale (v/v) ²	89,1	88,3	92,0	88,0
Disponibilité en eau (v/v) ³	0,38	0,41	0,23	0,40
Disponibilité en air (v/v) ⁴	0,17	0,03	0,47	0,04
pH eau ⁵	6,8	6,7	7,3	6,5
Conductivité électrique (mS cm ⁻¹) ⁶	0,7	0,7	0,6	0,6
Matière organique (g kg ⁻¹) ⁷	687,3	690,6	908,5	712,6
N organique (g kg ⁻¹)	11,1	11,1	6,9	13,1
Ratio C/N	30,9	31,0	65,9	27,2

^{1,2,3,4}AFNOR (2000a), ⁵AFNOR (2000b), ⁶AFNOR (1998), ⁷déterminé à 550°C, 7 h

Tableau 2 : Composition des engrais organiques F1 (d'origine animale), F2 (d'origine végétale)

	F1	F2
Matière organique (g kg ⁻¹)	559,5	636,7
C total (g kg ⁻¹)	279,8	318,4
N organique (g kg ⁻¹)	59,5	54,1
N total (g kg ⁻¹)	67,4	55,1
P total (mg kg ⁻¹)	35,4	18,6
K total (mg kg ⁻¹)	52,3	40,8
Ratio C/N	3,8	5,1

1.2 Méthodes d'incubation et d'analyse des substrats

Une expérimentation en conditions contrôlées a été mise en place afin d'établir des cinétiques de minéralisation de l'azote organique dans les différents couples engrais-substrat. Les incubations ont été réalisées par le partenaire Aurea AgroSciences. Les quatre substrats ont été incubés à quatre températures (4, 20, 28 et 40 °C) et trois potentiels matriciels (-3,2, -10,0 et -31,6 kPa correspondant à pF1,5, pF2,0 et pF2,5, respectivement), avec ou sans ajout d'engrais, dans l'obscurité et en l'absence de plantes. Le potentiel matriciel caractérise l'état énergétique de l'eau dans un sol. Il correspond à la pression nécessaire pour extraire l'eau du sol. Plus sa valeur est négative, plus la succion pour extraire l'eau du sol par les plantes est élevée, et plus l'humidité du substrat est faible. Des échantillons destructifs ont été utilisés pour extraire et mesurer les teneurs en N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ après 3, 7, 14, 28 et 49 jours. L'engrais organique a été appliqué à un taux de 55 g N kg⁻¹ de substrat base poids sec. La quantité d'engrais appliquée a été calculée sur la base des pratiques habituelles des producteurs (200 g d'engrais N m⁻³ de substrat). Les teneurs en N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ ont été extraites et mesurées avec de l'eau dé-ionisée (1:1.5

vol.) pendant 1 h. Les concentrations ont été déterminées par colorimétrie en utilisant un analyseur à flux continu (Skalar Analytical). Trois répétitions ont été préparées par modalité. Les bactéries nitrifiantes ont été quantifiées comme suit : les acides nucléiques totaux ont été extraits des échantillons de substrat à l'aide d'un kit Qiagen DNeasy PowerSoil (Cat No./ID : 12888-100). Ensuite, une réaction en chaîne par polymérase quantitative a été réalisée en utilisant les amorces 968 R et 1401 R pour les bactéries totales et les amorces amoA-1F et amoA-2R pour les bactéries nitrifiantes.

1.3 Modélisation de la minéralisation de l'azote organique

1.3.1 Modèle cinétique de 1^{er} ordre

Deux approches de modélisation ont été utilisées. D'une part, la cinétique de minéralisation nette de l'azote a été modélisée à l'aide d'un modèle de cinétique de premier ordre. Ce formalisme a été choisi car il est largement utilisé pour modéliser la minéralisation de la matière organique dans les sols (Cannavo et al., 2008). La prédiction de la minéralisation nette de l'azote a été calculée comme suit :

$$N = A \times [1 - \exp(-K \times JN)] \quad (1)$$

Où N est la quantité prédite de N minéralisé (exprimée en % de N organique appliqué), A (%) le pourcentage maximal d'azote organique minéralisé, K (j⁻¹) le taux de minéralisation de l'azote organique, et JN correspond au temps, exprimé en jours normalisés calculés comme suit :

$$JN = t \times f(T) \times f(H) \quad (2)$$

Où t est la durée d'incubation (jours), f(T) et f(H) les fonctions de température et d'humidité, respectivement.

Ce modèle a été calibré à T=20°C et pF2, c'est-à-dire les conditions pour lesquelles l'amplitude de l'azote minéralisé était la plus élevée, pour l'ensemble des données d'incubation et pour chaque substrat, sans distinction du type d'engrais (Cannavo et al., 2022).

1.3.2 Modèle statistique

D'autre part, un modèle statistique a été utilisé : il consiste à établir une équation multivariée à partir de quelques variables facilement utilisables par les producteurs de substrats et d'engrais. Ce modèle multivarié est le suivant :

$$N = \alpha \times N_{\text{Fert}} + \beta \times N_{\text{init}} + \gamma \times JN \quad (3)$$

Où N_{Fert} est la teneur en engrais N appliqué (mg N kg⁻¹), N_{init} est la teneur initiale en N dans le substrat (mg N kg⁻¹), α et β sont des paramètres ajustés.

Le modèle a été calibré sur 2/3 de la base de données d'incubation avec les 4 substrats, les 2 engrais à toutes les dates de mesure au cours de l'incubation (n=1235, avec une sélection aléatoire). Il a été testé sur le 1/3 restant de la base de données (n=625).

1.3.3 Validation des modèles sur des données indépendantes acquises in situ dans les stations expérimentales partenaires

Les deux modèles ont été testés sur des données de suivi d'azote minéral en conditions réelles de serre, acquises sous différentes conditions climatiques françaises (Tableau 3), sur les mêmes couples substrats-engrais étudiés en incubation et sans plantes. Le tableau 3 présente les différentes conditions d'expérience. Les expériences 1 et 2 ont été mises en place dans la station Est Horticole (longitude 6°60' W, latitude 48°39' N), l'expérience 3 dans la station Astredhor Loire Bretagne STEPP (longitude -2°71' W, latitude 48°50' N), l'expérience 4 dans la station CDHRC (longitude 1°97' W, latitude 48°83' N), les

expériences 5 et 6 à CIVAM Bio 66 (longitude 2°90' W, latitude 42°70' N), et les expériences 7, 8 et 9 dans la station de GRAB (longitude 4°81' W, latitude 43°95' N).

Tableau 3 : Conditions expérimentales in situ

Expérience (numéro)	Substrat	T min – T max (T moy)	N fertilisant appliqué mg N kg ⁻¹	N min initial du substrat mg N kg ⁻¹	Nombre d'observations
1	S1	8,0– 32,1 (19,2)	1218	268	5
2	S1	1,2 – 21,3 (7,9)	1589	269	10
3	S1	-0,1 – 27,3 (9,8)	1618	271	3
4	S3	4,2 – 42,3 (21,8)	1765	265	6
5	S2	5,8 – 26,1 (14,0)	777	411	4
6	S4	5,8 – 26,1 (14,0)	980	149	4
7	S2	10,9 – 41,7 (24,7)	1765	411	1
8	S4	10,9 – 41,7 (24,7)	1967	149	1
9	S2	6,3 – 30,2 (16,4)	1043	411	1

Ces essais ont été conduits sous abri afin de s'affranchir de la pluie et les arrosages ont été pilotés de manière harmonisée, en pilotant sur des poids seuils, entre les 6 sites afin de limiter les pertes d'azote par lixiviation. Une partie des essais a été menée sans matériel végétal pour s'affranchir des prélèvements de la plante et l'autre avec plante pour valider les pratiques au regard de la qualité de production. Les températures aériennes et du substrat ont été mesurées en continu et avant chaque arrosage, les pots ont été pesés pour évaluer l'humidité du substrat. Des dosages successifs d'azote minéral (Nitrachek) dans le substrat ont été réalisés à intervalle régulier (entre 7 et 15 jours selon les cultures) pour évaluer l'impact des variations de température et d'humidité sur la minéralisation de l'azote organique (figure 1). Selon les cultures, les percolats ont également été récupérés afin de réaliser un bilan azoté complet.



Figure 1 : (A) Outils de pilotage utilisés pour suivre in situ les teneurs en azote nitrique (boîtier Nitrachek®), en azote ammoniacal (boîtier RQFlex®) dans les supports de culture et la teneur en chlorophylle des feuilles (pince à chlorophylle MC-100), (B) Dispositif expérimental in situ sous abri avec des pots sans plantes

2. Résultats

2.1 Dynamiques de minéralisation de l'azote organique

Les résultats expérimentaux d'incubation ont été publiés par Cannavo et al. (2022). Une analyse ANOVA a été menée afin d'identifier les facteurs significativement impliqués dans la minéralisation de l'azote organique. Les résultats montrent que la production de N minéral est dépendante du type de substrat, et de l'humidité et de la température pendant l'incubation (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 2). Ils avaient pourtant été choisis comme *a priori* différents en raison de leurs origines (végétale vs. animale).

La minéralisation nette de l'azote résulte d'une combinaison de cinétiques de production d'ammonium et de nitrate. 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, et les cinétiques présentées correspondent aux traitements en situation de « confort » d'humidité (pF2) et de température (28°C) pour les micro-organismes. Les courbes de minéralisation nette de l'azote (figure 2A) exprimées en fonction de l'azote apporté par l'engrais, sont la somme de la production de NH_4^+ (figure 2B) et de NO_3^- (figure 2C).

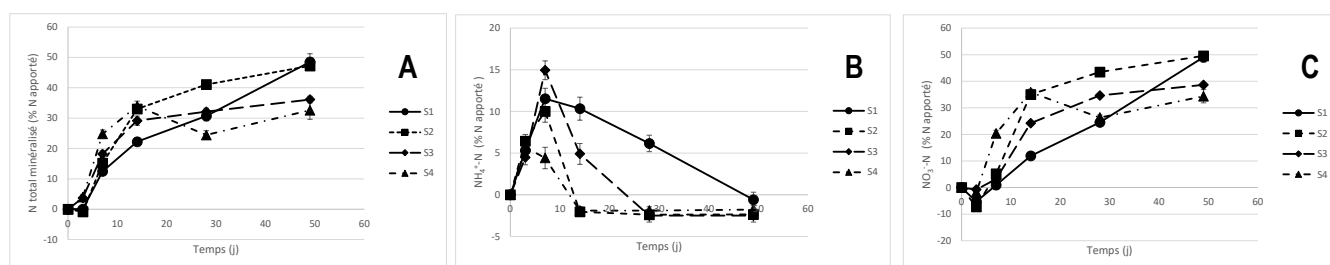


Figure 2 – Effet du substrat sur la minéralisation nette de l'azote : azote minéral total (A), N-NH_4^+ (B), et N-NO_3^- (C), exprimés en % de l'azote apporté par l'engrais. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard (n=3)

Au bout de 49 jours les substrats S3 et S4 produisent le moins d'azote minéral (32,7 et 36,7 % de l'azote apporté). Les substrats S1 et S2 convergent vers la même valeur (49%). Les cinétiques d'accumulation de N-NH_4^+ sont présentes des similitudes avec un pic observé au bout de 3 jours et une disparition après 14 jours. Le substrat S4 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 de l'azote, dans les substrats S1, S2 et S3 (figure 2). Un facteur possible d'explication est le ratio C/N du substrat qui est supérieur à 25, seuil à partir duquel l'organisation nette de l'azote est possible.

L'analyse de l'activité biologique des substrats a concerné la quantification des gènes de bactéries oxydant l'ammonium. Les figures 3 et 4 montrent l'effet de la température et de la date d'incubation sur la richesse des substrats en bactéries ammonitrifiantes.

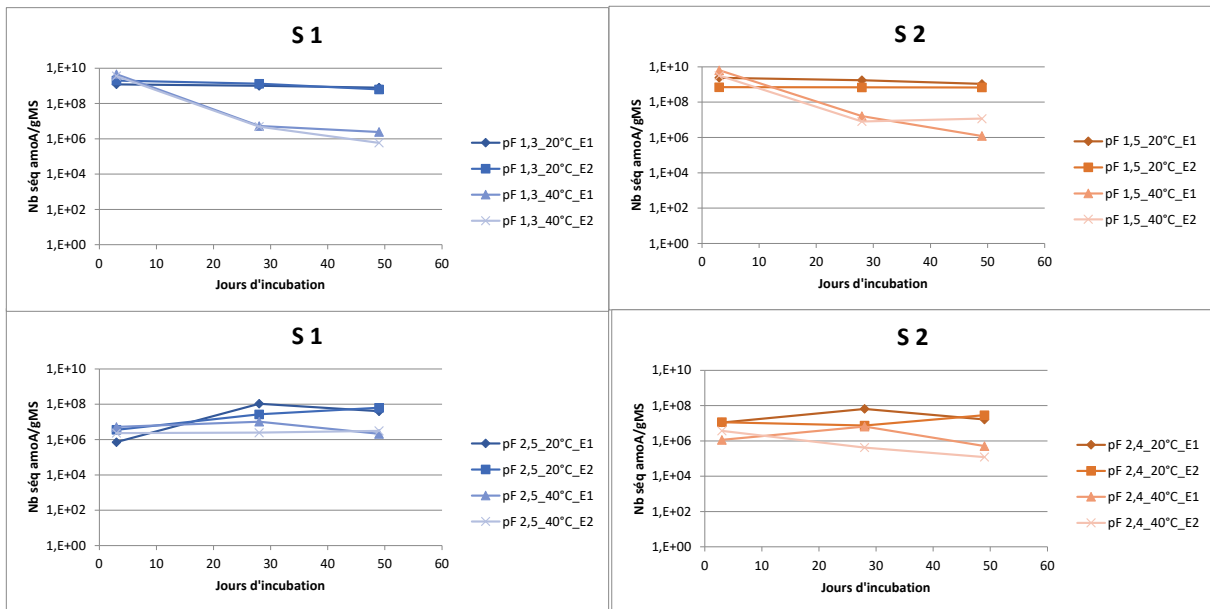


Figure 3 : Evolution des populations microbiennes ammonitrifiantes (porteurs de la séquence d'ADN amoA) en fonction du temps d'incubation aux différentes conditions d'humidité (pF) et de température (°C) dans les substrats S1 et S2

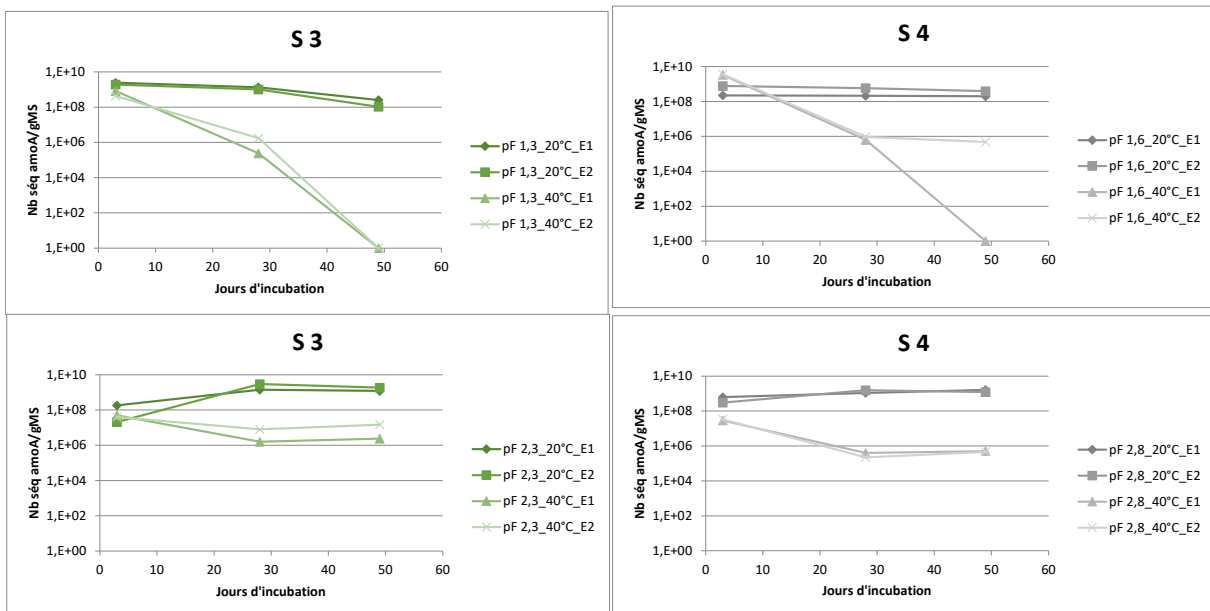


Figure 4 : Evolution des populations microbiennes ammonitrifiantes (porteurs de la séquence d'ADN amoA) en fonction du temps d'incubation aux différentes conditions d'humidité (pF) et de température (°C) dans les substrats S3 et S4.

Ces résultats montrent que les populations des bactéries ammonitrifiantes sont sensibles aux fortes températures. En effet, pour tous les substrats, l'augmentation de la température d'incubation à 40°C a réduit la quantité de bactéries ammonitrifiantes. Le niveau de sensibilité à la température dépend des substrats et de l'humidité. De même, l'effet de l'humidité semble plus important aux températures moyennes (20°C) alors que pour les températures élevées (40°C), l'effet de la température est dominant et ne permet pas de révéler un effet de l'humidité.

2.2 Modélisation de la minéralisation de l'azote organique

Une loi d'action de la température a été établie pour tous les substrats, à pF2, et en combinant les engrais F1 et F2 (Figure 5).

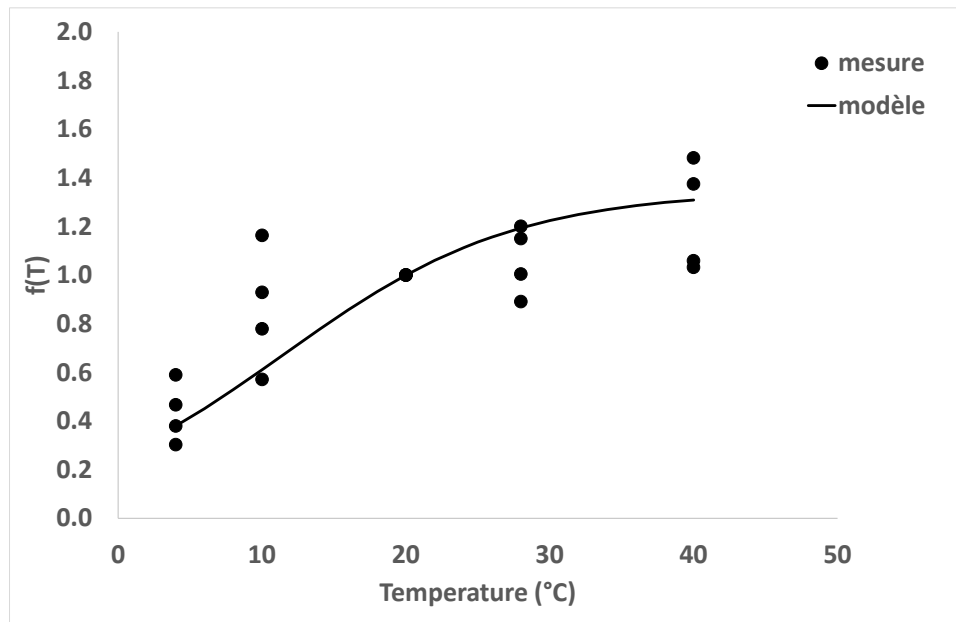


Figure 5 : Courbe de réponse $f(T)$ de la minéralisation selon la température du substrat. Le facteur $f(T)$ qui décrit cette loi d'action est établi pour les 4 substrats, à pF2, et avec 4 répétitions pour chaque température (au total $n=17$)

L'équation du modèle, dont le formalisme s'inspire du modèle STICS (Brisson et al., 2008) pour décrire la minéralisation de la matière organique du sol, s'écrit ainsi (Cannavo et al., 2022) :

$$f(T) = \frac{1.35}{1 + 2.12 \times \exp(-0.12 \times T)} \quad R^2=0.91, \text{ RMSE}= 0.14 \quad (4)$$

La loi d'action de l'humidité, via le facteur $f(H)$, n'a pu être établie. Différentes réponses à l'humidité ont été observées pour chaque substrat. Pour cette raison, la fonction $f(H)$ a été fixée à la valeur de 1 pour la suite des travaux de modélisation (ce qui suppose aucune limitation de la minéralisation par le taux d'humidité).

Les travaux de modélisation sont détaillés dans Cannavo et al., (2023), nous synthétisons ici les résultats majeurs. Le modèle multivarié est un modèle statistique qui n'a pas de signification agronomique mais il nous a permis d'établir un modèle robuste sur un grand jeu de données ($n=1860$) (figure 6). Sa force réside aussi dans sa généralité puisqu'il a été conçu à partir des cinétiques de minéralisation des 4 substrats. A notre connaissance, une telle modélisation statistique n'a pas été appliquée à la minéralisation de l'azote dans les substrats. Pour concevoir ce modèle, il était nécessaire de sélectionner un ensemble simple de paramètres d'entrée accessibles aux producteurs de substrats et aux fabricants d'engrais (teneur en azote de l'engrais, teneur en azote du substrat, température et humidité du substrat). Nous avons essayé d'améliorer ce modèle en considérant plus de paramètres et en particulier les paramètres physico-chimiques des substrats tels que leur réserve en eau, leur macroporosité, leur teneur en azote organique ou leur rapport C/N. Cela n'a pas amélioré la qualité de la prédiction. Le tableau 4 précise les paramètres et performance de calibration-validation du modèle (eq. (3)).

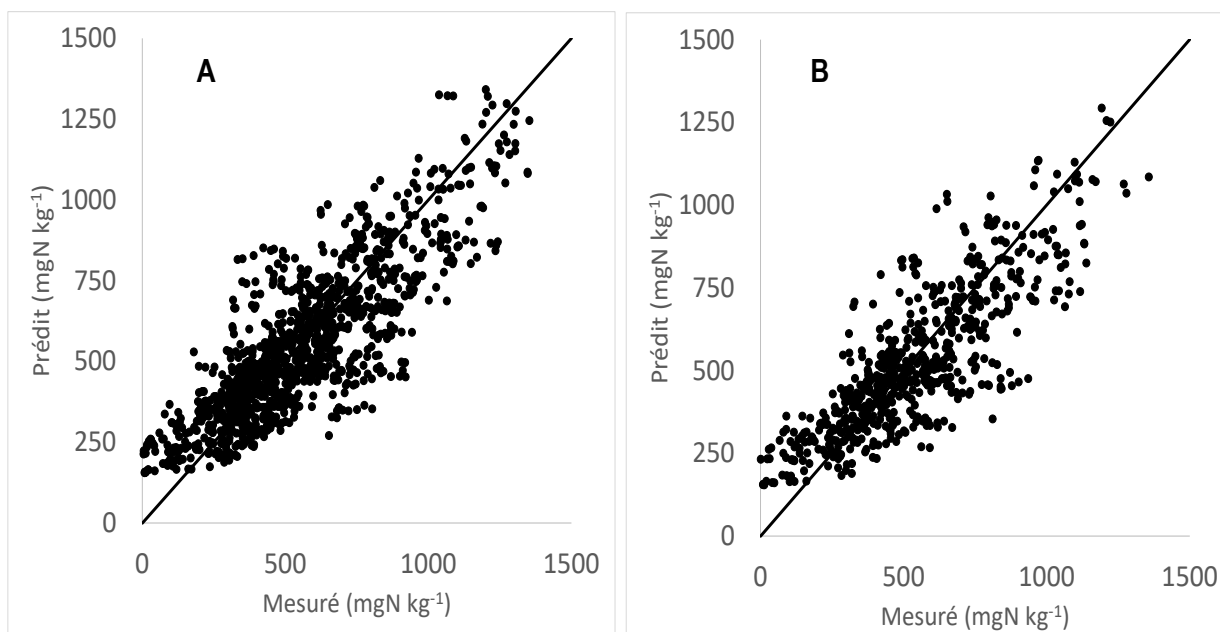


Figure 6 : Calibration (A) et validation (B) du modèle multivarié de prédiction de la minéralisation nette de l'azote

Tableau 4 : Paramètres de validation et performance statistique du modèle

	α	β	γ	R^2	RMSE mg N kg ⁻¹ substrat
Calibration n=1235	0,11	0,82	9,22	0,84	145,2
Validation n=625				0,83	145,5

Le modèle de cinétique du premier ordre a été développé pour chaque substrat et avec moins de répétitions (n=6) que le modèle multivarié (figure 7). Cependant, sa force est qu'il a permis d'identifier des paramètres agronomiques d'intérêt, comme le taux de minéralisation, un paramètre qui permet d'évaluer la capacité d'un substrat à dégrader un engrais organique. Les quatre substrats étaient relativement similaires en termes de propriétés physico-chimiques même s'ils étaient fabriqués à partir de matériaux différents et pour des objectifs cultureux différents. Les différentes cinétiques de minéralisation peuvent être attribuées au fonctionnement microbien des substrats. Les paramètres de calibration du modèle sont présentés dans le tableau 5. La calibration est bonne pour les 4 substrats, avec un R^2 compris entre 0,85 (S4) et 0,99 (S2), et une RMSE comprise entre 1 % (S1) et 10 % (S2) (tableau 2). Les taux de minéralisation, K, varient fortement avec le type de substrat, de $K=0,013$ à $0,178 \text{ j}^{-1}$ pour S1 et S4 respectivement. Les modèles ont également été testés à d'autres températures, et à pF2. Dans l'ensemble, le modèle a bien reproduit les données expérimentales, sauf pour certaines conditions de température extrêmes, à savoir à 4°C (S2, S3 et S4) et à 40°C (S1 et S2), où les RMSE étaient les plus élevées (résultats non montrés).

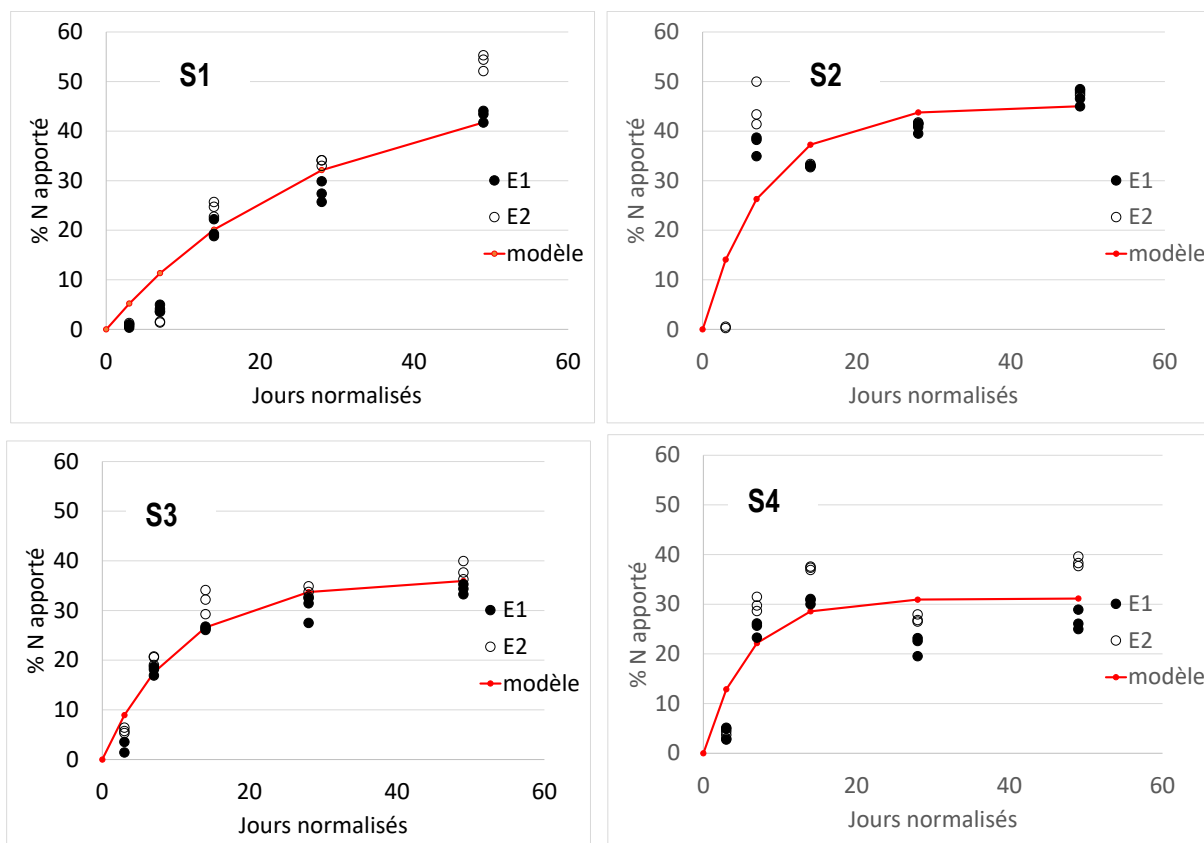


Figure 7 : Courbes de minéralisation nette de l'azote en fonction de la nature du fertilisant E1 et E2, et modèle de cinétique du premier ordre calibré sur E1 et E2.

Table 5 : Paramètres de calage du modèle et performance de calibration à 20°C et pF2 (Eq. (1)), pour chaque substrat (n=24), avec A le pourcentage maximal d'azote organique minéralisé, K le taux de minéralisation de l'azote organique, R² le coefficient de corrélation, et RMSE l'erreur quadratique moyenne.

	S1	S2	S3	S4
A (%)	100	45	36	31
K (j ⁻¹)	0,013	0,125	0,09	0,178
R ²	0,96	0,99	0,97	0,85
RMSE (%)	1	10	4	7

Les deux modèles ont été satisfaisants en ce qui concerne les critères de performance de la simulation. Néanmoins, ces deux modèles ont tendance à surestimer les valeurs mesurées, et le modèle cinétique du premier ordre surestime davantage les valeurs mesurées (de +12 %) dans la plage centrale de teneurs en N mesurées dans les substrats (300-1000 mg N kg⁻¹), qui concentre le plus de données (soit 77% des données mesurées). Un autre point faible rencontré pour ces deux modèles est leur moins bonne capacité de prédiction pour des teneurs en azote minéralisé soit faibles soit élevées, qui correspondent respectivement à des conditions de températures basses (4°C) et élevées (40°C) probablement critiques pour l'activité biologique. Les pratiques de culture hors-sol dans ces conditions extrêmes de température restent relativement marginales. Néanmoins, ces biais ne sont *a priori* pas liés à la loi d'action de la température, qui a montré une bonne intégration des mesures à 4 et 40°C lors de sa calibration (Cannavo et al., 2022). Cependant, le travail de modélisation a été réalisé sans loi d'action de l'humidité, impossible

à établir pour l'ensemble des substrats. Même si le travail de modélisation a été réalisé à une succion fixe (-10 kPa), des interactions entre la température et l'humidité ont pu se produire, et le modèle ne les a pas prises en compte. Ainsi, des travaux de recherche doivent être développés dans ce domaine. La modélisation basée sur la cinétique du premier ordre peut également être limitée par le choix du formalisme. Nous avons choisi un modèle avec un seul compartiment de matière organique, et donc un seul taux de minéralisation. Plusieurs formalismes mathématiques de cinétiques du premier ordre existent, prenant en compte un ou plusieurs compartiments de matière organique associés à des constantes de minéralisation spécifiques.

2.2 Validation des modèles sur un jeu de données indépendant en stations expérimentales

La validation des modèles sur un jeu de données autre que les incubations en laboratoire était un enjeu majeur pour confirmer nos résultats. Les données expérimentales acquises durant le projet, utilisées pour la validation indépendante des deux modèles développés, couvraient un large spectre de conditions environnementales en termes de gamme de température (-0,1 à 41,7°C), de diversité des substrats et de quantité d'azote apportée par l'engrais (777-1967 mg N kg⁻¹). Pour la température, certaines valeurs se situent en dehors de la plage de calibration du modèle, mais restent des mesures très occasionnelles, et nous supposons qu'elles ont eu peu d'impact sur nos résultats. Les modèles ont donné une bonne représentation des valeurs mesurées, ce qui est un résultat très encourageant. Cependant, on retrouve la même tendance à surestimer les valeurs observées. Le modèle multivarié se rapproche plus des valeurs observées (RMSE=220 mg N kg⁻¹) que le modèle cinétique de premier ordre (RMSE= 256 mg N kg⁻¹) (figure 7). Cela ne signifie pas que les modèles agronomiques ne sont pas bons, car ils sont largement utilisés dans les agrosystèmes et ont démontré leurs capacités prédictives. Cependant, ces modèles agronomiques ont souvent été établis dans des contextes pédoclimatiques spécifiques, pour des espèces cultivées spécifiques, ce qui leur confère une limite d'extrapolation ou de généralité des résultats. Dans notre étude, ces modèles ont donné de très bons résultats lorsqu'ils ont été calibrés sur chaque substrat.

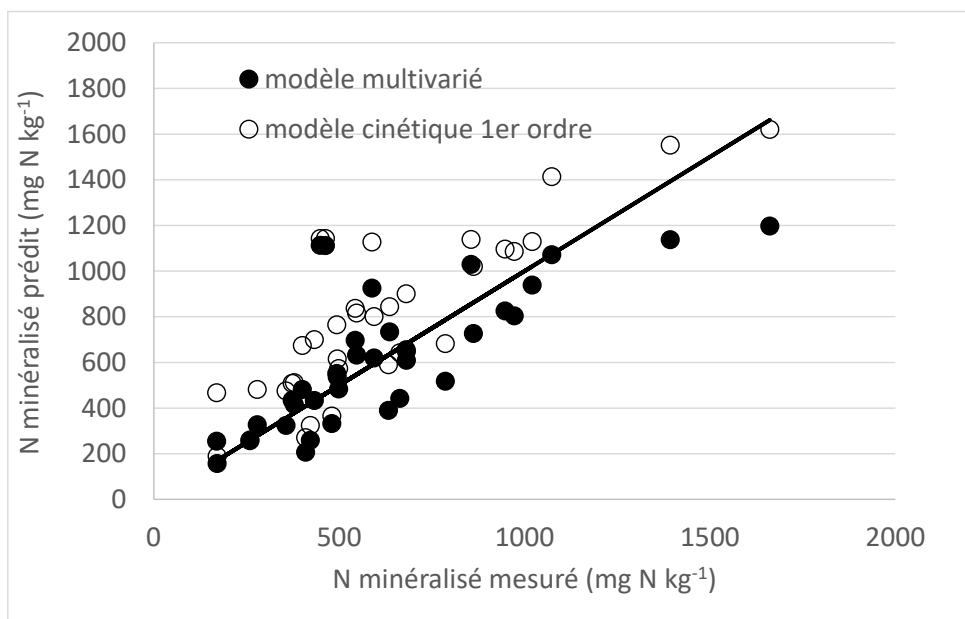


Figure 7 : Prédiction de la teneur en N minéralisé net pendant les expérimentations in situ.

2.3 Recherche d'indicateurs pour le pilotage in situ - Mise au point d'outils de terrain

Les deux types d'indicateurs (teneur en azote minéral dans le substrat et teneur en chlorophylle) ont été mis en œuvre sur les différents dispositifs et des règles de décision ont été définies en amont. La règle consistait à déclencher un surfaçage lorsque la valeur de l'indicateur diminuait de 20 à 30% par rapport aux valeurs mesurées sur l'itinéraire en fertilisation minérale.

Les tests sur les différents dispositifs montrent que :

- Le suivi de l'azote nitrique dans le substrat (Nitracheck®) permet de mettre en évidence un décrochage relativement précoce, ce qui est intéressant pour des cultures sur lesquelles les carences ne s'expriment que tardivement. Le suivi de l'azote ammoniacal est plus délicat car bien souvent les concentrations sont faibles et ce dernier n'est pas détectable. Il existe néanmoins des bandelettes de mesure avec une plage de mesure comprise entre 0,2 et 7 mg/L de NH_4^+ . Toutefois, ces deux indicateurs liés à des mesures d'azote minéral dans le substrat se sont révélés pertinents et complémentaires. La mesure de l'azote ammoniacal (à l'aide du boîtier RQ-Flex®) renseigne sur le bon déroulement ou non de la minéralisation. En effet, en période chaude, la nitrification se déroule correctement et l'azote ammoniacal n'est pas détectable car trop fugace. *A contrario*, en période froide, l'azote ammoniacal peut s'accumuler et devenir problématique pour la culture.
- Le suivi de l'indice chlorophyllien quant à lui se révèle plus complexe dans l'interprétation des résultats. En effet, les baisses de teneurs en chlorophylle ne sont pas toujours liées à une carence en azote minéral ; cela peut être lié à des carences d'autres éléments (ex : fer). En règle générale, la règle de décision définie en amont (diminution de 20 à 30% de la valeur par rapport à la fertilisation minérale) n'est pas adaptée. Les surfaçages ont été déclenchés de manière trop tardive. Ce type d'indicateur se révèle tout de même intéressant pour suivre l'état physiologique des plantes car il est simple à mettre en œuvre et non destructif. Cet indicateur est lié à l'indice de coloration des feuilles qui reflète la teneur en chlorophylle ; cette dernière étant corrélée à l'état de nutrition azotée. Les courbes d'évolution obtenues avec les deux appareils N-Tester® et Apogée sont comparables mais les résultats de l'appareil Apogée® sont plus facilement interprétables et plus fins. Avec ce dernier, les unités sont exprimées en valeurs absolues (concentration chlorophylle en $\mu\text{mol.m}^{-2}$) alors que pour le N-Tester®, elles doivent être transformées en classes pour afficher les données statistiquement correctes. Dans ce dernier cas, la lecture des résultats est plus complexe.

A l'issue de cette première année d'étude, il apparaît que chaque indicateur présente un intérêt bien spécifique. L'outil de suivi final fera probablement appel à plusieurs de ces indicateurs selon :

- Les types de culture (cycle court ou long),
- La taille des feuilles (car les pinces à chlorophylle sont plus délicates à manipuler sur des végétaux à petites feuilles),
- La propension de l'espèce végétale à exprimer une carence foliaire,
- La saison de culture (froide ou chaude).

Conclusion et perspectives

Le projet OptiFaz (i.e. optimisation de la fertilisation organique azotée) a permis de générer des connaissances et références originales dans le domaine de la fertilisation organique en production hors-sol. Les substrats étudiés ont montré des réponses de minéralisation différentes selon les engrais apportés en raison de leurs propriétés bio-physicochimiques propres. Deux modèles de prédiction de la minéralisation de l'azote organique ont pu être développés. Le modèle multivarié a une capacité de prédiction légèrement supérieure au modèle de cinétique du premier ordre, ce dernier ayant été adapté aux substrats organiques. Les résultats encourageants de ce projet méritent d'être approfondis. Il convient tout d'abord de renforcer la qualité prédictive et le domaine de validité des modèles développés par l'étude d'un nombre plus élevé de substrats divers. Dans un contexte d'indépendance aux ressources, des substrats sans tourbe et sans fibre de coco doivent être pris en compte. Les substrats minéraux tels que la laine de roche sont très répandus et doivent être étudiés. Concernant les engrais, il convient aussi d'élargir la gamme étudiée c'est-à-dire inclure des engrais liquides, et de sélectionner des engrais de nature contrastée en termes de dynamique de minéralisation sur la base de leur stœchiométrie, du procédé de fabrication, de l'origine des matières premières, etc...). Enfin, le projet OptiFaz a été conduit en l'absence de plantes croissant sur les substrats fertilisés. Il convient désormais d'intégrer la plante et d'évaluer l'impact de la rhizosphère sur le processus de minéralisation de l'azote organique et l'absorption de l'azote minéralisé par la plante. Ces actions de recherche devront être validées au sein des filières horticoles par la réalisation d'essais de culture in situ.

Remerciements

Ce projet a été financé par le CASDAR, Projet OptiFaz, numéro de convention 5746.

Références bibliographiques

- AFNOR Amendements du Sol et Supports de Culture—Détermination des Propriétés Physiques—Masse Volumique Apparente Sèche, Volume D'air, Volume d'eau, Valeur de Rétraction et Porosité Totale. NF EN 13040. U44-307. 2000a. Available online: <https://www.boutique.afnor.org/normes>
- AFNOR Amendements du Sol et Supports de Culture—Détermination du pH. NF EN 13037. U44-308. 2000b. Available online: <https://www.boutique.afnor.org/normes>.
- AFNOR Amendements du Sol et Supports de Culture—Détermination de la Conductivité Electrique. NF EN 13038. U44-309. 1998. Available online: <https://www.boutique.afnor.org/normes>.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N, 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Ed. Quae, 301p.
- Burnett S.E., Mattson N.S., Williams K.A, 2016. Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. *Scientia Horti* 208, 111–119
- Caldwell B.A., 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia* 49, 637–644
- 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
- Cannavo P., Recous S., Valé M., Bresch S., Paillet L, Benbrahim M., Guénon R., 2022. Organic Fertilization of Growing Media: Response of N Mineralization to Temperature and Moisture. *Horticulturae*, *Horticulturae*, 8, 152
- Cannavo P., Recous S., Valé M., Bresch S., Benbrahim M., Guénon R, 2023. Prediction of nitrogen mineralization in organically fertilized growing media for soil-less production. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 186, 532-542
- Jerkebring K., 2003. Växande marknad – försäljning, volymer och trender för ekologisk mat 2003. *Ekologiska Lantbrukarna*.
- Ma L., Shaffer M. J., 2001. A review of carbon and nitrogen processes in nine U.S. soil nitrogen dynamics models. In "Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management." pp. 55–102. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA
- Nicolardot B., Recous S., 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 Soil* 228, 83–103
- Tittarelli F., Båth B., Ceglie F.G., García M.C., Möller K., Reents H.J., Védie H., Voog, W., 2017. Soil fertility management in organic greenhouse: an analysis of the European context. *Acta Horti* [International Society for Horticultural Science (ISHS)], Leuven, Belgium, pp. 113–126



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.