



HAL
open science

Compréhension du comportement d'engrais organiques dans les terreaux destinés au marché amateur

Boris Calvet

► **To cite this version:**

Boris Calvet. Compréhension du comportement d'engrais organiques dans les terreaux destinés au marché amateur. Sciences agricoles. 2013. dumas-00905965

HAL Id: dumas-00905965

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00905965>

Submitted on 19 Nov 2013

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.

Table des matières

INTRODUCTION

| | |
|--|-----------|
| 1 Contexte et enjeux | 2 |
| 1.1 L'entreprise..... | 2 |
| 1.2 La fertilisation organique | 3 |
| 2 Les supports de culture (pour particuliers) | 4 |
| 3 La fertilisation des supports de culture | 4 |
| 3.1 Les engrais minéraux..... | 5 |
| 3.2 Les engrais organiques | 5 |
| 4 Les problèmes liés à la fertilisation organique | 6 |
| 4.1 Le processus de minéralisation de l'azote..... | 8 |
| 4.2 Les paramètres qui influencent la minéralisation de l'azote | 9 |
| 4.2.1 paramètres liées au couple engrais/substrat..... | 9 |
| 4.2.2 paramètres liées au milieu | 11 |
| 4.2.3Le Temps..... | 13 |
| 4.3 Conséquences pour la plante | 13 |
| 4.3.1 Exemple de raréfaction d'un composé : le NO_3^- | 13 |
| 4.3.2 Exemples d'accumulation de composés : le NH_4^+ et le NO_2^- | 14 |
| 4.4 Vue d'ensemble : plantes et microorganismes | 14 |
| 5 Particularités des substrats | 16 |
| 6 Problématique de travail et hypothèses posées | 16 |
| 6.1Le pH des substrats stockés | 17 |
| 6.2Le stockage sous forme de palette..... | 17 |
| 1 Matériel et méthodes | 18 |
| 2 Résultats | 20 |
| 3 Discussion | 29 |
| 1 Matériel et méthodes | 32 |
| 2 Résultats | 34 |
| 3 Discussion | 37 |
| CONCLUSION | 41 |
| BIBLIOGRAPHIE | 42 |

Introduction

1 Contexte et enjeux

1.1 L'entreprise

La société Biolandes a été créée en 1980 à Le Sen, au cœur de la forêt des Landes pour concrétiser une idée originale : produire de l'essence d'aiguille de pin par un procédé novateur de distillation. Après le passage dans l'alambic, d'énormes quantités d'aiguilles de Pin se retrouvaient cependant inutilisables. C'est pourquoi la société Biolandes Agro fut créée dans le but de commercialiser ces coproduits végétaux comme amendements organiques de masse pour la viticulture bordelaise et l'arboriculture de la vallée de la Garonne. Ainsi furent créées les deux sociétés sœurs : « Biolandes », la première, restera une entreprise de chimie qui se développera énormément par la suite, « Biolandes Agro », la seconde, suivra les pas de sa grande sœur en restant cependant sur un marché bien plus national.

Toujours dans les années 80, Biolandes Agro s'intéresse à un autre produit de la forêt des Landes : les écorces de pin. L'idée cette fois-ci est de valoriser les écorces disponibles à la sortie des scieries pour qu'elles soient utilisées comme paillage. Le paillage était une technique en grande partie oubliée à ce moment-là mais les espaces verts ont permis le lancement de l'activité en devenant les pionniers de son utilisation. Les économies d'eau et de fertilisant n'étant alors pas tout à fait à l'ordre du jour, le paillage avait avant tout un rôle esthétique. Cette idée innovante provoqua la création de toutes pièces d'un marché du paillage en France.

Lors du dépoussiérage des écorces pour produire du paillage, on obtenait des écorces aux calibres plus fins (entre 0 et 15mm). Ces écorces aux diamètres plus fins furent utilisées comme matières premières de supports de culture et vendus aux professionnels.

Motivés par la montée en puissance du marché du jardin amateur, Biolandes Agro décide au début des années 90 de se lancer dans la vente de terreaux et paillages aux particuliers. L'entreprise crée alors des gammes complètes pour les deux produits. Cette période voit également l'écorce de pin devenir le paillage n°1 en France, assurant à Biolandes Agro une place de choix sur le marché des paillages. Cette place de choix permet alors à l'entreprise de se placer plus aisément sur le marché des terreaux.

Les années 2000 sont marquées par la pénurie de matière première suivant la tempête de 1999 : l'écorce des arbres tombés en grand nombre devient rapidement trop abîmée pour servir de paillage et les arbres restés debout ne suffisent pas à fournir les volumes nécessaires. Un autre phénomène fait son apparition qui prendra de plus en plus d'ampleur pendant la seconde moitié des années 2000 : l'engouement pour le « biologique ». Cette tendance n'épargne pas le marché des terreaux : la vente de terreaux Utilisables en Agriculture Biologique(UAB) augmente en flèche dans les jardinerie durant les années 2006-2007.

Biolandes Agro, devenu Biolandes Pin Décor en 2003 après le rachat de la société Pin Décor (un fabricant de paillages localisé dans à Bussac-forêt en Charente Maritime), répond à l'évolution de la demande en créant une gamme de terreaux UAB.

La société évolue aujourd'hui sur un marché français du jardin de 7.4 milliards d'euros dont 12% sont occupés par la catégorie « équipements » dans laquelle figurent les supports de culture. Les principaux distributeurs sont les grandes et moyennes surfaces, les jardinerie et les libres services agricoles, qui totalisent à eux trois 86% de la distribution (Promojardin, 2012), ce sont les clients principaux de l'entreprise. La part occupée par la vente de terreaux UAB a fortement augmenté depuis 2007, elle représente ainsi 37.82% des volumes de ventes de janvier à mai 2013.

1.2 La fertilisation organique

Ces nouveaux terreaux ne peuvent pas être fertilisés avec de l'engrais minéral classique, ils nécessitent l'utilisation d'engrais organiques pour être UAB ; Biolandes Pin Décor choisit d'utiliser des engrais organiques d'origines différentes pour adapter sa gamme de produits. Si la substitution de l'engrais minéral par de l'engrais organique ne change pas a priori la donne en ce qui concerne la commercialisation de terreaux aux particuliers, les subtilités liées à la variété des molécules présentes dans ces engrais pourraient avoir des conséquences sur le comportement des terreaux. Lorsque les volumes de vente des terreaux UAB étaient faibles, aucun problème n'avait été rapporté quant à leur qualité, il paraissait donc logique de penser qu'aucun problème ne serait constaté en augmentant les volumes de vente. Cependant des réclamations provenant de particuliers commencent à apparaître, notamment concernant des semis qui ne lèvent pas et des effets délétères sur les premiers stades de développement des plantes. Le problème s'étend aux différents producteurs de terreaux et la recherche commence à s'intéresser au comportement des engrais organiques dans les supports de culture. Le sujet est déjà connu et bien étudié dans les sols mais les différences liées aux terreaux poussent les chercheurs à reconsidérer les hypothèses de départ pour adapter leurs connaissances à ce nouveau domaine et essayer de trouver la cause des défaillances récemment signalées.

Mon travail dans ce cadre sera d'essayer de progresser dans la compréhension de ce qui a pu provoquer les comportements récemment observés chez les terreaux à fertilisation organique dans le but d'isoler éventuellement des leviers d'action pour remédier à ces défaillances ; d'où l'intitulé de mon travail : « compréhension du comportement des engrais organiques dans les terreaux destinés au marché amateur ».

Pour tenter de comprendre comment se comportent les engrais organiques dans les supports de culture et les désagréments qui peuvent en découler, il faut tout d'abord définir ce qu'est un support de culture :

2 Les supports de culture (pour particuliers)

« La croissance et le développement d'une plante sont normalement assurés si l'équilibre est satisfait à tout moment entre la demande et l'offre en éléments nécessaires au processus ; dans le milieu racinaire, outre l'eau et l'oxygène, doivent être présents les éléments minéraux sous des formes qui sont ou deviendront assimilables » (Lemaire et al., 1989). Le but d'un support de culture étant d'assurer la croissance des plantes, il devra fournir à la fois l'eau, l'air et les éléments minéraux nécessaires au système racinaire de celles-ci. Il devra ainsi (Michel, 2012) :

- Posséder des propriétés physiques : Porosité/aération, rétention en eau, mouillabilité ;
- Faire preuve de Biostabilité ;
- Faire preuve d'innocuité : présence limitée de pathogènes, Eléments traces métalliques, polluants organiques ;
- Posséder enfin des propriétés chimiques : éléments minéraux, pH, salinité, CEC

Le fait que les supports de culture vendus par Biolandes Pin Décor soient destinés au marché des particuliers a quelques conséquences au niveau des propriétés recherchées dans ceux-ci : le jardinier amateur ne possède pas d'équipement qui permet une gestion fine de l'irrigation et de la fertilisation, il lui faudra donc un substrat peu drainant.

Du côté réglementaire, la norme NF 44-551 (AFNOR, 2004) de mai 2002 définit les supports de culture comme « produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux. Leur mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité en air et en eau telle qu'ils sont capables à la fois d'ancrer les organes absorbants des plantes et de leur permettre d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance. » Cette définition officielle stipule que le support de culture devra créer un milieu dans lequel les éléments nécessaires à la croissance pourront être absorbés, ceux-ci seront fournis par les fertilisants.

Si les problèmes signalés paraissent liés au type de fertilisation ajouté au support de culture, il nous faut comprendre le rôle de cette fertilisation et donc celui des engrais.

3 La fertilisation des supports de culture

Les engrais sont des « matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition (éléments fertilisants majeurs (N, P,

K), éléments fertilisants secondaires (Ca, Mg, S) et oligoéléments (autres métaux ou métalloïdes nécessaires à la croissance des plantes) sous une forme assimilable» selon la norme NF U 42-001 (AFNOR, 2004).

Pour comprendre la particularité des fertilisants organiques, définissons les deux types de fertilisation précédemment évoqués : fertilisation minérale et fertilisation organique.

3.1 Les engrais minéraux

Les engrais minéraux peuvent être simples ou composés de plusieurs éléments. Ils peuvent se présenter sous forme solide, liquide ou gazeuse et avoir une action immédiate ou progressive. Selon la NF U42-001 (AFNOR, 2004), la teneur d'au moins un ces trois éléments (N, P₂O₅ et K₂O) doit être égale ou supérieure à 3%.

L'industrie utilise différents procédés pour isoler les éléments fertilisants majeurs (Moughli, 2000) :

- l'azote de l'atmosphère est fixé chimiquement pour former de l'ammoniac, qui est ensuite combiné avec d'autres produits pour donner des engrais azotés ;

- Le phosphate est prélevé à partir de roches phosphatées qui sont extraites de carrières ;

- Le potassium quant à lui provient de dépôts marins ou souterrains de mélange de KCl et NaCl voire MgCl₂

En plus des éléments N, P et K, on peut trouver dans les engrais minéraux d'autres éléments, notamment des oligoéléments.

Les molécules utilisées sont relativement peu nombreuses et leur chimie est bien connue, ce qui permet de réaliser des mélanges précis aux propriétés correctement maîtrisées. Les entreprises productrices de supports de culture peuvent ainsi utiliser une grande variété d'engrais minéraux (Osmocote, PG mix...), adaptés selon les besoins des cultures et les composants du substrat.

3.2 Les engrais organiques

Les engrais organiques sont des engrais « dont la totalité des éléments fertilisants a une origine animale ou végétale » (AFNOR, 2004). Les matières fertilisantes, souvent des déchets d'industries, ont des origines très variées : sang séché, vinasses, tourteaux, fumiers, cuir et fourrures, guano, plumes, poudre de cornes... Les molécules mises à disposition des plantes sont naturellement elles aussi bien plus variées que dans le cas des engrais minéraux. L'offre est étendue et les nombreuses matières premières permettent de confectionner une large gamme de mélanges, c'est pourquoi les fertilisants organiques se distinguent de leurs analogues minéraux par une exceptionnelle complexité.

Il faut noter qu'une troisième catégorie de fertilisants peut être isolée : en mélangeant des matières d'origines minérale et organique, on obtient un engrais de type organo-minéral dont les propriétés seront dépendantes des deux types de fertilisants.

Pour essayer de comprendre l'origine des dysfonctionnements possibles liés à la fertilisation organique, il faut envisager les conséquences de la différence entre engrais organique et engrais minéral au niveau du support de culture dans son ensemble.

4 Les problèmes liés à la fertilisation organique

La fertilisation organique a de nombreux avantages ; outre sa durabilité, elle permettrait d'obtenir par exemple des tomates au goût plus agréable (Heeb et al., 2005). Cependant, nous allons voir que ces mêmes fertilisants organiques peuvent être sources de problèmes.

Si on part du principe que les problèmes à l'origine des réclamations concernant les substrats fertilisés organiquement ont pour origine le comportement des terreaux eux-mêmes et non des mauvaises conditions de culture, il faut chercher les défaillances du côté des rôles normalement assurés par le terreau (§2) :

- **Innocuité** : l'apport d'organismes phytopathogènes par les types de fertilisants organiques alors utilisés par l'entreprise n'a jamais été signalé, il est donc peu probable qu'un tel apport soit à l'origine des manquements agronomiques rapportés
- **Biostabilité** : la biostabilité est fortement liée aux composants du mélange de base du terreau, il est peu probable que l'ajout de fertilisants organiques la modifie.
- **Fertilité chimique** : Le pH, la CEC et la conductivité des supports de culture sont contrôlés avant commercialisation et ainsi maîtrisés, reste la disponibilité en éléments nutritifs. concernant ce point particulier, il faut noter que les engrais organiques et les engrais minéraux apportent des éléments minéraux sous des formes différentes. Cette différence est au cœur de ce qui distingue un terreau à fertilisation organique d'un terreau à fertilisation minérale : les éléments nutritifs apportés par les engrais organiques ont besoin d'être minéralisés pour être biodisponibles. Les qualités chimiques d'un support de culture peuvent donc être diminuées par une défaillance de la minéralisation de ceux-ci. La minéralisation des éléments nutritifs est assurée par certains types de microorganismes, la présence même de ceux-ci dans le support de culture fait donc partie des qualités du support. Ainsi une « qualité biologique » du substrat est nécessaire à sa qualité chimique dans le cadre de la fertilisation organique.
- **Fertilité physique** : les propriétés physiques d'un substrat sont principalement liées aux matériaux qui le composent en majeure partie : tourbe, écorces, fibres de bois... L'engrais utilisé a peu de chance de jouer un rôle dans la définition et l'évolution de ces paramètres bien que ceux-ci aient par ailleurs un rôle important dans la fertilité du substrat.

Une diminution de la fertilité chimique par l'intermédiaire de la minéralisation des éléments nutritifs paraît être le candidat le plus sérieux pour expliquer les problèmes liés aux terreaux fertilisés organiquement. Nous allons donc pour la première fois resserrer le champ de notre étude en nous limitant à l'étude des qualités chimiques des terreaux UAB.

Intéressons-nous maintenant à la minéralisation des éléments nutritifs dans le substrat. Pour ce faire, nous allons nous appuyer sur des recherches déjà effectuées, en nous plaçant, le plus souvent possible, dans le cadre d'essais réalisés sur des substrats hors sols et non en pleine terre.

La minéralisation des éléments nutritifs est une étape essentielle pour permettre la nutrition de la plante. Comme le précisait Lemaire et al. dans la citation qui entame le chapitre sur les supports de cultures, les éléments minéraux doivent être présents « sous des formes qui sont ou deviendront assimilables ». Plus encore que l'assimilabilité, le facteur primordial pour la nutrition de la plante est la biodisponibilité. La biodisponibilité des nutriments est assurée par :

- La solubilité des nutriments
- Une concentration suffisante de ceux-ci
- La mobilité des nutriments

S'il est relativement aisé de s'assurer que les formes chimiques des minéraux Ca, Mg et K remplissent ces trois critères dans un substrat, il n'en va pas de même pour les éléments N, P et S. Les éléments minéraux N, P et S sont en effet (sauf exception) sous forme de molécules plus ou moins complexes dans la matière organique. Après dégradation de la matière organique, ils seront rapidement transformés par les microorganismes jusqu'à leur forme la plus oxydée : nitrate (NO_3^-), phosphate (HPO_4^{2-}) et sulfate (SO_4^{2-}), et c'est sous cette forme qu'ils sont les plus mobiles et qu'ils seront généralement absorbés. Des formes intermédiaires solubles peuvent être assimilées, comme par exemple les Acides Aminés ou NH_4^+ pour l'azote (Paungfoo-Lonhienne et al., 2012), mais seulement si la proximité avec la plante est suffisante, en conditions normales elles auront en effet toutes les chances d'être oxydées avant d'arriver aux racines. L'oxydation des éléments N, P et S est ainsi nécessaire pour assurer leur biodisponibilité, ce processus d'oxydation est appelé minéralisation.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à la minéralisation de l'azote, premier nutriment du sol en termes de consommation par la plante et une des clefs de la productivité de celle-ci (Martinez-Andujar et al., 2013). Nous resserrons ainsi une seconde fois notre champ d'étude : les qualités chimiques du substrat seront caractérisées principalement par l'intermédiaire d'un seul élément : l'azote.

4.1 Le processus de minéralisation de l'azote

La minéralisation de l'azote se fait selon les étapes suivantes :

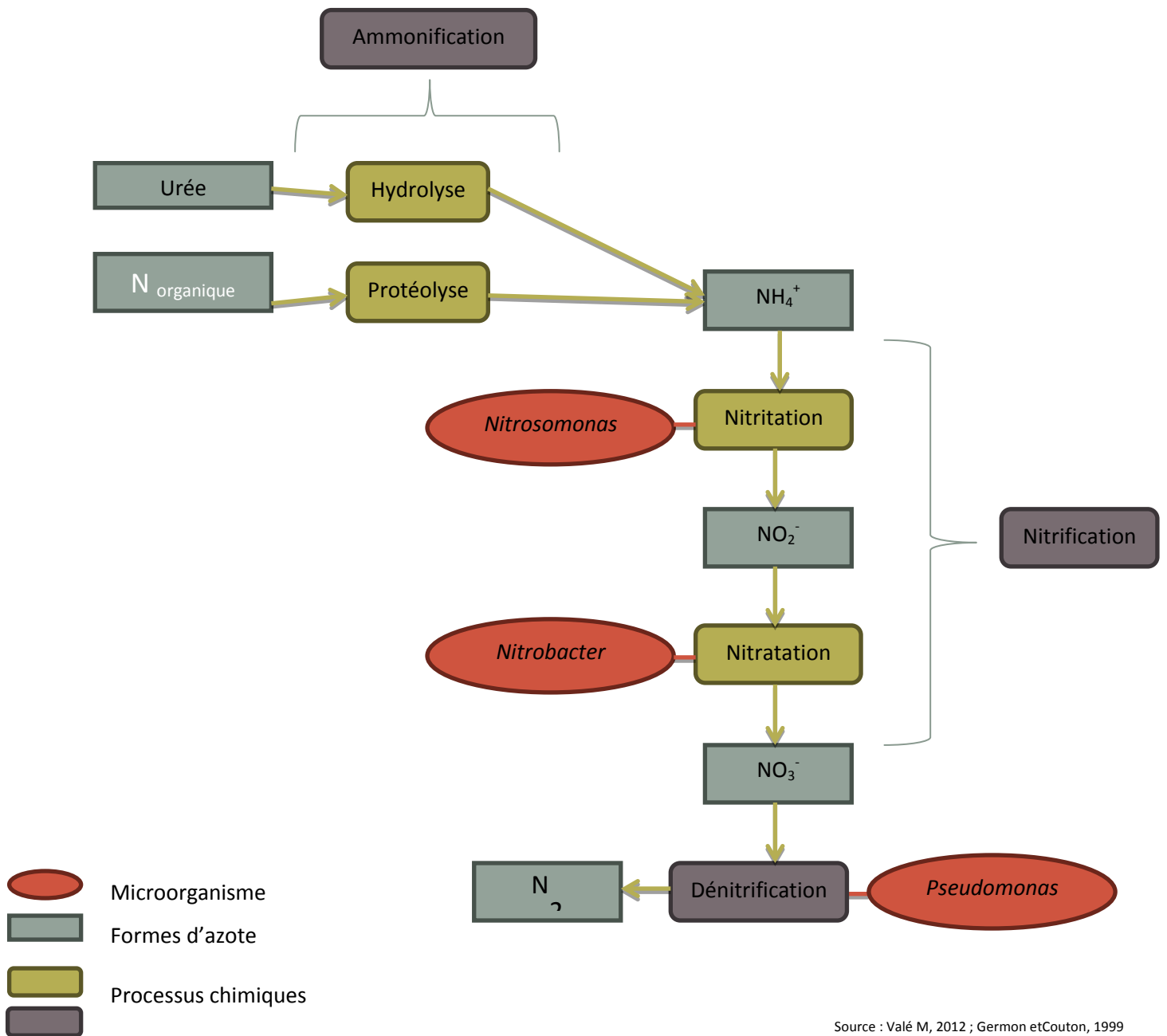


Figure 1 : La minéralisation de l'azote

Les différentes réactions chimiques qui conduisent des formes non disponibles de l'azote aux formes biodisponibles sont assurées par des microorganismes. Or la présence et le

développement des microorganismes sont tributaires de nombreuses conditions du milieu. C'est pourquoi la minéralisation de l'azote, qui permet la nutrition des plantes et donc leur croissance, est dépendante de nombreuses grandeurs telles que la température, l'humidité, l'oxygénation du milieu, et de manière générale toutes les composantes indispensables à la vie des microorganismes.

Dans un souci de clarté, nous diviserons à compter de maintenant la chaîne de réactions chimiques qui mène de l'azote organique au N_2 en trois parties :

- La première partie que nous appellerons ammonification désignera les réactions qui permettent le passage de l'azote organique au NH_4^+ (protéolyse et hydrolyse). Cette étape est réalisée par des bactéries autotrophes et des champignons présents dans le substrat (Sierra Augustinus, 2007).
- La deuxième partie que nous appellerons nitrification désignera les réactions qui permettent le passage de NH_4^+ à NO_3^- (nitritation et nitratisation). Cette étape est réalisée par les bactéries *Nitrosomonas* puis *Nitrobacter* elles aussi présentes dans le support de culture. (Sierra Augustinus, 2007)
- La troisième partie que nous appellerons dénitrification désignera les réactions qui permettent le passage de NO_3^- à N_2 (en passant par les composés intermédiaires NO_2^- , NO , N_2O). Cette étape est réalisée par différentes bactéries dont la plupart sont du genre *Pseudomonas*. (Germon & Couton, 1999)

Lemaire et al., notent en 1989 que « La somme des éléments prélevés par la plante augmente pendant tout ou partie de sa vie végétative, mais avec des intensités variables pour chacun d'eux en fonction des stades de développement et de la croissance ; les exigences diffèrent selon les espèces et la destination des cultures . » Ceci implique que la minéralisation de l'azote devra avoir lieu au bon moment pour pouvoir fournir à la plante assez de nutriments aux périodes où elle en a le plus besoin. Si minéralisation et croissance n'ont pas lieu aux moments opportuns, des problèmes de nutrition pourront survenir et provoquer pourquoi pas des accidents de croissance ou de germination.

Pour comprendre l'origine d'une perturbation de la minéralisation de l'azote, nous allons faire l'inventaire de toutes les grandeurs qui peuvent avoir un impact sur la vie des microorganismes et donc sur les transformations chimiques qu'ils assurent.

4.2 Les paramètres qui influencent la minéralisation de l'azote

4.2.1 paramètres liées au couple engrais/substrat

De manière générale, beaucoup de variables essentielles pour la minéralisation dépendent de la formulation, au sens large, du support de culture. On y retrouve des variables liées à la définition même d'un couple engrais/substrat ainsi que des variables aux propriétés des matières composant le support.

L'humification des composants du substrat

Terhoeven-Urselmans et al. (2007) notent dans une étude sur l'effet de la température sur la minéralisation de l'azote que la température critique (à partir de laquelle la nitrification est inhibée) dépend de la formulation du support : dans un support composé de matières peu humifiées, le ratio $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ augmente dès 45°C tandis qu'une température de 60°C est nécessaire pour faire augmenter ce même ratio dans un support plus humifié.

Carlile(2004) indique également que les polymères présents dans les substrats peuvent avoir un effet sur la minéralisation des composants du substrat lui-même : les substrats riches en cellulose et hémicellulose (écorces, fibres de bois...) seront dégradés plus rapidement, or la richesse en carbone de ces polymères peut obliger les microorganismes qui les dégradent à prélever des nutriments azotés dans le milieu pour assurer la synthèse des molécules nécessaires à leur survie. Il s'agit ici de la minéralisation des composants du substrat et non des molécules apportées par l'engrais, nous sommes donc à la limite de notre problématique, pourtant il est utile de considérer ces dynamiques pour avoir une idée globale des mécanismes à l'œuvre dans un substrat. La tourbe est un matériau riche en lignine et peu sujet à une dégradation rapide par les microorganismes.

La présence de microorganismes

Si les microorganismes sont responsables de la minéralisation, il est logique que leur présence soit indispensable à celle-ci. Ainsi Carlile (2004) observant une accumulation de NH_4^+ dans un terreau pendant son stockage avance que cette concentration est due au caractère inerte du terreau stocké.

L'engrais utilisé

Matériau ajouté au substrat pour augmenter sa fertilité chimique, l'engrais a bien entendu lui aussi une influence importante sur la minéralisation de l'azote. Le type d'engrais utilisé (guano, vinasses, compost de plumes...) détermine la nature des molécules azotées présentes dans le support et donc les cinétiques de minéralisation qu'elles devront subir. Kelderer et al. (2008) ont ainsi mesuré les cinétiques de minéralisation de différentes matières fertilisantes dans des échantillons de terre à 8°C ; leurs résultats montrent que le taux de minéralisation de N chez certains fertilisants organiques à 14 jours peut être équivalent à celui d'engrais minéraux quand d'autres types d'engrais organiques ne permettent d'atteindre que 5% de cette valeur.

De plus, les effets des deux composantes du substrat (support et engrais) se conjuguent pour donner des résultats différents pour chaque couple. La multiplicité des mélanges (tourbe, écorces, fibres de bois...) rend la prédiction du comportement de l'engrais très difficile, c'est

pourquoi il est préférable de choisir comme unité de raisonnement le couple engrais/support (Valé M., 2012).

Le pH

Le pH influence la solubilité des micros et macroéléments ainsi que la capacité des plantes à les assimiler. Il a également un effet sur la présence de certaines communautés microbiennes –et donc sur la minéralisation- car ces communautés ont des pH de croissance optimale différents. (Sierra Augustinus, 2007).

M.Valé (2012) affirme que la nitrification est fortement limitée en-dessous de pH 5,5. Ainsi une étude montre qu'augmenter le pH au-dessus de 5,5 enrichit le substrat à base d'écorces de pin en NO_3^- (Niemiera & Wright, 1986), de la même façon, Lang & Elliot (1991) ont observé que la nitrification dans un substrat à base de tourbe était insignifiante pour un pH inférieur à 5.6.

La disponibilité en O₂

Chaque microorganisme prenant part à la minéralisation de l'azote possède une tolérance à l'anoxie. Les microorganismes responsable de la dénitrification peuvent par exemple survivre avec très peu voire aucun dioxygène tandis que ceux qui sont responsables de la nitrification sont sensibles à l'anoxie. Ainsi Abril et al. (2001) suggèrent que l'altération des processus aérobie dans un extrait de sol placé à l'intérieur d'un cylindre clos pourrait expliquer les abondances des différentes formes d'azote mesurées après une période d'incubation.

La salinité (conductivité)

La salinité d'un support de culture est donnée en mesurant sa conductivité. La salinité optimale pour la croissance des végétaux en supports de culture se situe entre 1.00 et 1.76 mS.cm-1 (Maynard & Hochmuth, 1997).

Cependant la salinité peut également être toxique pour les microorganismes et les réactions enzymatiques desquelles leur vie dépend. Irshad et al. (2005) ont démontré que la salinité (concentration en minéraux) du substrat inhibe d'avantage la nitrification que l'ammonification de l'azote. Ainsi, après 8 semaines, la libération de NO_3^- à 0.2 mS.cm-1 est 265% plus importante qu'à 11.5 mS.cm-1. Ceci est confirmé par Inubushi et al (1999) qui ont prouvé qu'une conductivité supérieure à 1mS.cm-1 inhibe la nitrification alors qu'il faut une conductivité de 2dS.m-1 pour inhiber l'activité de l'uréase.

4.2.2 paramètres liées au milieu

La température

La température optimale pour la nitrification se situe entre 25°C et 35°C (Sierra Augustinus, 2007), bien qu'elle puisse avoir lieu pour une large gamme de températures. La nitrification est généralement réduite au-dessus de 40°C et en-dessous de 5°C (Havlin et al., 2004). En réalité, l'effet de la température sur la nitrification est plus complexe, comme le montrent certaines études :

Walden & Wright (1995) ont réalisé une expérience sur un substrat à base d'écorces de pin avec des températures différentes et des durées d'expositions par jour différentes créées pour simuler des conditions rencontrées au sud des Etats Unis. Une solution de NH_4^+ est apportée régulièrement pour simuler la nitrification d'un engrais plus complexe. Cette étude démontre grâce à la mesure du ratio $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$ qu'une exposition de 1 heure à 52°C inhibe complètement la nitrification mais que l'effet d'une exposition à 46°C dépend du temps d'exposition. Cette étude, comme la plupart des études sur le sujet, a été réalisée sur des substrats en conditions de culture sous serre. Un autre type d'études réalisées sur le stockage du terreau permettent de caractériser l'effet de la température lorsque celui-ci est associé à l'anoxie présente à l'intérieur d'un sac de terreau stocké :

Terhoeven-Urselmans et al., (2007) ont réalisé une expérience sur des supports de culture tourbeux différents stockés 2 semaines en absence d'oxygène à des températures différentes. Les concentrations en NH_4^+ n'augmentent avec la température que pour un seul des 4 mélanges créés. On observe en revanche une diminution de la concentration en NO_3^- avec la température chez l'ensemble des mélanges, certainement successive à un blocage de la nitrification de N mais non de la dénitrification. Si la concentration en NH_4^+ ne diminue pas, il est normal de constater que le ratio $\text{NH}_4^+ : \text{NH}_3$ diminue également avec la température.

Les engrais organiques peuvent offrir un comportement spécifique en réaction à la chaleur : une culture réalisée sous des températures élevées peut conduire chez des terreaux fertilisés à l'aide de matière organique à une libération importante de NH_4^+ en début de culture. (Bresch, 2012). La concentration diminue par la suite au profit d'une présence supérieure des nitrates.

L'humidité

L'activité microbienne maximale a habituellement lieu pour des humidités volumiques comprises entre 50 et 70% de la capacité de rétention en eau d'un sol (Linn and Doran, 1984). Les substrats contenant des microorganismes semblables, la minéralisation dans un support de culture sera elle aussi maximale pour des humidités volumiques autour de 60%. Ainsi la concentration en NO_3^- dans un substrat durant 24 semaines de stockage est stable lorsque ce substrat possède une humidité volumique de 25% alors qu'elle augmente brusquement à la 8^{ème} semaine quand le même substrat possède une humidité volumique de 55% (Gagnon et al., 1993).

4.2.3 Le Temps

La vie des microorganismes et les processus chimiques qu'ils utilisent ayant des vitesses différentes, tous les paramètres mentionnés plus haut n'auront d'effet sur la minéralisation que si les conditions non favorables sont maintenues suffisamment longtemps.

Nous nous intéressons de plus à des terreaux vendus pour le marché amateur, or les jardiniers occasionnels n'utilisent les supports de culture que ponctuellement sur de longues périodes de temps, potentiellement jusqu'à un an (Carlile, 2004), ils sont donc stockés le reste du temps. Entre les différentes utilisations, le terreau sera ainsi stocké, ce qui laissera aux conditions du milieu le temps nécessaire pour avoir un effet marqué sur les cinétiques de minéralisation de l'azote par l'intermédiaire de la vie des microorganismes.

De nombreux paramètres peuvent ainsi influencer les dynamiques de la minéralisation de l'azote. Intéressons-nous maintenant à la racine du problème : les conséquences pour la plante des altérations possibles des processus de minéralisation par les variables mentionnées précédemment.

4.3 Conséquences pour la plante

Pour résumer les conséquences possibles d'une inhibition de la minéralisation au niveau de la plante, considérons le schéma simplifié suivant :

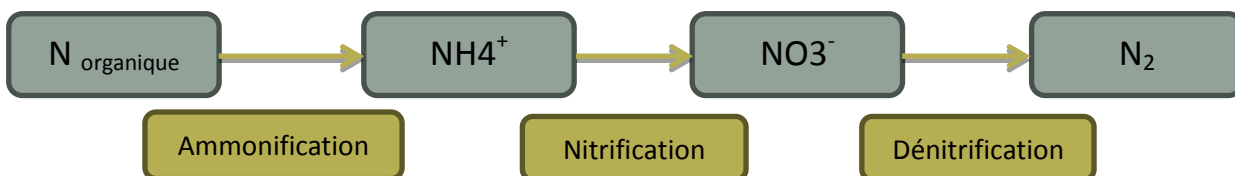


Figure 2 Schéma simplifié de la minéralisation de l'azote

Lors de chaque étape de la minéralisation, des microorganismes différents assurent les réactions chimiques qui vont mener d'une forme azotée à la suivante. Or ces microorganismes possèdent des conditions biologiques optimales différentes (température, pH, salinité, disponibilité en O₂...). Ainsi selon les valeurs prises par les grandeurs influentes pour les microorganismes énumérées précédemment, certaines réactions pourront être inhibées et d'autres moins, menant à l'accumulation et/ou à la raréfaction de certains composés.

4.3.1 Exemple de raréfaction d'un composé : le NO₃⁻

C'est par exemple le cas en conditions d'anoxie : le manque de dioxygène est extrêmement néfaste pour les populations de microorganismes responsables de la nitrification mais il n'a en revanche aucun effet sur les populations responsables de la dénitrification. De ce fait, la

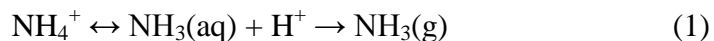
concentration en nitrates dans un substrat en conditions d'anoxie a tendance à diminuer avec le temps (Abril et al., 2001). Cette raréfaction peut avoir des conséquences néfastes sur une plante cultivée dans ce substrat dans la mesure où l'azote est un composé essentiel à la plante et qu'il est en majorité assimilé sous forme de nitrate. Il convient également de remarquer qu'une raréfaction des nitrates par blocage spécifique de la nitrification augmentera la concentration du milieu en NH_4^+ même si l'ammonification est elle aussi ralentie en conditions d'anoxies. L'exemple précédent peut ainsi également être considéré comme une accumulation de composé ; le ratio $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$ est ainsi un bon estimateur de l'état du système dans ce genre de situations.

4.3.2 Exemples d'accumulation de composés : le NH_4^+ et le NO_2^-

L'accumulation de composés azotés ne poserait aucun problème si certains d'entre eux n'étaient pas toxiques pour la plante.

C'est par exemple le cas de NH_4^+ : ce composé paradoxal est une importante source d'azote assimilable pour la plante mais peut lui être toxique s'il est trop abondant dans le milieu, généralement pour des concentrations de 0.1 – 0.5 mmol/L (Britto&Kronzucker,2002). Or certaines conditions comme des pH ou températures trop bas peuvent d'avantage inhiber les microorganismes responsables de la nitrification que ceux qui assurent l'ammonification(Britto&Kronzucker, 2002). Ceci peut aboutir à une concentration du milieu en NH_4^+ , celui-ci devient alors toxique pour la plante et peut provoquer différents symptômes dont les plus fréquents sont la chlorose, une réduction générale de la croissance, une diminution du rendement, une diminution du ration racine/tige ou une absence de germination (Horchani et al., 2011). La faible présence voire l'absence des microorganismes responsables de la nitrification dans un substrat peut aboutir à une accumulation similaire de NH_4^+ (Valé, 2012).Les symptômes d'une phytotoxicité de NH_4^+ pourraient ainsi correspondre aux observations faites dans les réclamations concernant les terreaux UAB.

D'autres conditions encore peuvent provoquer des phénomènes d'inhibition sélective de microorganismes et aboutir à l'accumulation de composés intermédiaires. Si par exemple le pH d'un sol est élevé (supérieur à 7), une volatilisation importante de NH_3 peut avoir lieu selon l'équilibre suivant :



Or les pH élevés et la présence de NH_3 sont deux conditions particulièrement inhibitrices pour *Nitrobacter*, bactérie responsable de la transformation de NO_2^- en NO_3^- , il est donc logique d'observer dans ce cas une accumulation de NO_2^- , composé notoirement toxique lui aussi pour la germination et la plante elle-même (Schumann &Sumner, 1998).

4.4 Vue d'ensemble : plantes et microorganismes

Parmi les grandeurs que nous avons notées comme ayant un effet sur la minéralisation, nous retrouvons des grandeurs qui ont un effet direct sur la croissance des plantes. Ainsi les valeurs prises par ces grandeurs pourront affecter la croissance des plantes soit directement soit indirectement par l'intermédiaire de la minéralisation :

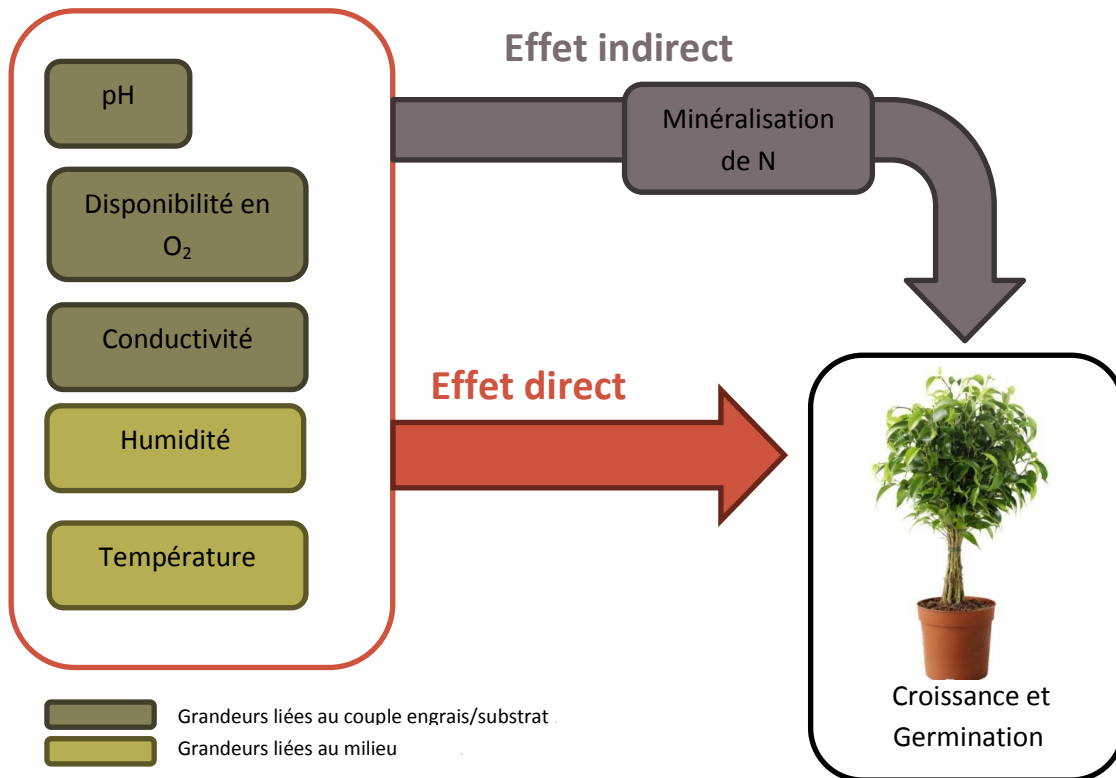


Figure 3 Effets direct et indirect sur la croissance et la germination de la plante

Pour avoir un effet direct positif sur la croissance, les grandeurs devront se trouver dans une fourchette de valeurs favorable à la plante. Pour avoir un effet indirect positif en revanche, ces mêmes grandeurs devront se trouver dans une fourchette de valeurs favorables aux microorganismes. Cette dichotomie rendra difficile la prévision du comportement d'un terreau en culture, elle est au cœur de la complexité de la fertilisation organique. Un effet d'interférence pourrait même être isolé si on considère que la présence d'une plante peut avoir un effet sur la quantité de bactéries responsables de la nitrification qui se trouvent dans le pot où elle est cultivée. Herlihy (1972) affirme ainsi que la concentration d'un substrat en bactéries nitrifiantes peut augmenter 1000 fois à la suite d'une culture réalisée dans ce substrat. Cet effet supplémentaire éventuel ajoute encore à la complexité des interactions entre plantes et microorganismes autour des dynamiques de minéralisation.

En plus de l'existence de communautés de microorganismes et de la présence de conditions favorables à leur développement, il faut enfin rappeler que les nutriments azotés ne seront présents en quantité suffisantes que s'ils ne sont pas prélevés par les microorganismes pour leur consommation propre (§4.2.1).

La minéralisation dans un substrat est ainsi un processus complexe. Avant de mettre en place des expériences pour mesurer l'influence de paramètres sur ce processus, il est nécessaire de considérer la spécificité des supports de culture hors-sol par rapport au milieu le plus fréquemment étudié dans la littérature : le sol lui-même.

5 Particularités des substrats

La grande majorité des études sur la minéralisation de l'azote ont été réalisées sur des échantillons de terre ou en plein champ. Bien que cela ne remette pas en question les tendances générales exposées dans la partie précédente, il est nécessaire d'identifier ce qui différencie un substrat vendu en sac d'un sol. Les supports de culture sont différents des sols en plusieurs endroits :

-Ils sont relativement inertes (Valé, 2012).

-Ils peuvent avoir des pH très acides (Valé, 2012).

-Ils sont soumis à de fortes variations de températures et d'humidité (gestion de l'irrigation) (Valé, 2012).

-Ils sont très riches en matière organique (plus de 60%). Ceci peut avoir des conséquences notables notamment sur l'immobilisation de l'azote en début de culture (§4.2.1). Il est à noter que ce phénomène entre en contradiction avec l'état supposé « relativement inerte » des terreaux.

Ces remarques laissent sous-entendre que les processus chimiques dans les substrats pourraient être plus violents que dans le sol. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces différences lors de la lecture des travaux déjà effectués, de la planification et de l'interprétation des expériences futures.

6 Problématique de travail et hypothèses posées

La problématique globale était la suivante : « Comment se comportent les substrats fertilisés à l'aide de matières organiques ? ». Cependant après réflexion nous avons décidé de nous limiter à la problématique qui suit : « Comment la variation de certains paramètres influence-t-elle l'évolution des propriétés chimiques (et notamment la minéralisation de l'azote) au sein d'un substrat ? ».

Dans un souci d'application, les « paramètres » dont la variation sera étudiée auront pour point commun d'être des leviers d'action potentiels pour l'entreprise : dans l'intérêt d'une société commerciale, il n'est intéressant d'identifier la cause d'un dysfonctionnement que si on peut agir sur cette cause pour lever le problème. Nous avons déjà énuméré la liste des paramètres qui peuvent influencer les deux processus que nous avons choisis (§4.1 & §4.2),

nous avons séparé ces paramètres en deux catégories : les paramètres liés au couple engrais/substrat et les paramètres liés au milieu. Seuls les paramètres de la première catégorie sont modifiables par un industriel. Parmi ceux-ci figurent le pH et le temps de stockage.

Le travail sera ainsi axé sur 2 problématiques liées à la fertilisation organique. Le but sera de créer pour ces expériences des conditions qui se rapprochent le plus possible des conditions dans lesquelles les terreaux se retrouvent en réalité, de la fabrication à l'utilisation par le particulier. Une troisième expérience concernant le comportement de différents couples engrais/substrat a également été menée mais les résultats ne seront pas exposés ici faute de place.

6.1 Le pH des substrats stockés

Le pH optimal pour la croissance des végétaux est généralement situé entre 5.5 et 6.8 (Maynard & Hochmuth, 1997), or la minéralisation peut se trouver inhibée à des pH trop faibles, notamment durant le stockage du terreau. Le stockage de terreaux à pH différents implique l'action conjuguée du pH et de conditions d'anoxie. Il serait intéressant d'évaluer l'impact du pH initial d'un terreau sur son évolution pendant le stockage et sur le comportement de plantes cultivées dans celui-ci à l'issue du stockage pour pouvoir s'assurer de la validité des fourchettes actuellement considérées comme acceptables par l'entreprise. Quel sera l'effet d'un stockage sur des terreaux aux pH initiaux différents? Quelles seront les conséquences sur la minéralisation de l'azote et sur plantes cultivées dans ces terreaux à l'issue du stockage? Est-il possible de lier le comportement de la plante aux dynamiques de minéralisation de l'azote dans le substrat? Faut-il adapter les spécifications de pH pour les terreaux à fertilisation organique?

Hypothèse : Le pH du substrat peut inhiber certaines étapes de la minéralisation de l'azote à lors du stockage de celui-ci. Cette inhibition pourra avoir des conséquences néfastes sur la croissance des plantes cultivées dans ce substrat.

6.2 Le stockage sous forme de palette

Le stockage sous forme de palette est une étape incontournable dans la production puis la commercialisation des supports de culture destinés aux particuliers. Les conditions dans lesquelles le terreau peut se trouver pendant ce stockage impliquent une faible disponibilité en oxygène et des variations de température, le tout pendant des périodes de temps parfois étendues. L'action conjointe de la modification de ces paramètres du milieu peut aboutir à la modification des processus de minéralisation de l'azote à l'intérieur des sacs. Comment évolue la minéralisation de l'azote à l'intérieur de ces sacs? Quelles en seront les conséquences pour des plantes cultivées dans ces terreaux à l'issue du stockage? Est-il possible de lier le comportement de la plante aux dynamiques de minéralisation de l'azote dans le substrat?

Hypothèse : Le stockage des sacs sous forme de palettes peut entraîner une inhibition de certaines étapes de la minéralisation de l'azote à l'intérieur des sacs. Cette inhibition pourra avoir des conséquences néfastes sur la croissance des plantes cultivées dans ce substrat.

Le mémoire sera ainsi séparé en deux parties, la première comprendra l'expérience portant sur le pH des substrats stockés, la seconde comprendra l'expérience sur le stockage sous forme de palette. Chaque partie sera séparée en 3 sous-parties : matériel et méthodes, résultats et discussion.

Le pH des substrats stockés

1 Matériel et méthodes

Nous réaliserons tout d'abord une gamme de pH sur un mélange 50% tourbe blonde, 50% tourbe brune en ajoutant différentes quantités de dolomie. La gamme sera ainsi composée de 4 substrats à pH croissants : pH 5 ; pH 5.5 ; pH 6 et pH 6.5. Une gamme sera fertilisée à l'aide d'un engrais minéral NPK 19-10-10 à 0.7kg/m^3 et une autre à l'aide d'un engrais organique Guanito (Italpollina) 6-15-3 à 3kg/m^3 . Trois modalités de stockage seront ensuite appliquées à ces gammes de substrats :

- Aucun stockage : les gammes sont utilisées directement après préparation. Le but de ce test est de pouvoir différencier l'effet direct de l'effet indirect (voir §4.2.4) du pH sur la plante.
- Stockage de 3 semaines dans un sac clos
- Stockage de 3 semaines dans un sac clos contenant une poignée de fumier de cheval composté. Le fumier de cheval composté est qualifié de « ferment » car il représente un inoculum de microorganismes apporté au mélange de tourbe relativement inerte. Le but de ce test est de tenter d'observer l'effet d'un ajout de microorganismes sur la minéralisation à l'intérieur d'un substrat.

Pour tenter de quantifier l'effet que les différents traitements auront eu sur la minéralisation de l'azote, nous utiliserons les terreaux traités pour des tests de germination sur tomate et cresson alénois à l'intérieur d'une chambre de germination close. Dans le cas de la tomate, 3 graines seront plantées par pot ; le nombre de graines germées sera compté le 7^{ème} puis au 14^{ème} jour après plantation ; les plantes seront cultivées pendant 30 jours puis mesurées, coupées au niveau du collet et pesées pour chaque modalité. En ce qui concerne le cresson, 20

graines seront plantées par pot ; le nombre de graines germées sera compté au 2^{ème} puis au 7^{ème} jour après plantation ; les plantes seront cultivées pendant 7 jours puis coupées au niveau du collet et pesées pour chaque modalité.

Chaque traitement représente ainsi un vecteur (type de stockage, type de plante, fertilisation, pH) et correspond dans la réalité à un pot de 1L dans lequel sont semées les graines. Le tableau suivant décrit l'agencement des traitements pour les essais sur cresson (Un tableau identique pourrait être dessiné pour la tomate) :

Tableau 1 : Les différents traitements du test réalisé sur cresson

| Type de plante | Type de stockage | fertilisation | pH | | |
|------------------------|------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Cresson | Aucun stockage | Organique | 5 | Test en chambre n°1 | |
| | | | 5.5 | | |
| | | | 6 | | |
| | | | 6.5 | | |
| | | Minérale | 5 | | |
| | | | 5.5 | | |
| | 6 | | | | |
| | 6.5 | | | | |
| | Stockage de 3 semaines | Organique | 5 | | Test en chambre n°2 |
| | | | 5.5 | | |
| | | | 6 | | |
| | | | 6.5 | | |
| Minérale | | 5 | | | |
| | | 5.5 | | | |
| | | 6 | | | |
| | | 6.5 | | | |
| Stockage de 3 semaines | Organique | 5 | Test en chambre n°3 | | |
| | | 5.5 | | | |
| | | 6 | | | |
| | | 6.5 | | | |
| | Minérale | 5 | | | |
| | | 5.5 | | | |
| | | 6 | | | |
| | | 6.5 | | | |

Pour chaque couple (type de stockage ; type de plante), soit 6 modalités, un test en chambre de germination sera réalisé qui comprendra 3 répétitions (3 pots, donc) des 8 traitements concernés ainsi que 3 répétitions d'un terreau témoin Fertiligène® (terreau semis

conventionnel, référence du marché) qui définira le taux maximal de germination pour la session. Nous considérerons qu'aucun gradient d'hétérogénéité ne se trouve à l'intérieur de la chambre de germination, les pots seront donc disposés selon un dispositif entièrement randomisé à 3 répétitions :

Tableau 2 : disposition des pots dans la chambre de germination

| | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
| O6 | M5 | T | M6 | O6,5 | M5 | T | M5,5 | M6,5 |
| O5,5 | M6 | M5,5 | O5 | O5,5 | O6,5 | | | |
| M6,5 | O6,5 | O5 | O5,5 | M5 | M5,5 | | | |
| O5 | O6 | O6 | T | M6 | M6,5 | | | |
| barquette 1 | | | barquette 2 | | | barquette 3 | | |
| Chambre de germination | | | | | | | | |

Chaque case correspond à un traitement et donc à un pot de 1L ; M = fertilisation Minérale ; O = fertilisation Organique ; les chiffres sont les pH des substrats ; T= Témoin

Les plantes seront arrosées par sub-irrigation lors de la mise en place du test. La température sera enregistrée à l'intérieur de la pièce contenant la chambre de germination tout au long de l'expérience et l'humidité des terreaux sera mesurée pour chaque série de mélanges. La conductivité et le pH de chaque mélange seront mesurés sur extrait aqueux (dilution de 1/1.5 à l'aide d'eau distillée) avant la mise en place dans la chambre.

Traitement statistique

Les traitements statistiques des données seront effectués à l'aide du logiciel R version 3.0.1 (R Core Team, 2013).

2 Résultats

L'exposé des résultats se divisera en 2 parties, la première concernera les tests sur cresson et la seconde les tests sur tomates. Dans les 2 parties, les graphes posséderont la même mise en forme ; les modalités de fertilisation suivront le code de couleurs suivant :

| |
|---|
| Fertilisation minérale (0.7 kg/m ³ 19-10-10) |
| Fertilisation organique (3 kg/m ³ Guanito) |
| Témoin |

L'humidité massique ainsi que les températures moyenne, minimale et maximale dans la pièce durant le stockage du terreau seront précisées pour chaque test. La conductivité en revanche ne sera pas indiquée pour chaque mélange car les valeurs mesurées se sont révélées homogènes et favorables à la croissance et à la germination (Annexe I).

1^{ère} partie : test sur cresson

Les analyses de variance (ANOVA) réalisées pour les différents sur cresson tests n'ont jamais signalé un effet significatif du Ph du terreau sur la germination ou la masse fraîche, c'est pourquoi je ne le préciserai pas lors de chaque test (Annexe II). Les résultats des différentes modalités de pH seront tout de même discutés et comparés aux résultats issus de la bibliographie. La mesure de la masse fraîche des différents pots à l'issue des 7 jours de culture n'apport pas d'information supplémentaires, c'est pourquoi les graphes en question ne seront pas inclus dans la partie résultats. Ils sont cependant disponibles en annexe (Annexe III).

Premier test : pas de stockage du terreau

Comme mentionné précédemment, l'objectif de ce test est d'observer l'effet direct que les différents pH des terreaux préparés pourront avoir sur la croissance et la germination du cresson.

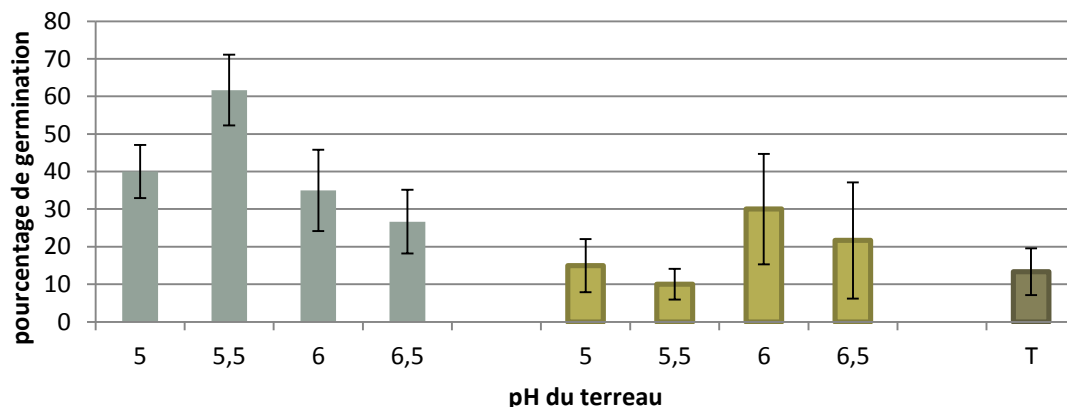


Figure 4 : cresson : germination à 2 jours, pas de stockage du terreau ; humidité massique des terreaux =59%

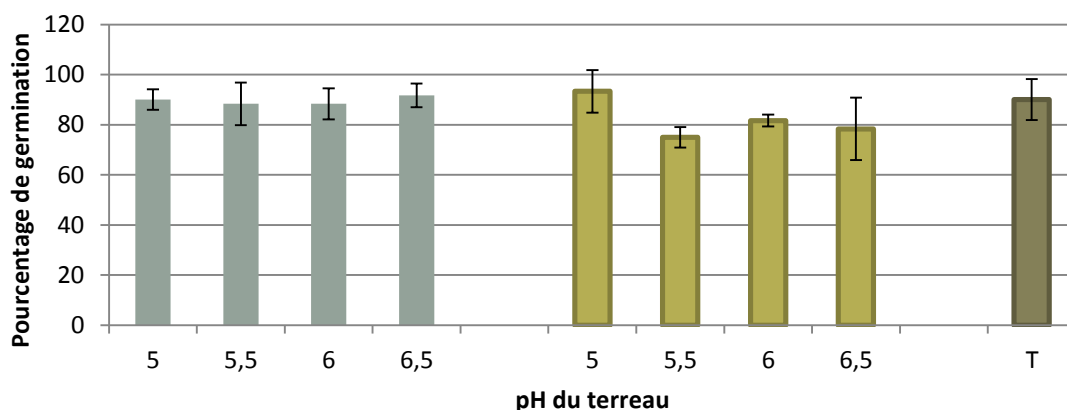


Figure 5 : cresson : germination à 7 jours, pas de stockage du terreau ; humidité massique des terreaux =59%

La rapidité de germination semble être à l'avantage des terreaux à fertilisation minérale. Si les résultats de l'ANOVA affirment qu'il existe un effet significatif du type de fertilisation (p-valeur = 0.03167), l'ensemble des modalités conservent des résultats corrects en termes de pourcentage de germination : seule la modalité organique de pH 5,5 se trouve en-deçà de la limite fatidique des 80%. Les terreaux à fertilisation organique offrent des résultats plus variés que leurs homologues minéraux mais il est difficile d'isoler un effet du pH, ce qui est confirmé par l'ANOVA (p-valeur = 0.321). La modalité organique de pH 5 se démarque quelque peu par la qualité de ses résultats, il sera intéressant de la suivre dans les prochains tests.

Deuxième test : stockage du terreau 3 semaines en sac

Ce test a pour but de mettre en évidence ou d'écarter la possibilité d'une action indirecte du pH au travers de la minéralisation des éléments (et notamment celle de l'azote) pendant le stockage. La température moyenne à l'intérieur du local pendant les 21 jours de stockage du terreau fut de 14,5°C, la température maximale 22,4°C et la température minimale 9,40°C.

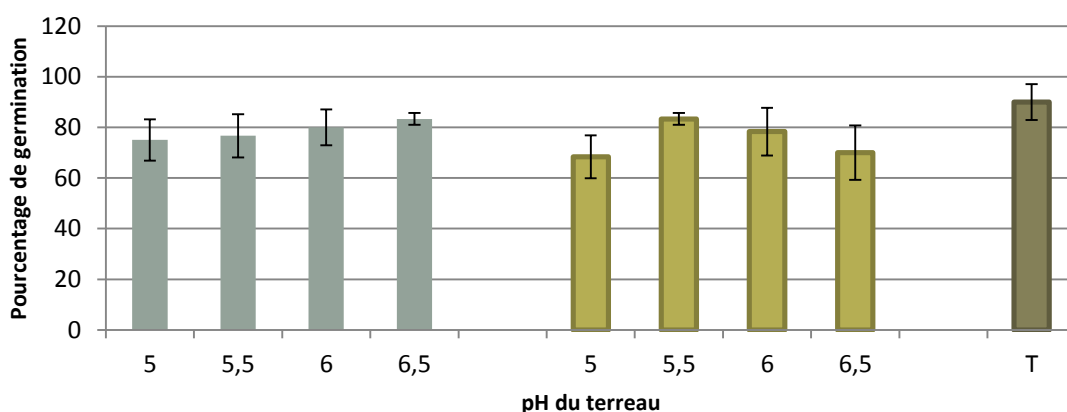


Figure 6 : cresson : germination à 2 jours, terreau stocké pendant 3 semaines ; humidité massique des terreaux = 62%

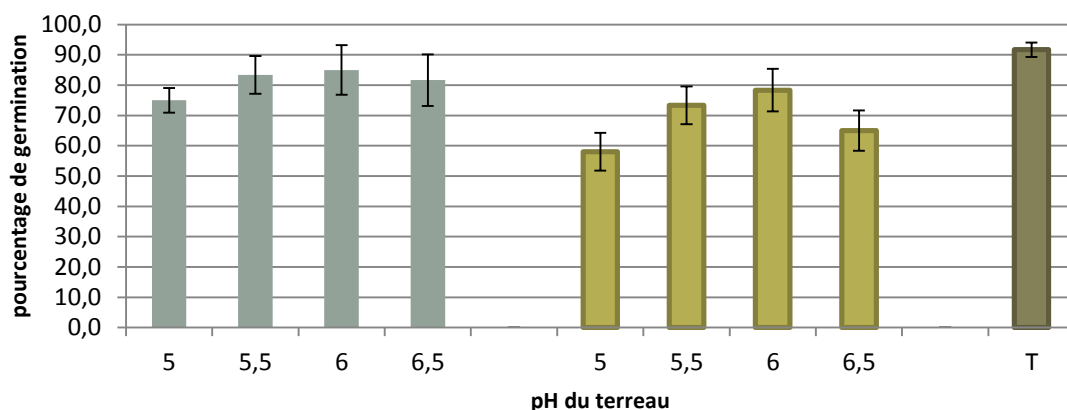


Figure 7 : cresson : germination à 7 jours, terreau stocké pendant 3 semaines ; humidité massique des terreaux = 62%

Malgré une germination plus rapide que lors du premier test, les résultats au bout de 7 jours sont légèrement inférieurs à ceux que nous avons observés pour les terreaux non stockés. Si les modalités à fertilisation minérale affichent toujours des résultats proches des 80% de germination, les modalités à fertilisation organique se situent globalement en-deçà de cette limite ; la différence entre les deux types de fertilisation est confirmée par l'ANOVA (p-valeur = 0.00853). Ainsi, alors qu'aucune modalité n'offrait des résultats inférieurs à 80% de germination du témoin lors du premier test réalisé, deux modalités sont ici en-dessous des 80% ; il s'agit des terreaux de pH 5 et 6.5 à fertilisation organique. Le fait que ces modalités soient celles qui possèdent les pH les plus extrêmes de la gamme (sachant de plus qu'elles ne se démarquent au sens négatif du terme que dans le test comprenant des terreaux stockés 3 semaines au préalable) pourrait indiquer que la minéralisation de l'azote est optimale pour un pH compris entre 5,5 et 6,5. Lang & Elliot (1991) affirment que la minéralisation est négligeable dans un substrat tourbeux en-dessous de pH=5.6 ; ceci semble supporté par le faible pourcentage de germination de la modalité organique de pH5. On peut signaler cependant que Terhoeven-Urselmans et al. (2007) ont réalisé l'ensemble de leurs études sur la minéralisation de l'azote à l'aide de substrats uniquement composés de tourbes ajustées à pH 5,0-5,5, obtenant des résultats positifs dans plusieurs cas.

Troisième test : stockage du terreau 3 semaines en sac en présence de ferment

La température moyenne à l'intérieur du local pendant les 21 jours de stockage du terreau fut de 15,5°C, la température maximale 27,6°C et la température minimale 9,40°C. L'ajout d'une source de microorganismes permet-il de modifier les résultats à l'issue du stockage ?

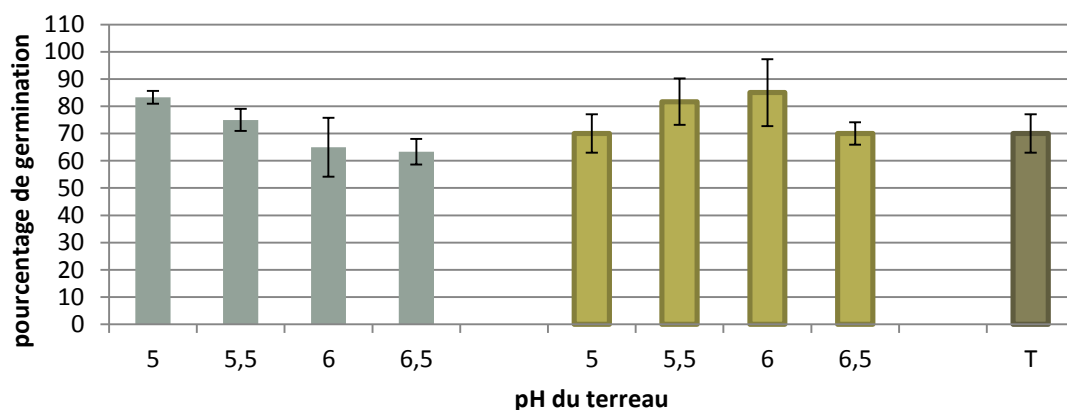


Figure 8 : germination à 2 jours, terreau stocké pendant 3 semaines en présence de fumier; humidité massique des terreaux = 63%

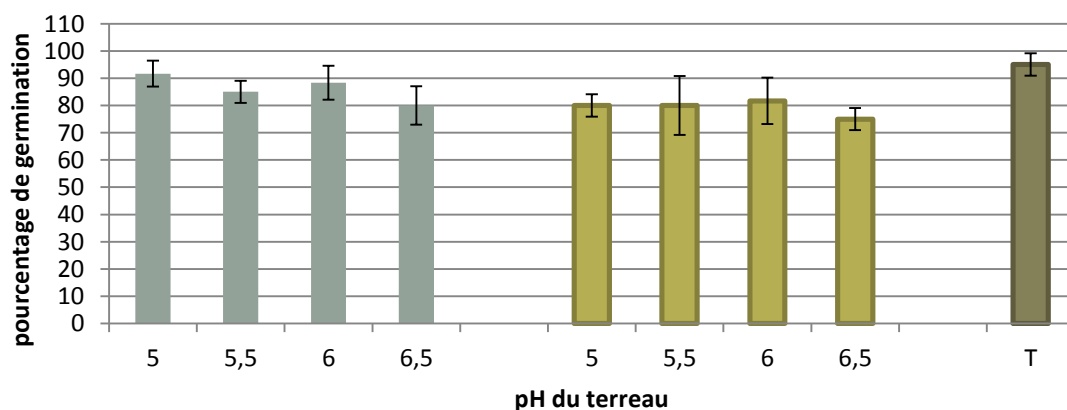


Figure 9 : germination à 7 jours, terreau stocké pendant 3 semaines en présence de fumier; humidité massique des terreaux = 63%

Les résultats de différentes modalités de pH à l'intérieur de chaque type de fertilisation sont ici globalement similaires. Les terreaux aux pH les plus bas n'affichent plus des taux de germination inférieurs aux autres modalités. Cette légère correction des écarts observés lors du second essai pourrait être due à la présence de ferment. Une ANOVA confirme cependant l'existence d'une différence significative entre les résultats des deux types de fertilisation (p-valeur = 0.03393).

2^{ème} partie : test sur tomates

Nous ne présenterons pas les données qui concernent la germination; chaque pot ne contenant que 3 plants, les pourcentages sont grossiers et ne permettent pas de justifier l'observation de tendances ; les données sont cependant disponibles en annexe (Annexe III). La culture de tomates pendant 30 jours a de plus révélé l'existence d'effets de bordure sur un côté de la chambre. Des données ont ainsi été écartées des moyennes, ce qui donne des effectifs différents pour les différentes modalités et empêche de procéder aux tests statistiques utilisés pour les résultats sur cresson.

Premier test : pas de stockage du terreau

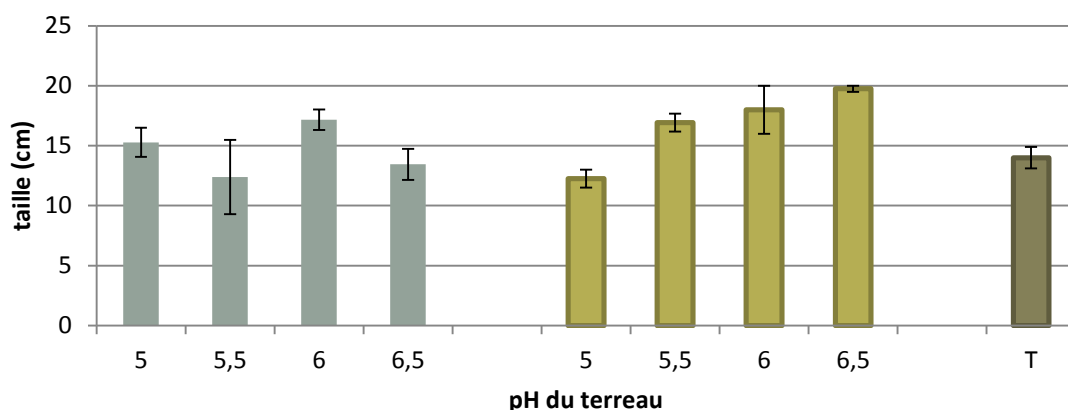


Figure 10 : tomate : taille à 30 jours, pas de stockage du terreau ; humidité massique des terreaux =66%

Une modalité semble pouvoir être distinguée dans chacun des deux types de fertilisation : pour les terreaux à fertilisation minérale, le terreau de pH 6 offre de meilleurs résultats que ses camarades et pour les terreaux à fertilisation organique le terreau de pH 5 offre des résultats plus mauvais que ses camarades. Il semble donc que le pH puisse avoir un effet direct sur la croissance de la tomate. Les modalités mentionnées précédemment seront à surveiller dans les tests à venir.

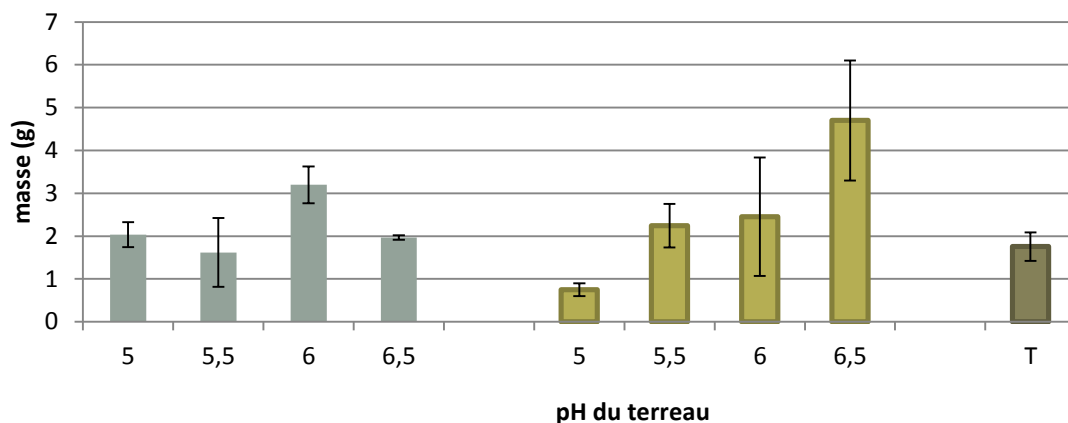


Figure 11 : tomate : masse fraîche par plant à 30 jours, pas de stockage du terreau ; humidité massique des terreaux =66%

Les mesures de masse fraîche confirment les résultats donnés par les hauteurs ; ils accusent cependant encore d'avantage la mauvaise prestation du témoin.

Deuxième test : stockage du terreau 3 semaines en sac

La température moyenne à l'intérieur du local pendant les 21 jours de stockage du terreau fut de 17.27°C, la température maximale 31.9°C et la température minimale 9,40°C.

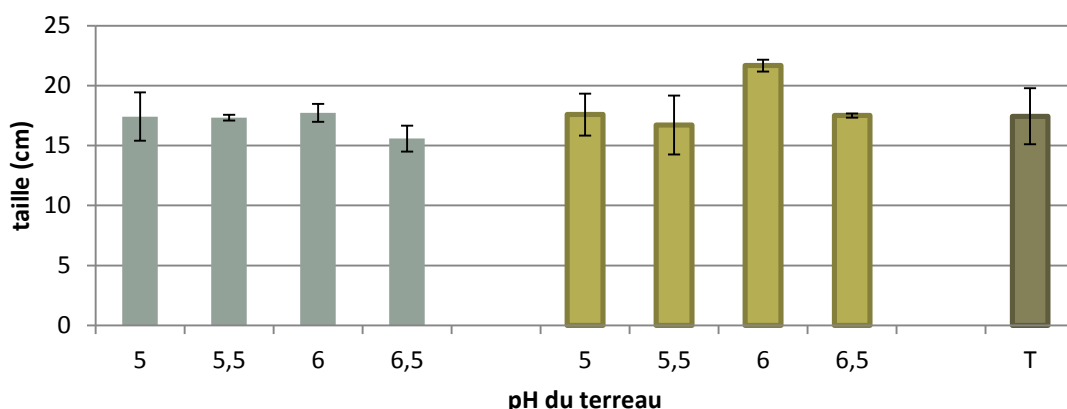


Figure 12 : tomate : taille à 30 jours, terreau stocké pendant 3 semaines ; humidité massique des terreaux =62%

Le terreau de pH 6 avec fertilisation organique offre de meilleurs résultats que l'ensemble des autres modalités. En-dehors de cette valeur exceptionnelle, les résultats des différents terreaux sont semblables. La mesure des hauteurs ne semble pas permettre d'isoler un effet particulier dont le stockage de 3 semaines du terreau puisse être responsable, à part peut-être une plus grande homogénéité dans les hauteurs mesurées, ce qui est incompatible avec l'observation d'un blocage de la minéralisation qui aurait éventuellement pu apparaître. Le terreau à fertilisation organique de pH 5 n'offre plus de résultats inférieurs aux autres modalités de ce type de fertilisation ; il est possible que l'observation réalisée lors du premier test ait été le résultat d'un pH en réalité inférieur à 5 chez le terreau concerné en premier lieu, conséquence éventuelle d'une variation dans les caractéristiques de la tourbe utilisée. Il en va de même pour le terreau à fertilisation minérale de pH 6.

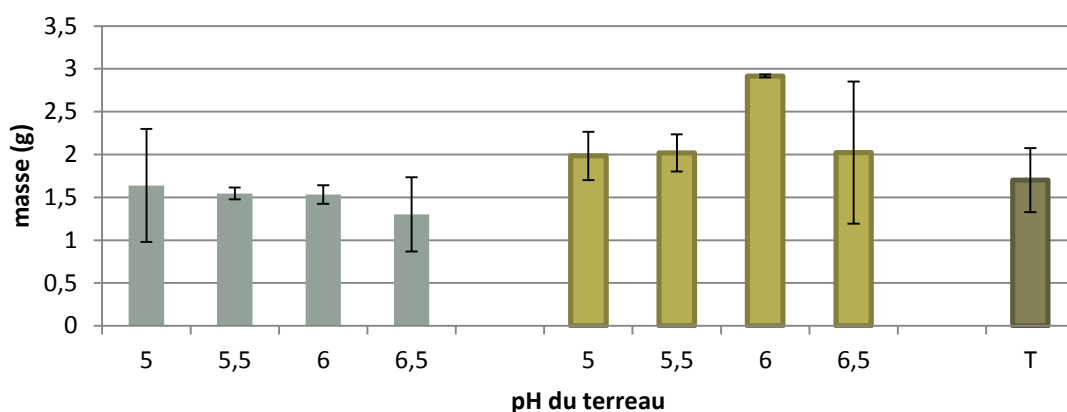


Figure 13 : tomate : masse fraîche par plant à 30 jours, terreau stocké pendant 3 semaines; humidité massique des terreaux =62%

La mesure de la masse fraîche apporte de nouveaux éléments : 3 des modalités organiques ont des résultats supérieurs à 3 des modalités minérales. Les terreaux fertilisés organiquement ont donc permis aux plantes de posséder des masses supérieures aux modalités minérales malgré des hauteurs comparables. Il semblerait que le stockage de 3 semaines n'ait pas joué en la

défaveur de l'engrais organique, au contraire ; aucune accumulation de composés phytotoxiques n'a l'air de s'être produite ni aucune pénurie en nutriments. Les bons résultats des modalités organiques pourraient être dus à une bonne minéralisation pendant la culture de l'engrais organique utilisé (Guanito). La tomate s'étant révélée sensible à l'effet direct du pH du terreau (figure13), il se pourrait également que les bons résultats soient dus à une évolution du pH pendant le stockage.

Troisième test : stockage du terreau 3 semaines en sac en présence de ferment

La température moyenne à l'intérieur du local pendant les 21 jours de stockage du terreau fut de 23.3°C, la température maximale 36.5°C et la température minimale 13.9°C.

La culture a également été menée dans la chambre de germination pendant une période (30 jours) aux températures extrêmes : la température moyenne dans le local était de 26 °C la minimale de 14,9°C et la maximale de 38,7 °C ; les températures qui ont dû régner à l'intérieur de la chambre de germination devaient être encore bien supérieures à ces valeurs. Les plantes ont donc souffert de la chaleur et présentent, tant en hauteur qu'en masse fraîche, des résultats très inférieurs à ceux des deux premiers tests réalisés sur tomates.

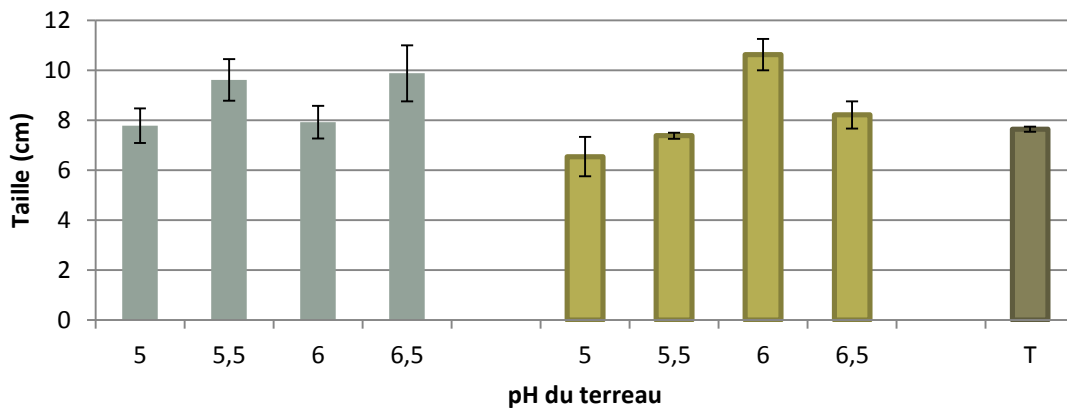


Figure 14 : tomate : taille à 30 jours, terreau stocké pendant 3 semaines en présence de ferment ; humidité massique des terreaux =74%

Le terreau à fertilisation organique de pH 6 offre ici encore de très bons résultats relatifs. Deux des modalités à fertilisation minérale se hissent cependant à sa hauteur. Les modalités à fertilisation minérale affichent de meilleurs résultats relatifs que lors du deuxième test, ce qui pourrait être dû à une baisse de la performance des modalités organiques à l'issue du stockage. Cette hypothèse irait à l'encontre d'un effet positif de l'utilisation de ferment. Cependant l'effet pourrait également être dû à l'humidité du mélange en question : avec 74% d'humidité massique, les terreaux réalisés pour ce dernier test sont en moyenne 10% plus humides que les terreaux des autres tests. La température durant le stockage pourrait également être mise en cause dans la mesure où Terhoeven-Urselmans et al. (2007) affirment que le stockage à 35°C ou plus d'un terreau devrait être évité car cela pourrait entraîner une réduction de la germination et de la croissance des plantes ; les terreaux à fertilisation organique pourraient être plus sensibles que leurs homologues minéraux à ce phénomène en vertu de l'importance inférieure de la minéralisation pour ces derniers.

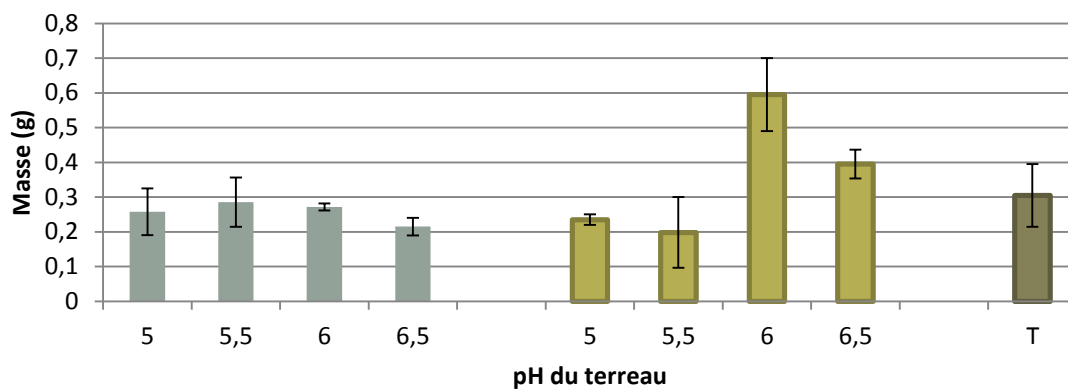


Figure 15 : tomate : masse fraîche par plant à 30 jours, terreau stocké pendant 3 semaines en présence de ferment ; humidité massique des terreaux =74%

Les masses fraîches par plant distinguent encore d'avantage la modalité organique de pH 6. La modalité organique de pH 6,5 présente des résultats supérieurs à toutes les autres modalités sauf une. Il semblerait donc que les valeurs de pH les plus élevées de ce test soient favorables dans le cas des terreaux à fertilisation organique. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les microorganismes apportés par le ferment se sont mieux développés aux pH de 6 et 6,5, assurant ainsi une meilleure minéralisation des éléments nutritifs. Les pH les plus élevés de la gamme considérée devraient en effet permettre un meilleur développement des bactéries responsables de la nitrification (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) dans la mesure où leurs gammes de pH idéales sont respectivement de 6,0-9,0 et 7,3-7,5. Cela va cependant à l'encontre des résultats avancés par Schumann & Sumner (1998) qui émettent l'hypothèse que des pH supérieurs à 6 pourraient conduire à une accumulation de NO_2^- phytotoxique à cause de l'inhibition des bactéries responsables de la nitrification par de fortes concentrations en NH_3 ainsi que par les conditions de pH elles-mêmes. Cette dernière étude a cependant été réalisée en plein champ et les systèmes ne sont pas forcément comparables, notamment au niveau biologique.

3 Discussion

Tests sur cresson

Les résultats des essais sur cresson pourraient permettre d'isoler un effet du stockage de 3 semaines sur les engrais organiques (inhibition sélective de la minéralisation de l'azote en-dehors d'une fourchette de pH). La borne inférieure de la fourchette optimale serait aux alentours de pH 5, ce qui serait en accord avec Niemera & Wright (1986), Lang & Elliot (1991) et Valé (2012). Une borne supérieure aux alentours de pH 6 n'est cependant pas mentionnée dans la bibliographie rencontrée concernant l'effet du pH sur la minéralisation de l'azote. Une explication potentielle pourrait être à chercher du côté de l'effet de l'anoxie pendant le stockage : Abril et al. (2001) remarquent qu'une inhibition de la nitrification a lieu dans des échantillons de sol pour des valeurs de pH supérieures à 6 ; cette inhibition entraîne une raréfaction de NO_3^- et une augmentation corollaire de la concentration en NH_4^+ , composé potentiellement phytotoxique. L'effet constaté sur le terreau à fertilisation organique de pH 6,5 est cependant faible et il serait plus raisonnable de penser que l'existence d'une borne supérieure à la fourchette idéale de pH est un artéfact. Toute la difficulté de l'étude de la minéralisation pendant le stockage reste cependant liée à l'action conjuguée de l'anoxie et du pH. Un effet lié à la présence de ferment dans le terreau pendant le stockage (légère réduction de ces inhibitions) pourrait également être isolé, ce qui serait en accord avec les prescriptions de Valé (2012) quant à l'ajout d'une source de microorganismes pour permettre une meilleure minéralisation.

Tests sur tomate

En ce qui concerne les résultats sur tomates, l'hétérogénéité des résultats ne permet pas d'isoler d'effet certain du stockage à un pH donné. Seule la modalité à fertilisation organique de pH 6 semble donner à chaque fois de très bons résultats après stockage. Il semble peu probable qu'une fourchette de pH aussi étroite soit à tel point optimale pour la minéralisation des éléments nutritifs. Une fourchette optimale plus large comme celle que pourrait indiquer le troisième test (pH 6 et plus) semblerait plus raisonnable. Elle serait en accord avec des résultats présentés par Taylor et al. (2013) qui affirment que le ratio $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ diminue lorsque le pH augmente dans des substrats à base d'écorces et de tourbe préalablement stockés. Or il a été démontré que la masse fraîche de choux chinois (*Brassicarapa* L. subsp. *Chinensis*) diminuait avec l'augmentation du ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (Terhoeven-Urselmans et al., 2007) et il serait logique que la tomate qui est considérée comme une espèce sensible à la toxicité de NH_4^+ (Britto & Kronzucker, 2002) réagisse de la même manière. Comme mentionné précédemment, Abril et al. (2001) affirment que l'anoxie a tendance à conduire à une raréfaction de NO_3^- par inhibition spécifique de la nitrification et donc à une augmentation corollaire de la concentration en NH_4^+ ; les résultats présents semblent plaider en faveur de la primauté de l'effet du pH sur celui de l'anoxie, comme le suggère l'étude menée par Taylor et al. L'étude sur les effets de l'anoxie concernait cependant des échantillons de sol et il n'est pas surprenant que les résultats observés soient plus proches de l'étude sur le stockage de substrats. Le fait que les résultats en termes de germination ou de croissance ne paraissent pas

meilleurs pour des pH supérieurs à 6 dans les tests sur cresson après stockage pourrait s'expliquer par le fait que cette espèce est moins sensible à la toxicité de NH_4^+ . Les résultats du dernier test mené sur tomates sont cependant à considérer avec précaution à cause de la faible croissance des plantes en présence de températures élevées. Les résultats moyens du témoin dans les différents essais sur tomate remettent également en cause la primauté de l'effet du terreau sur celui des conditions de culture.

Limites et perspectives

La comparaison avec les fourchettes de pH idéales pour la minéralisation de l'azote fournies dans la bibliographie est dans certains cas discutable ; celles-ci concernent parfois des mesures réalisées en culture (Lang & Elliott, 1991 ; Argo&Biernbaum, 1997) et représentent donc des fourchettes de minéralisation idéales pour un milieu aérobie en présence de plantes, un milieu bien éloigné du milieu asphyxiant des conditions de stockage.

Plusieurs éléments pourraient être améliorés dans cette expérience pour obtenir des résultats plus fiables :

- Il serait souhaitable d'augmenter le nombre de répétitions, notamment pour le test sur tomates, ce qui permettrait d'obtenir des écart-types plus précis et ainsi des données utilisables en ce qui concerne les pourcentages de germination. Une solution pourrait être d'utiliser des pots plus petits, les pots de 1L sont en effet presque trop volumineux pour une simple culture de 3 pieds de tomates pendant 30 jours, et à fortiori pour la culture de cresson pendant 7 jours.
- La culture de tomates pendant 30 jours a révélée l'existence d'un effet de bordure concernant un côté de la chambre, ce qui est inévitable si des pots de 1L sont utilisés (il n'y a alors pas assez de place pour les disposer différemment). Ici aussi l'utilisation de pots plus petits pourrait permettre de contourner le problème.
- Les différents mélanges sont préparés avec les mêmes proportions de tourbe, cependant la qualité des tourbes utilisées peut varier selon l'endroit où elles sont prélevées dans le stock, stock qui peut être composé de plusieurs arrivages successifs de tourbes aux qualités différentes qui évoluent ensuite au fur et à mesure de leur stockage en plein air. Malgré le fait que les différents arrivages proviennent de la même tourbière, les caractéristiques physiques, chimiques et pourquoi pas biologiques (présence de communautés de microorganismes) des constituants des mélanges utilisés dans les tests seraient susceptibles de varier. Une variation du pH initial de la tourbe ou de la saturation de sa capacité d'échange cationique pourrait conduire à un effet différent de l'ajout de dolomie sur le pH final du mélange et fausser les résultats des expériences successives. Il serait souhaitable de réaliser un seul et unique mélange au départ puis de lui appliquer les différents traitements et de le stocker durant la même période. La seule contrainte qui nous a empêchés de réaliser cette manipulation est qu'il aurait fallu que la chambre de

germination puisse contenir deux des 3 essais simultanément, ce qui n'est pas le cas. Le problème ici aussi pourrait être contourné en utilisant des pots plus petits.

- L'expérience portant sur le pH et l'anoxie potentiellement liée au stockage, une meilleure gestion des autres paramètres influant sur les dynamiques de minéralisation serait bénéfique. Les sacs ont été stockés sans contrôle de la température, paramètre considéré comme de la première importance en ce qui concerne la minéralisation de l'azote. Comme les sacs ont été stockés à des moments différents, les températures pendant le stockage ont été différentes. Or des variations de la teneur en NO_3^- dans des terreaux amendés ont été observées pour des gammes de température rencontrées dans le bâtiment où les sacs ont été stockés (20-35°C) (Terhoeven-Urselmans et al., 2007). En vue d'isoler l'effet du pH, la comparaison des résultats absolus des deux tests comprenant un stockage du terreau est délicate. Seuls les résultats des différentes modalités d'un même test sont comparables et nous sommes partis du principe que les variations de proportions à l'intérieur de deux tests restaient comparables, c'est-à-dire que l'effet du couple pH/anoxie restait observable malgré celui de la température. Ceci est discutable dans la mesure où les terreaux à fertilisation minérale et les terreaux à fertilisation organiques pourraient être affectés différemment par la température de stockage, et ils ont même de fortes chances de l'être en vertu des différences déjà mentionnées (§3). Il reste donc que seuls les terreaux à pH différents mais à fertilisation identique au sein d'un même test sont comparables dans l'absolu. De façon relative il reste cependant possible de comparer les proportions obtenues pour chaque type de fertilisation dans les 3 tests, en prenant soin de se référer au test n°1 pour pouvoir isoler l'effet indirect du pH (au travers de la minéralisation). Un stockage à température constante aurait pu éviter de telles complications. De même la culture elle-même a eu lieu à des températures différentes, ce qui contrarie un peu plus la comparaison des résultats absolus des différents tests. La comparaison des résultats exclusivement à l'intérieur d'un même test permet cependant de s'affranchir du problème car, contrairement aux conséquences sur les terreaux, il est possible de supposer que la température aura un effet uniforme sur les différentes modalités d'un même test. Ainsi les proportions relatives des modalités des 3 tests restent comparables. Ici aussi une température de culture constante pourrait améliorer l'interprétation des résultats. Les températures de stockage et de culture auront cependant des effets insurmontables si elles prennent des valeurs suffisantes pour complètement inhiber le développement des microorganismes pour l'une et la croissance des plantes pour l'autre. En ce qui concerne la température de culture (celle qui règne dans la chambre), il est possible que des valeurs élevées aient été atteintes à cause notamment de l'absence de système de ventilation dans la chambre de germination. L'humidité des substrats a elle été supposée constante et ce fut en effet le cas à l'exception du dernier test réalisé sur tomates. Mais la complexité de ces tests présente un intérêt : comme mentionné précédemment (§5), le but est également de se placer dans les conditions d'action d'un industriel, or celui-ci pourra modifier aisément le pH mais ne pourra pas contrôler tous les paramètres, il est donc logique d'essayer au départ d'observer l'effet de la modification d'un paramètre accessible malgré l'évolution des paramètres alentours. Dans tous les cas, une réflexion plus approfondie sur les objectifs de l'expérience (choisissons-nous de mesurer l'effet du pH ou du pH associé au stockage,

sur la croissance des plantes ou sur le comportement du terreau) et les variables mises en jeu aurait permis une interprétation moins complexe.

- Le statut du témoin est discutable : celui-ci est resté dans la pièce où ont été stockés les terreaux utilisés dans les expériences. Les sacs de terreau témoin n'ont pas subi l'anoxie car ils étaient ouverts mais ils ont été utilisés pendant une période s'étalant sur plusieurs mois et ont subi les températures locales. Peut-être que le terreau au contraire aurait bénéficié de la fermeture des sacs. Les résultats moyens des témoins pendant les tests sur tomates pourraient laisser penser qu'un changement plus fréquent des sacs de terreaux témoin et/ou un stockage à température constant de ceux-ci auraient été bénéfiques.
- L'expérience porte sur le pH initial du substrat car celui-ci est une grandeur contrôlable par l'entreprise, cependant il pourrait être intéressant de suivre son évolution pendant la culture ; il représenterait alors une variable explicative qui permettrait d'affiner les suppositions concernant les dynamiques à l'œuvre pendant le test de germination. Il en va de même pour la conductivité. Ces valeurs pourraient être suivies grâce à des mesures directes réalisées sur toutes les modalités.

Quelques changements pourraient ainsi apporter une meilleure valeur à l'expérience, et ce pour des dépenses peu importantes.

Le stockage sous forme de palette

1 Matériel et méthodes

L'expérience sera réalisée sur deux palettes de terreaux :

- une palette de terreau semis UAB à la composition suivante : tourbe brune, tourbe blonde, fertilisation organique : Guanito (6-15-3), dolomie.

- une palette de terreau horticole à la composition suivante : tourbe brune + tourbe blonde, écorces compostées, fumier de cheval composté, fertilisation organique : Guanito (6-15-3), dolomie.

Les palettes sont composées de 48 sacs de 40 litres pour le terreau semis et de 42 sacs de 50 litres pour le terreau horticole ; les palettes sont composées d'un ensemble de sacs emballé à l'aide de plusieurs épaisseurs de films plastique étirable (banderollé) et disposant d'une « coiffe » (pièce de plastique opaque plus résistant) sur la partie supérieure. Ces palettes seront stockées dans les conditions habituelles sur la plateforme de stockage, c'est-à-dire en plein air.

Un échantillonnage du terreau des deux palettes sera effectué tous les 14 jours. Pour chaque échantillon, 3 sous-échantillons de 3 litres seront prélevés chacun dans un sac différent de la palette. Le prélèvement se fera à l'aide d'une tarière pour pouvoir récolter du terreau sur toute la longueur du sac. Les 3 sous-échantillons seront enfin mélangés pour former un échantillon.

Pour tenter de quantifier l'effet du stockage sur la minéralisation de l'azote, quatre méthodes seront utilisées sur chaque échantillon :

- Un test de germination sur tomate et cresson selon un protocole suivant :

Cresson

3 pots de 450 mL seront remplis du terreau horticole prélevé lors de l'échantillonnage.

3 pots de 450 mL seront remplis du terreau semis prélevé lors de l'échantillonnage.

3 pots seront remplis de terreau semis Fertiligène® pour constituer le témoin.

20 graines de cresson alénois seront semées dans chaque pot, l'ensemble des pots sera mis en culture dans une chambre de germination. Le pourcentage de germination sera mesuré à 2 et 7 jours. La masse fraîche de l'ensemble des plantes de chaque pot sera mesurée au bout de 7 jours.

Tomate

3 pots de 450 mL seront remplis du terreau horticole prélevé lors de l'échantillonnage.

3 pots de 450 mL seront remplis du terreau semis prélevé lors de l'échantillonnage.

3 pots seront remplis de terreau semis Fertiligène® pour constituer le témoin.

3 graines de tomate seront semées dans chaque pot, l'ensemble des pots sera mis en culture dans une chambre de germination. Le pourcentage de germination sera mesuré à 7 et 14 jours. La masse fraîche de l'ensemble des plantes de chaque pot sera mesurée au bout de 14 jours.

Les pots seront placés dans la chambre de germination selon un dispositif complètement randomisé à 3 répétitions.

- Un test Solvita® qui permet grâce à un gel coloré de quantifier le $\text{NH}_{3(g)}$ et le $\text{CO}_{2(g)}$ émis par les microorganismes présents dans le terreau lors d'une incubation de 4 heures dans une enceinte confinée de 280 mL. La couleur du gel est transcrite en un score sur une échelle de 1 à 8 pour le $\text{CO}_{2(g)}$ et sur une échelle de 1 à 5 pour le $\text{NH}_{3(g)}$. Dans les deux échelles, la note la plus basse correspond au plus fort dégagement du gaz concerné.
- Un dosage par colorimétrie de NO_3^- et NH_4^+ réalisé sur extrait aqueux (dilution 1/1,5 du terreau dans de l'eau distillée) par le laboratoire LCA.
- Une mesure de la conductivité et du pH selon la méthode sur extrait aqueux (dilution 1/1,5 du terreau dans de l'eau distillée).

Ces 3 mesures seront réalisées sur les échantillons prélevés tous les 14 jours pendant 2 mois (60 jours).

2 Résultats

Dosage de NO_3^- et NH_4^+

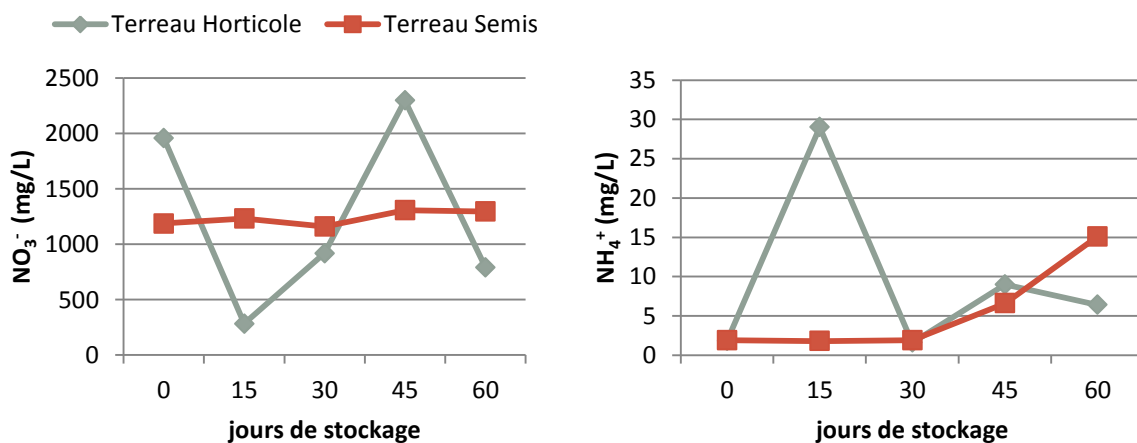


Figure 16 : évolution des concentrations en NH_4^+ et NO_3^- telles que mesurées à différentes étapes du stockage des terreaux

Le terreau de type semis présente des concentrations en NH_4^+ et NO_3^- quasiment constantes pendant les 45 premiers jours de stockage ; une augmentation de la concentration en ions ammonium est cependant observable au bout de 45 jours et se poursuit au 60^{ème} jour.

Le terreau de type horticole en revanche accuse une diminution d'un facteur d'environ 4 de la concentration en nitrates dès les 15 premiers jours de stockage. Cette diminution de la quantité d'ions nitrate s'accompagne d'une augmentation de la concentration en ions ammonium d'un facteur d'environ 15. La concentration en nitrate augmente par la suite pour dépasser au 45^{ème} jour la concentration mesurée à t0. La concentration en NH_4^+ redescend dès le 30^{ème} jour pour retrouver sa valeur initiale avant d'entamer une nouvelle augmentation qui se stabilise au jour 60. La concentration en nitrates quant à elle diminue fortement du jour 45 au jour 60 pour dessiner un pic.

Mesure du pH et de la conductivité

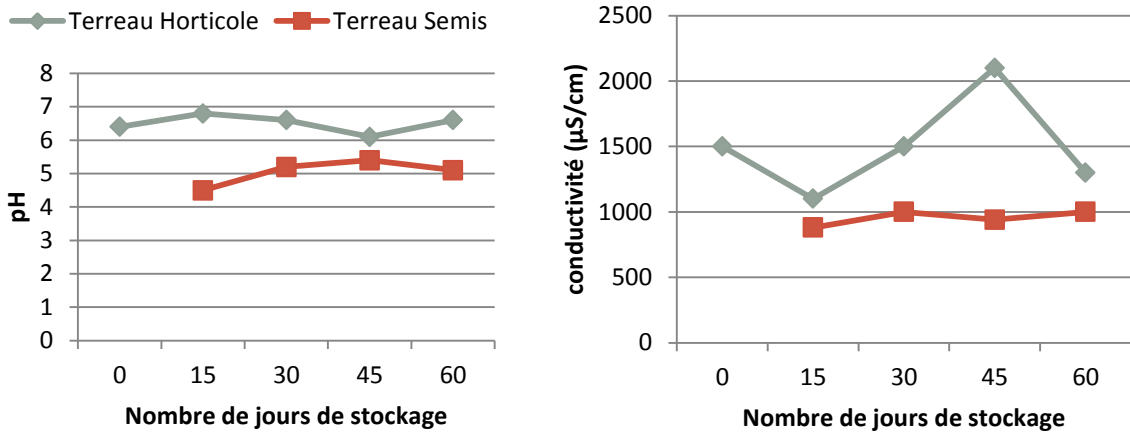


Figure 17 : évolution du pH et de la conductivité tels que mesurés à différentes étapes du stockage des terreaux.

Le terreau de type semis présente une fois de plus des paramètres quasi-constants tout au long de la période de stockage.

Le terreau horticole quant à lui connaît une augmentation de sa conductivité qui culmine aux alentours de 2 mS/cm au 45^{ème} jour de stockage. Cette augmentation s'accompagne d'une baisse du pH qui prend sa valeur la plus basse également au 45^{ème} jour. La conductivité amorce ensuite une diminution au jour 60 pour dessiner un pic autour du jour 45.

Test Solvita®

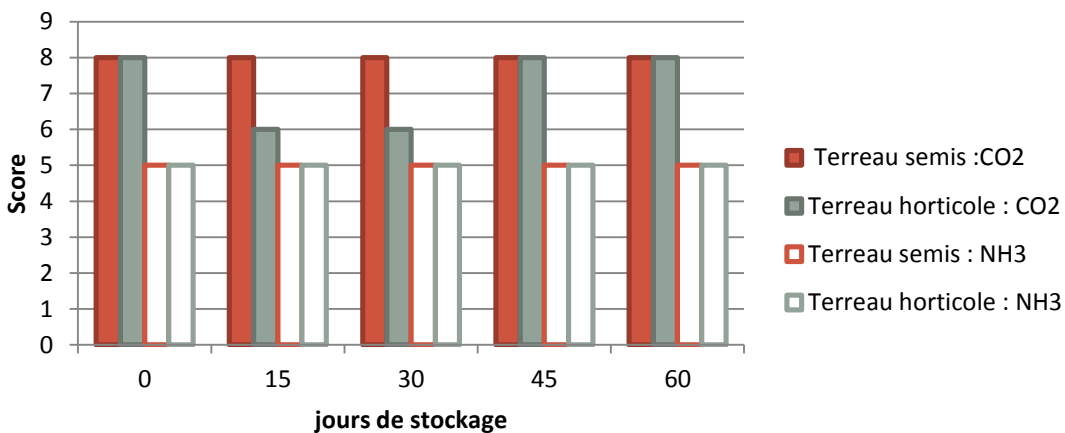


Figure 18 : évolution des "scores" donnés par le test Solvita® tels que mesurés à différentes étapes du stockage des terreaux ; Concernant le $\text{NH}_3(\text{g})$, l'échelle se situe entre 1 et 5, le score de 1 correspondant au dégagement le plus fort ; concernant le $\text{CO}_2(\text{g})$, l'échelle se situe entre 1 et 8, le score de 1 correspondant au dégagement le plus fort.

A l'exception d'un léger dégagement de CO_2 mesuré aux jours 15 et 30 chez le terreau horticole, aucun dégagement significatif n'a pu être mesuré par les gels colorés. Un dégagement de CO_2 trahit une activité des microorganismes sans pour autant permettre de

préciser de quels microorganismes il s'agit. La sensibilité de cette méthode est à remettre en question pour caractériser des variations fines dans des matériaux déjà bien humifiés. Le test Solvita® a été créé pour mesurer l'état de décomposition de composts et seul un essai que nous avons réalisé sur un fumier de cheval en cours de compostage a permis de détecter un dégagement de $\text{NH}_3(\text{g})$.

Tests de germination tomate et cresson

Cresson

Pour les 3 terreaux utilisés dans le cadre des tests de germination, les variables « taux de germination » et les « masse fraîche » affichent un excellent coefficient de corrélation (0.99 pour le terreau semis, 0.98 pour le terreau horticole et 0.87 pour le terreau témoin (Annexe V)). C'est pourquoi seuls les résultats concernant la germination seront présentés.

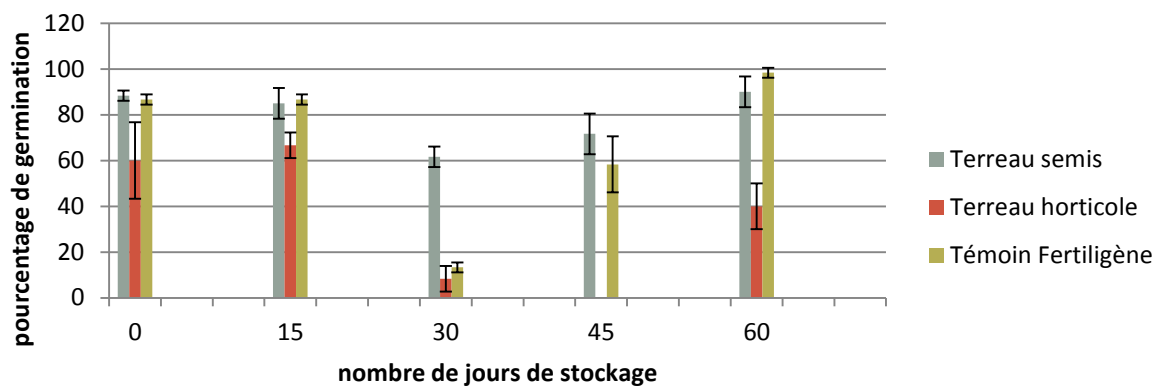


Figure 19 : évolution du pourcentage de germination du cresson à 7 jours tels que mesuré à différentes étapes du stockage des terreaux

Les taux de germination des terreaux semis et témoin sont supérieurs à 80% durant les 15 premiers jours de stockage quand celui du terreau horticole est systématiquement en-dessous de cette valeur. Les taux de germination s'effondrent au 30^{ème} jour de stockage et les mauvais résultats du terreau témoin empêchent de tenir compte des données de ce test. Les pourcentages de germination augmentent à nouveau au 45^{ème} puis au 60^{ème} jour pour les terreaux semis et témoin pour retrouver les valeurs mesurées en début de stockage. Le terreau horticole ne permet plus aucune germination au jour 45 et retrouve des valeurs presque équivalentes aux mesures de départ lors de l'essai mené au 60^{ème} jour. La diminution globale des résultats au jour 30 ainsi que la récupération de ceux-ci au cours des jours 45 puis 60 indiquent que des facteurs liés au milieu pourraient jouer un rôle important dans la variabilité observée. La chaleur qui règne dans la chambre de germination pourrait une fois de plus être la cause de la diminution des performances. Les tests de germination ont en effet été réalisés au même moment que les derniers tests de germination sur tomate de la première expérience, tests qui ont également souffert dans des proportions similaires.

Tomate

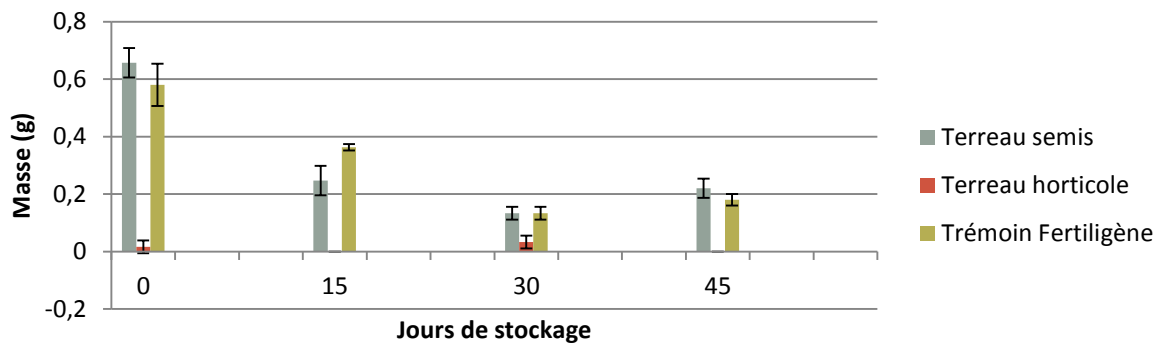


Figure 20 : évolution de la masse des plants de tomates à 14 jours telle que mesurée à différentes étapes du stockage des terreaux

Les résultats des terreaux semis et témoin sont équivalents pour les tests réalisés tout au long de la période de stockage. Le fait que les masses fraîches mesurées diminuent rapidement avec le temps est probablement encore une fois lié à un facteur du milieu et non à une évolution du terreau pendant le stockage. Si la chaleur est encore à inculper, la tomate semble y être plus sensible que le cresson. Les résultats du terreau horticole sont quasiment nuls et ce dès le début du stockage de la palette. Aucun test de germination n'a pu être effectué au jour 60 car je ne disposais pas du temps nécessaire pour mener à terme les 15 jours de culture.

3 Discussion

Terreau horticole

Le terreau horticole subit une forte diminution de la concentration en nitrates dès le 15^{ème} jour de stockage. Cette diminution pourrait être due à :

- un blocage spécifique de la nitrification lié à une faible présence des microorganismes concernés (Valé, 2012) ou à des conditions défavorable pour ceux-ci. Parmi les conditions, on trouve l'anoxie (Abril et al., 2001), un pH trop bas (Britto&Kronzucker, 2002) ou une température trop élevée (Terhoeven-Urselmans et al., 2007). Le pH est plutôt élevé (entre 6 et 7) même s'il amorce à ce moment-là une diminution, il semble donc peu probable que sa valeur soit à l'origine de l'inhibition des microorganismes. L'anoxie est un candidat mais les données sur son effet unique concernant les terreaux (et non les sols) sont rares. L'élévation de la température combinée à l'anoxie est ici l'hypothèse la plus sérieuse car l'expérience menée pour caractériser leurs effets conjoints élevée (Terhoeven-Urselmans et al., 2007) concerne précisément un substrat stocké (uniquement à base de tourbe cela dit) et constate un phénomène identique à celui qui est observé dans notre cas.

- un phénomène d'immobilisation de l'azote par les microorganismes (Carlile, 2004 ; Valé, 2013). Le Guanito est pourtant considéré comme un produit capable de fournir rapidement de l'azote (Kelderer M. et al., 2008).

La diminution de la concentration en NO_3^- est un phénomène souvent observé lors du stockage de terreaux à fertilisation minérale, cependant celle-ci est généralement accompagnée d'une stagnation de la concentration en NH_4^+ (Terhoeven-Urselmans et al., 2007 ; Gagnon et al., 1993). Dans l'expérience présente, une forte augmentation de la concentration en NH_4^+ mesurée au 15^{ème} jour semble rappeler que la fertilisation est ici bel et bien organique. Un tel pic de minéralisation conduisant à une accumulation d'ions ammoniums a déjà été observé en culture (Bresch, 2012) et il semble qu'un phénomène similaire puisse avoir lieu durant le stockage du terreau en sac. L'augmentation du ratio $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ est d'autant plus importante chez le terreau horticole : celui-ci atteint une valeur de 0,1 mesurée au jour 15, soit une augmentation d'un facteur 100 par rapport à la moyenne des mesures aux autres dates. Le cresson ne semble pourtant pas souffrir particulièrement de l'augmentation de la concentration en NH_4^+ (qui atteint 1,6 mmol/L au jour 15) : les résultats du test réalisé au jour 15 sont similaires à ceux du test réalisé au jour 0 (Figure 19), ce qui va à l'encontre de Britto &Kronzucker (2002) qui affirment que des symptômes de la phytotoxicité de NH_4^+ apparaissent généralement pour des concentrations de 0,1 à 0,5 mmol/L. Quant à la tomate, l'absence de croissance dans le terreau horticole tout au long de la durée du stockage ne permet pas d'observer un effet particulier (Figure 20) au jour 15, si ce n'est l'absence totale de germination quand une très faible partie des graines germaient pour les autres dates (Annexe VI).

La diminution de la concentration en NO_3^- est suivie d'une augmentation de celle-ci pour dépasser, au 45^{ème} jour, la concentration initiale. Cette augmentation est suivie d'une diminution du pH et d'une augmentation de la conductivité. La concomitance de ces trois phénomènes est généralement observée durant le stockage des terreaux (Bunt, 1976). La concentration en NH_4^+ quant à elle retrouve sa valeur initiale dès le 30^{ème} jour ; il est ainsi possible de supposer que le NO_3^- nouvellement formé est issu du NH_4^+ synthétisé en grande quantité aux alentours du jour 15. Si le cresson ne semblait pas affecté par les forts taux en NH_4^+ , l'augmentation de la conductivité et la valeur qu'elle atteint au jour 45 paraît avoir raison de sa germination (figure 19). La baisse de la conductivité au 60^{ème} jour permet de retrouver des taux de germination corrects pour le cresson, ici encore la nouvelle augmentation de la concentration en NH_4^+ ne semble pas être phytotoxique.

Terreau semis

Les grandeurs mesurées pour le terreau semis ne varient que très peu tout au long du stockage : pH, conductivité et concentration en NO_3^- restent quasi-constants et dans des fourchettes acceptables tant pour la minéralisation que pour la croissance des plantes. Seule la concentration en NH_4^+ augmente durant les deux dernières semaines pour atteindre au jour 60 une concentration de 0,83 mmol/L (toxique selon Britto &Kronzucker (2002)). Quant aux résultats des tests de germination, le terreau semis offre des performances similaires au terreau témoin à l'exception du test réalisé sur cresson au 30^{ème} jour de stockage, test pour

lequel le terreau il affiche des résultats supérieurs au témoin. L'augmentation de la concentration en NH_4^+ ne semble pas ici non plus diminuer la germination du cresson, cependant elle pourrait entraîner une augmentation de la conductivité dans les jours suivant, comme dans le cas du terreau horticole. Nous pouvons ainsi nous demander si le terreau semis n'est pas au 60^{ème} jour sur le point de connaître un sort similaire à celui qu'a connu le terreau horticole au 15^{ème} jour. Une différence subsiste cependant : l'augmentation de la concentration en NH_4^+ chez le terreau semis ne s'accompagne pas d'une diminution de la concentration en nitrates. Ainsi c'est un phénomène inverse à celui qui est généralement observé en présence de fertilisant minéral qui à l'air de s'amorcer chez le terreau semis. Les deux terreaux ont été amendés avec le même fertilisant organique à des doses similaires, la différence est donc à chercher du côté de la formulation en matières premières. Ici encore apparaît la nécessité de raisonner au niveau du couple engrais-substrat.

Limites et perspectives

Plusieurs éléments pourraient être améliorés pour obtenir des résultats plus fiables :

- La date qui a été donnée comme t_0 n'est pas la date de fabrication du terreau mais une date ultérieure à la date d'arrivée des palettes sur le site : le terreau semis a été fabriqué le 02/04/2013 et le terreau horticole le 28/05/2013 quand le début de l'expérience est daté du 10/06/2013. Il est donc possible que des phénomènes se soient produits avant le début de l'expérience qui n'ont pas pu être mesurés. Ainsi le pic de concentration en NH_4^+ accompagné de la baisse de la concentration en NO_3^- observés chez le terreau horticole ont pu se produire chez le terreau semis pendant les 2 mois qui ont séparé sa fabrication du début de l'essai. Il est même possible d'envisager que l'augmentation de la concentration en NH_4^+ qui semble s'amorcer au jour 60 chez le terreau semis constitue un second évènement, ce qui implique que plusieurs pics de minéralisation rapide peuvent se produire pendant le stockage d'un même terreau. En commençant les mesures au moment de la fabrication du terreau, il aurait été possible de disposer d'un meilleur suivi des variables mesurées. Les nécessités logistiques rendent cependant une telle situation illusoire et il serait plus réaliste de viser un simple raccourcissement du délai entre la fabrication du terreau et le début des mesures. Dans le cas particulier de notre expérience, il aurait également été intéressant de suivre le comportement du terreau semis pendant encore quelque temps
- Les palettes n'ont pas été placées sur la plateforme de stockage ouverte dès le début de l'essai. Elles stationnaient initialement à proximité d'un bâtiment et ne recevaient l'incidence directe du soleil qu'au cours de l'après-midi, elles n'ont été transférées qu'au bout du 22^{ème} jour. Il se peut ainsi que certaines palettes reçoivent une somme d'énergie plus importante et s'échauffent d'avantage durant leur transit sur la plateforme. Un placement immédiat des palettes sur la plateforme aurait éventuellement permis d'obtenir un résultat plus proche de la réalité.
- Les échantillons sont un mélange du contenu de trois sacs situés à des hauteurs différentes, ce qui a pour effet de noyer les hétérogénéités qui peuvent exister entre les sacs. Terhoeven-Urselmans et al. (2007) ont démontré que le ratio $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$ à l'intérieur de sacs de terreau après un stockage de deux ans était différent selon que les perforations

des sacs étaient orientées vers l'extérieur ou vers l'intérieur de la palette (les sacs dont les perforations étaient orientées vers l'intérieur possédaient des concentrations plus faibles en NO_3^- et plus élevées en NH_4^+). Ce même phénomène pourrait avoir des conséquences à l'échelle considérée lors de notre expérience. De même il est tout à fait probable que les sacs situés sur le haut de la palette subissent des températures bien plus élevées que ceux qui sont situés au milieu ou sur le bas. Une étude plus fine pourrait permettre d'observer ces différences.

- En ce qui concerne les tests de germination, comme lors de l'expérience concernant le pH, les variations de température à l'intérieur de la chambre ainsi que le stockage du terreau témoin dans la pièce contenant la chambre sont des limites qu'une pièce mieux isolée pourrait permettre de dépasser. Il se peut cependant que la capacité germinative des graines utilisées soit en cause dans le cas du cresson. Il est généralement recommandé de stocker les graines dans un endroit frais et sec or celles-ci ont été stockées dans la même pièce que le terreau tout au long de l'expérience. Les graines utilisées lors du test de germination au jour 45 montrent une diminution de leur capacité germinative et l'utilisation de nouvelles graines pour le test au jour 60 permet de retrouver des pourcentages de germination corrects chez le témoin. Il est cependant peu probable qu'un facteur différent de la température puisse expliquer les résultats catastrophiques du test réalisé au jour 30.
- L'essai aurait bénéficié d'une augmentation de la fréquence des mesures. Le pic de concentration en NH_4^+ ainsi que la baisse de concentration en NO_3^- concernant le terreau horticole sont imprécis et paraissent disproportionnés par rapport aux mesures réalisées aux autres dates. Un resserrement des dates de mesure pourrait permettre de mieux représenter les dynamiques à l'œuvre, d'isoler un maximum, un minimum voire une courbe entière précise.
- Depuis l'automne 2012, il est conseillé par un encart au dos des sacs de brasser et d'aérer le terreau quelques heures avant de l'utiliser pour diminuer l'effet d'un éventuel blocage de la minéralisation. L'efficacité de cette manipulation n'a jamais été mesurée et une expérience comme celle que nous avons menée aurait été une bonne occasion de l'assurer. La mise en place d'une modalité « terreau aéré » lors des tests de germination aurait pu être moyen d'ajouter de la valeur à l'expérience.
- Les deux substrats étant composés de matières premières différentes, il aurait été intéressant de mesurer la minéralisation de l'azote dans ces mélanges de matières premières non fertilisés. L'effet du fertilisant aurait ainsi pu être apprécié plus finement.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de pouvoir départager les effets d'un blocage de la nitrification de ceux d'une immobilisation de l'azote par les microorganismes. Ces deux phénomènes peuvent en effet conduire à une chute de la concentration en nitrates tout en étant de nature différente. Une mesure de l'activité microbienne pourrait permettre de les différencier et il est intéressant à ce propos de constater que le test Solvita® enregistre un dégagement de CO_2 durant la période où la concentration en NO_3^- baisse.

Conclusion

Nous avons exposé dans ce rapport deux pistes pour essayer de trouver une origine possible aux défaillances signalées des terreaux UAB : le pH et le stockage.

L'influence du pH d'un terreau stocké sur la croissance et la germination des plantes au travers de la minéralisation de l'azote s'est révélé être difficilement mesurable. Tout en considérant la complexité des phénomènes en jeu, il ne semble pas que le pH soit une variable majeure lorsque celui-ci se situe dans la gamme considérée (5 - 6,5). C'est pourquoi une spécification de pH entre 5,5 et 6,5, qui évite donc la valeur plus discutable de 5, semble suffisante pour assurer un bon taux de germination et une croissance correcte des plantes dans un terreau UAB.

Les dynamiques de minéralisation à l'œuvre durant le stockage sous forme de palette se sont avérées importantes pour la croissance et la germination des plantes cultivées dans le terreau à l'issue du stockage. Il semble que l'évolution du terreau UAB entre le moment de sa fabrication et celui de sa commercialisation aurait pu causer des défaillances du type de celles qui ont été signalées par réclamation. Une investigation plus poussée de l'évolution de la minéralisation pendant le stockage est cependant nécessaire pour isoler des leviers d'action précis pour l'entreprise.

Bibliographie

- Abril A.**, Caucas V., Bucher E.H. (2001) Reliability of the in situ incubation methods used to assess nitrogen mineralization: a microbiological perspective. *Applied Soil Ecology*, 17:125-130.
- AFNOR.** (2004) *Matières fertilisantes et supports de culture : Echantillonnage, analyses chimiques et essais physico-chimiques*. Saint-Denis la Plaine : AFNOR, 368 p. (Matières fertilisantes et supports de culture). ISBN 2121842519
- Argo W.R.** & Biernbaum J.A. (1997) Lime, water source, and fertilizer nitrogen form affect medium pH and nitrogen accumulation and uptake. *HortScience*, 32(1):71-74.
- Britto D.T.** & Kronzucker H.J. (2002) NH₄⁺ toxicity in higher plants : a critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159:576-584.
- Bunt A.C.** (1976) *Modern potting composts*. The Pennsylvania State University Press. 277 p.
- Bresch S.** (2012) Vers une meilleure maîtrise de la fertilisation organique pour les productions horticoles. In : Astredhor (18 janvier 2012). *Journées Techniques*. Astredhor, 19 p. multigr.
- Carlile W.R.** (2004) Changes in organic growing media during storage. *Acta Horticulturae*, 648:153–159.
- Gagnon B.**, Rioux C., Chagnon J. (1993) Evolution of chemical composition and microbial activity during storage of compost-based mixes. *Compost Science and Utilization*, 1(3):15-21.
- Germon J.C. & Couton Y.** (1999) La dénitrification dans les sols, régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, novembre 1999, numéro 38, p. 67-74.
- Havlin J.L.**, Beaton J.D., Tisdale S.L., Nelson W.L. (2004) *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. 7^{ème} édition. Englewood Cliffs N.J: Prentice-Hall, 528 p. ISBN 0130278246
- Heeb A.**, Lundegårdh B., Ericsson T. and Savage G. P. (2005) Nitrogen form affects yield and taste of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85: 1405–1414.
- Herlihy M.** (1972), Microbial and enzyme activity in peats. *Acta Horticulturae*, 26:45-50.
- Horchani F.**, R'bia O., Hajri R., Aschi-Smiti S. (2011) Nitrogen nutrition and ammonium toxicity in higher plants. *International Journal of Botany*, 7:1–16.
- Inubushi K.**, Barahona M.A., Yamakawa K. (1999) Effects of salts and moisture content on N₂O emission and nitrogen dynamics in Yellow soil and Andasol in model experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 29:401-407.

Irshad M., Honna T., Yamamoto S., Eneji A.E., Yamasaki N. (2005) Nitrogen mineralization under saline conditions. *Plant and Soil Science*, 36:1681-1689.

Kelderer M., Thalheimer M., Andreaus O., Topp A., Burger R., Schiatti P. (2008) The mineralization of commercial organic fertilizers at 8°C temperature. In : Eco-Fruit (13ème conférence, Weinsberg/Germany, février 2008). *International Conference on Cultivation Technique and Phytopathological Problems in Organic Fruit-Growing*.Eco-Fruit, p.160-166.multigr.

Lang H.J. & Elliott G.C. (1991) Influence of ammonium:nitrate ratio and nitrogen concentration on nitrification activity in soilless potting media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116:642-645.

Lemaire F., Dartigues A., Rivière L.M., Charpentier S. (1989) *Culture en pots et conteneurs : principes agronomiques et applications*. Limoges : Revue Horticole, 184 p. (Du labo au terrain). ISBN 2738001572

Linn, D.M.&Doran J.W. (1984) Effect of water-filled pore space on carbondioxide and nitrousoxide production on tilled and non-tilledsoils. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 48:1267-1272.

Martínez-Andújar C., Ghanem M. E., Albacete A., Pérez-Alfocea F. (2013) Response to nitrate/ammonium nutrition of tomato (*Solanumlycopersicum* L.) plants overexpressing a prokaryotic NH₄⁺-dependant asparagine synthetase. *Journal of Plant Physiology*, 170:676-687.

Maynard D.N. &Hochmuth G.J. (1997) *Knott's Handbook for Vegetable Growers*.5ème édition. New York : John Wiley& Sons, 642 p. ISBN 047173828X

Michel J.C. (2012) Les supports de culture : bases agronomiques & contraintes environnementales – Marché & tendances stratégiques. In : Astredhor (18 janvier 2012). *Journées Techniques*.Astredhor, 41 p. multigr.

Moughli L. (2000) Les engrais minéraux, caractéristiques et utilisation. *Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA*, septembre 2000, numéro 72, p. 1-4.

Niemiera A.X. & Wright R.D. (1986) Effect of liming rate on nitrification in a pine bark medium.*Journal of the American Society for Horticultural Science*, 111:713-715.

Paung foo-Lonhienne C., Visser J., Lonhien T. G. A., Schmidt S. (2012) Past, present and future of organic nutrients.*Plant Soil*, 359:1-18.

Promojardin.(2012) Le marché du jardin amateur : synthèse [en ligne]. 4 p. Disponible sur <http://www.mpl.ird.fr/documentation/download/FormBibliog.pdf> (Consulté le 11 juin 2013)

R Core Team (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.URL <http://www.R-project.org/>.

Schumann A. & Sumner M. (1998) Potential ammonia and nitrile toxicity from fly ash-sewage-poultry manure mixtures. In : Association française pour l'étude du sol (16^{ème} congrès, Montpellier, août 1998). *Congrès mondial de science du sol*. Association française pour l'étude du sol, 8 p. multigr.

Sierra Augustinus I. A. (2007) *Nutrient release and availability from individual and blended nutrient sources for organic transplant production*. Thèse de doctorat : Horticulture : Gainesville : University of Florida, 119p.

Taylor L.L., Niemiera A.X., Wright R.D. (2013) Nitrification in pine tree substrate is influenced by storage time and amendments. *HortScience*, 48:115-122.

Terhoeven-Urselmans T., Bruns C., Schmilewski G., Ludwig B. (2007) Effect of passive heating and storage on the quality of hand-bagged and pre-packed growing media. *Scientia Horticulturae*, 115:82-90.

Valé M. (2012) Activité biologique et engrais organiques dans les sols et substrats : principes agronomiques et outils analytiques. In : Astredhor (18 janvier 2012). *Journées Techniques*. Astredhor, 45 p. multigr.

Vendryes B. (2011) *Fertilisation organique : stratégie d'utilisation en culture hors sol et conteneur pour l'horticulture ornementale*. Mémoire du diplôme de l'Institut Polytechnique de Beauvais : agriculture : Beauvais : Institut polytechnique, 79 p.

Walden R.F. & Wright R.D. (1995) Interactions of high temperature and exposure time influence nitrification in a pine bark medium. *HortScience*, 30(5):1026-1028.

Annexes

Annexe I : Conductivité des différents mélanges utilisés lors de l'expérience portant sur le pH des terreaux

| Fertilisation | Test sur cresson | | | Test sur tomate | | |
|---------------|------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|
| | sans stockage | stockage 3 semaines | Stockage 3 semaines + ferment | sans stockage | stockage 3 semaines | Stockage 3 semaines + ferment |
| Organique | 640 | 460 | 560 | 480 | 660 | 400 |
| Organique | 600 | 480 | 560 | 480 | 500 | 420 |
| Organique | 640 | 540 | 680 | 540 | 780 | 500 |
| Minérale | 720 | 600 | 520 | 420 | 780 | 520 |
| Minérale | 720 | 380 | 700 | 640 | 640 | 690 |
| Minérale | 780 | 760 | 640 | 500 | 540 | 740 |
| Minérale | 900 | 590 | 760 | 700 | 800 | 420 |

Annexe II.a : résultats des tests statistiques du test sur cresson (germination à 7 jours) sans stockage du terreau :

Normalité des résidus :

```
Shapiro-Wilk normality test  
data: Res$residuals  
W = 0.9731, p-value = 0.7427
```

Homosédasticité :

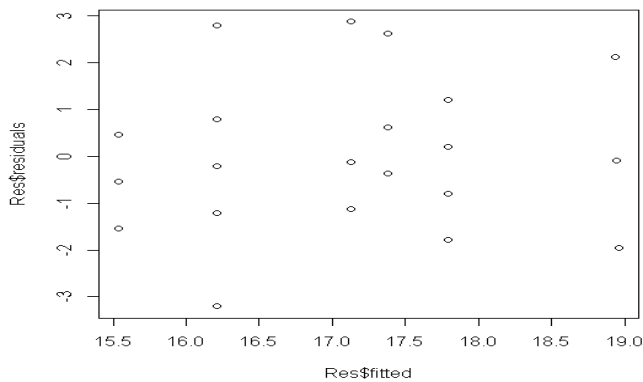


Table d'analyse de la variance :

| Analysis of Variance Table | | | | | |
|---|----|--------|---------|---------|-----------|
| Response: germination | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
| pH | 3 | 10.458 | 3.4861 | 1.2468 | 0.32064 |
| fert | 1 | 15.042 | 15.0417 | 5.3796 | 0.03167 * |
| Residuals | 19 | 53.125 | 2.7961 | | |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

Annexe II.b : résultats des tests statistiques du test sur cresson (germination à 7 jours) après stockage du terreau pendant 3 semaines :

Normalité des résidus :

| |
|------------------------------|
| Shapiro-Wilk normality test |
| data: Res\$residuals |
| W = 0.9556, p-value = 0.3568 |

Homosédasticité :

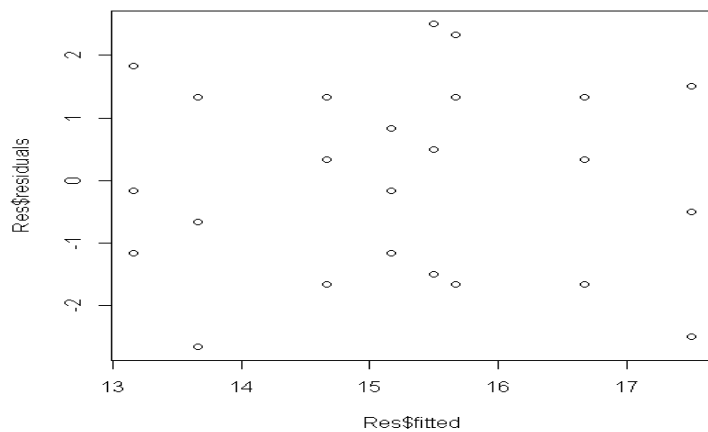


Table d'analyse de la variance :

| Analysis of Variance Table | | | | | |
|---|----|--------|---------|---------|-------------|
| Response: germ | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
| pH | 3 | 19.5 | 6.5000 | 2.3302 | 0.106760 |
| fert | 1 | 24.0 | 24.0000 | 8.6038 | 0.008532 ** |
| Residuals | 19 | 53.0 | 2.7895 | | |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

Annexe II.c : résultats des tests statistiques du test sur cresson (germination à 7 jours) après stockage du terreau pendant 3 semaines en présence de ferment :

Normalité des résidus :

| |
|------------------------------|
| Shapiro-Wilk normality test |
| data: Res\$residuals |
| W = 0.9579, p-value = 0.3981 |

Homosédasticité :

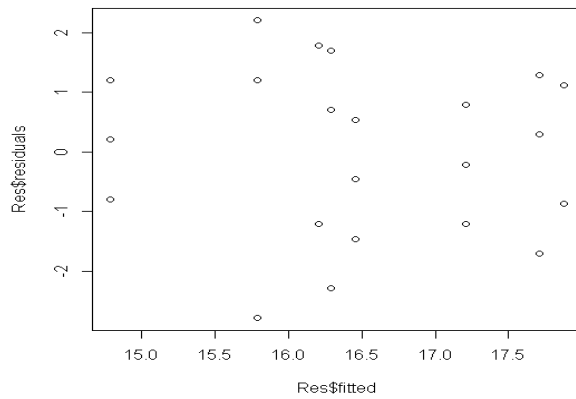


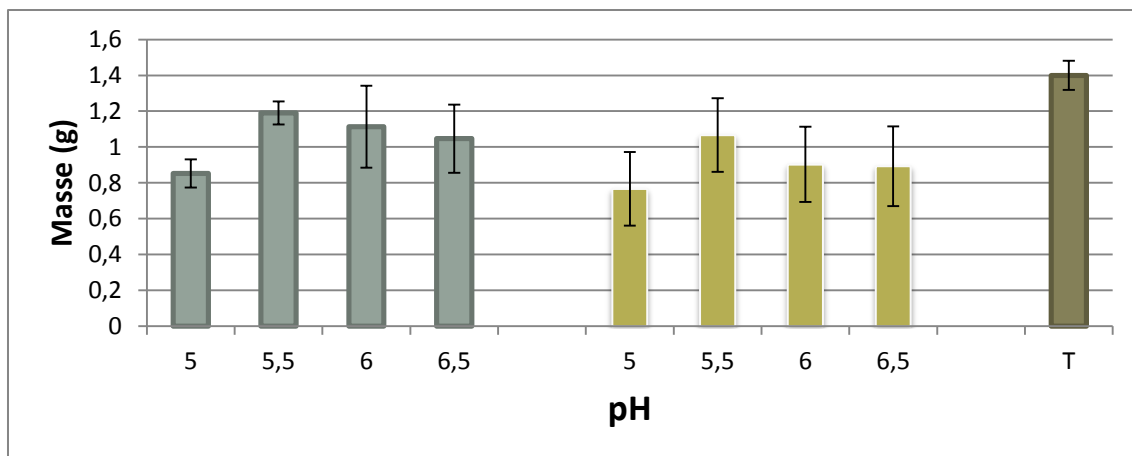
Table d'analyse de la variance :

Analysis of Variance Table

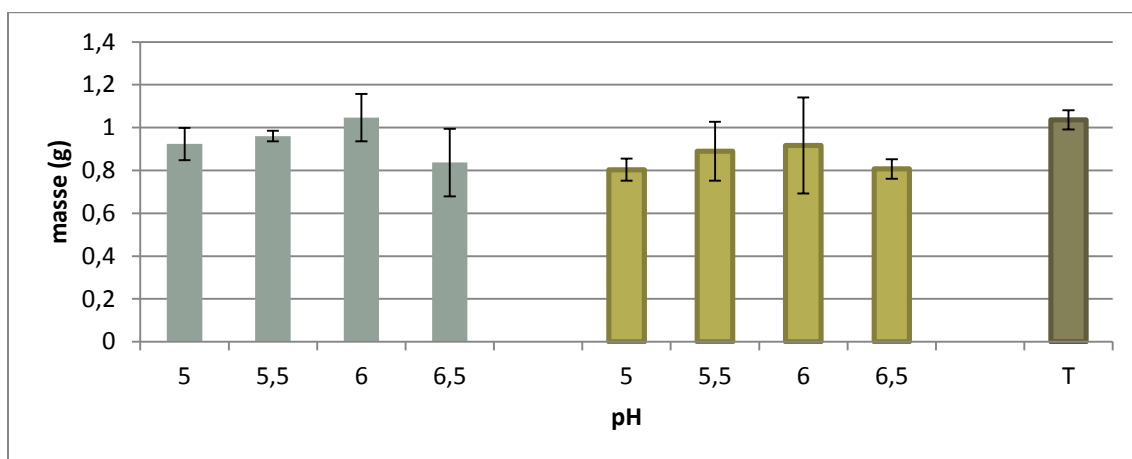
Response: germ

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|-----------|
| pH | 3 | 10.125 | 3.3750 | 1.4643 | 0.25591 |
| fert | 1 | 12.042 | 12.0417 | 5.2245 | 0.03393 * |
| Residuals | 19 | 43.792 | 2.3048 | | |

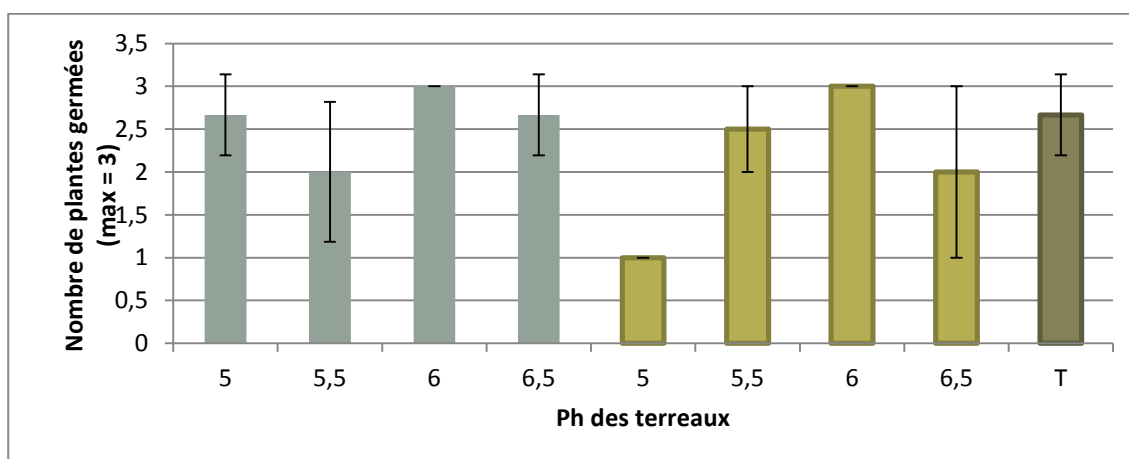
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



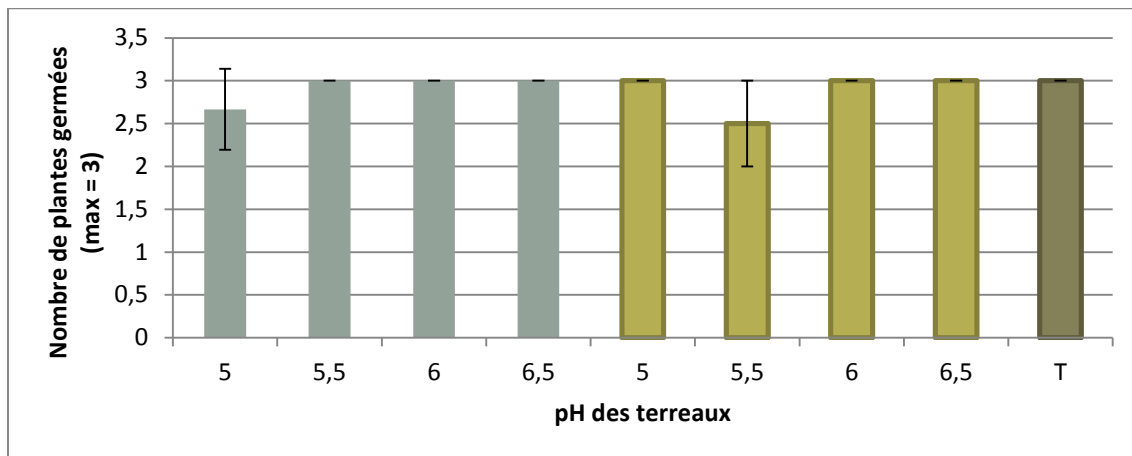
Annexe III.a : Cresson : masse fraiche par pot à 7 jours, après stockage du terreau pendant 3 semaines



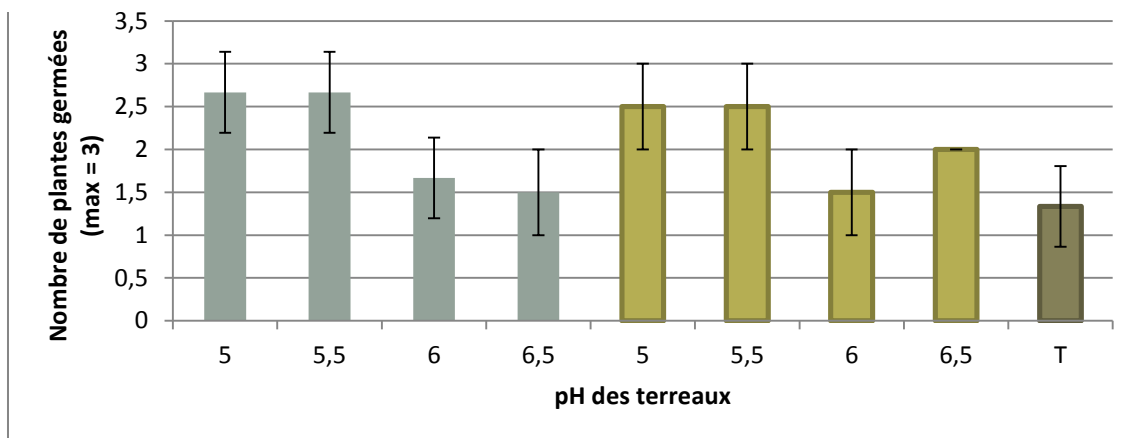
Annexe III.b : Cresson : masse fraiche par pot à 7 jours, après stockage du terreau pendant 3 semaines en présence de ferment



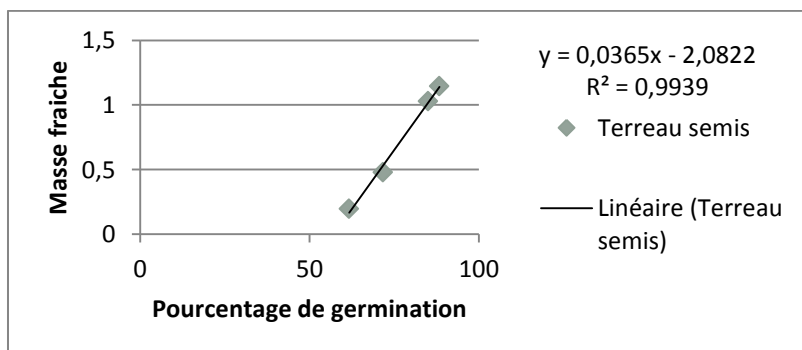
Annexe IV.a : Tomate : nombre de plantes germées par pot (max = 3) à 30 jours, sans stockage du terreau

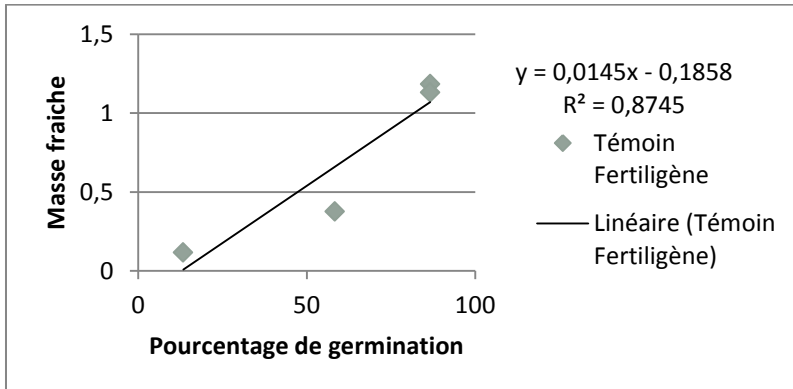
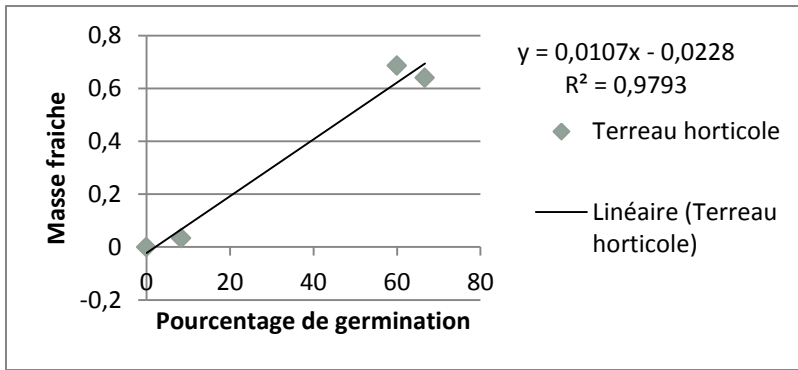


Annexe IV.b : Tomate : nombre de plantes germées par pot (max = 3) à 30 jours, après stockage du terreau pendant 3 semaines

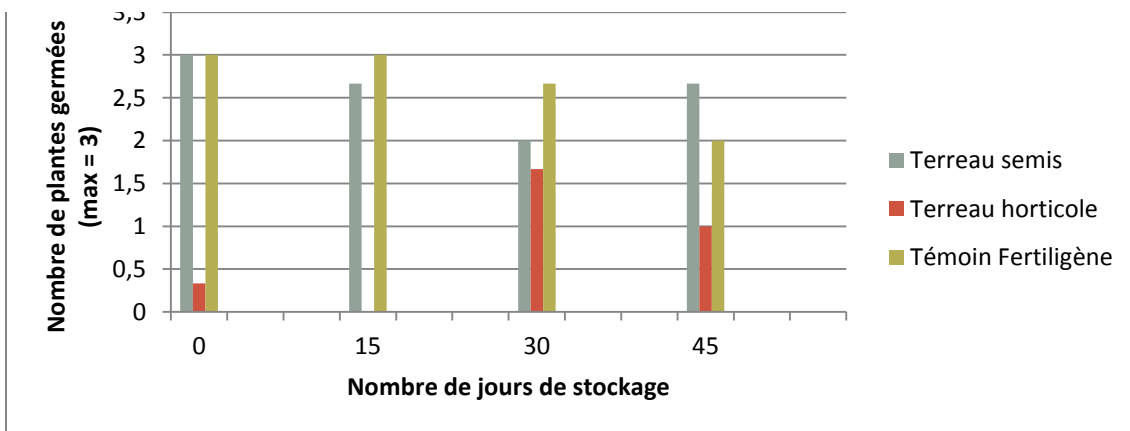


Annexe IV.c : Tomate : nombre de plantes germées par pot (max = 3) à 30 jours, après stockage du terreau pendant 3 semaines en présence de ferment

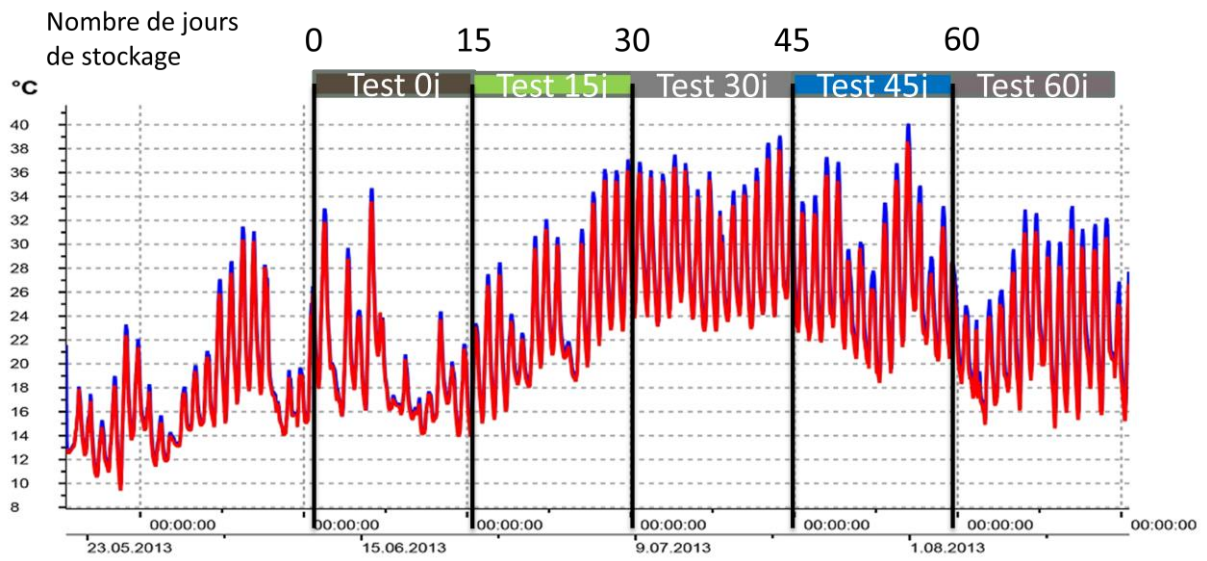





Annexe V : Cresson : corrélation entre les variables masse fraiche et pourcentage de germination chez les différents terreaux testés



Annexe VI : Tomate : nombre de plantes germées par pot (max = 3) à 14 jours, donnée mesurée à différentes dates du stockage



Annexe VII : Température (enregistrée toutes les 2 heures) dans la pièce contenant la chambre de germination pendant les tests réalisés à 0, 15, 30, 45 et 60 jours de stockage.

| | |
|--|---|
|  | Diplôme : Ingénieur Horticole Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Gestion Durable du Végétal Enseignant référent : Jean-Charles Michel |
| Auteur(s) : Boris CALVET Date de naissance* : 22/11/1990 | Organisme d'accueil : BIOLANDES Pin Décor Adresse : Route de Bélis 40420 LE SEN |
| Nb pages : 42 Annexe(s) : 7 | |
| Année de soutenance : 2013 | Maître de stage : M. Philippe Sartre |
| Titre français : Compréhension du comportement d'engrais organiques dans les terreaux destinés au marché amateur | |
| Titre anglais : Assessing the behavior of organic fertilizers in growing media designed for the amateur market | |
| <p>Résumé :</p> <p>Avec l'importance croissante des préoccupations environnementales, le marché des terreaux Utilisables en Agriculture Biologique (UAB) s'est développé. Ces terreaux sont fertilisés à l'aide d'engrais organiques, engrais complexes et diversifiés dont le comportement en culture peut être différent de celui des engrais minéraux traditionnellement utilisés, notamment en ce qui concerne les dynamiques de minéralisation de l'azote. Pour pouvoir s'assurer de la qualité de ces terreaux dans le cadre de leur commercialisation auprès des particuliers, il est nécessaire de comprendre leur comportement durant leur stockage dans l'entreprise ou en magasin ainsi que les conséquences que ce comportement aura sur les plates cultivées dans le terreau.</p> <p>Nous nous intéressons dans un premier temps à l'effet du pH du terreau sur son comportement pendant le stockage et sur les plantes cultivées dans celui-ci à l'issue du stockage. Le pH ne semble pas être une variable très influente dans la fourchette de 5,5 à 6,5, un terreau au pH compris entre ces deux bornes devrait pouvoir assurer une minéralisation correcte durant le stockage ainsi qu'un bon taux de germination des plantes.</p> <p>Nous nous intéressons ensuite à l'évolution des dynamiques de minéralisation de l'azote pendant le stockage du terreau conditionné en palettes et à ses conséquences sur les plantes. Certaines formulations de terreaux peuvent connaître une libération rapide de NH_4^+ en grande quantité ainsi qu'une raréfaction de NO_3^- durant leur stockage. Ces évolutions peuvent avoir des conséquences délétères sur les plantes cultivées. Des expériences supplémentaires sont cependant nécessaires pour isoler des leviers d'action potentiels pour les entreprises.</p> | |
| <p>Abstract :</p> <p>With growing concerns about environmental problems, the organic growing media market has been developing for the past few years. Organic growing media is fertilized with organic fertilizers, which encompass a wide variety of natural components. The behavior of these fertilizers can vary a great deal, especially regarding nitrogen mineralization. In order for a company to ensure the quality of these growing media for individual use, their chemical evolution during storage must be assessed along with the consequences of this evolution on growth and germination of plants.</p> <p>We first investigate the impact of pH on the evolution of peat-based mixes during storage and on plants grown in these growing media after storage. pH doesn't seem to be of major importance regarding plant germination as long as it stays within the 5.5 – 6.5 range. Thus a growing media with a pH of 5.5 to 6.5 should ensure a good nitrogen mineralization while allowing good plant germination.</p> <p>In a second part, we follow the evolution of nitrogen mineralization in a group of growing media bags stored as a plastic-wrapped palette and we try to measure the impact of this special kind of storage on plant germination and growth. Some mixes can undergo rapid and important NH_4^+ accumulation along with NO_3^- rarefaction. These phenomena can cause a decline in plant growth and germination but further study is required to try and isolate precise levers of action that could provide a way of avoiding such negative outcomes.</p> | |
| Mots-clés : support de culture, terreau, substrat, stockage, minéralisation, azote, pH, cresson, tomate, germination (storage, mineralization, cress, tomato, germination, growing media,nitrogen) | |