

FRANÇOIS BIRON

**EFFETS DES EXTRAITS DE COMPOST (EC)
FORTIFIÉS SUR LA CROISSANCE DU SOYA
(*Glycine max* (L.) Merr.)**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DE PHYTOLOGIE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

Résumé

En agriculture biologique, peu de produits sont autorisés pour améliorer la croissance des plantes. Cette étude qualifie les éléments solubles d'extraits de compost (EC) sur la croissance du soya. En présence ou non d'aération, six composts ont macéré dans l'eau pendant 14 jours et caractérisés. Quatre EC ont été sélectionnés, fortifiés et vaporisés sur le feuillage du soya cultivé dans du sable et traité avec de l'eau ou une solution nutritive. Les éléments solubles des EC évoluent en fonction du temps, dont les nitrates qui diminuent en fonction de l'aération. La teneur en éléments minéraux des EC est optimale après 2 jours et sans aération. L'EC «Fumier de vers» a démontré une augmentation du développement, des biomasses, et du prélèvement en éléments minéraux du soya traité avec une solution nutritive. L'effet bénéfique de cet EC semble lié à des substances de croissance solubles, autres que les éléments minéraux solubles.

Abstract

In organic agriculture, there are few certified products that can be used to favor plant growth. This study was conducted to determine the soluble compounds from water extract of compost (WEC) that could benefit soybean growth. In the presence or the absence of aeration, six composts were macerated into water up to 14 days. Following the characterization of WEC, four were selected, enriched and applied on foliage of soybean grown in sand and watered with a nutrient solution or water. Over time, most soluble mineral salts went into solution, but N could be lost through denitrification. To enhance mineral contents and minimize N loss, WEC should be produced within two days. When treated with the nutrient solution, the water extract of vermicompost enhanced soybean development, biomasses, and plant mineral contents. This WEC appears to favor plant growth through the provision of soluble growth substances, other than soluble mineral elements.

Avant-Propos

Ce mémoire consiste en une introduction (chapitre 1), une revue de littérature du sujet d'étude (chapitre 2) qui mène à l'élaboration des hypothèses de recherche (chapitre 3) et la méthodologie utilisée (chapitre 4). L'expérience s'est déroulée en trois volets. Les résultats de ces trois volets sont présentés et discutés en trois sous-sections au chapitre 5. La conclusion répond aux hypothèses de recherche (chapitre 6). Un article scientifique reprenant les résultats les plus pertinents de ce mémoire est en cours en préparation.

Remerciements

Je tenais à remercier le plus sincèrement les personnes suivantes :

- Ma directrice Chantal Beauchamp pour son temps, pour m'avoir montré à faire de la science de qualité et pour avoir assumé les frais de recherche dans son laboratoire.
- Mon co-directeur François-P. Chalifour pour ses précieux conseils lors de la planification des expériences, ses diverses interventions lors de l'expérience avec le soya et pour avoir assumé les frais des analyses chimiques sur les extraits de composts et les plantes.
- Mon co-directeur Adrien N'dayegamiye de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) à Québec pour les commentaires pertinents concernant l'analyse des composts et sur le mémoire et pour m'avoir fait comprendre l'importance de se concentrer sur un seul sujet.
- L'équipe du laboratoire de l'IRDA avec qui j'ai passé un été 2006 fantastique et qui m'a permis d'utiliser leur laboratoire.
- Pascal Desbiens pour les trucs en statistiques et un exemple de rigueur.
- Le département de statistique de l'Université Laval sans qui l'analyse d'un dispositif expérimental complexe n'aurait jamais été possible.
- Je tiens à remercier particulièrement le FQRNT pour son soutien financier au cours de ma maîtrise sans quoi le processus n'aurait pu être possible.
- En terminant, j'aimerais remercier Julie Beauregard et Mathurin Biron. Ils ont été tous deux des sources d'inspiration afin de continuer et de persévérer dans ce projet.

Merci.

À Flore Biron

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Avant-Propos.....	iii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	ix
1. Introduction.....	2
2. Revue de littérature.....	5
2.1. Le compost.....	5
2.2 Les extraits de compost.....	5
2.2.1 Les extraits d'algues.....	6
2.3 Les éléments minéraux solubles des extraits de compost.....	6
2.3.1 Les éléments minéraux majeurs et éléments traces.....	7
2.3.2 La dynamique des extraits de compost.....	11
2.3.3 L'absorption foliaire des éléments minéraux.....	13
2.4 Les éléments organiques solubles.....	14
2.4.1 Les substances humiques.....	14
2.5 Le soya et la nodulation.....	16
3. Hypothèses et objectifs.....	18
3.1 Hypothèses de travail.....	18
3.2 Objectifs de recherche.....	18
4. Méthodologie.....	19
4.1 Volet 1 : Caractérisation des composts.....	19
4.1.1 Description des composts.....	19
4.1.2 Échantillonnage des composts.....	20
4.1.3 Paramètres physicochimiques.....	21
4.1.4 Paramètres biologiques.....	22
4.1.5 Analyses statistiques.....	23
4.2 Volet 2 : Impact du compost, de l'aération et du temps de macération sur les caractéristiques physico-chimiques des EC.....	24
4.2.1 Fabrication des extraits de compost.....	24
4.2.1.1 Extraits de composts aérés.....	24
4.2.1.2 Extraits de compost non aérés.....	25
4.2.2 Échantillonnage des extraits de compost.....	25
4.2.3 Paramètres physicochimiques.....	26
4.2.4 Analyse statistique.....	26
4.3 Volet 3 : Impact des EC sur la nutrition minérale, la nodulation et sur la biomasse du soya.....	27
4.3.1 Désinfection des semences.....	27
4.3.2 Culture des plantes de soya.....	27
4.3.3 Préparation des extraits de composts fortifiés.....	28
4.3.4 Vaporisation des extraits de compost fortifiés sur le soya.....	29
4.3.5 Mesures en cours de développement.....	29
4.3.6 Mesures à la récolte.....	30

4.3.7 Analyse statistique	30
5. Résultats et Discussion	32
5.1 Volet 1 : Caractérisation des composts	32
5.1.1 Paramètres physicochimiques des composts	32
5.1.1.1 La teneur en matière sèche et en cendres	32
5.1.1.2 pH.....	32
5.1.1.3 Conductivité électrique	33
5.1.1.4 Carbone total.....	33
5.1.1.5 Azote total.....	33
5.1.1.6 Ratio C/N	34
5.1.1.7 Éléments majeurs et éléments traces	35
5.1.2 Paramètres biologiques des composts.....	38
5.1.2.1 Carbone microbien.....	38
5.1.2.2 Taux de germination et d'élongation, et indice de germination	38
5.1.2.3 Dégagement de CO ₂	38
5.1.2.4 Minéralisation du N-NO ₃	40
Conclusion volet 1	41
5.2 Volet 2 : Impact de l'aération, du compost et du temps de macération sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des EC	43
5.2.1 Extraits de compost.....	43
5.2.1.1 Paramètres physicochimiques.....	43
5.2.1.1.1 Teneurs en matière sèche et en cendres	43
5.2.1.1.2 pH, conductivité électrique et potentiel rédox	46
5.2.1.1.3 Anions.....	54
5.2.1.1.4 Cations	63
5.2.2 Les extraits de compost comparés aux composts de départ.....	72
5.2.2.1 Paramètres physicochimiques.....	72
5.2.2.1.1 Teneur en matière sèche et en cendres.....	72
5.2.2.1.2 pH et conductivité électrique	72
5.2.2.1.3 Anions.....	75
5.2.2.1.4 Cations	76
Conclusion volet 2	78
5.3 Volet 3 : Impact des EC sur la nutrition minérale, la nodulation et sur la biomasse du soya	79
5.3.1 Extraits de composts	79
5.3.1.1 Paramètres physicochimiques.....	79
5.3.2 Effets des EC appliqués sur le feuillage du soya : bioessai	80
5.3.2.1 Paramètres physiologiques de croissance: hauteur, diamètre du collet et stades de développement	81
5.3.2.2 Paramètres physiologiques à la récolte : le poids sec des parties aériennes, des racines, des nodosités et du nombre de nodosités	86
5.3.2.2.1 Teneur en éléments minéraux des parties aériennes.....	90
5.3.2.2.2 Prélèvement en éléments minéraux	96
Conclusion volet 3	108
6. Conclusion	109
Bibliographie	111
ANNEXE 1	121

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Moyenne des masses volumiques des composts.....	20
Tableau 5.1 : Caractérisation physique des composts initiaux. Moyennes et écarts types de trois répétitions.	32
Tableau 5.2 : Caractérisation chimique des composts initiaux. Moyennes et écarts types de trois répétitions.	34
Tableau 5.3 : Caractérisation des composts initiaux pour les éléments majeurs et éléments traces. Moyennes et écarts types de trois répétitions.	37
Tableau 5.4 : Carbone de la biomasse microbienne, taux de germination et d'élongation racinaire, ainsi que l'indice de germination obtenus de l'analyse des composts initiaux. Moyennes et écarts types de trois répétitions	38
Tableau 5.5 : Résumé de l'analyse de variance du dégagement de CO ₂ des composts initiaux en fonction du temps d'incubation.	39
Tableau 5.6 : Résumé de l'analyse de variance de la minéralisation du N-NO ₃ en fonction du compost et du temps d'incubation.	40
Tableau 5.7 : Résumé de l'analyse de variance de la teneur en matière sèche et en cendres sur base humide (%) dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération et du compost.	44
Tableau 5.8 : Teneur moyenne et son erreur type en matière sèche et en cendres (%) sur une base sèche dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération et du compost.	45
Tableau 5.9: Résumé de l'analyse de variance du pH, de la CÉ et du PR des EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération, du compost et du temps de macération.	47
Tableau 5.10 : Moyenne ± écart type des pH des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	49
Tableau 5.11 : Moyenne ± écart type de la CÉ (mS/cm) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	51
Tableau 5.12 : Moyenne ± écart type du PR (mV) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	53
Tableau 5.13: Résumé de l'analyse de variance de la quantité de N-NO ₃ , P-PO ₄ , S-SO ₄ et Cl dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération, du compost et du temps de macération.	55
Tableau 5.14 : Moyenne de la quantité de N-NO ₃ (mg N-NO ₃ /L) ± écart type des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.....	56
Tableau 5.15 : Moyenne ± écart type de la quantité de P-PO ₄ (mg P-PO ₄ /L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.....	59

Tableau 5.16 : Moyenne \pm écart type de la quantité de S-SO ₄ (mg S-SO ₄ /L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.....	61
Tableau 5.17 : Moyenne \pm écart type de la quantité de Cl (mg Cl/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	63
Tableau 5.18: Résumé de l'analyse de variance de la quantité de K, Ca, Mg et Na dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération, du compost et du temps de macération.....	65
Tableau 5.19 : Moyenne \pm écart type de la quantité de K (mg K/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	67
Tableau 5.20 : Moyenne \pm écart type de la quantité de Ca (mg Ca/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	69
Tableau 5.21: Moyenne \pm écart type de la quantité de Mg (mg Mg/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	70
Tableau 5.22 : Moyenne \pm écart type de la quantité de Na (mg Na/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.	72
Tableau 5.23 : Caractérisation chimique et indice de germination des EC fortifiés appliqués sur le soya lors du bioessai.	80
Tableau 5.24 : Résumé de l'analyse de variance de la hauteur, du diamètre du collet et des stades de développement du soya en fonction de l'arrosage avec une solution nutritive, de la vaporisation avec des EC fortifiés et du temps.	82
Tableau 5.25 : Résumé de l'analyse de variance du poids sec des parties aériennes, du poids sec des racines, du poids sec des nodosités et du nombre de nodosités du soya en fonction de l'arrosage avec une solution nutritive et de la vaporisation avec des EC fortifiés.....	87
Tableau 5.26 : Poids secs des parties aériennes, des racines, et des nodosités, et nombre de nodosités par plante de soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.....	88
Tableau 5.27 : Résumé de l'analyse de variance des teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn des parties aériennes du soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.	91
Tableau 5.28 : Teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn des parties aériennes du soya arrosé ou non avec une solution nutritive et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.....	92
Tableau 5.29 : Résumé de l'analyse de variance du prélèvement en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn par du soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.....	98
Tableau 5.30 : Prélèvements en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn par plante de soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.....	101

Liste des figures

Figure 4.1 : Illustration du montage de l'expérience sur les EC.....	25
Figure 5.1 : Quantité de CO ₂ dégagée par les composts initiaux. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 3).....	40
Figure 5.2 : Quantité de N-NO ₃ minéralisée par les composts initiaux. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 3).....	41
Figure 5.3 : Effet du temps de macération sur les pH des EC pour les interactions «aéré * Fumier de vers», «non aéré * Fumier de vers», «aéré * autres composts» et «non aéré * autres composts». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).	49
Figure 5.4 : Effet du temps de macération sur le PR des EC fabriqués en présence ou en absence d'aération. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 16).	53
Figure 5.5 : Effet du temps de macération sur la quantité de N-NO ₃ des EC fabriqués en présence ou en absence d'aération. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 16).....	57
Figure 5.6 : Effet du temps de macération sur la quantité de P-PO ₄ des EC «composts biodynamiques» et «Tourbe et Crevette». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 8).....	60
Figure 5.7 : Effet du temps de macération sur la quantité de K des EC «autres composts» et «Fumier de vers». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 8).	67
Figure 5.8 : Relation entre le pH et la CÉ du compost et celle de leur EC aux temps «1 h, 2, 7 et 14 d» (n = 32).....	74
Figure 5.9 : Relation entre les quantités de NO ₃ , de P et de S du compost et celle de leur EC aux temps «1 h, 2, 7 et 14 d» (n = 32).	75
Figure 5.10 : Relation entre les quantités de K, Ca, Mg et Na du compost et de leur EC aux temps «1 h, 2, 7 et 14 d» (n = 32).	77
Figure 5.11 : Effet de la solution nutritive sur la hauteur moyenne des plantes de soya inoculées ou non et vaporisées avec de l'eau et celles inoculées et vaporisées avec les EC «biodynamique 24 mois», «biodynamique 3 mois» et «Fumier de vers». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).	84
Figure 5.12 : Effet du temps sur les stades de développement des plantes de soya inoculées et vaporisées avec les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois» puis sur les plantes de soya inoculées ou non et vaporisées avec de l'eau. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 8).	85
Figure 5.13 : Effet de la solution nutritive sur le poids sec des parties aériennes du soya inoculé vaporisé avec les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois» et avec de l'eau. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).	89
Figure 5.14 : Effet de la solution nutritive sur le poids sec des racines du soya inoculé et vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» et de l'eau. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).	90

- Figure 5.15 : Effet de l'arrosage avec la solution nutritive ou de l'eau sur la teneur en K des parties aériennes du soya pour les vaporisations avec les EC «Tourbe et Crevette», «eau» et «Fumier de vers». Tous ces traitements avaient été inoculés avec *Bradyrhizobium*. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4). ..95
- Figure 5.16 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en N par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 103
- Figure 5.17 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Ca par par plante de le soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 103
- Figure 5.18 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Mg par plante de le soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et l'EC «Fumier de vers». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 104
- Figure 5.19 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Cu par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 104
- Figure 5.20 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Mn par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 105
- Figure 5.21 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Zn par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau, les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 105
- Figure 5.22 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en K par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et l'EC «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4)..... 107

1. Introduction

Avec une croissance annuelle globale de 15 %, la production certifiée biologique est un des secteurs de l'agroalimentaire qui connaît la plus forte progression (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2006). Au Québec en 2005, 232 fermes œuvraient dans le secteur des grandes cultures – céréales et oléagineux biologiques. Ce secteur occupe la deuxième place après le sirop d'érable pour ce qui a trait au nombre de fermes certifiées biologiques sur un total de 816 fermes en 2005 (Macey, 2006).

L'une des trois problématiques la plus importante, des producteurs de grandes cultures en régie biologique, mise en lumière par le document intitulé: *Priorités de recherche, d'innovation et de transfert technologique en agriculture biologique* (CRAAQ, 2006), est la fertilisation. En agriculture biologique, les pratiques de fertilisation doivent non seulement permettre à la plante de se développer et de croître adéquatement, mais également permettre de protéger les ressources environnementales et d'assurer la pérennité du système de production (Petit et Jobin, 2005). Pour ce faire, la fertilisation en régie biologique vise à enrichir le sol, principalement par l'utilisation d'engrais verts, d'apports en fumier et en compost et par l'introduction de légumineuses en cours de rotation. Dans le contexte de l'agriculture biologique québécoise en 2005, les cultures de prairies/pâturage, dont une certaine proportion est occupée par des légumineuses, occupent la première place avec 4246 ha, suivies par le soya (*Glycine max* (L.) Merr.) avec 1 188 ha (Macey, 2006). Ainsi, le soya a été sélectionné pour ce projet dû à l'importance de ses superficies et à son potentiel élevé de développement en mode biologique maraîcher (Born, 2006).

Le soya fait partie de la famille des Fabacées (Fabaceae). Il établit une relation symbiotique spécifique avec des bactéries du genre *Bradyrhizobium* (Willems, 2006) à l'intérieur de structures appelées «nodosités». Ces bactéries possèdent une enzyme appelée nitrogénase qui leur permet de réduire l'azote atmosphérique (N_2) en ammonium (NH_4). L'azote sous forme de $N-NH_4$ est rapidement transféré à la plante et permet généralement de combler la majeure partie des besoins azotés de cette culture (Chalifour, 2006).

Par contre, le soya suit généralement une culture exigeante dans la rotation alors que le sol risque d'être plus appauvri en éléments nutritifs, celui-ci pourrait bénéficier d'applications foliaires pour stimuler sa croissance. (Estevez, 2006; Canadian Organic Growers, 2001; Duval, 1991). Pour faire face à cette problématique, les producteurs recherchent un stimulant certifié biologique à faible coût. Les extraits de compost (EC) pourraient répondre à cette problématique.

Un EC réfère à une suspension de compost et d'eau qui macère pendant une période de temps déterminée et qui est filtrée avant l'application sur les cultures. Le compost initial, la méthode d'extraction, la période de contact, le ratio compost : eau, le pH, la température, la disponibilité des éléments du compost, etc., sont quelques-uns des facteurs qui influenceront la composition finale de l'EC (Scheuerell et Mahaffee, 2002). Les EC sont surtout utilisés pour la protection des plantes contre les agents pathogènes (Scheuerell et Mahaffee, 2002; 2004; 2006) mais aussi pour fertiliser les plantes (Welke, 2001), pour accélérer de la décomposition des matières organiques (Hall et coll., 2006), pour le traitement des semences (Tränkner, 1992), pour réduire les odeurs (Pfeiffer et Koepf, 1980), pour la «vivification» des composts et des sols (Pfeiffer et Koepf, 1980), pour introduire des microorganismes bénéfiques (Higa et Parr, 1994) et améliorer la structure du sol (Pfeiffer et Koepf, 1980).

Les manières d'employer les EC diffèrent selon les utilisations. Par exemple, les EC peuvent être vaporisés sur le feuillage (Scheuerell et Mahaffee, 2002; Ingham, 1999), les résidus (Hall et coll., 2006), le compost (Pfeiffer et Koepf, 1980) et le sol (Pfeiffer et Koepf, 1980; Walz, 2001). Les EC peuvent aussi être apportés par irrigation (Scheuerell et Mahaffee, 2004; Ingham, 1999) ou utilisés comme traitement des semences en immergeant les semences dans ceux-ci (Tränkner, 1992).

Les connaissances scientifiques concernant l'aspect phytosanitaire des EC continuent de progresser (Scheuerell et Mahaffee, 2006), tandis que les connaissances scientifiques concernant l'effet des EC sur la croissance végétale demeurent limitées comme en témoigne cette citation :

“Further, studies that document the nutritive effects of teas are not shown and to her knowledge have not been done sufficiently to allow prediction about what kinds of nutrients we can expect from compost teas made with different materials.” (Helen Atthowe dans Walz, 2001)

Les hypothèses sous-jacentes à ce travail sont que la composition des EC dépend du compost utilisé, du temps de macération et de la présence d'aération ou non. Les EC aérés ou non peuvent être bénéfiques au soya en stimulant : 1) le développement, 2) l'absorption des éléments majeurs et des éléments traces, 3) la nodulation et 4) la croissance (c.-à-d. la production de biomasse) du soya.

La présente étude vise donc à développer les connaissances sur les aspects bénéfiques des EC sur la croissance des plantes. Plus précisément à répondre aux objectifs suivants : 1) établir la relation entre les analyses physicochimiques et biologiques des composts et leurs extraits; 2) déterminer l'impact du compost, de l'aération et du temps de macération sur les caractéristiques physicochimiques des EC; 3) déterminer l'impact des EC sur la nutrition minérale, la nodulation et la croissance (biomasse) du soya. Pour ce faire, le projet a été séparé en trois volets. Le premier volet servira à la caractérisation des composts avec lesquels les EC seront fabriqués. Quatre des six composts testés seront choisis en fonction des résultats de cette caractérisation. Le deuxième volet sera consacré à la fabrication des EC et à l'analyse de l'impact du compost, du temps et de l'aération sur leur composition. Les résultats de ce deuxième volet serviront à déterminer la méthode utilisée pour la fabrication des EC pour le troisième volet. Le troisième volet servira à l'application des EC sur le soya et à l'évaluation de leurs effets sur la croissance, la nodulation et la nutrition de cette culture.

2. Revue de littérature

2.1. Le compost

Le compost est l'élément essentiel des EC. Les normes biologiques canadiennes définissent le compost comme le :

«produit d'un processus aérobie géré avec soin et par lequel des microorganismes digèrent des matières non synthétiques. Les matières organiques servant à la fabrication du compost doivent être gérées de façon à atteindre certaines températures assez longtemps pour stabiliser efficacement les nutriments et tuer les agents pathogènes de l'humain» (Gouvernement du Canada, 2006).

Ainsi, une grande variété de produits peut potentiellement se retrouver dans les EC comme les éléments minéraux, les composés organiques, les microorganismes, etc.

2.2 Les extraits de compost

Un EC est un mélange de compost et d'eau (1 : 5 à 1 : 10 (volume : volume)) qui macère de 1 heure (h) à 2 semaines avant d'être filtré et appliqué sur les cultures. La solubilisation des éléments nutritifs du compost est l'objectif principal de la production de l'EC (Diver, 2002). L'EC diffère du «thé de compost» (Brinton et coll., 1996) par l'absence de fermentation induite par l'ajout d'une source de carbone soluble (Scheuerell et Mahaffee, 2002). Les modes de fabrication des EC sont rassemblés en deux groupes. Les EC aérés sont ceux confectionnés à l'aide d'un système qui force de l'air dans le mélange. En opposition, les EC non-aérés réfèrent aux méthodes qui n'interviennent pas ou peu lors de la macération. Il est tentant d'utiliser le mot «aérobie» ou «anaérobie» pour décrire les EC mais il deviendrait difficile de mesurer les quantités d'oxygène (O₂) présentes afin de les classer (Scheuerell et Mahaffee, 2002). Le thé de compost se fabrique avec aération ou sans aération. La fermentation associée aux thés de compost est généralement favorisée par l'ajout d'une forme de carbone facilement assimilable comme la mélasse (Diver, 2002; National Organic Standard Board, 2004). L'adjectif «fortifié» rappelle qu'un ou des produits ont été ajoutés pour enrichir l'EC et parfois augmenter la densité microbienne (Scheuerell et Mahaffee, 2004). Tous les produits ajoutés aux EC sont aussi appelés

«additifs». Les additifs les plus courants approuvés pour l'agriculture biologique sont : les extraits d'algues, la poudre de roche et les substances humiques (SH) (Diver, 2002). Dans cette étude, les extraits d'algues ont été ajoutés à tous les EC et seront brièvement abordés.

2.2.1 Les extraits d'algues

Ascophyllum nodosum est l'espèce retrouvée le plus souvent dans les produits à base d'algues dédiés à l'agriculture (Verkleij, 1992). Disponibles en concentrés liquides ou en poudre soluble, ceux-ci contiennent, entre autres : des éléments minéraux majeurs et des éléments traces (Verkleij, 1992; Acadian Seaplant Limited, date inconnue), des composés carbonés solubles (des alginates (Moen et coll., 1997; Rioux et coll., 2007), des polyphénols (Moen et coll., 1997), des polysaccharides (Marais et Joseleau, 2001; Rioux et coll., 2007), de la bétaine (Blunden et coll., 1997), des substances de croissance (des cytokinines (Hussain et Boney, 1969), des auxines (Mowat, 1964 cité dans Verkleij, 1992), de l'acide abscisique et indole acétique (Boyer et Dougherty, 1988)) et des SH (Radwan et coll., 1997). Notons que la composition des extraits d'algues change en fonction de la saison de récolte (Moen et coll., 1997), de l'espèce utilisée, de l'endroit de récolte et du procédé d'extraction (Craigie et coll., 2007).

Les bénéfices liés à l'application d'algues marines en agriculture sont les suivants : 1) augmentation de la germination, des rendements (Verkleij, 1992; Norrie et Keathley, 2006), de la résistance aux stress et du taux de chlorophylle (Blunden et coll., 1997) 2) diminution de l'incidence des insectes et des agents pathogènes fongiques (Verkleij, 1992). La laminarine, un polymère de β -1,3-glucanes extrait de l'algue brune *Laminaria digitata* (Benhamou, 2009) stimule la β -D-(1,3) glucanase qui est un important régulateur pour la défense et le développement de la plante (Patier et coll., 1993). La bétaine serait responsable de l'augmentation de la chlorophylle (Blunden et coll., 1997). Des flavones hydroxylés contenus dans les extraits d'algues ont stimulé le gène *nodA218* du trèfle blanc (Djordjevic et coll., 1987).

2.3 Les éléments minéraux solubles des extraits de compost

Les paramètres physico-chimiques des EC continuent d'évoluer dans le temps. Ces facteurs sont aussi déterminants afin d'assurer le succès d'une fertilisation foliaire avec un EC. Le

National Organic Standard Board (2004) propose quelques pistes pour expliquer l'effet «fertilisation» des EC sur la plante, dont les éléments minéraux solubles et les éléments organiques solubles.

2.3.1 Les éléments minéraux majeurs et éléments traces

Les composts sont une source d'éléments minéraux majeurs et éléments traces (Keeling et coll., 2003) parmi lesquels la présence des 17 éléments minéraux essentiels à la croissance végétale est dénotée (Epstein et Bloom, 2005). Les matériaux initiaux (Zaccheo et coll., 2002), le rapport carbone azote (C/N) (Larsen et McCartney, 2000; Ndegwa et Thompson, 2000), le pH (Körner et Stegmann, 1998), la température (Körner et Stegmann, 1998), l'aération/humidité (Michel et Reddy, 1998), la technologie de compostage (Ndegwa et Thompson, 2001) comptent parmi les facteurs responsables de la quantité d'éléments minéraux contenue dans les composts.

Par la suite, un bon processus de compostage permettra la pasteurisation du produit tout en préservant le maximum d'éléments minéraux contenus dans les matériaux initiaux. À cet égard, des matériaux initiaux ayant un rapport C/N près de 30 (Larsen et McCartney, 2000) ainsi qu'un pH près de la neutralité contribueront à réduire les pertes de N par volatilisation et/ou par lessivage durant le processus. Körner et Stegmann (1998) ont décelé une augmentation des pertes de N par volatilisation lorsque le pH des matériaux initiaux était élevé. C'est lorsque la température est élevée durant la phase thermophile que la perte de N par volatilisation est la plus importante (Körner et Stegmann, 1998). Durant la phase mésophile, les pertes de N par volatilisation sont aussi réduites grâce à une meilleure survie des bactéries assimilatrices d'ammoniac (NH_3) (Sasaki et coll., 2004). Un taux d'oxygénation plus faible que 1 millilitre (ml) d' O_2 /minute (min) évitera la volatilisation du N (Michel et Reddy, 1998). Notons que le soufre (S) peu aussi être perdu par volatilisation sous forme de composés soufrés comme l'hydroxyde de soufre (H_2S) et le disulfide de diméthyle ($\text{C}_2\text{H}_6\text{S}_2$) (Thompson et coll., 2002).

En ce qui a trait au mode de compostage, les lombricomposts sont habituellement plus riches en éléments minéraux que les composts conventionnels (Ndegwa et Thompson, 2001; Tognetti et coll., 2005). En effet, cela est attribuable aux vers qui excrètent du NH_4 et

de l'urée sous forme d'urine par les nephridia qui sont présents sur chaque segment du ver (Edwards et Bohlen, 1996). De plus, les lombricomposts ont généralement une quantité plus importante de calcium (Ca) car le système digestif des vers peut recycler le Ca en carbonate de calcium (CaCO_3) grâce aux glandes calciféreuses qui s'y trouvent (Edwards et Bohlen, 1996). Les éléments minéraux des composts proviennent des matériaux initiaux utilisés. Voici sous quelles formes on retrouve les éléments minéraux dans la matière organique d'origine végétale.

Élément minéraux :	Formes dans la matière organique
N	Substances humiques : Acides humiques (AH) Acides fulviques (AF) Substances non-humiques : Protéines Acides et sucres aminés Acides nucléiques Vitamines
Phosphore (P)	Inositols phosphates Phospholipides Acides nucléiques
Potassium (K)	Entre dans la composition de presque aucun composé organique
S	Sulphates phénoliques Polysaccharides sulphatés Cystéine et méthionine

Lors du processus de compostage, les microorganismes dégradent la matière organique. Ils transforment ainsi graduellement les éléments minéraux liés aux molécules organiques vers des formes plus simples. Ces dernières peuvent être réutilisées par d'autres microorganismes, intégrées à des molécules organiques plus complexes ou perdus par lessivage ou par volatilisation. C'est sous ces formes plus simples que les éléments sont prélevés par les plantes.

À cet égard, les lombricomposts possèdent généralement une plus grande proportion d'éléments disponibles aux plantes. La différence de disponibilité est attribuable aux formes différentes des éléments minéraux dans les lombricomposts. Edwards et Bohlen (1996) rapportent que la moitié du N excrété par les vers se trouve dans le mucus qui

recouvre leur cuticule. Le lombricompost constitue aussi un matériel beaucoup plus riche en P disponible et sous de nombreuses formes (Ghosh et coll., 1999). Ceci s'explique par une plus grande quantité de formes de P peu attachées à la matière organique et une plus faible quantité de formes de P rattachées à l'aluminium (Al). Orozco et coll. (1996) montrent que le lombricompostage augmente aussi la disponibilité du Ca et du magnésium (Mg) comparativement au matériel de départ. Malgré la présence d'une quantité importante d'éléments minéraux, il demeure que la grande majorité des éléments du compost sont sous formes organiques (Mustin, 1987) et par le fait même peu disponibles immédiatement aux plantes.

En agronomie, un des défis de la nutrition des plantes est de prédire la disponibilité des éléments dans une matrice pour la plante. Ainsi, une analyse des éléments totaux utilisant une extraction forte brisant tous les liens entre les particules minérales et organiques permettra de connaître les teneurs dans la matrice, comme un compost (Pansu et Gautheyrou, 2006). Cependant, ces teneurs en éléments totaux ne peuvent être utilisées pour prédire ceux qui sont disponibles aux plantes. Des extractions moins fortes sont utilisées selon la nature de la matrice (plus ou moins alcaline, avec plus ou moins de matière minérale ou organique, etc.) pour déterminer les éléments disponibles du sol. Au Québec, c'est l'extraction au Mehlich-3 qui est très populaire pour évaluer la disponibilité du P, K, Ca, Mg, Na, Al, Cu et Mn des sols (CPVQ, 1997). L'extraction à l'eau chaude est aussi utilisée pour quantifier le bore disponible dans le sol (CPVQ, 1997). Dans ces cas, les éléments extraits sont souvent corrélés aux éléments prélevés par les plantes. Cependant, ces approches qui cherchent à mimer les interactions avec les racines des plantes et la matrice n'ont pas été retenues, car la force de la solution extractive est plus forte que celle de l'eau froide. En effet, l'EC est une extraction à l'eau froide (H₂O) des composés solubles du compost à un temps donné. L'eau froide est un solvant polaire efficace pour dissoudre les composés polaires ou ioniques (Zumdahl, 2007). Elle est considérée comme une extraction douce qui donne de l'information sur la disponibilité des éléments de la solution du sol (Pansu et Gautheyrou, 2006), ou ici du compost. La solubilité des éléments du compost à l'eau froide demeure relativement faible, car plusieurs constituants ne sont pas miscibles à l'eau. Par contre, les molécules polaires sont solubles à l'eau, mais la force des liaisons ioniques liant certains éléments entre eux, ou à la matière minérale et organique du

compost influence la solubilisation. Finalement, lorsque la concentration des ions constitutifs solubles atteint un maximum, c'est-à-dire que la solution est saturée, alors l'addition de composés ioniques constitutifs provoque l'apparition de précipités.

Pour les molécules polaires du compost, le potentiel de solubilisation de certains éléments demeure élevé. Zaccheo et coll. (2002) rapportent que 78 à 95 % du N des composts est sous forme de composés solubles ou potentiellement hydrolysables. Ce N pourrait se retrouver théoriquement en solution dans les EC. Le N entre en solution sous ses formes inorganiques (NH_4 et le nitrate (NO_3)) et peut ensuite être absorbé par la plante. Par contre, la plus grande partie du N en solution est liée à la matière organique en solution (Said-Pullicino et coll., 2007). Le P absorbé par la plante dans la solution du sol est sous forme de H_2PO_4 ou HPO_4 . Le K est faiblement lié à la matière organique des composts et est facilement hydrolysable. C'est pour cette raison que les EC seraient une bonne source de K (Walz, 2001). Le K est absorbé par la plante directement sous sa forme ionique par des canaux spécifiques (Hirsch et coll., 1998). Le S est quant à lui lié à la matière organique par des liens esters (C-O-S) ou directement au carbone (C-S) (Fortin, 2006). L'hydrolyse du S organique est faible. La plante prélève le S sous sa forme soluble (SO_4). Le Ca et le Mg sont des métaux alcalino-terreux peu solubles à l'eau puisqu'ils sont fortement liés à la matière organique des composts.

Étant donné la variabilité des composts et de leurs matériaux initiaux, il est difficile de prédire avec certitude la quantité d'éléments nutritifs qui sera transférée dans les EC. Kannangara et coll. (2006) n'ont pas montré l'existence d'une relation entre la teneur en éléments minéraux majeurs et éléments traces du compost et celle de leurs extraits. Chefetz et coll. (1998) démontrent que la quantité totale de N soluble diminue durant le processus de compostage. Par contre, Hall et coll. (2006) ont démontré une augmentation des quantités de Ca, de Mg, de S et de fer (Fe) dans des extraits à l'eau avec l'âge du compost utilisé pour l'extrait. La conductivité électrique (CÉ) est fortement corrélée à la quantité d'éléments minéraux en solution. Chefetz et coll. (1998) rapportent une diminution de la CÉ de 5,4 à 2,9 mS/cm avec l'âge du compost.

Malgré le fort potentiel de solubilisation de certains éléments minéraux, il n'en demeure pas moins que celle-ci s'effectue sur une longue période de temps puisque le compost est un produit qui évolue. Lors de la fabrication d'un EC, uniquement les éléments solubles à ce moment seront disponibles.

2.3.2 La dynamique des extraits de compost

La transformation des éléments minéraux d'une forme organique vers la forme minérale est possible grâce à l'action des microorganismes (Epstein et Bloom, 2005), qui jouent un très grand rôle dans les cycles du carbone, du N, du P et de plusieurs autres éléments essentiels au règne végétal (Brady et Weil, 2002). Par conséquent, les quantités ainsi que les formes que peuvent prendre les éléments minéraux dans les composts, et probablement dans les EC, évoluent non seulement avec le type et l'âge des composts (Goyal et coll., 2005), mais aussi selon les conditions qui prévalent lors de la macération du compost dans l'eau (Merrill et McKeon, 2001). Ainsi, la présence des microorganismes et les conditions auxquelles les EC sont soumis influencent la minéralisation de la matière organique et les teneurs en éléments minéraux solubles. L'effet de l'aération, du temps de macération sur les changements des paramètres physico-chimiques et des éléments minéraux lors de la fabrication des EC sera donc abordé dans cette section.

L'impact des conditions d'aération sur les teneurs en éléments minéraux est peu documenté et soulève plusieurs interrogations. Ainsi, à long terme, les microorganismes anaérobies facultatifs sont nombreux dans les EC non-aérés (Walz, 2001). Alors que lorsque les EC sont aérés, les microorganismes aérobies sont plus nombreux (Walz, 2001). Merrill et McKeon (2001) rapportent que les EC non-aérés demeurent en aérobie pendant les 48 premières heures. Dans le même ordre d'idée, Scheuerell et Mahaffee (2004) ont mesuré la quantité d'O₂ dissous dans les EC aérés et non-aérés (1 : 30) (poids : poids) avec différents types d'additifs. Les EC aérés avaient plus d'O₂ dissous (8,5 ppm) que les EC non-aérés (6,4 ppm) (Scheuerell et Mahaffee, 2004). Avec des additifs (extraits d'algues, AH liquides et de poudre de roche), la quantité d'O₂ dissous des EC non-aérés passe à 0,2 ppm (Scheuerell et Mahaffee, 2004). Les microorganismes en aérobie pourraient favoriser la perte par volatilisation du NH₃, alors que les microorganismes en anaérobie pourraient induire le phénomène de dénitrification et ainsi provoquer une perte d'oxyde nitreux (N₂O).

C'est un phénomène bien documenté dans les sols (Firestone et coll., 1980), mais non dans les EC. De plus, l'impact d'une flore aérobie ou anaérobie sur la solubilisation des autres éléments minéraux du compost est inconnu.

La documentation sur l'effet de l'ajout d'additifs dans les EC est à peu près inexistante. Par ailleurs, l'impact des additifs sur la dynamique des éléments minéraux des EC n'est pas connu. L'effet de ces derniers sur les paramètres physico-chimiques est un peu plus documenté. Les EC aérés ont une CE significativement moindre (0,40 dS/m) que les EC aérés fortifiés contenant 1,2 g d'extraits d'algues, 2,5 ml d'acides humiques liquides et 3 g de poudre de roche (1,02 dS/m) (Scheuerell et Mahafee, 2004). Pour des EC aérés, l'ajout d'additifs fait augmenter significativement le pH de 7,4 à 8,6 (Scheuerell et Mahafee, 2004). Un thé de compost non aéré de vaches laitières 1 : 4 (poids humide : volume) fortifié avec de la mélasse et d'extraits algues a donné, après 48 h, un pH de 5,67 tandis que le pH du thé de compost non-aéré équivalent était de 8,06 (Kannangara et coll., 2006). Le pH plus acide des thés de compost non-aéré serait le résultat de la formation des acides organiques et du NH_4 en absence d' O_2 (Brinton, 1998). Le pH viendra ensuite influencer la disponibilité des éléments de l'EC.

Le potentiel rédox (PR) est une mesure de la disponibilité des électrons (Patrick et coll., 1996). Cette mesure a été utilisée pour caractériser l'intensité des réactions d'oxydation ou de réduction afin de les relier aux procédés biologiques dans les sols inondés (Patrick et coll., 1996). Tout comme le pH, le PR définit les conditions sous lesquelles des réactions biochimiques importantes prennent place (Patrick et coll., 1996). Les sols ayant des PR supérieurs à 300 mV sont considérés en aérobie. C'est l' O_2 qui agit comme donneur d'électron dans ces systèmes. Les sols ayant des PR inférieurs à 300 mV sont considérés en anaérobie. Les valeurs de PR déterminent la source qui agit à titre de donneur d'électrons. Par exemple, à 200 mV, c'est le NO_3^- qui est donneur d'électron, à 0 mV c'est le Fe^{3+} et à -200 mV, c'est le CO_2 (Patrick et coll., 1996). Les mesures de PR sont très utiles pour signaler le début des conditions réductrices causées par l'appauvrissement d'oxydants comme l' O_2 et le NO_3 (Patrick et coll., 1996). Estevez (2006) rapporte que dans un sol avec un PR élevé, comme un sol sableux, les éléments traces peuvent être moins disponibles.

Cela est particulièrement vrai pour le manganèse (Mn). La mesure du PR dans les EC serait donc un indice des réactions ayant cours dans ceux-ci.

Il est essentiel de documenter l'effet de ces phénomènes sur la composition chimique des EC lors de la macération afin d'obtenir des EC riches en éléments disponibles pour les plantes. Il demeure que les données sur la composition en éléments minéraux majeurs et éléments traces solubles des EC sont rares. Il y a aussi un manque de connaissances afin de prédire la composition des EC à partir d'un compost donné soumis à des conditions d'aération ou non pendant une période de quelques heures à 14 jours (d).

2.3.3 L'absorption foliaire des éléments minéraux

En agriculture, les EC sont surtout appliqués sur les feuilles des plantes. Les EC pourraient donc agir comme un fertilisant foliaire. Il est intéressant d'avoir recours à la fertilisation foliaire pour corriger rapidement une carence en cours de croissance (Duval, 1991; Canadian Organic Growers, 2001; Estevez, 2006). Les éléments qui ruissellent des feuilles lors de l'application peuvent aussi être absorbés par les racines (Reickenberg et Pritts, 1996). Plusieurs études documentent l'efficacité de la fertilisation foliaire. Janeczek et coll. (2004) ont noté une augmentation de 5 % du nombre de gousses et de 3 % du rendement de du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) avec l'ajout de molybdène (Mo), seul ou en combinaison avec du bore (B), par application foliaire au début de la floraison. Chez le soya, les besoins en Ca, en Mg, en S et en Mn sont particulièrement élevés (Estevez, 2006). Le Mo est aussi d'une importance cruciale, car il est nécessaire pour la réduction du NO₃ et la fixation du N₂ atmosphérique (Chalifour, 2006).

L'efficacité de la fertilisation foliaire dépend des facteurs suivant : l'élément appliqué, le pH de la solution, la température, l'humidité extérieure, le stade de développement, l'espèce, la fréquence d'application, la dose et le statut nutritionnel de la plante (Kuepper, 2003). Tous les éléments ne sont pas absorbés de la même manière. Le K est un élément absorbé rapidement lors d'application foliaire (Wittwer et Teubner, 1959; Reickenberg et Pritts, 1996). Pour être prélevé, le Fe doit être réduit à la membrane plasmique des cellules des feuilles (Nikolic et coll., 2003). L'absorption du Mn, quant à lui, est plus rapide chez les jeunes feuilles de soya (Wittwer et Teubner, 1959).

La solution appliquée aux feuilles doit avoir un pH situé entre 5,5 et 8,5, être finement atomisée et devrait toucher les parties inférieures des feuilles là où sont les stomates (Canadian Organic Growers, 2001; Kuepper, 2003). Lors de l'application, la température extérieure devrait être inférieure à 27°C sinon les stomates seront fermés (Kuepper, 2003). Kuepper (2003) et Canadian Organic Growers (2001) recommandent l'application à l'aube ou à la brumante lorsque les conditions sont les plus humides.

Le mécanisme présumé justifiant la fertilisation foliaire repose aussi sur la présomption selon laquelle ce type de fertilisation modifie la capacité d'absorption de la plante en stimulant la quantité d'exsudats que celle-ci excrète dans la rhizosphère (Kuepper, 2003).

2.4 Les éléments organiques solubles

En plus des éléments minéraux, l'eau permet la solubilisation de plusieurs autres éléments organiques. Keeling et coll., (2003) ont détecté dans un extrait à l'eau d'un compost d'origine végétale la présence de plusieurs centaines de composés organiques qui pourraient potentiellement stimuler la croissance végétale. De l'eau ayant été en contact avec de la matière organique décomposée contient entre autres des substances humiques (SH) (Pinton et coll., 1998). Ces molécules sont souvent des produits dérivant des activités microbiennes entamées lors du processus de compostage (Xu et Juma, 1993). Comme pour les éléments minéraux, le degré d'avancement du processus de compostage et la technologie de compostage viendront influencer la quantité et le type de molécule organique qui se retrouvera dans l'EC. La plus grande quantité et diversité microbienne retrouvées dans les lombricomposts résultent en une plus grande quantité et diversité de métabolites secondaires dérivant de ces microorganismes (Tomati et coll., 1988).

2.4.1 Les substances humiques

Les SH sont la partie de la matière organique stable réfractaire à la décomposition. Les SH sont composés d'une série de substances de poids moléculaire relativement élevé qui ont été formées par des réactions de synthèse secondaires des microorganismes. Les SH regroupent les AH, insolubles à pH acide, et les AF, solubles à tous les pH (Sutton et Sposito, 2005). Les SH sont présentes dans l'extraction à l'eau du compost (Pinton et coll., 1998). La quantité ainsi que la diversité de leurs groupements fonctionnels confèrent aux

SH une capacité de réaction avec les éléments chimiques du sol en plus d'affecter les organismes du sol ainsi que les plantes (Sutton et Sposito, 2005).

Les effets des SH sur les plantes sont documentés. Il y a eu des augmentations : du rendement en grain (Delfine et coll., 2005), de la longueur et du poids sec des racines chez le blé (Malik et Azam, 1985), du prélèvement du NH_4 par *Pinus laricio* et *P. pinaster* (Pannucio et coll., 2001) et du poids sec des racines et du nombre de nodosités du soya (cv. Bragg) (Tan et Tantiwiranond, 1983). Liu et coll. (1998) démontrent qu'une application foliaire de SH peut influencer significativement la masse racinaire et l'absorption de certains éléments minéraux tels : le P, le S, le Mg et le K.

Les effets des SH sur la plante proviendraient tous d'une stimulation des ATPases des membranes cellulaires (Canellas et coll., 2002). Les ATPases sont un groupe d'enzymes qui catalysent la réaction de l'ATP vers l'ADP. Les pH^+ ATPases, elles, sont des pompes à protons, situées sur la membrane plasmique. Elles utilisent l'énergie de l'hydrolyse du MgATP (Morsomme et Boutry, 2000) pour transporter un proton de part et d'autre de la membrane contre un gradient de concentration (Palgrem, 2001). La différence de concentration de protons de part et d'autre de la membrane créée par les pH^+ ATPases est considérée comme étant la principale force qui module les mécanismes d'absorption secondaires des protéines de transport comme les antiports et les symports. Ce qui permet le passage d'autres cations, anions et solutés neutres (Palgrem, 2001) d'où l'importance des pH^+ ATPases dans la nutrition végétale.

Canellas et coll. (2002) ont clairement démontré que les SH stimulaient la production de pH^+ ATPases dans des cellules de racines de maïs. La stimulation des pH^+ ATPases vient ensuite influencer plusieurs processus physiologiques chez la plante. Elle se répercute sur la synthèse des protéines (Muscolo et coll., 1996), sur la rétention en eau des cellules (Fu Jiu et coll., 1995 cité dans Delfine et coll., 2005), sur l'absorption du NO_3 (Santi et coll., 1995; Pinton et coll., 1999; Muscolo et coll., 1999), ainsi que sur différentes fonctions enzymatiques (Muscolo et coll., 1996). Le résultat final étant une modification de la croissance et du rendement des plantes.

Les effets des SH sur la physiologie végétale se rapprochent beaucoup de ceux observés avec les phytohormones (Muscolo et coll., 1993). Les auxines sont, elles aussi, impliquées dans la stimulation des $\text{mP}^{\text{H}^+}\text{ATPases}$ (Tanimoto, 2005) et peuvent donc stimuler ou inhiber la croissance des cellules végétales des parties aériennes et souterraines en fonction de leur concentration (Tanimoto, 2005) de la même manière que les SH. D'où le rapprochement entre les SH et les auxines selon plusieurs scientifiques (Muscolo et coll., 1999; Canellas et coll., 2002).

2.5 Le soya et la nodulation

La nodulation est le processus durant lequel des bactéries appelées rhizobia, des *Rhizobium* chez la majorité des légumineuses ou *Bradyrhizobium*, dans le cas du soya, infectent les racines et induisent la formation de nodosités, dans lesquelles il y a réduction de N_2 atmosphérique en N-NH_4 (Oldroyd et Downie, 2008). Les racines de légumineuses envoient d'abord aux rhizobia un signal spécifique contenant notamment des flavonoïdes (Broughton et coll., 2003). Une fois les rhizobia près des racines, la forte concentration de flavonoïdes induit l'expression des gènes *nod* et *hcn* des rhizobia. Ces gènes *nod* et *hcn* produisent des facteurs *nod* qui agissent comme des phytohormones en déclenchant plusieurs réactions physiologiques chez la plante dont : la courbure des poils racinaires, la formation du cordon infectieux, l'activation de la mitose chez les cellules du cortex, etc. (Oldroyd et Downie, 2008). Les bactéries se retrouvent alors emprisonnées dans ce qui deviendra une nodosité. C'est durant l'incursion dans la racine que les bactéries se transformeront en bactéroïdes qui produiront les enzymes nécessaires à la fixation biologique du N_2 atmosphérique (Chalifour, 2006).

C'est l'enzyme nitrogénase qui est responsable de la fixation biologique du N. La nitrogénase est formée de deux sous-unités : «protéine-Fe» et «protéine Mo-Fe». La nitrogénase nécessite de l'énergie sous forme d'ATP et du pouvoir réducteur fourni par la ferrédoxine (Chalifour, 2006). La ferrédoxine est une protéine contenant du S et du Fe qui transporte des électrons vers les deux sous-unités de la nitrogénase. Ces électrons sont ensuite utilisés pour réduire le N lié au Mo de la sous-unité «protéine Mo-Fe» et former du N-NH_4 . Une fois sous forme de NH_4 , le N est intégré à un squelette carboné pour être transporté dans la plante.

Le taux de fixation du N par les bactéroïdes dépend de l'apport en glucides par la plante, de l'apport en O₂ par la leghémoglobine et du mécanisme de rétro-action provoqué par des sous-produits de la fixation (Schulze, 2004). Une fertilisation adéquate des autres éléments minéraux n'est pas à négliger pour un taux de fixation optimal. Une carence en Ca et en Mg, réduit le développement des nodosités ainsi que l'activité fixatrice du N (Caetano-Anollés et coll., 1989 cité dans Chalifour, 2006). Une quantité de P élevée est aussi nécessaire lors de la nodulation et permet une augmentation par un facteur 30 du poids sec des nodosités (Israel, 1987 cité dans Chalifour, 2006). Le Mo faisant partie de la nitrogénase, donc, le soya est sujet à une carence de cet élément. La quantité de nodosités sur une plante de soya est déterminée en partie par un mécanisme de rétroaction, dont le NO₃ accentue l'inhibition et le NH₄ réduit l'inhibition (Chalifour, 2006).

3. Hypothèses et objectifs

3.1 Hypothèses de travail

Cette étude vise à démontrer les effets d'EC sur la croissance du soya. Les hypothèses suivantes seront vérifiées :

- 1) la composition en éléments majeurs et traces des EC dépend des composts d'origine et de leur maturité, du temps de macération et de la présence ou non d'aération;
- 2) l'application des EC sur le feuillage stimule l'absorption des éléments majeurs et éléments traces, la nodulation et la croissance (c.-à-d., la production de biomasse) du soya.

3.2 Objectifs de recherche

Les objectifs généraux sont:

- 1) de caractériser différents composts quant à leurs qualités physicochimiques et biologiques;
- 2) de mettre en évidence l'impact du compost, de l'aération et du temps de macération sur les caractéristiques physicochimiques des EC, et de relier leur composition en éléments majeurs et éléments traces aux composts de départ;
- 3) de déterminer l'impact des EC sur la croissance, la nutrition minérale, la nodulation et sur la biomasse du soya.

4. Méthodologie

Cette expérience a été rendue possible grâce à la contribution en matériaux de plusieurs entreprises. Des six composts de départ, trois ont été fournis par la compagnie «Fafard et frères inc.» (St-Bonaventure, QC): «Forestier Biofor®», «Marin Biosol» et «Tourbe et Crevette». Le lombricompost «Fumier de vers» a été fourni par la «Ferme Eugénia» (Bic, QC) et les deux composts biodynamiques à base de fumier de cheval (24 et 3 mois) par la «Ferme l'Armoire aux Herbes» (Ham-Nord, QC). Tous ces composts peuvent être utilisés en agriculture biologique (Québec Vrai, communication personnelle, 15/10/2007). Les semences de soya biologique (cultivar Victoria) ont été fournies par «Semences Prograin inc.» (St-Césaire, QC).

4.1 Volet 1 : Caractérisation des composts

4.1.1 Description des composts

Le compost «Forestier Biofor®» a été fabriqué à base d'écorces de conifères vieilles, de fumier de poulet composté, de tourbe de sphaigne et de chaux. Le compost «Marin Biosol» a été conçu à base de fumier de poulet composté de tourbe de sphaigne, de farine de crustacés et d'algues marines. Le compost «Tourbe et Crevette» a été fait à base de fumier de poulet composté, de tourbe de sphaigne et de farine de crevettes.

Le lombricompost «Fumier de vers» a été fabriqué à base de tourbe de sphaigne, de bois raméal fragmenté et de fumier de bovin. Une fois la phase thermophile terminée, le mélange a été donné aux vers pendant deux mois et ensuite tamisé.

Les composts biodynamiques ont été fabriqués à base de fumier de cheval, de foin et de résidus de plantes médicinales. Les résidus de plantes médicinales étaient en partie constitués de tiges, de feuilles et de racines non nettoyées contenant du sol. Le mélange a été mis en tas de 10 m de long, par 2 m de large par 1,2 m de haut directement sur le sol. Le tas a été «dynamisé» avec de l'achillée mille-feuille (*Achillea millefolium*), de l'ortie (*Urtica dioica*), de la camomille (*Matricaria chamomilla*), de l'écorce de chêne (*Quercus rubra* L.) et des pissenlits (*Taraxacum sp.*) qui ont été intégrés, tel quel, dans le compost au

fur et à mesure de l'édification du tas. À mi-hauteur et une fois le tas terminé, il y a eu aspersion avec une macération de valériane (*Valeriana officinalis*). Le tas a été ensuite recouvert de 10 cm de foin, puis d'un géotextile qui laisse passer l'eau, mais pas la lumière. Le compost de 24 mois («biodynamique 24 mois») a été déplacé, et par le fait même mélangé, au printemps 2006. Il a été laissé à l'extérieur en tas. Le compost de 3 mois («biodynamique 3 mois») n'a jamais été retourné. Les masses volumiques des composts sont présentées au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Moyenne des masses volumiques des composts

Composts	Masse volumique ¹ (g / L)
Fafard Forestier biofor®	438,6
Fafard Marin biosol	466,5
Fafard Tourbe et crevette	467,1
Fumier de vers (Ferme Eugénia)	496,9
Biodynamique 24 mois (Ferme l'Armoire aux herbes)	656,2
Biodynamique 3 mois (Ferme l'Armoire aux herbes)	744,8

¹ : Les masses volumiques des composts de crevette, fumier de vers, biodynamique 24 et 3 mois ont été calculées lors du volet 3 de l'expérience avec 300 ml de compost. Les masses volumiques des composts biofor et biosol ont été fournies par la compagnie Fafard.

4.1.2 Échantillonnage des composts

L'échantillonnage des composts de ferme («Fumier de vers» et «biodynamique 3 et 24 mois») a été fait conformément à la méthode du Bureau de Normalisation du Québec (2005), tandis que l'obtention d'un échantillon représentatif des autres composts («Fafard Forestier biofor®», Fafard Marin biosol» et «Fafard tourbe et crevette») repose sur l'acquisition de trois sacs de chacun des composts. Un échantillon de chaque sac de compost a été prélevé comme suit : 250 ml de compost ont été prélevés à huit endroits différents dans le sac puis uniformément mélangé. L'échantillon des composts de ferme a été divisé en trois après avoir été uniformément mélangé.

4.1.3 Paramètres physicochimiques

Des mesures de la teneur en matières sèches (%) après séchage à 105°C (American Society for Testing and Material, 2001) et de la teneur en cendres (%) par combustion à 440°C (American Society for Testing and Material, 2001) ont été prises sur 50 g de compost.

Le pH (Accumet Research AR10 pH meter, Fischer Scientific) a été déterminé sur 10 g de compost humide dans 20 ml d'eau déminéralisée après 30 min sur un agitateur rotatif ajusté à 180 tours/min (Thomas, 1996).

La CÉ (712 Conductometer, Brinkmann Instrument Metrohm, Switzerland) a été mesurée sur l'équivalent de 6 g de compost sec mélangé à 300 ml d'eau déminéralisée, déposé sur un agitateur rotatif (160 tours/min) pendant 30 min puis centrifugé pendant 10 min à 6000 tours/min (Rhoades, 1996).

Le carbone total a été mesuré par combustion sèche (Leco CNS 1000) sur 250 mg de compost passé au tamis 100 mesh (Nelson et Sommers, 1996).

Les teneurs en N Kjeldhal ont été mesurées sur un échantillon de 1 g de compost humide selon la méthode Kjeldhal (Bremner, 1996), puis dosées à l'autoanalyseur Technicon (Model AAI, Technicon Instruments, Tarrytown, NY). Les teneurs en N-NO₃ des composts ont été mesurées sur un échantillon de 1 g de compost humide mélangé à du KCl 2N (1 : 10, poids humide : volume) pendant 1 h, filtré puis dosées à l'autoanalyseur Technicon (Model AAI, Technicon Instruments, Tarrytown, NY) (Bremner et Mulvaney, 1982). Le N total représente l'addition de l'azote Kjeldhal et du N-NO₃. Le ratio C/N est déterminé en divisant le résultat du carbone total (en %) par celui du N total (en %).

Les éléments majeurs et éléments traces totaux ont été extraits par une digestion à 375 °C pendant 2 h 20 min de 1 g de compost humide avec 6 ml d'une solution constituée de : 97 g d'acide sélénieux, 100 ml d'eau déminéralisée et 2 L d'acide sulfurique 98 % Grade ACS; et 2 ml de H₂O₂ 30 %. Le résultat de cette digestion a été dosé au ICP plasma (Soltanpour et coll., 1996). Ces éléments sont: le P, le K, le Ca, le Mg, le sodium (Na), le S, le Fe, l'Al, le B, le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le Mn, le Mo, le barium (Ba), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le strontium (Sr) et le zinc (Zn).

4.1.4 Paramètres biologiques

Le carbone de la biomasse microbienne est un estimé du carbone des microorganismes présents dans un compost. Pour un même type de compost, plus le carbone de la biomasse microbienne est élevé, plus ce compost contient des microorganismes. Puisqu'il y a plus de microorganismes lors de la phase de compostage active, une biomasse élevée indique l'immaturation du compost. Il a été déterminé conformément à la méthode fumigation/extraction (Powlson et coll., 1987).

L'indice de germination estime l'inhibition causée par la présence de composés phytotoxiques dans un compost (Zuconi et coll., 1985). La phytotoxicité est parfois associée à la présence d'acides organiques dans un jeune compost. Le taux de germination, d'élongation racinaire et l'indice de germination ont été déterminés selon la méthode de Zuconi et coll. (1985). Le compost a été mélangé à l'eau (1 : 10 poids humide : volume) puis placé sur un agitateur rotatif 30 min à 120 tours/min. Trois ml de ce mélange ont été ensuite versés dans chacun des 4 pétris contenant 3 papiers Whatmann et 25 graines de cresson (*Lepidium sativum* L.). Ces pétris ont été scellés, puis placés à l'incubateur à 27°C. Après 24 h, le nombre de graines germées a été déterminé et la longueur des racines mesurée. Trois ml d'eau distillée stérile ont été utilisés pour le témoin. Le taux de germination (G), d'élongation racinaire (E) et l'indice de germination (I) ont été calculés comme suit :

$$\%G = \frac{\left(\frac{X}{\text{compost}}\right)}{\left(\frac{Y}{\text{témoin}}\right)} \times 100$$

où «X» représente le nombre de graines germées pour le compost et «Y» représente le nombre de graines germées pour le témoin. «Compost» et «témoin» représentent le nombre total de graines ayant reçu l'EC ou le témoin, respectivement.

$$\%E = \frac{\left(\frac{A}{\text{compost}} \right)}{\left(\frac{B}{\text{témoin}} \right)} \times 100$$

où «A» représente la longueur totale de toutes les racines des graines germées pour le compost et «B» représente la longueur totale de toutes les racines des graines germées pour le témoin. «Compost» et «témoin» représentent le nombre total de graines ayant reçu l'EC ou le témoin, respectivement.

$$\%I = \frac{(G \times E)}{100}$$

où «G» représente le taux de germination et «E» représente le taux d'élongation racinaire.

Le dégagement du CO₂ et la minéralisation du N-NO₃ des composts sont des estimés de deux activités microbiennes, soit la respiration des microorganismes et la minéralisation de l'azote. Ils ont été suivis dans le temps. Le dégagement de CO₂ des composts a été déterminé en incubant pendant 70 d, à 26°C, 100 g de compost humide dans un bocal scellé dans lequel une fiole contenant 10 ml de NaOH 1N a été déposée. Tous les 10 d, la fiole a été retirée et remplacée par une neuve. Le carbone dans la fiole a été dosé à l'aide d'un titrateur automatique (MetroOhmn 794 Basic Titrino, 728 Stirrer, 712 Conductometer, 785 DMP Titrino) (Zibilske, 1996). Le N-NO₃ de ces mêmes composts incubés a été dosé à l'autoanalyseur Technicon (Model AAII, Technicon Instruments, Tarrytown, NY) sur un échantillon de 5 g prélevés tous les 10 d lorsque la fiole de NaOH 1N était retirée.

4.1.5 Analyses statistiques

Les analyses ont été faites sur trois échantillons de composts. Un seul échantillon a été utilisé pour déterminer la CÉ et le carbone de la biomasse microbienne, des composts «composts biodynamiques 3 et 24 mois». Pour ces exceptions, aucun écart type n'a pu être calculé.

Le dispositif expérimental utilisé pour tous les paramètres physicochimiques, pour le taux de germination, le taux d'élongation, l'indice de germination et le carbone microbien a été un plan entièrement aléatoire. Une expérience factorielle avec un plan en tiroirs subdivisés

comportant quatre répétitions avec le facteur «compost» en parcelles principales et le facteur «temps» en sous parcelles a été utilisée pour le dégagement de CO₂ et la minéralisation du N-NO₃.

L'homogénéité de la variance des paramètres physicochimiques et biologiques a été vérifiée à l'aide du test de Levene généré par la procédure GLM (General Linear Models) du logiciel SAS (SAS, 2004) excepté le dégagement de CO₂ et la minéralisation du N-NO₃ qui a été vérifiée à l'aide du graphique des résidus généré par la procédure PLOT du logiciel SAS (SAS, 2004). La distribution normale de l'erreur expérimentale de tous les paramètres a été vérifiée à l'aide du skewness/kurtosis et du test Shapiro-Wilk généré par la procédure UNIVARIATE du logiciel SAS (SAS, 2004).

Pour les paramètres physicochimiques, le taux de germination, le taux d'élongation, l'indice de germination et le carbone microbien les composts ont été comparés entre eux à l'aide d'un LSD protégé généré par la procédure GLM (General Linear Models) du logiciel SAS (SAS, 2004).

Pour les paramètres biologiques, l'analyse de variance factorielle a permis de faire un examen de la variance globale des facteurs significatifs, compost et temps, et de leur interaction lorsque significative pour estimer leur contribution à la variation totale. Comme il s'agit d'un facteur qualitatif (compost) combiné à un facteur quantitatif (temps), les moyennes ont été présentées à chacun des niveaux des facteurs et l'interprétation des résultats se simplifie à une description des résultats.

4.2 Volet 2 : Impact du compost, de l'aération et du temps de macération sur les caractéristiques physico-chimiques des EC

4.2.1 Fabrication des extraits de compost

4.2.1.1 Extraits de composts aérés

Un litre d'eau ultra-pure stérilisée a été versé dans un pot Mason® de 1,5 L préalablement stérilisé. Des pochettes d'environ 10 cm par 16 cm ont été confectionnées dans un grillage de nylon (71 trous au 5 cm) cousues avec un fil de nylon (Coats & Clark, AT26, 100 % Nylon). Elles ont été stérilisées aux rayons UV d'une hotte à courant laminaire (Bio

Klone2, Biological Containment Hood, Microzone Corporation, Nepean, Canada, U.V. : G30T8) pendant 10 min de chaque côté. Deux cents ml de compost maintenu à température de la pièce depuis 24 h, ont été versés dans les pochettes qui ont été ensuite complètement submergées dans l'eau. L'air a été introduit dans les pots Mason® à l'aide d'une pompe à aquarium (Hagen®, Elite802, 115 V, 4 W, 60 Hertz, 1500 cm³/min, 4 p.s.i.) reliée par un tuyau (VWR 1/8'' certified lab food grade), au bout duquel était placé un diffuseur d'air (Hagen® Elite Art.#A962, résine epoxyde et sable silicieux) qui se trouvait au fond du pot Mason®. Une pompe avait deux sorties qui alimentaient chacune deux pots. Avant d'arriver aux pots, l'air transitait dans un erlenmeyer rempli d'eau ultra-pure (figure 4.1).

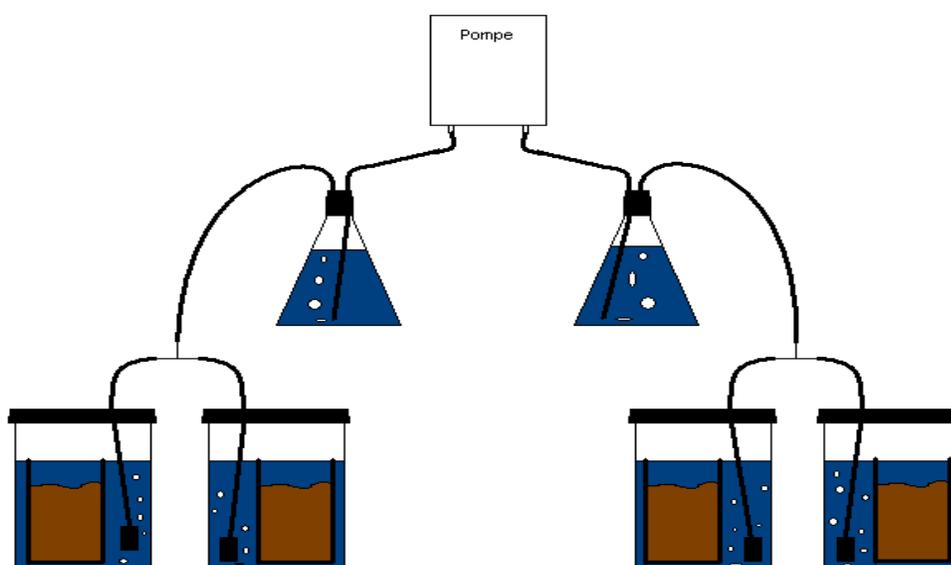


Figure 4.1 : Illustration du montage de l'expérience sur les EC.

4.2.1.2 Extraits de compost non aérés

La procédure a été la même que pour les EC aérés excepté qu'aucun air n'a été introduit dans les pots. Les couvercles «snap» des pots Mason® n'ont pas été percés et ils ont été vissés de façon à sceller les pots.

4.2.2 Échantillonnage des extraits de compost

Les prélèvements des EC dans les pots ont été effectués à la surface, au centre et au fond du pot Mason® à l'aide d'une pipette (Labsystems®, Finnpipette Digital 1 - 5 ml, Finlande) aux embouts stériles. Le diamètre de l'ouverture de l'embout était de 1 mm. Les

échantillons, préparés en vue d'analyses qui ont été faites ultérieurement (K, Ca, Mg, Na, N-NO₃, le chlore (Cl), le P-PO₄ et le S-SO₄), ont été immédiatement congelés. Après le dernier échantillonnage à 14 d, l'EC restant a été conservé pour les analyses de la teneur en matière sèche et de la teneur en cendres.

4.2.3 Paramètres physicochimiques

Deux échantillons décongelés d'EC 14 d ont été versés dans des creusets de pyrex puis mis à l'étuve à 54°C et au four (Thermolyne, 62700 furnace) à 440°C (American Society for Testing and Material, 2001) afin de mesurer la teneur en matière sèche et la teneur en cendres. La teneur en cendres humides a été calculée avec le poids humide de l'EC au dénominateur plutôt que son poids sec. Le pH (ORION, perpHecT LogR meter Model 310), la CÉ (HANNA Instruments HI8820), et le PR (ORION Multimeter Model SAE520) ont été directement mesurés dans les échantillons d'EC immédiatement après l'échantillonnage. Les éléments minéraux (K, Ca, Mg, Na) ont été mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (Perkins Elmer, model 3300) sur 1 ml d'échantillon décongelé qui a été mélangé avec 1 ml de HCl 10 % (volume : volume), 0,2 ml d'une solution de lanthane 1 % + CsCl 3 % et 10 ml d'eau distillée dans un tube de pyrex. Les concentrations élémentaires utilisées pour produire les courbes témoins ont été : 0,5, 1, 2, 5 ppm pour le Mg, 1, 5, 10, 20 ppm pour le Ca, 1, 2, 4, 10, 20 ppm pour le K et le Na. Le N-NO₃, le Cl, le P-PO₄ et le S-SO₄ ont été dosés sur des EC à l'aide d'un HPLC (Waters 431 Conductivity detector) avec une colonne pour la fraction anionique (IC-Pak anion).

4.2.4 Analyse statistique

L'essai consistait en une expérience factorielle de type 2 x 4 x 4. Le facteur «aération» consistait en la présence ou l'absence d'aération dans les EC. Le facteur «compost» consistait en la fabrication d'EC avec 4 composts : «Tourbe et Crevette», «Fumier de vers», «biodynamique 24 mois» et «biodynamique 3 mois». Finalement, le facteur «temps» consistait en un prélèvement des EC aux périodes (1 h, 2, 7 et 14 d). Le dispositif expérimental était constitué d'un plan en tiroir subdivisé comportant quatre répétitions avec le facteur «aération» en parcelle principale, le facteur «compost» en sous-parcelles et le facteur «temps» en sous-sous parcelles.

L'homogénéité de la variance des résultats des paramètres physicochimiques sur les EC a été vérifiée à l'aide du graphique des résidus généré par la procédure PLOT du logiciel SAS (SAS, 2004). Seules les teneurs en S-SO₄ et en Na ont nécessité une transformation ln avant de procéder à l'analyse de la variance. La distribution normale de l'erreur expérimentale a été vérifiée à l'aide du Skewness/Kurtosis et du test Shapiro-Wilk généré par la procédure UNIVARIATE du logiciel SAS (SAS, 2004).

Les ANOVA des paramètres physicochimiques des EC ont été calculées en utilisant la procédure GLM du logiciel SAS (SAS, 2004). Les traitements ont été comparés entre eux à l'aide de contrastes simples générés par la procédure MIXED mais traités par la procédure GLM du logiciel SAS (SAS, 2004). Finalement, des analyses de régression ont été réalisées afin de déterminer la relation entre certains paramètres physicochimiques des composts et ceux de leur EC. Pour les régressions le N, le P, le S, le K, le Ca et le Na ont nécessité une transformation ln avant de procéder à l'analyse de la variance.

4.3 Volet 3 : Impact des EC sur la nutrition minérale, la nodulation et sur la biomasse du soya

4.3.1 Désinfection des semences

Les semences de soya (cv. Victoria; Semences Prograin Inc., St-Césaire, QC) utilisées avaient été produites en régie biologique. Les semences dont la masse se situait dans l'intervalle correspondant à plus ou moins un écart type (0,155 – 0,193 g / semence) ont été sélectionnées. Elles ont été stérilisées à l'éthanol 95 % pendant 30 secondes et 10 min dans l'hypochlorite de sodium (NaClO; 5,25 %) avant d'être rincées 5 fois à l'eau distillée, puis séchées sous la hotte à courant laminaire en conditions stériles (Anonyme, 2005).

4.3.2 Culture des plantes de soya

Quarante-huit pots de plastique d'une capacité de 1,87 L avec un diamètre de 15 cm et une hauteur de 14,5 cm ont été utilisés. Les trous de drainage des pots ont été obstrués avec des morceaux de géo membrane de plastique perforé afin d'empêcher le substrat de s'écouler des pots. Le fond d'un sac en plastique a été découpé de manière à former un tube aux extrémités ouvertes, puis a été fixé sur la bordure supérieure intérieure du pot de manière à ce que la vaporisation de l'EC puisse s'écouler sur le substrat et aussi pour protéger les

plantes du contact avec les traitements adjacents. Chacun des pots a été rempli avec un mélange homogène contenant: 2010,8 g de sable blanc (Quartz Industriel 0,65 mm, Unimin Canada Ltd. St-Canut, QC) et 17,3 g de compost «Tourbe et Crevette» humide (Fafard, St-Bonaventure, QC, J0C 1C0). Ce mélange (10,9 g) a été préalablement échantillonné. Le substrat a été humidifié uniformément avec 300 ml d'eau du robinet. Cinq trous éloignés les uns des autres, de 1,5 cm de diamètre et 2,5 cm de profondeur, ont été façonnés à l'aide d'un tube de verre à la surface du substrat. Une semence de soya a été déposée dans chaque trou. Pour le traitement en symbiose avec *Bradyrhizobium*, les semences ont été inoculées avec deux ml d'inoculant (*B. japonicum* souche 532C liquide, cultivée sur milieu YMA à $30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et contenant $\sim 10^8$ bactéries par ml). Une fois les trous refermés, 50 ml d'eau du robinet ont été distribués uniformément à la surface du pot. Les pots ont été placés, selon l'ordre établi par PROC PLAN de SAS (SAS, 2004) (Annexe 1), dans un cabinet de croissance (Controlled Environment Ltd., Winnipeg, MN; T°jour/nuit: 25/20 °C; photopériode: 16 h; fluorescents VHO (Very high output; Koninklijke Philips Electronics)) pendant 43 d. Les plantes sans solution nutritive ont été arrosées avec 50 ml d'eau tous les jours, tandis que les traitements «solution nutritive» ont reçu 50 ml de solution nutritive (Anonyme, 2005) les lundis, mercredis et vendredis, et de l'eau les autres jours. Une semaine après la levée, les trois plantules les plus vigoureuses de chacun des pots ont été conservées. Deux autres inoculations avec *Bradyrhizobium japonicum* souche 532C (2 ml chacune) ont eu lieu une et deux semaines après les semis pour tous les traitements inoculés.

4.3.3 Préparation des extraits de composts fortifiés

Un litre et demi de solution de H_3PO_4 0,0005 M a été versé dans un béccher de 4000 ml stérilisé. Trois cents ml de compost maintenu à température de la pièce depuis 24 h ont été versés dans une pochette, décrite à la section 4.2.1.1, et qui a été submergée dans la solution de H_3PO_4 0,0005 M. Après 48 h sans aération, la pochette a été retirée et le surplus d'eau qu'elle contenait a été écoulée dans le béccher pendant 2 min. L'EC a été filtré par gravité sur papier Whatman #42 à 4°C toute la nuit. Un extrait d'algue (0,0038 g/L) (ASL, soluble seaweed extract powder, Acadian Seaplant, Ltd. Nova Scotia) a été ajouté à l'EC. Le pH (ORION, perpHecT LogR meter Model 310) a été ajusté à 6,5 à l'aide de KOH (1M) ou H_3PO_4 (0,05M). L'EC fortifié a été filtré à 0,22 μm , et séparé, à raison de 60 ml par

bouteille (Nalgène® stérile), dans des conditions stériles avant d'être entreposé au réfrigérateur à 4°C jusqu'à leur utilisation. Ces manipulations ont été répétées quatre fois à partir des composts «Tourbe et Crevette», «Fumier de vers», «biodynamique 3 mois» et «biodynamique 24 mois»). Un échantillon de chacun des EC et de chaque répétition a été analysé pour certains éléments minéraux (K, Ca, Mg, Na, N-NO₃, P-PO₄, Cl et S-SO₄.) à l'aide d'un HPLC (Waters 431 Conductivity detector) avec une colonne pour la fraction négative (IC-Pak anion).

4.3.4 Vaporisation des extraits de compost fortifiés sur le soya

Avant l'application des EC sur le soya, un test de phytotoxicité a été effectué selon la méthode de Zucconi et coll. (1985). Cette méthode a été décrite à la section 4.1.4.

Les EC fortifiés ont été appliqués dès la levée des plantules, les lundis, mercredis et vendredis. Il y a eu en tout 14 applications. Le contenu d'une bouteille contenant les EC stériles a été versé dans un vaporisateur stérile (Continental E-Z sprayer, continental industries, Brampton, ON). Le sac de plastique entourant chacun des pots a été remonté de manière à ce que tout l'EC soit dirigé sur la plante et que l'excédent puisse s'égoutter à la surface du pot. Le feuillage des plantes a été aspergé avec 20 ml d'eau (traitements témoin inoculé, c.-à-d. «oi», et témoin non inoculé, c.-à-d. «oNi») ou de EC fortifié «Tourbe et Crevette» («Fcre»), «Fumier de vers» («vers»), «biodynamique 24 mois» («bma») et «biodynamique 3 mois» («bim»).

4.3.5 Mesures en cours de développement

La hauteur des plants a été mesurée avec un ruban à mesurer à partir du substrat (McWilliams et coll., 2004). Le diamètre du collet a été mesuré à l'aide d'un caliper (Mitutoyo, Japon) sous les cotylédons à 1 cm de la surface du substrat. Les stades de développement ont été évalués selon l'échelle proposée par McWilliams et coll. (2004). Pour permettre l'analyse des résultats, un nombre a été attribué à chaque stade de développement comme suit : 1 = ve, 2 = vc, 3 = v1, 4 = v2, 5 = v3, 6 = v4, 7 = v5, 8 = r1, 9 = r2.

4.3.6 Mesures à la récolte

Après 43 d de croissance, chaque plante de chacun des pots a été coupée à 1 cm du substrat. Les parties aériennes, racinaires et les nodosités ont été séparées. Les systèmes racinaires ont été évalués selon une échelle de 1 à 5 où 100 % représente les racines les plus vigoureuses (cote 1 = 0 %, 2 = 15 %, 3 = 50 %, 4 = 85 % et 5 = 100 %) (Little et Hills, 1978). La nodulation a été évaluée selon une échelle de 1 à 5 (cote 1 = 0 nodosités, 2 = quelques nodosités sur la racine principale, 3 = Quelques nodosités sur la racine principale + quelques nodosités sur les racines secondaires, 4 = plusieurs nodosités sur la racine principale + quelques nodosités sur les racines secondaires, 5 = plusieurs nodosités sur la racine principale + plusieurs nodosités sur les racines secondaires) (Peoples et coll., 1989). Les échantillons ont ensuite été séchés à 60°C, puis pesés. Les trois parties aériennes d'un même pot ont ensuite été regroupées et broyées pour le dosage des éléments minéraux. Le N et le P ont été dosés par colorimétrie après digestion (Isaac et Johnson, 1976), le K par spectroscopie d'émission atomique et le Ca, le Mg, le Fe, le Cu, le Mn et le Zn par spectrométrie d'absorption atomique (Spectromètre d'absorption atomique, marque Perkin-Elmer, modèle 3300, Uberlingen, Allemagne). Le prélèvement de ces éléments minéraux a été calculé en multipliant la masse sèche des parties aériennes par la teneur en éléments minéraux.

4.3.7 Analyse statistique

L'essai a consisté en une expérience factorielle de type 2 x 6. Le facteur «solution nutritive» était l'arrosage des plantes avec une solution nutritive ou avec l'eau du robinet. Le facteur «vaporisation» était la vaporisation des traitements témoins et des EC sur le feuillage des plantes de soya. Finalement, lorsque des mesures répétées dans le temps étaient requises pour la croissance des plantes, alors le facteur «temps» était aussi considéré dans l'expérience. Le dispositif expérimental était constitué d'un plan en tiroir subdivisé comportant quatre répétitions avec le facteur «solution nutritive» en parcelle principale, le facteur «vaporisation» en sous-parcelles et le facteur «temps» en sous-sous-parcelles, lorsque requis.

L'homogénéité de la variance des résultats pris à la récolte et en cours de croissance a été vérifiée à l'aide du graphique des résidus généré par la procédure PLOT du logiciel SAS

(SAS, 2004). La masse sèche des parties aériennes, des racines, et des nodosités, ainsi que les stades de croissance ont nécessité une transformation racine carrée. Le nombre de nodosités, la teneur en N, K et Fe des parties aériennes, le prélèvement en K et Fe et le diamètre du collet ont nécessité une transformation ln. Les teneurs en P, Ca, Mg, Cu et Zn, les prélèvements en P et Zn et la hauteur des plantes ont nécessité une transformation log10 avant de procéder aux analyses de la variance. La distribution normale de l'erreur expérimentale a été vérifiée à l'aide du Skewness/Kurtosis et du test Shapiro-Wilk généré par la procédure UNIVARIATE du logiciel SAS (SAS, 2004).

Les résultats des mesures prises en cours de croissance et après la récolte ont été présentés sous forme d'ANOVA présentant les moyennes des carrés générés par la procédure GLM du logiciel SAS (SAS, 2004), puis les traitements ont été comparés entre eux à l'aide de contrastes simples. Seuls les interactions et les contrastes d'interaction significatifs ont été discutés.

5. Résultats et Discussion

5.1 Volet 1 : Caractérisation des composts

5.1.1 Paramètres physicochimiques des composts

5.1.1.1 La teneur en matière sèche et en cendres

Les six composts initiaux présentent des différences pour leurs teneurs en matière sèche et en cendres (tableau 5.1). Selon la norme du Bureau de Normalisation du Québec (2005), la teneur en eau d'un compost doit être inférieure à 65 %, ou ≥ 35 % matière sèche (Bureau de Normalisation du Québec, 2005). Ainsi, seul le compost «biodynamique 3 mois» ne contient pas assez de matière sèche. Généralement, les composts contenant beaucoup de cendres sont ceux qui contiennent moins de carbone total et ceux dont le processus de compostage est le plus avancé (Levanon et Pluda, 2002). Cependant, la quantité élevée de cendres des deux composts biodynamiques témoigne de l'apport de sol lors de l'édification et du déplacement du tas d'un endroit à un autre (Pfeiffer et Koepf, 1980).

Tableau 5.1 : Caractérisation physique des composts initiaux. Moyennes et écarts types de trois répétitions.

Variables	Composts					
	Forestier Biofor®	Marin Biosol	Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodyn. 3 mois	Biodyn. 24 mois
	$\bar{x} \pm \sigma_x$					
Matière sèche (%)	40,15 $\pm 2,99$ bc	38,24 $\pm 4,06$ bc	41,63 $\pm 3,94$ b	36,57 $\pm 1,33$ c	25,67 $\pm 0,32$ d	50,41 $\pm 0,26$ a
Cendres (%)	22,79 $\pm 1,96$ d	23,45 $\pm 2,14$ d	26,70 $\pm 3,76$ d	42,48 $\pm 0,61$ c	62,45 $\pm 8,87$ b	77,25 $\pm 1,24$ a

Les résultats d'une même rangée suivis de lettres différentes sont significativement différents selon un LSD ($\alpha = 0,05$)

5.1.1.2 pH

Les pH relativement acides et alcalins des composts «Forestier Biofor®» et «biodynamique 3 mois» sont différents des pH des autres composts (tableau 5.2). L'acidification d'un compost est généralement attribuable à la production d'acides organiques lors de la maturation (Edwards et Bohlen, 1996), tandis que la libération de N-NH₄ associée à

l'activité microbienne explique généralement un pH plus alcalin (Mustin, 1987). L'activité microbienne importante du compost «biodynamique 3 mois» explique son pH alcalin. La production plus rapide d'acides organiques dans les lombricomposts (Atiyeh et coll., 2000) et la transformation du N-NH₄ vers le N-NO₃ explique le pH plus acide du «Fumier de vers» comparativement aux composts «Marin Biosol, Tourbe et Crevette et biodynamique 3 mois» (tableau 5.2). Le compost «biodynamique 24 mois» est plus acide que le «biodynamique 3 mois», ce qui correspond à l'évolution normale des composts vers un pH plus acide (Mustin, 1987). Le compost «Forestier Biofor®» est acide, malgré la chaux ajoutée à ce compost par la compagnie Fafard, s'expliquerait par l'acidité des matériaux initiaux en provenance de la forêt (Mustin, 1987).

5.1.1.3 Conductivité électrique

Les résultats de CÉ (tableau 5.2) sont analogues à ceux rapportés dans d'autres études, compte tenu du ratio de dilution élevé (Zaccheo et coll., 2002; VanderGheynst et coll., 2004; Kannangara et coll., 2006). Les composts «Tourbe et Crevette et Marin Biosol» se démarquent par leur CÉ élevée (tableau 5.2) qui s'expliquerait par la quantité importante d'éléments minéraux contribuant à la CÉ (VanderGheynst et coll., 2004).

5.1.1.4 Carbone total

Un compost doit contenir au moins 30 % de matière organique, soit environ 15% de carbone total (Bureau de Normalisation du Québec, 2005), et seul le compost «biodynamique 24 mois» contient moins de 15 % de carbone total. Les composts «biodynamiques 3 et 24 mois» contiennent beaucoup moins de carbone total que les composts de «Fafard» (tableau 5.2). La faible quantité de carbone total s'explique par la quantité importante de cendres qu'ils contiennent (tableau 5.1). Les composts perdent le carbone principalement sous forme de CO₂ lors de la décomposition de la matière organique. Il est donc normal de trouver plus de carbone dans le compost «biodynamique 3 mois», comparativement au compost «biodynamique 24 mois» (Goyal et coll., 2005). Ceci indique que le compost «biodynamique 3 mois» n'a pas encore atteint sa maturité.

5.1.1.5 Azote total

Les composts «Tourbe et Crevette et Marin Biosol» ont une quantité importante de N (tableau 5.2). Ceci démontre l'importance des matériaux initiaux et des facteurs influençant

la quantité de N durant le processus de compostage. La quantité de N a diminué entre le compost «biodynamique 3 mois» et «biodynamique 24 mois» ce qui s'explique par les différences d'âge entre ces composts.

5.1.1.6 Ratio C/N

Le compost «Marin Biosol» se démarque par un C/N élevé qui est le reflet d'une quantité de N moindre (tableau 5.2). Les composts «biodynamiques 3 et 24 mois» ont un rapport C/N faible qui s'explique par la faible quantité de carbone total. Le C/N est un indice du degré de stabilité et donc de la maturité des composts. Au fur et à mesure du processus de compostage, le C/N devrait diminuer. C'est ce qui est observé entre les composts «biodynamiques 3 et 24 mois».

Tableau 5.2 : Caractérisation chimique des composts initiaux. Moyennes et écarts types de trois répétitions.

Variables	Composts					
	Forestier Biofor®	Marin Biosol	Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodyn. 3 mois	Biodyn. 24 mois
	$\bar{x} \pm \sigma_x$					
pH	6,16 ± 0,25 d	7,29 ± 0,51 b	7,12 ± 0,15 bc	6,75 ± 0,05 c	7,97 ± 0,08 a	7,32 ± 0,05 b
Conductivité électrique ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	359,7 ± 65,45 bc	538,1 ± 106,9 a	610,2 ± 58,14 a	521,3 ± 27,2 ab	239,0 cd	181,8 d
Acides humiques (g gsec ⁻¹)	0,258 ± 0,022 a	0,324 ± 0,098 a	0,244 ± 0,029 a	0,178 ± 0,02 b	0,137 ± 0,02 c	0,119 ± 0,010 c
Acides fulviques (g gsec ⁻¹)	0,040 ± 0,033 b	0,076 ± 0,025 ab	0,041 ± 0,020 b	0,058 ± 0,02 b	0,095 ± 0,03 ab	0,107 ± 0,085 a
Carbone total (%)	39,76 ± 0,40 a	39,04 ± 1,33 a	38,61 ± 2,00 a	28,46 ± 3,26 b	20,62 ± 0,3 c	11,33 ± 0,14 d
Azote tot. (%)	1,88 ± 0,173 b	2,61 ± 0,020 a	2,55 ± 0,011 a	1,56 ± 0,99 c	1,66 ± 0,1 c	1,06 ± 0,016 d
C : N	21,25 ± 1,98 a	14,95 ± 0,50 c	15,12 ± 0,84 c	18,19 ± 1,62 b	12,41 ± 0,6 d	10,72 ± 0,22 d

Les résultats d'une même rangée suivis de lettres différentes sont significativement différents selon un LSD ($\alpha = 0,05$)

5.1.1.7 Éléments majeurs et éléments traces

Les teneurs en éléments majeurs sont similaires à celles retrouvées habituellement dans les composts (Mustin, 1987). De plus, tous les composts se conforment à la norme du Bureau de Normalisation du Québec (2005) pour la teneur maximale en éléments traces dans les composts de type AA et A.

En général, les composts de «Fafard» contiennent plus d'éléments minéraux majeurs et éléments traces dont : le P, le K, le Na, le S, le B, le Mo, le Zn et le Sr, que les autres composts (tableau 5.3). Par contre, les composts de «Fafard» contiennent moins d'éléments traces tels : l'Al, le Cd, le Co, le Cr, le Cu, le Mn, le Ni et le Pb que les autres composts. L'origine des intrants et la technologie de compostage expliqueraient ces différences. Les composts dans lesquels des ingrédients marins sont utilisés, soient «Marin Biosol» et «Tourbe et Crevettes», contiennent des quantités plus élevées de K, de Na, de Ca, de Mg, de S, de B, de Cu, de Mo, de Ni, de Sr et de Zn, ce qui correspond à la quantité élevée de ces éléments retrouvés dans des ingrédients marins (Verkleij, 1992). Les composts «Tourbe et Crevette» et «Marin Biosol» contiennent beaucoup de K, de Ca, de Mg, de Na et de S comparativement aux autres composts (tableau 5.3), ce qui explique leur CÉ élevée (tableau 5.2).

Le lombricompost se démarque particulièrement pour la quantité de Ca en raison de la présence de glandes calciféreuses dans le tube digestif des vers (Edwards et Bohlen, 1996). La quantité élevée de Ca du lombricompost (tableau 5.3) se reflète aussi par une CÉ élevée (tableau 5.2). La quantité élevée d'Al retrouvée dans le lombricompost pourrait être de source minérale puisque l'ajout de sable fait partie des intrants du lombricompost (Kaplan et coll., 1980).

Malgré le fait que la teneur en Mg et K des composts biodynamiques soit comparable aux autres composts (tableau 5.3), leur CÉ demeure plus faible (tableau 5.2). Ceci s'explique par des teneurs en Ca, Na et S qui sont inférieures à celles des autres composts (tableau 5.3). Encore une fois, l'origine des intrants, le mode d'entreposage et la technologie de compostage expliquent ces différences. Par exemple, l'utilisation de fongicides à base de

Cu et l'utilisation d'autres éléments traces dans l'alimentation des animaux sur les fermes biodynamiques expliqueraient la présence de ces éléments dans les composts biodynamiques. Utilisés comme amendement au sol, ces composts biodynamiques apporteraient une quantité élevée en Fe et Al. Cependant, ces deux éléments proviennent eux-mêmes du sol ajouté lors de la fabrication de ces composts, et ils ne devraient pas être considérés comme nuisibles. Une augmentation de certains éléments minéraux a normalement lieu avec la maturité du compost (Hall et coll., 2006). Cependant, en comparant les composts biodynamiques 3 et 24 mois, cet effet n'a pas été noté.

Tableau 5.3 : Caractérisation des composts initiaux pour les éléments majeurs et éléments traces. Moyennes et écarts types de trois répétitions.

Variables	Composts					
	Forestier	Marin	Tourbe et	Fumier	Biodyn.	Biodyn.
	Biofor®	Biosol	Crevette	de vers	3 mois	24 mois
	$\bar{x} \pm \sigma_x$					
P total	5238	6517	6308	3135	3209	2805
(mg kgsec-1)	± 1145 b	± 481a	± 204 a	± 608 c	± 47 c	± 103 c
K total	6465	11968	11773	4895	8948	5415
(mg kgsec-1)	± 1845 c	± 679 a	± 346 a	± 269 d	± 230 b	± 221 cd
Ca total	12968	27148	29052	39150	1191	9292
(mg kgsec-1)	± 3084 c	± 2879 b	± 2850 b	± 3578 a	± 2301 c	± 1251 c
Mg total	2305	4017	3999	3830	5486	4577
(mg kgsec-1)	± 574 d	± 171 bc	± 149 bc	± 435 c	± 262 a	± 415 b
S total	2373	5323	5226	4866	1863	1544
(mg kgsec-1)	± 307 b	± 581 a	± 467 a	± 178 a	± 33 bc	± 47 c
Fe total	2496	2811	2549	4854	14674	19511
(mg kgsec-1)	± 381 d	± 551 d	± 530 d	± 199 c	± 385 b	± 553 a
B total	11,67	18,27	18,87	20,5	16,0	13,23
(mg kgsec-1)	± 2,41 d	± 1,31 ab	± 1,01 ab	± 2,62 a	± 0,30 bc	± 4,32 cd
Zn total	155	164	156	154	103	97,9
(mg kgsec-1)	± 27 a	± 16 a	± 7 a	± 18 a	± 2,5 b	± 0,4 b
Cu total	47,4	63,2	66,5	51,2	110	116
(mg kgsec-1)	± 7,45 d	± 0,86 bc	± 6,68 b	± 9,05 cd	± 4,36 a	± 15,52 a
Mn total	234	197	186	419	737	830
(mg kgsec-1)	± 35 d	± 11 d	± 9 d	± 53 c	± 26 b	± 31 a
Mo total	1,48	1,89	1,72	1,85	1,08	1,03
(mg kgsec-1)	± 0,27 b	± 0,20 a	± 0,08 ab	± 0,27 a	± 0,06 c	± 0,03 c
Ni total	4,13	6,01	5,98	6,86	14,2	16,8
(mg kgsec-1)	± 1,09 d	± 0,78 c	± 1,20 c	± 0,66 c	± 0,92 b	± 1,04 a
Al total	1341	1541	1687	4228	5823	7879
(mg kgsec-1)	± 398 d	± 243 d	± 272 d	± 216 c	± 207 b	± 278 a
Ba total	40,46	35,46	32,53	122,3	67,03	56,3
(mg kgsec-1)	± 6,63 c	± 2,08 c	± 1,15 c	± 14,98 a	± 30,51 b	± 1,37 bc
Cd total	0,283	0,286	0,273	0,957	0,773	0,603
(mg kgsec-1)	± 0,060 d	± 0,019 d	± 0,031 d	± 0,126 a	± 0,034 b	± 0,044 c
Co total	8,14	3,81	4,92	4,96	27,87	27,7
(mg kgsec-1)	± 4,08 b	± 1,08 b	± 1,87 b	± 0,42 b	± 4,22 a	± 3,67 a
Cr total	3,17	3,97	3,09	10,02	11,4	10,77
(mg kgsec-1)	± 1,37 b	± 1,67 b	± 0,076 b	± 1,84 a	± 1,25 a	± 0,67 a
Na total	1152	2261	1959	1591	237	210
(mg kgsec-1)	± 838 b	± 545 a	± 447 a	± 140 ab	± 16 c	± 12 c
Pb total	3,89	2,00	1,38	9,27	11,47	16,8
(mg kgsec-1)	± 0,646 d	± 1,26 e	± 0,66 e	± 1,40 c	± 0,25 b	± 0,61 a
Sr total	31,7	70,0	71,3	73,4	49,4	34,2
(mg kgsec-1)	± 5,10 c	± 5,44 a	± 6,34 a	± 2,13 a	± 0,78 b	± 2,06 c

Les résultats d'une même rangée accompagnés de lettres différentes sont significativement différents selon un LSD ($\alpha = 0,05$)

5.1.2 Paramètres biologiques des composts

5.1.2.1 Carbone microbien

Les résultats obtenus pour le carbone microbien sont similaires à ceux de Tiquia (2005). Les composts «Tourbe et Crevette, Marin Biosol et biodynamique 3 mois» ont les teneurs en carbone microbien les plus élevées (tableau 5.4). La quantité de carbone microbien diminue entre les composts «biodynamiques 3 et 24 mois». Plus un compost est mature, plus les sources de carbone sont difficilement accessibles, et moins il y a d'énergie pour permettre les augmentations des populations des microorganismes, et donc, la biomasse microbienne diminue.

5.1.2.2 Taux de germination et d'élongation, et indice de germination

Les taux de germination et d'élongation, et l'indice de germination sont tous près de 100 %. Les composts n'ont donc pas d'effets phytotoxiques selon le test du cresson (tableau 5.4).

Tableau 5.4 : Carbone de la biomasse microbienne, taux de germination et d'élongation racinaire, ainsi que l'indice de germination obtenus de l'analyse des composts initiaux. Moyennes et écarts types de trois répétitions.

Variables	Composts					
	Forestier Biofor®	Marin Biosol	Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodyn. 3 mois	Biodyn. 24 mois
	$\bar{x} \pm \sigma_x$					
C-bio. ¹ (mg gsec ⁻¹)	2731 ± 1513 ab	4560 ± 498 a	4016 ± 399 a	1464 ± 154 bc	666	4478
Germination (%)	97,42 ± 4,13 a	99,74 ± 2,20 a	98,41 ± 3,26 a	102,2 ± 2,82 a	102,9 ± 2,61 a	102,0 ± 1,9 a
Élongation Racinaire (%)	101,5 ± 4,38 a	104,3 ± 3,37 a	101,1 ± 6,43 a	108,4 ± 10,6 a	102,9 ± 14,50 a	110,1 ± 10,7 a
Indice de germ. (%)	98,74 ± 2,14 a	104,0 ± 4,03 a	99,4 ± 4,51 a	110,7 ± 9,17 a	106,1 ± 17,12 a	112,3 ± 11,4 a

¹ = Carbone de la biomasse microbienne

Les résultats d'une même rangée suivis de lettres différentes sont significativement différents selon un LSD ($\alpha = 0,05$)

5.1.2.3 Dégagement de CO₂

C'est le facteur «compost» qui a le plus influencé la variable «dégagement de CO₂» avec 53 % de la variation, suivi du temps avec 5 % de la variabilité et de leur interaction avec 11 % de la variabilité (tableau 5.5). Les facteurs «compost» et «temps» expliquent les effets

généraux de ces facteurs sur le dégagement de CO₂, et ils sont décrits en premier. Puis, pour identifier ce qui se passe au niveau des composts dans le temps, l'interaction «temps*compost (T*C)» est présentée.

Tableau 5.5 : Résumé de l'analyse de variance du dégagement de CO₂ des composts initiaux en fonction du temps d'incubation.

Sources de variation	Degrés de liberté	Moyennes des carrés
Bloc	2	0,81 ns
Compost (C)	5	16,79 ***
Erreur a)	10	0,95
Temps (T)	6	1,29 ***
C * T	30	0,58 ***
Erreur b)	48	0,11
Coefficient de variation (%)		11,59

*** = significatif à $P \leq 0,01$; ns = non-significatif

Les données du dégagement de CO₂ dans le temps pour chacun des composts sont présentées à la figure 5.1 En général, c'est le compost «biodynamique 3 mois» qui dégage, en moyenne, le plus de CO₂ (6,301 mg CO₂ / g compost sec) suivi en ordre décroissant des composts «Marin Biosol», «Tourbe et Crevette», «Forestier Biofor®», «Fumier de vers» et «biodynamique 24 mois» avec respectivement 3,015, 2,978, 2,645, 2,170 et 1,298 mg CO₂ / g compost sec. Le compost «biodynamique 3 mois» est jeune et son activité microbienne, estimée par le dégagement de CO₂, est importante comparativement aux autres composts. Ceci est appuyé par une quantité élevée de carbone de la biomasse microbienne (tableau 5.4). D'autre part, l'évolution du CO₂ diminue généralement avec le temps d'incubation.

En particulier, le dégagement de CO₂ ne se fait pas de la même manière dans le temps en fonction du compost, d'où l'interaction «compost * temps» significative (tableau 5.5). Cette interaction est principalement attribuable au compost «biodynamique 3 mois» dont le dégagement de CO₂ augmente jusqu'à 30 d (figure 5.1). De manière générale, le dégagement de CO₂ diminue dans le temps pour les autres composts. Le carbone du compost devient de moins en moins accessible dans le temps et moins de CO₂ est dégagé.

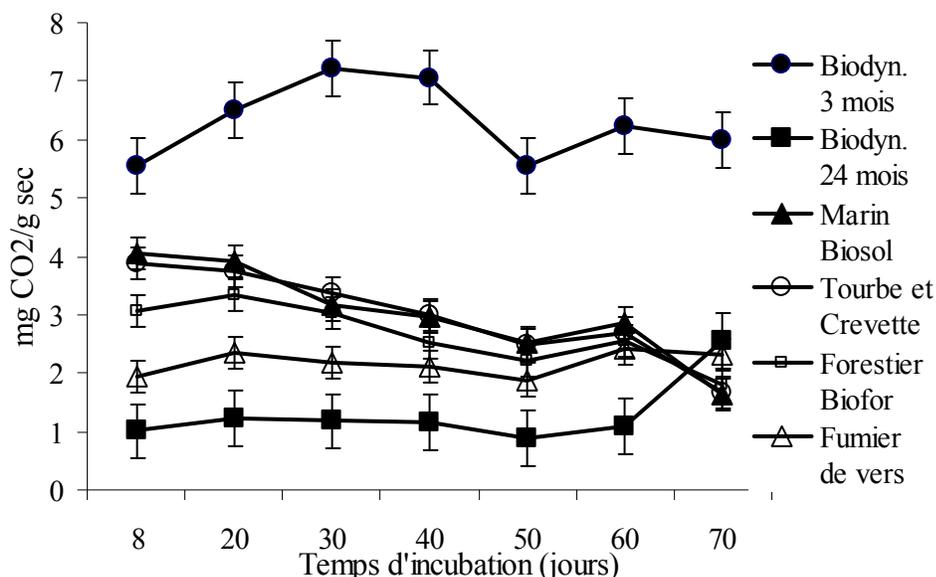


Figure 5.1 : Quantité de CO₂ dégagée par les composts initiaux. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 3).

5.1.2.4 Minéralisation du N-NO₃

C'est le facteur «compost» qui a le plus influencé le dégagement de N-NO₃ avec 43,1 % de la variation (tableau 5.6). La minéralisation du N-NO₃ dans le temps ne s'effectue pas de la même manière pour tous les composts, d'où l'interaction «temps * compost» qui représente 27,4 % de la variation.

Tableau 5.6 : Résumé de l'analyse de variance de la minéralisation du N-NO₃ en fonction du compost et du temps d'incubation.

Sources de variation	Degrés de liberté	Moyennes des carrés
Bloc	2	188310 ns
Compost (C)	5	2883656 ***
Erreur a)	10	348569
Temps (T)	4	831287 ***
T * C	7	458463 ***
Erreur b)	42	56165
Coefficient de variation (%)		25,88

*** = significatif à $P \leq 0,01$; ns = non-significatif

Brièvement, les composts qui minéralisent le plus de N-NO₃/g compost sec sont par ordre décroissant : «Tourbe et Crevette, Marin Biosol, Fumier de vers, biodynamique 24 mois, Forestier Biofor® et biodynamique 3 mois» avec respectivement 1,456, 1,289, 1,027, 0,752, 0,730 et 0,240 mg N-NO₃ / g compost sec. Les composts plus matures accumulent

en général une quantité plus importante de $N-NO_3$. La présence de $N-NO_3$ est attribuable aux microorganismes nitrificateurs qui transforment le $N-NH_4$ en $N-NO_3$.

Généralement, plus le temps d'incubation augmente, plus il y a la teneur en $N-NO_3$ augmente (figure 5.2), ce qui est conforme aux observations de Levanon et Pluda (2002). Cependant, pour le compost «biodynamique de 3 mois», la teneur en $N-NO_3$ a diminué entre 0 et 8 d (figure 5.2). De même, pour le compost «biodynamique 24 mois» la teneur en de $N-NO_3$ est restée relativement stable. L'état de décomposition peu avancée du compost «biodynamique de 3 mois» explique la diminution, car le peu de nitrate produit est réutilisé par les microorganismes pour leur croissance et leur multiplication et ne s'accumule pas dans le compost. Pour le compost «biodynamique 24 mois» la minéralisation-utilisation est relativement en équilibre.

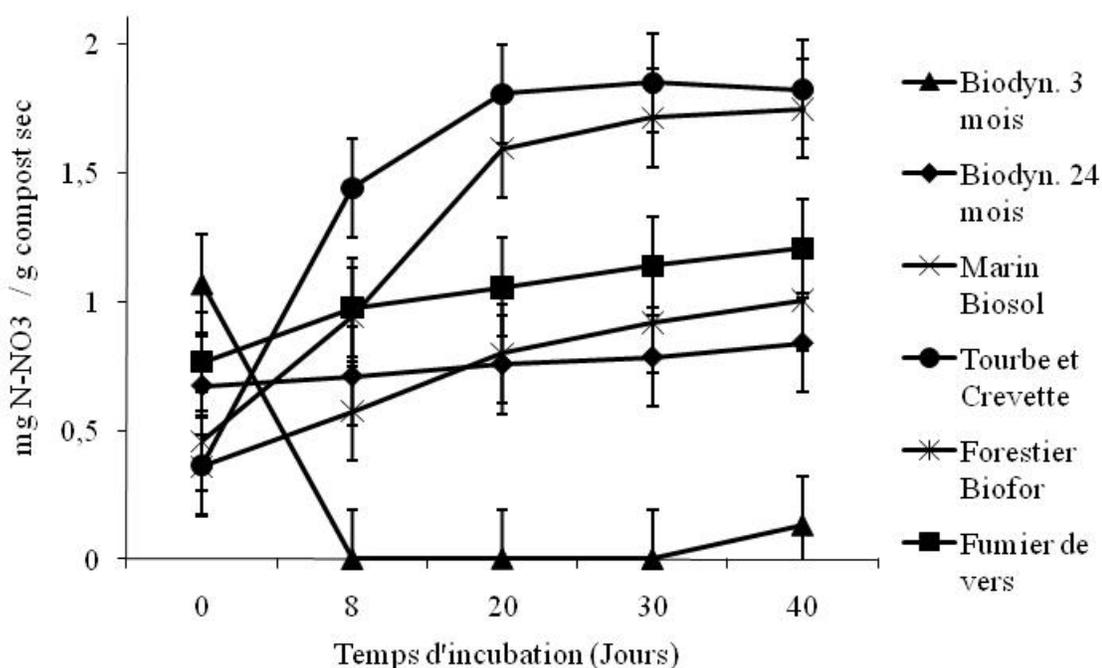


Figure 5.2 : Quantité de $N-NO_3$ minéralisée par les composts initiaux. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 3).

Conclusion volet 1

En prenant en compte que la composition des EC dépendra de la composition des composts d'origine, il est essentiel de caractériser les composts. Ainsi, ce volet a permis de caractériser les composts quant à leurs qualités physicochimiques et biologiques. Les

composts présentent des différences physiques, chimiques et microbiologiques entre eux. Les valeurs mesurées entrent dans la gamme de celles rapportées dans la littérature, et respectent souvent les caractéristiques physicochimiques des composts de type AA, A ou B de la norme nationale du Canada pour les amendements organiques – Compost (Bureau de Normalisation du Québec, 2005). La caractérisation biologique identifie des composts matures par une faible biomasse et de faibles activités microbiennes et des composts immatures par une biomasse et des activités microbiennes élevées. Ces composts sont donc représentatifs de ceux disponibles à la ferme.

Les pH des composts se rapprochent de la neutralité excepté pour les composts «Forestier Biofor®» et «biodynamique 3 mois» qui sont, respectivement, acides et alcalins. Les composts industriels de «Fafard» se démarquent par leur CÉ élevée et sont généralement les plus riches en N, P, et K. De ces composts, le compost «Tourbe et Crevette» a une biomasse microbienne et des activités microbiennes, exprimées par le dégagement en CO₂ et en N-NO₃, intermédiaire aux deux autres; il est encore immature. De plus, selon les indications sur le sac, les autres composts «Fafard» auraient été enrichis pour améliorer leur performance agronomique pour des usages particuliers en horticulture. Le compost «Fumier de vers» a une CÉ similaire aux composts industriels de «Fafard», mais est le plus riche en Ca et B. C'est un compost qui présente une biomasse et une activité microbienne faibles; signes d'une maturité avancée. Les composts «biodynamiques» diffèrent des autres composts par leur richesse en matière minérale, mais leurs faibles teneurs en C, N, P, K et Ca. De plus, ces composts diffèrent entre eux par leur maturité, avec des biomasses et activités microbiennes élevées pour le compost immature «biodynamique 3 mois» et faible pour le compost mature «biodynamique 24 mois».

Parmi ces six composts, les quatre composts sélectionnés sont «Tourbe et Crevette», «fumier de vers», «biodynamique 3 mois» et «biodynamique 24 mois». Leurs qualités variées en éléments nutritifs pour la plante et leur maturité devraient permettre l'obtention d'EC variés.

5.2 Volet 2 : Impact de l'aération, du compost et du temps de macération sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des EC

5.2.1 Extraits de compost

5.2.1.1 Paramètres physicochimiques

5.2.1.1.1 Teneurs en matière sèche et en cendres

Les ANOVAs (tableau 5.7) de la matière des cendres indiquent que le facteur «compost» représente respectivement 51 et 40 % de la variation totale. Le traitement «compost» explique une grande partie de l'effet sur la teneur en matière sèche et en cendres. Le facteur «aération» représente 5 % de la variation totale pour les deux variables à l'étude. De plus, l'interaction «aération * compost» représente 10 et 13 % de la variabilité totale.

Dans tous les cas, les effets du compost et de l'interaction «aération * compost» sont significatifs sur la teneur en matière sèche et en cendres dans les EC, indiquant que l'effet de l'aération interagit d'un compost à l'autre. L'effet de l'aération est significatif sur la teneur en matière sèche.

Tableau 5.7 : Résumé de l'analyse de variance de la teneur en matière sèche et en cendres sur base humide (%) dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération et du compost.

Sources de variation	Degrés de liberté	Moyenne de carré	
		Matière sèche	% cendres
Bloc	3	$6,37 \times 10^{-7}$ ns	$1,32 \times 10^{-7}$
Aération (A)	1	16×10^{-7} *	$1,30 \times 10^{-7}$ ns
Erreur a)	3	$2,1 \times 10^{-7}$	$0,42 \times 10^{-7}$ ns
Compost (C)	3	$36,6 \times 10^{-7}$ ***	$3,57 \times 10^{-7}$ ***
Bma ¹ vs. Bim ²	1	$26,2 \times 10^{-7}$ ***	$2,02 \times 10^{-7}$ **
Fcre ³ vs. Bma + Bim.	1	$33,6 \times 10^{-7}$ ***	$0,63 \times 10^{-7}$ ns
Vers ⁴ vs. autres composts ⁵	1	$48,3 \times 10^{-7}$ ***	$7,84 \times 10^{-7}$ ***
A * C	3	$7,4 \times 10^{-7}$ *	$1,12 \times 10^{-7}$ **
A * Bim vs. Bma	1	$8,5 \times 10^{-7}$ *	$0,16 \times 10^{-7}$ ns
A * Fcre vs. composts biodyn.	1	$8,79 \times 10^{-7}$ *	$2,70 \times 10^{-7}$ ***
A * vers vs. autres composts	1	$3,66 \times 10^{-7}$ ns	$0,61 \times 10^{-7}$ ns
Erreur b)	18	$2,5 \times 10^{-7}$	$0,31 \times 10^{-7}$
Coefficient de variation (%)		25,10	17,58

¹ : biodynamique 24 mois; ² : biodynamique 3 mois; ³ : Tourbe et Crevette; ⁴ : Fumier de vers; ⁵ : biodynamique 3 mois + biodynamique 24 mois + Tourbe et Crevette

*, **, *** = significatif à $P \leq 0,1$, $0,05$ et $0,01$; ns = non-significatif

Une brève description des résultats de la teneur en matière sèche et en cendres montre les moyennes globales des effets principaux des composts et de l'aération (tableau 5.8). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre les facteurs compost et aération sont aussi présentées.

En moyenne, c'est le compost «Tourbe et Crevette» qui permet d'obtenir la plus haute teneur en matière sèche dans les EC, suivi par ordre décroissant, des EC «biodynamiques 3 et 24 mois» et «Fumier de vers». D'autre part et en moyenne, l'aération permet d'obtenir une plus forte teneur en matière sèche dans l'EC. L'agitation créée par l'aération permet le passage de plus de particules fines dans ces EC. Cependant, les interactions significatives améliorent l'interprétation de ces tendances générales. Ainsi, l'augmentation en matière sèche est plus importante en présence d'aération plutôt qu'en absence d'aération, et ce, pour le compost «biodynamique 3 mois» comparativement au compost «biodynamique 24 mois» ou encore pour le compost «Tourbe et Crevette» comparativement aux deux composts biodynamiques. Le compost «biodynamique de 3 mois» est un compost immature

où les bactéries dominent la microflore (Beauchamp, 2006). Il est possible que les agrégats du compost créés par les liants microbiens, souvent associés aux activités fongiques, soient encore peu nombreux et permettent à la matière sèche de ce compost de passer en solution dans l'EC. D'autre part, le compost «Tourbe et Crevette» contrairement à la tendance générale de l'effet de l'aération, montre une augmentation dans la teneur en matière sèche en absence d'aération. Bien que la granulométrie n'ait pas été mesurée il est possible de spéculer sur la présence de très fines particules, libres ou faiblement liées, dans ce compost comparativement aux composts biodynamiques.

Pour la teneur en cendres, en moyenne, c'est le compost «biodynamique 3 mois» qui permet d'obtenir la teneur la plus élevée dans les EC, suivi par ordre décroissant, des EC «Tourbe et Crevette», «biodynamique 24 mois» et «Fumier de vers». Encore une fois, l'aération permet d'obtenir e plus forte teneur en cendres dans l'EC. Seule, l'interaction «aération * Tourbe et Crevette versus les composts biodynamiques» est significative. Encore une fois, le compost «Tourbe et Crevette» présente une augmentation dans la teneur en cendres en absence d'aération comparativement à la présence d'aération, et ce, contrairement à l'effet de l'aération noté pour les composts biodynamiques.

Tableau 5.8 : Teneur moyenne et son erreur type en matière sèche et en cendres (%) sur une base sèche dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération et du compost.

Composts	Matière sèche (%) ± erreur type			Cendres (%) ± erreur type		
	Aéré	Non aéré	Moyenne compost	Aéré	Non aéré	Moyenne compost
Tourbe et Crevette	0,255 ± 0,025	0,275 ± 0,026	0,265	0,111 ± 0,008	0,125 ± 0,008	0,118
Fumier de vers	0,159 ± 0,020	0,125 ± 0,017	0,142	0,089 ± 0,008	0,073 ± 0,008	0,081
biodynamique 3 mois	0,317 ± 0,026	0,193 ± 0,022	0,255	0,171 ± 0,008	0,108 ± 0,008	0,139
biodynamique 24 mois	0,218 ± 0,023	0,144 ± 0,019	0,181	0,128 ± 0,008	0,090 ± 0,008	0,109
Moyenne aération	0,237	0,184		0,124	0,099	

5.2.1.1.2 pH, conductivité électrique et potentiel rédox

L'ANOVA de la variable pH indique que les facteurs «temps», «compost» et «aération» représentent respectivement 24, 16 et 14 % de la variation totale (tableau 5.9). Pour la variable CÉ, l'ANOVA indique que les facteurs «compost» et «temps» représentent respectivement 56 et 13 % de la variation totale. Finalement, pour la variable PR, l'ANOVA indique que les facteurs «compost» et «temps» représentent respectivement 28 et 19 % de la variation totale.

Dans tous les cas, les effets des facteurs principaux «temps» et «compost» sont significatifs. L'interaction triple «aération*compost*temps» est significative pour la variable pH uniquement. L'interaction «compost*temps» est significative pour les variables CÉ et le PR. Les interactions «aération*temps» et «aération * compost» sont significatives pour la variable PR.

Une brève description des résultats du pH, de la CÉ et du PR montre les moyennes globales des effets principaux de l'aération, du compost et du temps (tableaux 5.10 à 5.12). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre les trois facteurs sont aussi présentées dans ces tableaux. Pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures présentant ces interactions significatives sont aussi présentées.

Tableau 5.9: Résumé de l'analyse de variance du pH, de la CÉ et du PR des EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération, du compost et du temps de macération.

Sources de variation	Degrés de liberté	Moyennes des carrés		
		pH	CÉ	Rédox
Bloc	3	0,129 ns	74571 ns	164,4 ns
Aération	1	2,050 *	313604 **	1882,0 ns
Erreur a)	3	0,242	29577	738,6
Compost	3	0,779 ***	2126952 ***	9641,4 ***
Bma ¹ vs bim ²	1	0,549 ***	87519 *	349,4 ns
Fcre ³ vs bma + bim	1	0,000 ns	5811357 ***	18425,8 ***
Vers ⁴ vs autres ⁵	1	1,788 ***	432927 ***	10149,0 ***
Aération*Compost	3	0,325 ***	20367 ns	1452,4 ***
Aération*bma vs bim	1	0,499 ***	3226 ns	1766,6 **
Aération*fcre vs (bma+bim)	1	0,116 **	55539 ns	2488,3 ***
Aération*vers vs autres	1	0,360 ***	2104 ns	102,2 ns
Erreur b)	18	0,019	20547	246,2
Temps	3	1,144 ***	474666 ***	6629,9 ***
temps linéaire (tlin)	1	2,643 ***	432689 ***	5186,1 ***
temps quadratique (tquad)	1	0,627 ***	446843 ***	7461,9 ***
temps cubique (tcub)	1	0,164 **	569767 ***	4542,9 ***
Aération *Temps	3	0,074 ns	12002 ns	1506,4 ***
Aération * temps linéaire	1	0,125 ns	34824 ns	631,1 ns
Aération * temps quadratique	1	0,004 ns	1071 ns	3251,4 ***
Compost*Temps	9	0,040 ns	72902 ***	547,1 *
bma vs bim* tlin	1	0,108 ns	38824 ns	1302,62 **
fcre vs bma+bim * tlin	1	0,127 *	11104 ns	2762,41 ***
Aération*Compost*Temps	9	0,086 **	18211 ns	450,8 ns
Aération*(bma vs bim)*tlin	1	0,107 ns	47750 ns	104,0 ns
Aération *(fcre vs bma+bim)*tlin	1	0,111 ns	35425 ns	802,1 ns
Aération *(vers vs autres)*tlin	1	0,444 ***	18273 ns	42,0 ns
Erreur c)	72	0,041	19454	297,3
Coefficient de variation (%)		2,77	15,83	8,80

¹ = biodyn. 24 mois; ² = biodyn. 3 mois; ³ = Tourbe et Crevette; ⁴ = Fumier de vers; ⁵ = biodyn. 3 mois + biodyn. 24 mois + Tourbe et Crevette

*, **, *** = significatif à $P \leq 0,1, 0,05$ et $0,01$; ns = non-significatif

En général, le pH des EC aérés est plus élevé que celui des EC non aérés (tableau 5.10). De plus, le pH des EC varie avec le type de compost. Finalement, il y a généralement une alcalinisation de tous les EC dans le temps. Cependant, des exceptions existent et le pH n'a pas évolué dans le temps de la même manière pour tous les EC en présence ou en absence d'aération. L'interaction triple «aération*compost*temps» (tableau 5.9) s'explique principalement par le contraste «aération*Fumier de vers vs autres composts*temps linéaire» (figure 5.3). L'évolution du pH n'arbore pas des profils similaires, car l'augmentation dans le temps du pH de l'EC «Fumier de vers» non aéré est plus importante que celles des autres groupes. Le compost peut présenter une grande variabilité d'un échantillon à un autre. Cela peut expliquer en partie cette observation. L'interaction double «aération*compost» (tableau 5.9) s'explique principalement par les interactions «aération*bma vs bim», et «aération*fcre vs (bma+bim)». Ainsi, le profil de l'augmentation du pH des EC aérés et non aérés faits à partir du compost «biodynamique 3 mois» est plus important comparativement au compost «biodynamique 24 mois». De même, le profil de l'augmentation du pH des EC aérés et non aérés faits à partir des composts biodynamiques est plus important comparativement au compost «Tourbe et Crevette».

En général, la diminution du pH des EC non aérés est probablement due à la production d'acides organiques en absence d'O₂ (Brinton, 1998). Cette diminution augmente dans le temps puisque les acides organiques vont s'accumuler dans la solution au fil du temps.

Tableau 5.10 : Moyenne \pm écart type des pH des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	7,14 \pm 0,14	6,96 \pm 0,09	7,41 \pm 0,13	7,04 \pm 0,14	7,14
2	+	7,36 \pm 0,21	7,00 \pm 0,33	7,59 \pm 0,39	7,26 \pm 0,22	7,30
7	+	7,58 \pm 0,15	7,21 \pm 0,19	7,86 \pm 0,10	7,45 \pm 0,12	7,53
14	+	7,70 \pm 0,11	7,22 \pm 0,13	7,93 \pm 0,04	7,59 \pm 0,15	7,61
Moyenne aération :		7,44	7,10	7,70	7,33	7,39
0	-	6,88 \pm 0,20	6,61 \pm 0,06	7,17 \pm 0,15	6,89 \pm 0,08	6,89
2	-	7,29 \pm 0,34	6,95 \pm 0,13	7,28 \pm 0,14	7,21 \pm 0,17	7,18
7	-	7,32 \pm 0,28	7,25 \pm 0,28	7,11 \pm 0,30	7,26 \pm 0,23	7,23
14	-	7,44 \pm 0,29	7,31 \pm 0,22	7,06 \pm 0,31	7,24 \pm 0,25	7,26
Moyenne aération :		7,23	7,03	7,16	7,15	7,14
Moyenne compost :		7,34	7,06	7,43	7,24	

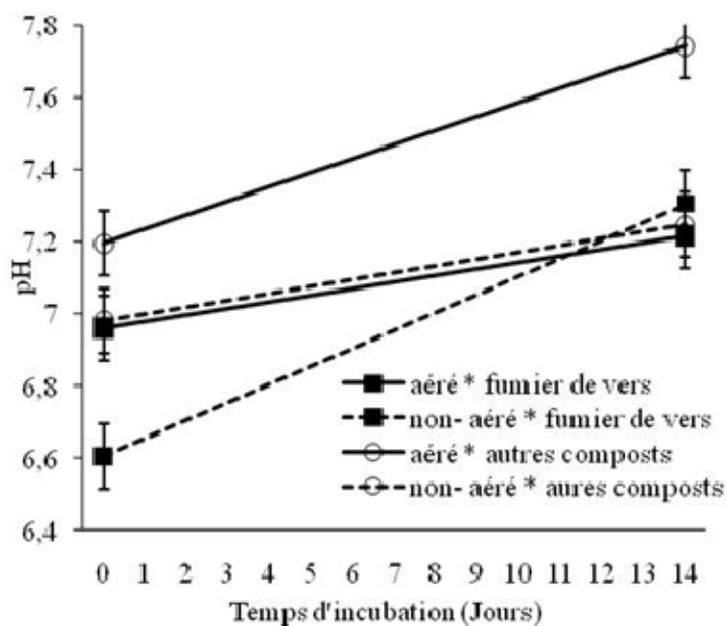


Figure 5.3 : Effet du temps de macération sur les pH des EC pour les interactions «aéré * Fumier de vers», «non aéré * Fumier de vers», «aéré * autres composts» et «non aéré * autres composts». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

En général, la CÉ des EC non aérés est plus élevée que celle des EC aérés (tableau 5.11). De plus, la CÉ des EC varie avec le type de compost. Les différences sont particulièrement marquées entre les «composts biodynamiques», «Tourbe et Crevette» et les «composts biodynamiques» et entre le compost de «Fumier de vers» et les «autres composts». Ainsi, la CÉ du «compost biodynamique 24 mois» est plus élevée que pour le «compost biodynamique 3 mois», indiquant une accumulation des sels dans le compost mature. De même, le compost «Tourbe et Crevette» a une CÉ plus élevée que la moyenne des composts biodynamiques. Les résidus marins sont souvent riches en sels. Finalement, le fumier de vers étant surtout produit en environnement protégé des intempéries, ce type de compost est souvent riche en sels. De plus, la CÉ varie dans le temps. Finalement, l'interaction double «aération*temps» (tableau 5.9) ne s'explique pas par un simple effet d'augmentation linéaire des CÉ dans le temps, mais des profils d'augmentation et de diminution de la CÉ dans le temps. Ces résultats sont conformes à ceux que rapportent Inbar et coll. (1993) cité dans Chefetz et coll. (1998).

Tableau 5.11 : Moyenne \pm écart type de la CÉ (mS/cm) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	897 \pm 243	917 \pm 187	358 \pm 90	517 \pm 92	672
2	+	1240 \pm 225	1044 \pm 106	701 \pm 44	683 \pm 34	917
7	+	1233 \pm 139	852 \pm 293	718 \pm 24	699 \pm 27	876
14	+	1115 \pm 284	938 \pm 327	632 \pm 202	754 \pm 20	860
Moyenne aération :		1121	937	602	663	831
0	-	886 \pm 187	947 \pm 228	369 \pm 44	686 \pm 71	722
2	-	1414 \pm 179	1153 \pm 86	683 \pm 47	744 \pm 54	999
7	-	1405 \pm 87	1035 \pm 94	754 \pm 81	771 \pm 44	991
14	-	1451 \pm 70	960 \pm 141	826 \pm 64	791 \pm 28	1007
Moyenne aération :		1289	1024	658	748	930
Moyenne compost :		1205	981	630	705	

En général, le PR des EC varie avec le type de compost, mais l'aération vient modifier l'effet de certains composts. Finalement, il y a généralement une diminution du PR de tous les EC dans le temps. Cependant, des exceptions à ces généralités existent et le PR n'a pas évolué dans le temps de la même manière en présence ou en absence d'aération, ou selon le type de compost à l'étude. L'interaction double «aération*temps» (tableau 5.9) ne s'explique pas par un simple effet d'augmentation linéaire des CÉ dans le temps, mais par un profil d'augmentation du PR pour un laps de temps donné, suivi d'un plateau, c.-à-d. une relation quadratique du PR dans le temps. Ainsi, le PR des EC aérés passe de 212,0 mV à 194,2 mV entre 0 et 2 d pour ensuite rester stable (figure 5.4), alors que le PR des EC non aérés diminue considérablement entre 0 et 2 d passant de 222,6 mV à 173,2 mV pour ensuite augmenter légèrement jusqu'à 184,8 mV à 14 d. L'absence d'aération a eu pour effet de diminuer le PR, ce qui est conforme à la théorie (Patrick et coll., 1996). Il est donc possible que la méthode utilisée pour aérer les EC aérés n'ait pas réussi à dissoudre

suffisamment d'O₂ dans les EC aérés pour maintenir des conditions en aérobie. Ceci pourrait avoir comme conséquence de perturber la minéralisation des éléments minéraux par les microorganismes dans les EC, et donc, de possiblement affecter la capacité des EC à stimuler la croissance végétale.

L'interaction «compost*temps» (tableau 5.9) s'explique par une augmentation linéaire du PR dans le temps. Cependant, l'évolution du PR n'arbore pas des profils similaires (tableau 5.12); ainsi, le profil de diminution du PR dans le temps des EC du compost «biodynamique 24 mois» est plus marqué que pour le compost «biodynamique 3 mois». De même, le profil de diminution du PR dans le temps des EC du compost «Tourbe et Crevette» est plus marqué que pour les composts biodynamiques. Ces différences sont possiblement liées à l'activité microbienne des composts (figure 5.1). En effet, comme le PR est une mesure de la disponibilité des électrons et les électrons sont utilisés lors de l'activité microbienne. Ce sont les composts ayant le moins d'activité microbienne qui ont des EC à PR élevés. La diminution du PR étant plus prononcée pour les EC des composts ayant une activité microbienne élevée.

L'interaction double «aération*compost » (tableau 5.9) s'explique principalement par les interactions aération*bma vs bim, et aération*fcre vs (bma+bim). Ainsi, le profil de diminution du PR des EC aérés et non aérés du compost «biodynamique 3 mois» est plus important comparativement au compost «biodynamique 24 mois». De même, le profil de diminution du PR des EC aérés et non aérés des composts biodynamiques est plus important comparativement au compost «Tourbe et Crevette».

Tableau 5.12 : Moyenne \pm écart type du PR (mV) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	197,8 \pm 16,0	229,5 \pm 14,9	205,9 \pm 18,2	214,8 \pm 20,6	212,0
2	+	174,8 \pm 9,5	209,5 \pm 17,7	183,4 \pm 10,8	209,0 \pm 14,1	194,2
7	+	176,3 \pm 6,2	228,3 \pm 15,3	176,1 \pm 12,7	213,5 \pm 10,5	198,5
14	+	167,0 \pm 14,2	210,5 \pm 7,3	200,8 \pm 20,8	196,0 \pm 21,3	193,6
Moyenne aération :		178,9	219,4	191,5	208,3	199,6
0	-	193,6 \pm 27,9	232,8 \pm 16,4	230,0 \pm 30,7	233,9 \pm 35,8	222,6
2	-	147,0 \pm 1,4	198,0 \pm 25,5	163,9 \pm 0,2	184,0 \pm 7,1	173,2
7	-	142,5 \pm 18,4	187,4 \pm 4,9	201,3 \pm 16,8	174,9 \pm 7,9	176,5
14	-	124,3 \pm 7,6	207,8 \pm 16,3	213,3 \pm 10,3	194,0 \pm 11,0	184,8
Moyenne aération :		151,8	206,5	202,1	196,7	189,3
Moyenne compost :		165,4	213,0	196,8	202,5	

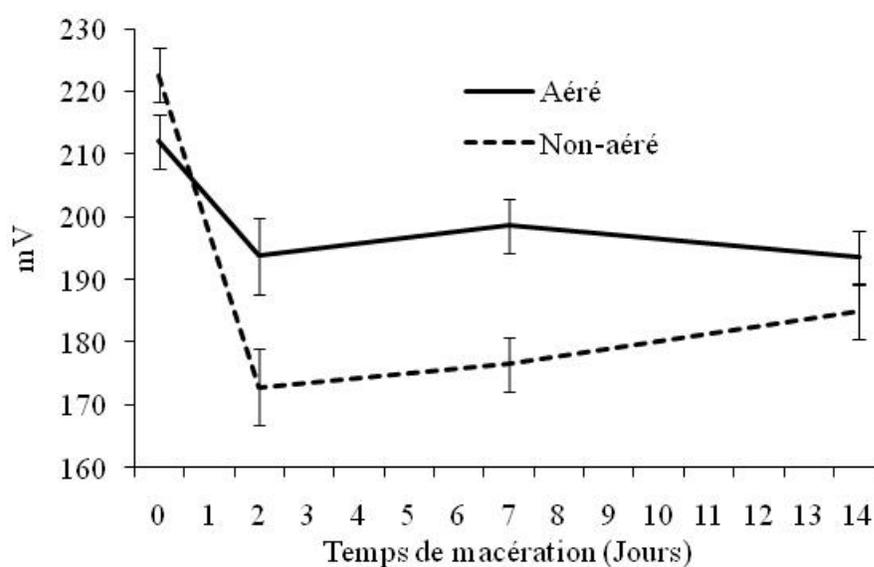


Figure 5.4 : Effet du temps de macération sur le PR des EC fabriqués en présence ou en absence d'aération. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 16).

5.2.1.1.3 Anions

Les ANOVAs des teneurs en N-NO₃ et de P-PO₄ des EC indiquent que les facteurs «compost» et «temps» représente respectivement 41 et 13 % de la variation totale pour le N-NO₃ et 73 et 11 % de la variation totale pour le P-PO₄ (tableau 5.13). Selon les ANOVAs des teneurs en S-SO₄ et en Cl des EC, c'est le facteur «compost» qui représente respectivement 96 et 92 % de la variation totale.

Dans tous les cas, les effets du facteur principal «compost» et son interaction «temps*compost» sont significatifs. Le facteur principal «aération» est significatif pour la variable S-SO₄, alors que l'interaction «aération*temps» est significative pour la variable Cl. Cependant, cette interaction n'est pas discutée, car elle ne semble pas avoir d'explications chimique ou biologique.

Une brève description des résultats du N-NO₃, P-PO₄, S-SO₄ et Cl montre les moyennes globales des effets principaux de l'aération, du compost et du temps (tableaux 5.14 à 5.17). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre les trois facteurs sont aussi présentées dans ces tableaux. De plus pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures présentent les interactions significatives.

Tableau 5.13: Résumé de l'analyse de variance de la quantité de N-NO₃, P-PO₄, S-SO₄ et Cl dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération, du compost et du temps de macération.

Sources de variation	Degrés de liberté	Moyennes des carrés			
		N-NO ₃ ⁻	P-PO ₄ ⁻	S-SO ₄ ⁻	Cl ⁻
Bloc	3	644,7 ns	77,36 ***	0,005 ns	425,9 ns
Aération (A)	1	187,7 ns	0,50 ns	0,124 *	371,3 ns
Erreur a)	3	82,4	0,46 ns	0,017	99,4
Compost (C)	3	4008,6 ***	2876,45 ***	78,682 ***	52444,3 ***
Bma ¹ vs Bim ²	1	7569,0 ***	306,25 ***	21,576 ***	60,1 ns
Fcre ³ vs Bma + Bim	1	4332,0 ***	7154,08 ***	101,581 ***	148741,3 ***
Vers ⁴ vs autres ⁵	1	124,9 ns	1169,01 ***	112,889 ***	8531,5 ***
A * C	3	182,3 ns	9,58 ns	0,053ns	66,9 ns
Erreur b)	18	179,1	19,95	0,126	189,5
Temps (T)	3	1305,8 ***	426,47 ***	0,509 ***	42,8 ns
T linéaire (tlin)	1	3773,6 ***	842,84 ***	0,463 ***	41,0 ns
T quadratique (tquad)	1	1,4 ns	275,61 ***	0,302 ***	1,8 ns
T cubique (tcub)	1	142,4 ns	160,95 ***	0,761 ***	85,5 ns
A * T	3	427,0 ***	9,02 ns	0,054 ns	42,2 ns
A * tlin	1	1207,3 ***	8,77 ns	0,112 ns	97,2
A * tquad	1	72,4 ns	18,24 *	0,000 ns	2,1 ns
A * tcub	1	1,4 ns	0,06 ns	0,051 ns	27,3 ns
C * T	9	111,2 *	83,72 ***	0,299 ***	384,7 ***
Bma vs Bim * tlin	1	45,0 ns	13,36 ns	0,970 ***	224,4 **
Fcre vs Bma + Bim * tlin	1	155,7 ns	277,04 ***	0,094 ns	61,7 ns
Bma vs Bim * tquad	1	189,9 *	3,05 ns	0,095 ns	124,7 *
Fcre vs Bma + Bim * tquad	1	30,2 ns	145,92 ***	0,001 ns	158,8 *
Vers vs autres * tquad	1	231,1 *	33,86 **	0,188 **	845,9 ***
Bma vs Bim * tcub	1	125,2 ns	3,96 ns	0,492 **	68,5 ns
Vers vs autres * tcub	1	221,7 **	22,37 *	0,197 **	583,1 ***
A * C * T	9	33,1 ns	5,08 ns	0,033 ns	213,6 ***
Erreur c)	72	63,30	5,88	0,043	43,16
Coefficient de variation (%)		25,45	22,72	7,72	12,64

¹ = biodynamique 24 mois; ² = biodynamique 3 mois; ³ = Tourbe et Crevette; ⁴ = Fumier de vers; ⁵ = biodynamique 3 mois + biodynamique 24 mois + Tourbe et Crevette

*, **, *** = significatif à $P \leq 0,1, 0,05$ et $0,01$; ns = non-significatif

Les nitrates sont facilement solubles dans l'eau, et les composts diffèrent entre eux quant à leur teneur en nitrate. Ainsi, les teneurs sont plus élevées dans l'EC «biodynamique 24 mois» comparativement à l'EC «biodynamique 3 mois» (tableau 5.14). Alors que les teneurs sont plus faibles dans l'EC «Tourbe et Crevette» comparativement aux EC «composts biodynamiques» (tableau 5.14). Le stade de maturité du compost et le type de compost expliquent ces différences. Un compost plus mature contient plus de N-NO₃ qu'un compost moins mature, ce qui se reflète dans les EC. Les teneurs obtenues sont similaires à celles rapportées par Chefetz et coll. (1998).

Tableau 5.14 : Moyenne de la quantité de N-NO₃ (mg N-NO₃/L) ± écart type des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	27,8 ± 20,1	35,3 ± 7,2	25,8 ± 0,5	45,0 ± 0,8	33,4
2	+	29,3 ± 22,7	33,5 ± 5,6	35,5 ± 0,6	44,8 ± 1,7	35,8
7	+	23,5 ± 19,6	32,3 ± 6,0	28,8 ± 1,5	44,3 ± 0,5	32,2
14	+	18,8 ± 15,9	32,0 ± 5,0	18,8 ± 1,0	44,5 ± 3,9	28,5
Moyenne aération :		24,8	33,3	27,2	44,6	32,5
0	-	26,8 ± 23,6	49,8 ± 5,4	23,0 ± 3,2	55,8 ± 9,7	38,8
2	-	28,5 ± 24,0	35,3 ± 7,0	32,5 ± 2,1	54,0 ± 3,2	37,6
7	-	12,5 ± 12,5	25,5 ± 6,2	21,5 ± 1,3	44,0 ± 1,4	25,9
14	-	2,5 ± 3,3	20,3 ± 6,9	10,8 ± 1,7	38,3 ± 2,1	17,9
Moyenne aération :		17,6	32,7	21,9	48,0	30,0
Moyenne compost :		21,2	33,0	24,6	46,3	

L'interaction «aération * temps» indique que la quantité de N-NO₃ des EC a diminué rapidement entre 0 et 14 d dans les EC non aérés passant de 38,8 à 17,9 mg N-NO₃/L, et moins rapidement entre 0 et 14 d dans les EC aérés passant de 33,4 à 28,5 mg N-NO₃/L (figure 5.5). Le N-NO₃ en solution peut être perdu par volatilisation ou dénitrification. À

cet égard, c'est pour des $PR \leq 250$ mV que le NO_3 sert de donneur d'électrons ouvrant ainsi la voie à la dénitrification (Masscheleyn, 1990 cité dans Patrick et coll., 1996). Les EC ont tous des $PR \leq 250$ mV (tableau 5.12) ce qui expliquerait une bonne partie des pertes en azote. Les conditions des EC non aérés étaient plus propices à la perte de $N-NO_3$ par dénitrification. C'est lors de conditions d'absence d' O_2 que les microorganismes dénitrificateurs sont actifs. Les conditions dans les EC aérés étaient aussi propices à la perte de $N-NO_3$ par dénitrification à cause d'un faible PR (tableau 5.12), liée à une aération probablement insuffisante. La volatilisation des NO_x a lieu particulièrement lorsque le pH est élevé (Körner et Stegmann, 1998), ce qui est le cas des EC aérés «Tourbe et Crevette, biodynamique 3 et 24 mois» (tableau 5.10). Dans les EC, le profil des pertes de $N-NO_3$ par dénitrification est plus rapide dans ceux non aérés que dans ceux aérés (figure 5.5). L'aération permet de mieux préserver le $N-NO_3$ présent dans les EC macérés pour une période de temps plus longue et possiblement de permettre une croissance végétale plus importante.

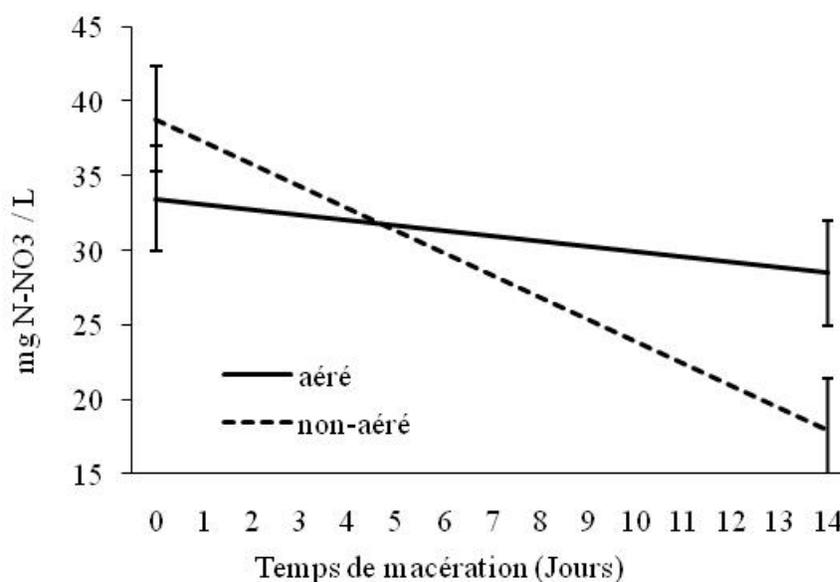


Figure 5.5 : Effet du temps de macération sur la quantité de $N-NO_3$ des EC fabriqués en présence ou en absence d'aération. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 16).

En général, il y a une diminution linéaire de la quantité de N-NO₃ entre 0 et 14 d (tableau 5.14). Par contre, l'interaction «compost * temps» explique certains cas particuliers. Ainsi, il y a une légère augmentation de la quantité de N-NO₃ dans l'EC «biodynamique 3 mois» de 1h à 2 d suivie d'une diminution jusqu'à 14 d, tandis que la quantité de N-NO₃ dans l'EC «biodynamique 24 mois» est stable de 1 h à 2 d, puis diminue jusqu'à 14 d (tableau 5.14). Les pertes de N-NO₃ sont plus importantes dans l'EC «biodynamique 3 mois» comparativement à l'EC «biodynamique 24 mois». D'autre part, il y a une diminution de la quantité de N-NO₃ dans l'EC du «Fumier de vers» de 1 h à 14 d, alors qu'en moyenne les autres composts présentent le même patron d'évolution des nitrates que l'EC «biodynamique 3 mois». Un EC fabriqué à partir d'un compost ayant encore une bonne activité microbienne minéralise le N-NO₃, alors que ce n'est pas le cas pour un EC fabriqué à partir d'un compost plus mature.

Le phosphate, s'il est libre de liens avec d'autres matières minérales ou organiques, peut être soluble dans l'eau. À cet égard, les composts diffèrent entre eux. Ainsi, les teneurs sont plus élevées dans l'EC «biodynamique 3 mois» comparativement à l'EC «biodynamique 24 mois» (tableau 5.15). Cependant, l'interaction «compost * temps» est significative (tableau 5.13) et plus particulièrement pour certains EC. Ainsi, les contrastes d'interaction «Tourbe et Crevette vs composts biodynamiques * temps » et «Fumier de vers vs autres composts * temps» sont significatifs. Le profil d'augmentation des teneurs en P-PO₄ est plus élevé dans l'EC de «Tourbe et Crevette» que dans les autres EC explique ces contrastes d'interaction. Par exemple, la quantité de P-PO₄ de l'EC «Tourbe et Crevette» augmente de 0 à 14 d passant, en moyenne, de 12,8 à 30,9 mg P-PO₄/L (figure 5.6) tandis que la quantité de P-PO₄ des EC «composts biodynamiques» augmente légèrement de 0 à 14 d passant de 2,5 à 8,9 mg P-PO₄/L (figure 5.6). Les différences des quantités de P-PO₄ dans les composts initiaux (tableau 5.3), l'activité microbienne du compost «Tourbe et Crevette» et son pH devenant plus alcalin entre 0 et 14 d (de 7,0 à 7,6 comparativement à, de 7,1 à 7,5 pour les composts biodynamiques) expliqueraient que le P-PO₄ continue de s'accumuler plus rapidement dans cet EC. De même, le profil d'augmentation des teneurs en P-PO₄ est peu élevé dans l'EC du «Fumier de vers» et diffère du profil d'augmentation moyen des autres EC. Les teneurs en P-PO₄ mesurées dans les EC sont du même ordre de grandeur que celles rapportées par Orozco et coll. (1996).

L'aération affecte la quantité de P-PO₄ retrouvée dans les EC dans le temps (tableau 5.13). La quantité de P-PO₄ solubilisé dans les EC évolue de façon quadratique dans le temps. Le P-PO₄ se solubilise en majorité en moins de 2 d, mais des quantités supplémentaires peuvent s'ajouter jusqu'à 14 d. Dans l'eau, la variation de la quantité de P-PO₄ dans les EC peut être attribuable à deux phénomènes : 1) la minéralisation du P de la matière organique, 2) les variations de la solubilité de cet élément en fonction du pH de l'EC.

Tableau 5.15 : Moyenne ± écart type de la quantité de P-PO₄ (mg P-PO₄/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	14,5 ± 2,6	4,3 ± 1,0	3,8 ± 0,5	2,0 ± 0,0	6,1
2	+	25,3 ± 6,1	6,0 ± 0,8	8,8 ± 1,3	4,8 ± 0,5	11,2
7	+	27,8 ± 5,6	6,3 ± 0,5	9,0 ± 2,2	5,3 ± 0,5	12,1
14	+	30,5 ± 6,5	7,0 ± 0,0	10,0 ± 1,4	6,8 ± 2,4	13,6
Moyenne aération :		24,5	5,9	7,9	4,7	10,7
0	-	11,0 ± 2,9	3,8 ± 1,0	3,8 ± 1,0	0,5 ± 0,6	4,8
2	-	25,8 ± 6,1	5,8 ± 1,0	8,5 ± 1,7	3,3 ± 0,5	10,8
7	-	31,0 ± 6,7	6,0 ± 1,6	11,0 ± 1,6	5,0 ± 0,8	13,3
14	-	31,3 ± 9,7	4,5 ± 2,1	13,3 ± 1,7	5,5 ± 0,6	13,6
Moyenne aération :		24,8	5,0	9,1	3,6	10,6
Moyenne compost :		24,6	5,4	8,5	4,1	

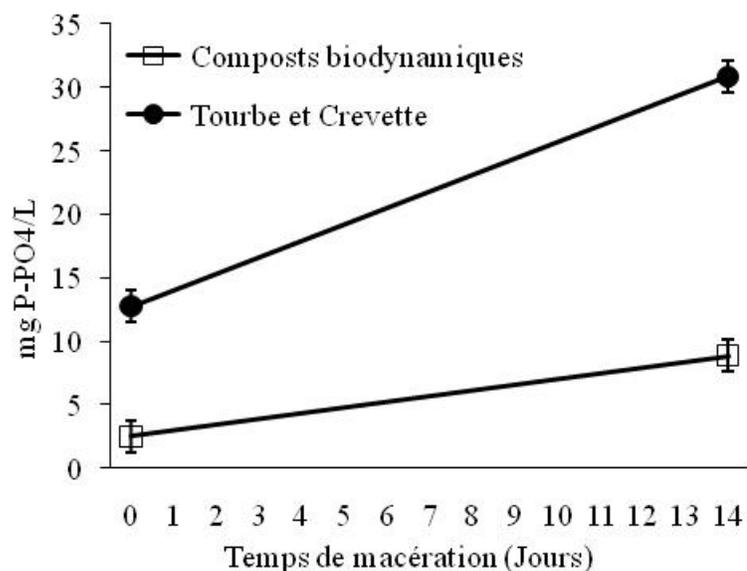


Figure 5.6 : Effet du temps de macération sur la quantité de P-PO₄ des EC «composts biodynamiques» et «Tourbe et Crevette». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 8).

Le sulfate peut aussi se solubiliser dans l'eau, et encore une fois, les composts diffèrent entre eux. Ainsi, les teneurs en S-SO₄ sont plus élevées dans l'EC «Tourbe et Crevette» comparativement aux l'EC «biodynamiques» (tableau 5.16). Cependant, l'interaction «compost * temps» est significative, et plus particulièrement pour certains EC. Ainsi, les contrastes d'interaction «compost biodynamique 24 mois vs 3 mois * temps» et «vers vs autres composts * temps » sont significatifs. Dans ces cas particuliers, le profil d'augmentation et de diminution des teneurs en S-SO₄ dans un EC diffère du profil d'augmentation et de diminution des teneurs en S-SO₄ dans l'autre (compost biodynamique 24 mois vs 3 mois) ou des autres EC (vers vs autres composts). Ainsi, le profil des teneurs en S-SO₄ est peu élevé dans l'EC «biodynamique 3 mois» et diffère du profil des teneurs en S-SO₄ de l'EC «biodynamique 24 mois». Dans ce dernier extrait, les teneurs en S-SO₄ sont environ 4 fois plus élevées que dans l'EC «biodynamique 3 mois». De même, l'EC du «Fumier de vers» est riche en S-SO₄, mais ces teneurs diminuent légèrement de 1 h à 14 d, alors que pour la moyenne des autres EC ces teneurs augmentent légèrement. Ces différences sont expliquées par l'origine des intrants et par le procédé de compostage. Hall et coll. (2006) rapportent des valeurs de S dans leurs EC 2 à 3 fois inférieures à celles

rapportées au tableau 5.16. Par contre, leurs composts contiennent aussi moins de S (Hall et coll., 2006).

De plus, l'aération influence significativement les teneurs en S-SO₄ des EC. Généralement, l'absence d'aération diminue les teneurs en S-SO₄ des EC, et ce, surtout dans le «Fumier de vers». Le S peut aussi être perdu par volatilisation sous forme de composés soufrés qui sont responsables d'une partie des odeurs (Thompson et coll. 2002). Ces pertes, s'il y en a eu, se seraient produites que dans l'EC de «Fumier de vers» non aéré (tableau 5.16).

Tableau 5.16 : Moyenne ± écart type de la quantité de S-SO₄ (mg S-SO₄/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	31,6 ± 4,2	69,6 ± 15,1	1,5 ± 0,6	6,1 ± 0,8	27,2
2	+	36,8 ± 7,6	71,6 ± 19,8	2,8 ± 0,5	6,9 ± 0,5	29,5
7	+	38,2 ± 5,6	72,4 ± 21,0	2,5 ± 0,6	7,8 ± 2,2	30,2
14	+	39,2 ± 6,2	73,3 ± 20,8	3,2 ± 1,0	7,2 ± 0,0	30,7
Moyenne aération :		36,5	71,7	2,5	7,0	29,4
0	-	29,8 ± 12,8	95,3 ± 24,7	1,2 ± 0,5	8,1 ± 1,4	33,6
2	-	44,5 ± 5,1	89,0 ± 24,6	2,8 ± 0,5	9,0 ± 1,0	36,3
7	-	40,8 ± 3,7	72,1 ± 21,6	2,5 ± 0,6	7,7 ± 0,6	30,8
14	-	38,4 ± 4,8	67,6 ± 20,5	3,2 ± 1,0	7,4 ± 1,0	29,1
Moyenne aération :		38,4	81,0	2,4	8,1	32,5
Moyenne compost :		37,4	76,4	2,5	7,5	

Le chlore se solubilise facilement dans l'eau, et les teneurs en chlore des EC diffèrent entre eux. Par contre, l'interaction «compost * temps» explique certains cas particuliers (tableau 5.17). Ainsi, les teneurs en chlore dans l'EC «biodynamique 3 mois» augmentent de façon importante de 1 h à 2 d, mais cette augmentation est très faible par la suite, ce qui diffère du

profil des teneurs en chlore dans l'EC «biodynamique 24 mois» lequel indique une diminution de 1h à 14 d (tableau 5.17). De plus, le profil des teneurs en chlore dans l'EC «Tourbe et Crevette» augmente de façon importante de 1 h à 14 d, alors que celui de l'EC des composts biodynamiques augmente très faiblement. À l'opposé, le profil des teneurs en chlore dans l'EC «Fumier de vers» diminue de 1 h à 14 d, alors que celui des autres EC augmente.

Ces teneurs en chlore sont similaires à celles rapportées par Michel et Reddy (1998). Les quantités de Cl élevées retrouvées dans les EC «Tourbe et Crevette» et «Fumier de vers» viennent probablement des intrants et la technologie de compostage utilisée. Le facteur «temps» n'est pas significatif puisque le Cl est très soluble. Notons que selon la durée du temps de macération et le type de compost utilisé, le chlore a pu se volatiliser ou non. La présence de sodium dans la solution pourrait expliquer que le chlore était précipité sous forme de sel et non volatile dans ce cas.

Tableau 5.17 : Moyenne \pm écart type de la quantité de Cl (mg Cl/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	97,3 \pm 9,7	64,5 \pm 5,5	15,3 \pm 1,0	21,5 \pm 6,4	49,6
2	+	102,5 \pm 8,6	62,0 \pm 7,9	21,5 \pm 0,6	16,5 \pm 1,3	50,6
7	+	100,8 \pm 10,7	61,3 \pm 7,3	21,5 \pm 0,6	16,8 \pm 1,7	50,1
14	+	102,3 \pm 9,3	62,8 \pm 8,2	21,3 \pm 0,5	17,0 \pm 0,8	50,8
Moyenne aération :		100,7	62,6	19,9	17,9	50,3
0	-	88,5 \pm 28,4	93,8 \pm 17,1	12,8 \pm 2,1	20,0 \pm 3,6	53,8
2	-	116,0 \pm 16,5	67,0 \pm 7,9	22,8 \pm 1,5	21,3 \pm 2,1	56,8
7	-	109,8 \pm 17,6	59,5 \pm 6,9	24,0 \pm 1,4	17,8 \pm 0,5	52,8
14	-	106,5 \pm 14,3	58,3 \pm 6,8	24,3 \pm 1,0	17,0 \pm 1,2	51,5
Moyenne aération :		105,2	69,6	20,9	19,0	53,7
Moyenne compost :		102,9	66,1	20,4	18,5	

5.2.1.1.4 Cations

Les ANOVAs des teneurs en K, de Ca, de Mg et de Na des EC indiquent que le facteur «compost» représente respectivement 72, 87, 48 et 95 % de la variation totale (tableau 5.18). Alors que le facteur «temps» a influencé considérablement la teneur en K dans les EC avec 9 % de la variation totale.

Dans tous les cas, les effets des facteurs principaux «aération», «compost» et «temps» sont significatifs. Les interactions «compost*temps» et «aération*compost*temps» sont significatives pour toutes ces variables.

Une brève description des résultats des teneurs en K, de Ca, de Mg et de Na des EC montre les moyennes globales des effets principaux de l'aération, du compost et du temps (tableaux 5.19 à 5.22). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre les trois facteurs

sont aussi présentées dans ces tableaux. De plus pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures illustrent les interactions significatives.

Tableau 5.18: Résumé de l'analyse de variance de la quantité de K, Ca, Mg et Na dans les EC en fonction de la présence ou de l'absence d'aération, du compost et du temps de macération.

Sources de variation	Degrés de liberté	Moyennes des carrés			
		K	Ca	Mg	Na
Bloc	3	991,0 ns	39,93 ns	15,54 ns	0,111 ns
Aération (A)	1	4356,1 *	886,80 ***	170,33 **	0,138 ns
Erreur a)	3	740,2	10,83	5,24 ns	0,034
Compost (C)	3	147427,9 ***	27868,22 ***	379,64 ***	65,486 ***
Bma ¹ vs Bim ²	1	3769,7 *	91,84 ns	86,65 ***	13,332 ***
Fcre ³ vs Bma + Bim	1	277876,7 ***	1933,12 ***	100,40 ***	121,575 ***
Vers ⁴ vs autres ⁵	1	160637,2 ***	81579,70 ***	951,86 ***	61,552 ***
A * C	3	534,9 ns	147,19 ***	11,29 ns	0,025 ns
Erreur b)	18	1089,6	96,47	7,91	0,023
Temps (T)	3	17945,9 ***	114,88 **	48,07 ***	0,610 ***
temps linéaire (tlin)	1	19984,1 ***	46,04 ns	17,03 **	0,688 ***
temps quadratique (tquad)	1	11762,8 ***	137,45 *	30,42 ***	0,555 ***
temps cubique (tcub)	1	27469,5 ***	192,38 **	108,13 ***	0,778 ***
A * T	3	914,4 **	95,27 *	0,83 ns	0,035 **
C * T	9	3994,4 ***	152,98 ***	31,74 ***	0,271 ***
Bma vs Bim * tlin	1	2779,0 ***	32,5 ns	20,46 **	0,400 ***
Fcre vs Bma + bim * tlin	1	2862,7 ***	20,7 ns	0,00 ns	0,009 ns
Bma vs Bim * tquad	1	1293,8 **	24,8 ns	9,12 *	0,254 ***
Fcre vs Bma + Bim * tquad	1	1628,1 **	16,7 ns	2,58 ns	0,004 ns
Vers vs autres * tquad	1	4451,1 ***	34,0 ns	12,08 **	0,258 ***
Bma vs Bim * tcub	1	3834,2 ***	153,2 *	77,76 ***	0,619 ***
Vers vs autres * tcub	1	11864,1 ***	891,1 ***	124,47 ***	0,659 ***
A * C * T	9	575,9 **	162,58 ***	10,43 ***	0,047 ***
A *(Vers vs autres)*tlin	1	692,1 ns	378,30 ***	13,85 **	0,050 **
A *(Fcre vs Bma+Bim)*tquad	1	759,3 *	19,37 ns	6,94 ns	0,008 ns
A *(Bma vs Bim)*tcub	1	921,7 *	103,20 ns	31,34 ***	0,187 ***
A *(Vers vs autres)*tcub	1	1418,3 **	971,66 ***	37,88 ***	0,142 ***
Erreur c)	72	270,0	40,38	2,96	0,009
Coefficient de variation (%)		9,16	18,96	15,81	3,68

¹ = biodynamique 24 mois; ² = biodynamique 3 mois; ³ = Tourbe et Crevette; ⁴ = Fumier de vers; ⁵ = biodynamique 3 mois + biodynamique 24 mois + Tourbe et Crevette

*, **, *** = significatif à $P \leq 0,1, 0,05$ et $0,01$; ns = non-significatif

Le potassium se solubilise facilement dans l'eau, et les teneurs en K des EC diffèrent entre elles dans le temps, et en fonction de la présence ou non d'aération. Par contre, certaines interactions «aération * compost * temps» expliquent des cas particuliers (tableaux 5.18 et 5.20). Ainsi, les teneurs en K de l'EC «biodynamique 3 mois» augmentent de façon importante de 1 h à 2 d, puis plus légèrement par la suite, ce qui diffère du profil des teneurs en K de l'EC «biodynamique 24 mois» qui lui indique une augmentation de 1h à 14 d (tableau 5.19). Dans ces deux cas, l'absence d'aération permet d'obtenir des teneurs plus élevées en K. D'autre part, le profil des teneurs en K de l'EC «Tourbe et Crevette» augmente de façon importante de 1 h à 14 d, alors que celui de l'EC des composts biodynamiques augmente plus faiblement. Encore une fois, l'absence d'aération permet d'obtenir des teneurs plus élevées en K. Finalement, le profil des teneurs en K de l'EC «Fumier de vers» varie peu de 1 h à 14 d, alors que celui des autres EC augmente. Dans le cas de l'EC «Fumier de vers», l'aération a peu d'effet sur les teneurs en K, alors, qu'en moyenne, les teneurs en K des autres EC augmentent plus en absence d'aération qu'en sa présence.

Les composts contenant le plus de K (tableau 5.3) ont donné des EC en contenant plus (tableau 5.19). Le K prend 2 d à se solubiliser et une fois en solution, il ne semble pas y avoir de perte (figure 5.7). Elad et Shtienberg (1994) rapportent des valeurs de K dans des EC du même ordre de grandeur que celles présentées au tableau 5.19. La matière très fine du lombricompost «Fumier de vers» et la disponibilité élevée des éléments minéraux dans les lombricomposts expliquent la solubilisation rapide du K dès 1 h.

Tableau 5.19 : Moyenne \pm écart type de la quantité de K (mg K/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	203,0 \pm 15,7	113,7 \pm 6,1	99,7 \pm 4,1	139,7 \pm 0,6	139,0
2	+	274,1 \pm 40,9	113,0 \pm 8,5	160,8 \pm 8,0	161,0 \pm 6,4	177,2
7	+	288,0 \pm 42,0	113,3 \pm 9,1	168,1 \pm 6,3	167,4 \pm 6,6	184,2
14	+	288,1 \pm 32,0	114,3 \pm 9,5	169,5 \pm 5,8	172,2 \pm 5,6	186,0
Moyenne aération :		263,3	113,5	149,5	160,0	171,6
0	-	190,9 \pm 77,9	126,9 \pm 16,9	82,5 \pm 12,3	153,6 \pm 25,4	138,5
2	-	309,3 \pm 18,9	119,1 \pm 7,3	162,0 \pm 10,3	183,2 \pm 8,2	193,4
7	-	324,2 \pm 21,1	114,5 \pm 13,3	183,9 \pm 9,5	184,4 \pm 15,0	201,7
14	-	330,5 \pm 11,5	112,2 \pm 8,1	192,7 \pm 10,7	186,3 \pm 10,3	205,4
Moyenne aération :		288,7	118,2	155,3	176,8	184,7
Moyenne compost :		276,0	115,8	152,4	168,4	

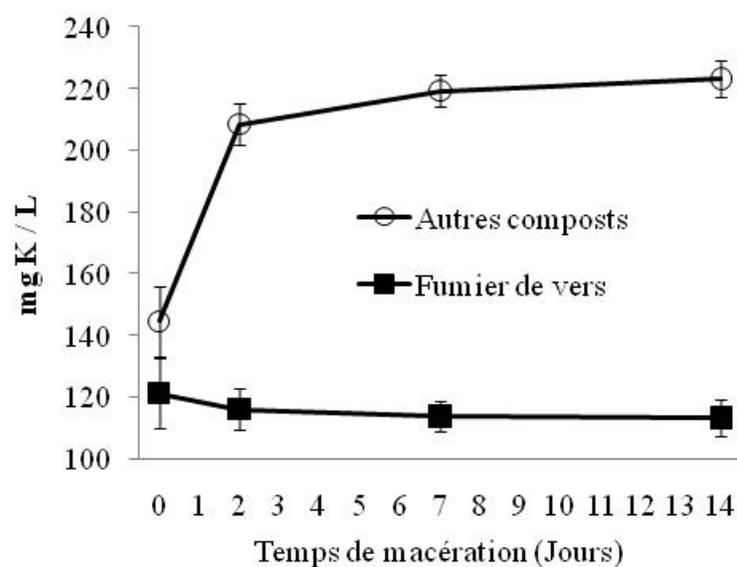


Figure 5.7 : Effet du temps de macération sur la quantité de K des EC «autres composts» et «Fumier de vers». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 8).

Le calcium peut se solubiliser dans l'eau, et les teneurs en Ca des EC diffèrent pour certains composts (Fcre vs Bma + Bim; tableau 5.20), ou dans le temps (Bma vs Bim * temps; tableau 5.20), et même parfois en fonction de la présence ou non d'aération (A*(vers vs autres)*temps; tableau 5.20). Ainsi, les teneurs en Ca de l'EC «Fumier de vers» sont plus élevées que celles des EC «biodynamiques». De plus, les teneurs en Ca de l'EC aéré et non aéré «biodynamique 3 mois» augmentent de 1 h à 14 d, alors que les teneurs en Ca des EC aérés et non aérés «biodynamique 24 mois» augmentent et diminuent au cours de 14 jours (tableau 5.20). Finalement, le profil des teneurs en Ca de l'EC aéré «Fumier de vers» augmente de 1 h à 14 d, mais diminue dans l'EC non aéré. Cette diminution du Ca est possiblement associée à une précipitation sous forme de CaCO_3 . Au contraire, le profil des teneurs en Ca des autres EC aérés et non aérés augmente légèrement de 1 h à 14 d. Hall et coll. (2006) rapportent des valeurs de Ca dans leurs EC semblables à celles de cette étude. La forte quantité de Ca de l'EC fabriqué à partir du «Fumier de vers» s'explique par la plus grande capacité de recyclage du Ca par les vers du lombricompost (Edwards et Bohlen, 1996) et par la solubilité des éléments minéraux dans les lombricomposts.

L'effet de l'aération dans le temps influence significativement les teneurs en Ca des EC. Ainsi, les teneurs en Ca augmentent avec la durée de la macération, et de manière plus importante pour les EC non aérés (tableau 5.20). L'agitation créée par l'aération a fait en sorte qu'une plus grande quantité de Ca est passée du compost à l'EC.

Tableau 5.20 : Moyenne \pm écart type de la quantité de Ca (mg Ca/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	16,4 \pm 7,4	68,0 \pm 7,6	8,0 \pm 1,7	8,6 \pm 0,9	25,2
2	+	22,9 \pm 1,9	73,1 \pm 10,7	15,9 \pm 4,8	10,8 \pm 0,7	30,7
7	+	24,7 \pm 5,8	74,1 \pm 11,8	16,4 \pm 3,4	13,0 \pm 1,1	32,1
14	+	25,0 \pm 5,2	76,0 \pm 11,6	19,7 \pm 3,2	15,8 \pm 1,2	34,1
Moyenne aération :		22,2	72,8	15,0	12,0	30,5
0	-		101,0 \pm			
		19,1 \pm 12,4	15,9	6,9 \pm 0,6	14,3 \pm 1,4	35,3
2	-	30,5 \pm 4,3	88,1 \pm 11,8	15,6 \pm 3,6	16,0 \pm 1,3	37,5
7	-	29,1 \pm 7,5	74,9 \pm 11,4	20,7 \pm 1,1	15,7 \pm 1,6	35,1
14	-	29,5 \pm 5,8	72,5 \pm 12,5	25,8 \pm 2,4	16,3 \pm 1,6	36,0
Moyenne aération :		27,0	84,1	17,2	15,6	36,0
Moyenne compost :		24,6	78,5	16,1	13,8	

Le magnésium se solubilise un peu dans l'eau, et les teneurs en Mg des EC diffèrent entre elles (Fcre vs Bma + Bim; tableau 5.18), et en fonction de la présence ou non d'aération dans le temps («A* Bma vs Bim*temps» et «A*Vers vs autres*temps»; tableau 5.18). Ainsi, les teneurs en Mg de l'EC «Tourbe et Crevette» sont plus élevées que les EC des composts biodynamiques (tableau 5.21). De plus, le profil des teneurs en Mg de l'EC «biodynamique 3 mois» aéré augmente de façon importante de 1 h à 2 d, puis plus légèrement par la suite, ce qui diffère du profil des teneurs en Mg de l'EC «biodynamique 24 mois» aéré lesquelles augmentent légèrement de 1h à 14 d. Dans ces deux cas, l'absence d'aération permet d'obtenir des teneurs plus élevées en Mg. Une partie de cette différence s'explique par l'âge de ces deux composts. En effet, le compost «biodynamique 3 mois» ayant une biomasse et une activité microbienne plus élevées continue de libérer du Mg tout au long de la période de macération. Le compost «biodynamique 24 mois» étant plus âgé

ne peut minéraliser autant de Mg. Finalement, le profil des teneurs en Mg de l'EC «Fumier de vers» aéré varie peu de 1 h à 14 d, alors que celui des autres EC augmente. Dans le cas de l'EC «Fumier de vers» non aéré, il y a une diminution des teneurs en Mg, alors, qu'en moyenne, les teneurs en Mg des autres EC non aérés augmentent. Il est possible d'avancer l'hypothèse selon laquelle le Mg en solution précipite sous forme de $MgSO_4$. L'activité microbienne faible du compost «Fumier de vers» fait aussi en sorte que peu de Mg peut être minéralisé. La minéralisation du Mg du compost «Fumier de vers» dans l'EC ne parviendrait pas à compenser la précipitation du $MgSO_4$ dans l'EC. Les teneurs en Mg rapportées dans la présente étude sont similaires à celles obtenues par Hall et coll. (2006). La teneur en Mg des composts ne se reflète pas nécessairement dans les EC, sans doute une question de matériaux initiaux et de technologie de compostage, mais surtout de solubilisation et de précipitation du Mg dans l'eau.

Tableau 5.21: Moyenne \pm écart type de la quantité de Mg (mg Mg/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	7,0 \pm 3,7	13,3 \pm 0,6	4,4 \pm 0,7	4,5 \pm 0,3	7,3
2	+	9,5 \pm 1,6	13,9 \pm 0,9	9,6 \pm 2,5	5,5 \pm 0,3	9,6
7	+	9,7 \pm 3,8	13,9 \pm 1,1	10,6 \pm 1,8	6,6 \pm 0,2	10,2
14	+	10,2 \pm 2,9	14,1 \pm 1,0	11,9 \pm 2,6	7,8 \pm 0,3	11,0
Moyenne aération :		9,1	13,8	9,1	6,1	9,5
0	-	8,4 \pm 5,6	20,9 \pm 1,9	3,9 \pm 0,9	8,1 \pm 1,1	10,3
2	-	13,8 \pm 1,6	18,3 \pm 0,8	8,7 \pm 1,2	8,5 \pm 0,5	12,3
7	-	12,7 \pm 4,4	15,5 \pm 1,1	12,1 \pm 0,9	8,2 \pm 0,9	12,1
14	-	13,3 \pm 3,7	15,5 \pm 0,9	15,6 \pm 0,8	9,0 \pm 0,6	13,3
Moyenne aération :		12,0	17,5	10,1	8,4	12,0
Moyenne compost :		10,6	15,7	9,6	7,3	

Le sodium se solubilise facilement dans l'eau, et les teneurs en Na des EC diffèrent entre elles (Fcre vs Bma + Bim; tableau 5.18), dans le temps et en fonction de la présence ou non d'aération ((A* Bma vs Bim)*temps et A*(vers vs autres)*temps; tableau 5.18). Ainsi, les teneurs en Na de l'EC «Tourbe et Crevette» sont plus élevées que celles des EC des composts biodynamiques (tableau 5.22). Aussi, le profil des teneurs en Na de l'EC aéré «biodynamique 3 mois» augmente légèrement de 1 h à 14 d, mais il augmente de 1 h à 2 d, puis diminue par la suite pour cet extrait non aéré. Par contre, le profil des teneurs en Na de l'EC «biodynamique 24 mois» augmente de 1 h à 2 d, puis diminue par la suite pour les extraits aérés et non aérés.

D'autre part, le profil des teneurs en Na de l'EC aéré et non aéré «Fumier de vers» diminue de 1 h à 14 d, alors que le profil des teneurs en Na des autres EC aéré et non aéré augmente. Ici, il est aussi possible d'avancer l'hypothèse que le Na en solution précipite sous forme de NaCl. Les EC contenant le plus de Na sont ceux fabriqués à partir des composts qui en contenaient le plus (tableau 5.22). Hall et coll. (2006) rapportent entre 137,06 et 225,10 mg Na/L dans leurs EC, ce qui est environ trois fois plus que les teneurs observées dans la présente étude. Ceci s'explique par des teneurs en Na dans leurs composts, légèrement supérieures aux nôtres et par un ratio compost : eau plus faible que 1 : 5 (volume : volume).

Tableau 5.22 : Moyenne \pm écart type de la quantité de Na (mg Na/L) des EC fabriqués à partir des composts «Tourbe et Crevette, Fumier de vers, biodynamique 3 et 24 mois» en fonction de l'aération et du temps de macération.

Temps	Aération	Composts				Moyenne temps
		Tourbe et Crevette	Fumier de vers	Biodynamique 3 mois	Biodynamique 24 mois	
0	+	40,1 \pm 7,5	47,9 \pm 0,4	5,5 \pm 0,2	1,7 \pm 0,1	23,8
2	+	48,5 \pm 6,3	46,0 \pm 3,0	6,2 \pm 0,3	2,9 \pm 0,3	25,9
7	+	49,0 \pm 5,9	46,1 \pm 3,1	6,4 \pm 0,3	3,1 \pm 0,3	26,1
14	+	49,1 \pm 6,1	46,7 \pm 3,4	6,7 \pm 0,3	3,1 \pm 0,1	26,4
Moyenne aération :		46,7	46,7	6,2	2,7	25,6
0	-	33,3 \pm 12,8	59,3 \pm 8,5	6,5 \pm 0,7	1,2 \pm 1,1	25,1
2	-	56,5 \pm 7,8	52,9 \pm 2,6	7,6 \pm 0,3	2,9 \pm 0,4	30,0
7	-	57,3 \pm 8,2	47,4 \pm 5,2	7,3 \pm 0,4	3,4 \pm 0,6	28,8
14	-	57,8 \pm 9,4	45,3 \pm 4,0	7,1 \pm 1,1	3,8 \pm 0,4	28,5
Moyenne aération :		51,2	51,2	7,1	2,8	28,1
Moyenne compost :		49,0	48,9	6,7	2,8	

5.2.2 Les extraits de compost comparés aux composts de départ

5.2.2.1 Paramètres physicochimiques

5.2.2.1.1 Teneur en matière sèche et en cendres

L'analyse de régression montre qu'il n'existe aucune relation entre la quantité de matière sèche des composts et la quantité de matière sèche de leurs EC ($P > F = 0,4003$). Il n'existe aucune relation entre la quantité de cendres des composts et la quantité de cendres de leurs EC ($P > F = 0,7133$). Il est donc impossible de prédire la quantité de matière sèche et de cendres dans l'EC en fonction de la quantité de matière sèche et de cendres du compost.

5.2.2.1.2 pH et conductivité électrique

La régression entre le pH du compost et celui de leur EC a été significative pour les temps «1 h, 2 et 7 d» (figure 5.8). La validité des équations reliant le pH des composts à celui des EC est faible compte tenu des coefficients de régression faibles. Le coefficient de régression diminue plus le temps de macération avance. Il est donc difficile de prédire le

pH des EC aux temps «1 h, 2 et 7 d» et impossible au temps «14 d». Il est plutôt surprenant de ne pas pouvoir prédire avec plus de précision le pH d'un EC 1 h ou 2 d à partir du pH du compost puisque ce dernier est mesuré dans un extrait à l'eau qui est semblable à un EC.

La régression entre la CÉ du compost et celle de leur EC a été significative pour tous les temps (figure 5.8). Le seuil de signification atteint un maximum à «2 d» pour ensuite diminuer à «7 et 14 d». La validité des équations reliant la CÉ des composts à celle des EC dépend du temps de macération. En effet, le coefficient de régression subit une augmentation de «1 h à 2 d» pour ensuite diminuer à «7 et 14 d». Dans ces conditions, il est possible de prédire la CÉ des EC à «1 h, 2, 7 et 14 d». Puisque la CÉ des composts est mesurée dans une extraction à l'eau de ce dernier, il est normal d'avoir des régressions significatives avec des R^2 élevés.

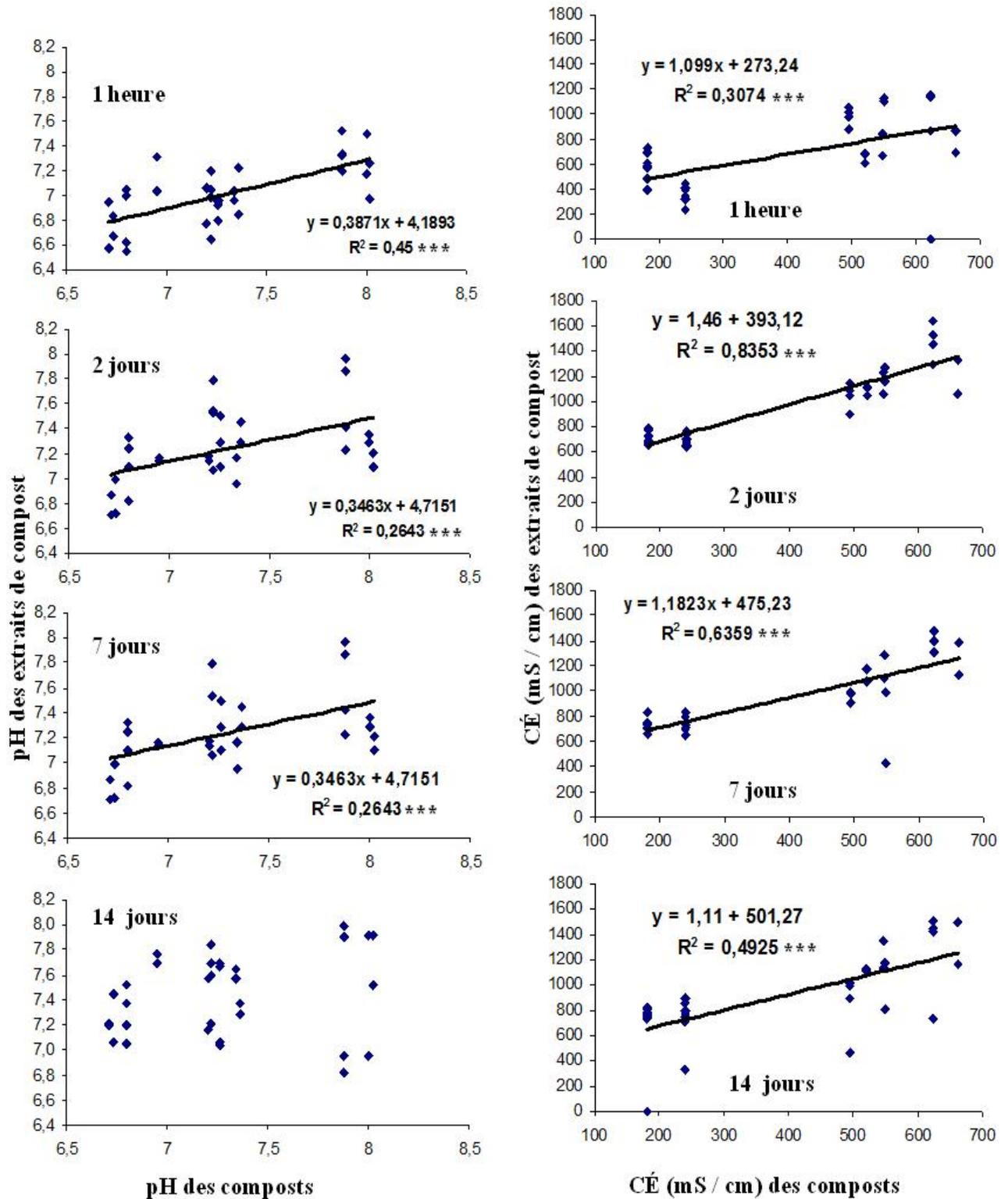


Figure 5.8 : Relation entre le pH et la CÉ du compost et celle de leur EC aux temps «1 h, 2, 7 et 14 d» (n = 32).

5.2.2.1.3 Anions

L'analyse de régression confirme qu'il n'y a pas de relation entre la teneur en N-NO₃ des composts et la teneur en N-NO₃ de leur EC. Il est donc impossible de prédire la teneur en N-NO₃ dans l'EC en fonction de la teneur en N du compost. La perte d'azote par dénitrification explique probablement cette absence de lien. Les régressions entre les teneurs en P et en S du compost et celles en P-PO₄ et en S-SO₄ des EC sont significatives à tous les temps (figure 5.9). Plus le compost initial contient de P et de S, plus son EC en contiendra aussi.

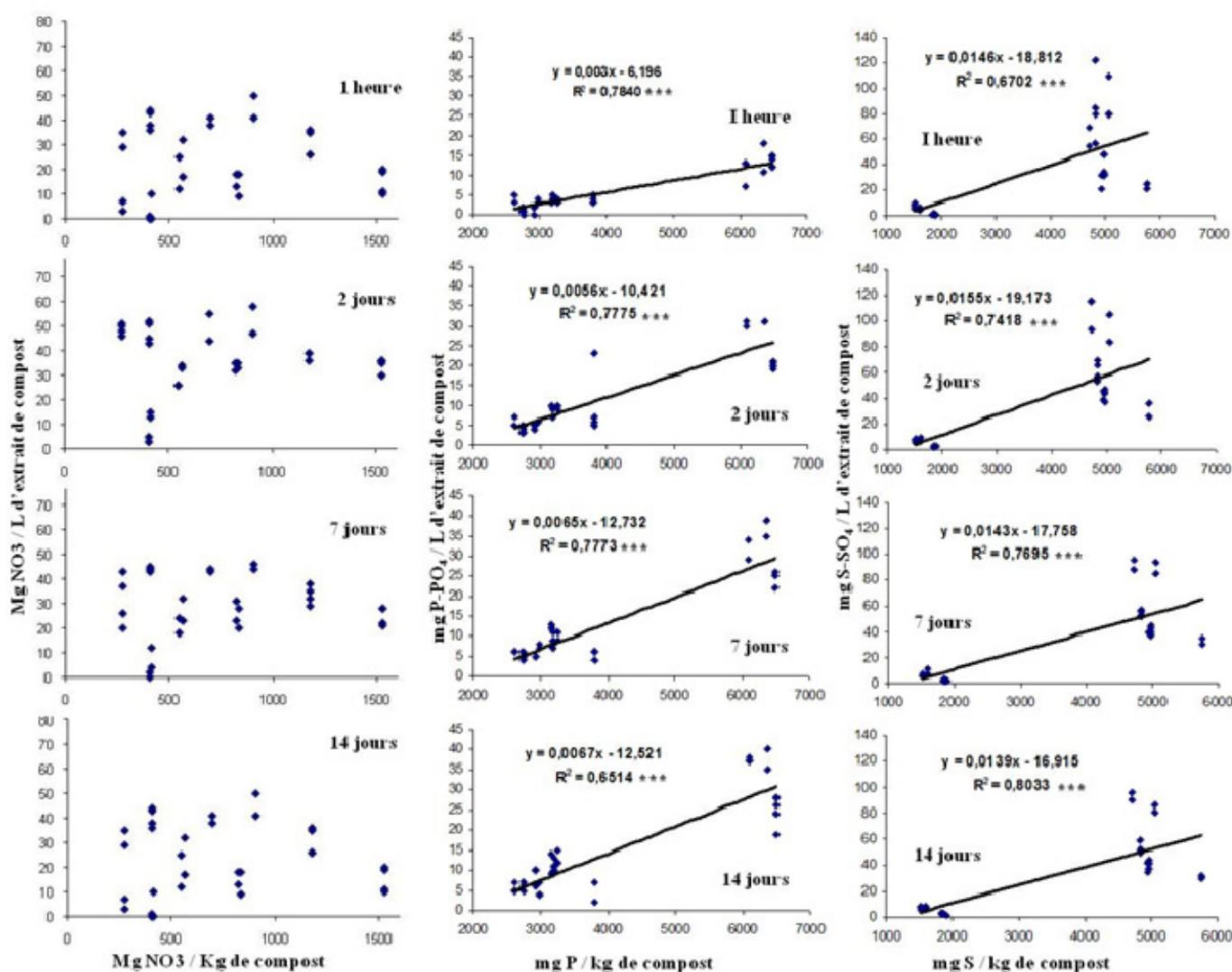


Figure 5.9 : Relation entre les quantités de NO₃, de P et de S du compost et celle de leur EC aux temps «1 h, 2, 7 et 14 j» (n = 32).

5.2.2.1.4 Cations

La régression entre les teneurs en K des composts et celles de leurs EC devient significative seulement à partir du temps «2 d» et demeure significative tout au long de la période de macération des EC (figure 5.10). Les régressions entre les teneurs en Ca et en Na des composts et celles de leurs EC ont été significatives dès 1 h et demeurent significatives tout au long de la période de macération des EC (figure 5.10). La régression entre les teneurs en Mg du compost et celles de leurs EC a été significative seulement pour les temps 1 h et 2 d (figure 5.10). La validité des équations reliant les teneurs en cations des composts à celles des EC est élevée pour le K, la Ca et le Na et faibles pour le Mg (figure 5.10). Plus le compost initial contient de K, de Ca et de Na, plus son EC en contiendra aussi. Par contre, il est difficile de prédire la quantité de Mg des EC à partir du compost de départ.

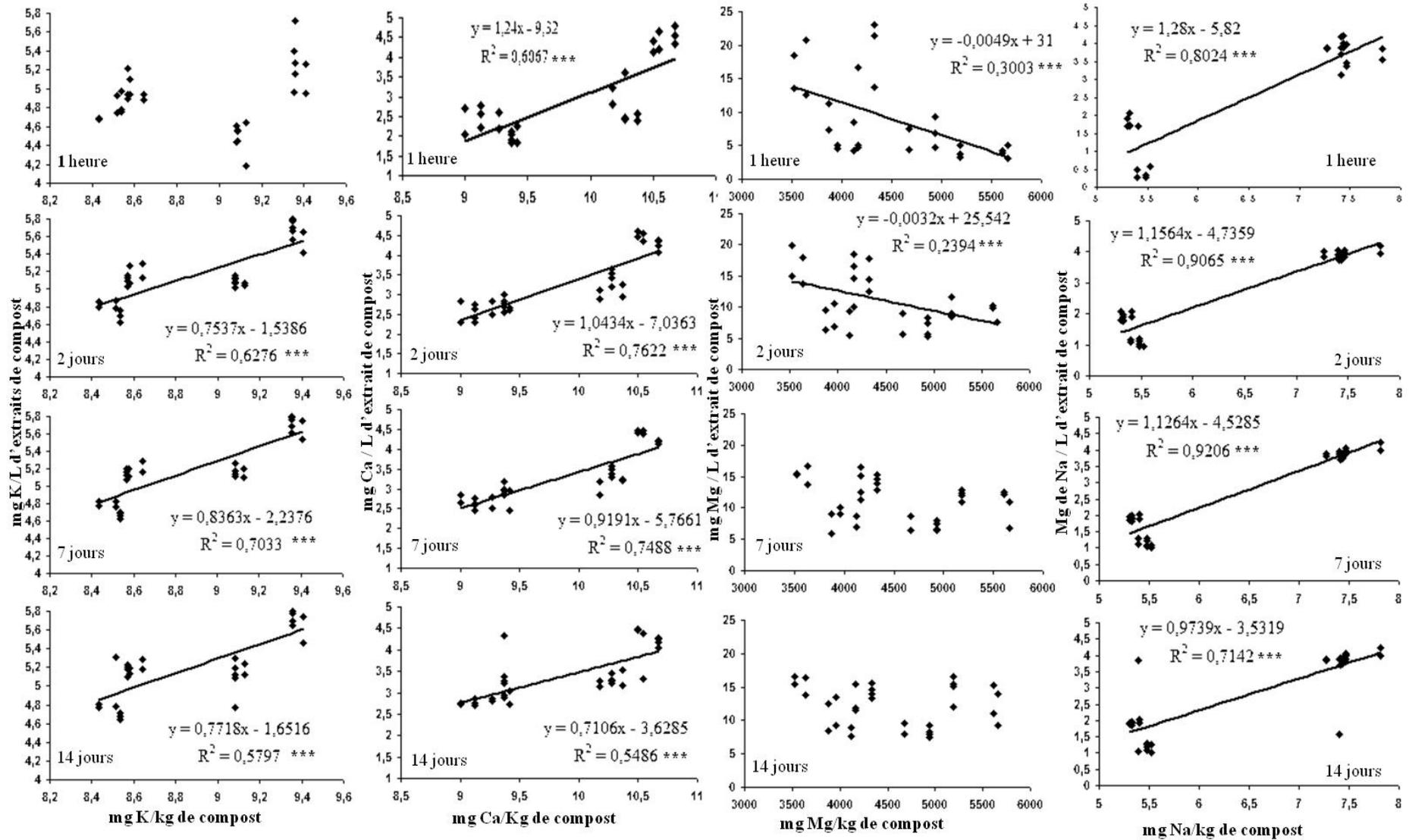


Figure 5.10 : Relation entre les quantités de K, Ca, Mg et Na du compost et de leur EC aux temps «1 h, 2, 7 et 14 j» (n = 32).

Conclusion volet 2

Ce deuxième volet a permis d'éclaircir l'effet de l'aération, du compost et du temps de macération sur les paramètres physico-chimiques des EC. Le facteur «aération» affecte certains paramètres des EC. L'aération devient importante principalement pour les EC fabriqués à partir de compost riche en azote et où la biomasse et l'activité microbienne sont élevées. Notons aussi une diminution plus importante du PR, du pH et du N-NO₃ des EC en absence d'aération. L'aération affecte la disponibilité des électrons, et par conséquent, certaines réactions qui ont lieu dans les EC, dont la perte en N-NO₃. Cependant, c'est le facteur «compost» qui a le plus d'influence sur la majorité des paramètres physicochimiques des EC. En effet, c'est le compost initial qui détermine le pH, la CÉ et la quantité de certains éléments minéraux des EC. Il est généralement possible de déterminer la quantité d'éléments minéraux des EC en fonction de la quantité d'éléments contenue dans les composts initiaux comme confirmé par les coefficients de régression élevés. Il est donc important de bien connaître les paramètres du compost initial quand vient le temps de produire un EC. Finalement, le facteur «temps de macération» affecte aussi les paramètres physicochimiques. Le temps permet l'évolution du pH, de la CÉ, du PR, du N-NO₃ et du P-PO₄. Certains EC deviennent moins acides avec le temps en raison des pertes de N. Plusieurs éléments minéraux se solubilisent en 2 d comme indiqué par la CÉ, qui est une mesure globale des sels en solution. La teneur en éléments solubles des EC évoluent dans le temps, où certains sels deviennent solubles en 2 d, mais peuvent aussi co-précipités par la suite. Ce serait le cas du CaCO₃, NaCl, MgSO₄, etc. Cette évolution expliquerait la disparition du lien entre la composition d'un compost et son extrait de compost dans le temps.

De plus, ce deuxième volet a permis de démontrer l'importance des composts de départ sur la solubilisation des composantes du compost de départ. Afin de favoriser la croissance des plantes, les EC doivent contenir de l'azote. Ainsi, il n'est pas souhaitable de faire macérer les composts plus de deux jours dans l'eau puisque l'absence d'aération favorise la perte d'azote par dénitrification. Les EC contiennent relativement peu d'éléments minéraux comparativement aux composts initiaux, et c'est aussi à deux jours qu'ils en contiennent le plus. À la lumière des résultats des analyses du volet 2, les EC les plus susceptibles de

favoriser la croissance des plantes sont ceux non aérés ayant macéré deux jours. Les EC ne présentent pas de caractéristiques les empêchant d'être appliqués sur le feuillage des plantes pour stimuler leur croissance. Cependant, les EC contiennent peu d'éléments minéraux fertilisants (0,002 – 0,005 % N, 0,0004 – 0,002 % P₂O₅, 0,01 – 0,03 % K₂O) comparativement à une solution nutritive conventionnelle (Hewitt, 1966) et ils doivent être enrichis en P et K pour mieux répondre aux besoins des plantes, dont le soya.

5.3 Volet 3 : Impact des EC sur la nutrition minérale, la nodulation et sur la biomasse du soya

5.3.1 Extraits de composts

5.3.1.1 Paramètres physicochimiques

Les caractéristiques chimiques des EC vaporisés sur le soya sont présentées au tableau 5.23. Comparativement aux EC du volet 2, les EC ont été enrichis par l'ajout d'acide phosphorique et l'apport de poudre d'algue riche en K (tableau 5.23). De légères différences sont notées dans la composition en éléments minéraux des EC enrichis comparativement à ceux du volet 2 (tableaux 5.14 à 5.17 inclusivement et 5.19 à 5.22 inclusivement). Elles pourraient être le résultat de l'acidification des extraits par l'acide phosphorique, causant une légère augmentation de l'extraction des éléments minéraux, ou encore du processus de minéralisation des composts entreposés à 4 °C depuis plusieurs mois. Les EC utilisés pour la vaporisation sur le soya n'ont pas causé d'effet phytotoxique d'après le test sur le cresson (tableau 5.23).

C'est une fois de plus l'EC «Tourbe et Crevette» qui contient le plus de P-PO₄ et de K. L'EC «Fumier de vers» contient le plus de Ca, de Mg et de Na tandis que les EC «biodynamiques 24 et 3 mois» contiennent le plus de N-NO₃ (tableau 5.23).

Tableau 5.23 : Caractérisation chimique et indice de germination des EC fortifiés appliqués sur le soya lors du bioessai.

	Extraits de compost fortifiés			
	Tourbe et Crevette	Fumier de vers	biodynamique 24 mois	biodynamique 3 mois
	$\bar{x} \pm \sigma_x$	$\bar{x} \pm \sigma_x$	$\bar{x} \pm \sigma_x$	$\bar{x} \pm \sigma_x$
pH	6,52 ± 0,01	6,51 ± 0,02	6,51 ± 0,01	6,49 ± 0,02
Éléments minéraux				
N-NO ₃ (mg / L)	3,5 c ± 0,58	36,25 b ± 4,86	56,5 a ± 4,65	57,25 a ± 5,06
P-PO ₄ (mg / L)	59,5 a ± 7,33	19,75 c ± 3,59	15,25 c ± 2,87	34,5 b ± 4,20
K (mg / L)	296,5 a ± 13,97	140,93 c ± 14,83	179,05 b ± 13,13	192,23 b ± 8,08
Ca (mg / L)	19,38 c ± 0,95	106,03 a ± 7,94	17,63 c ± 0,97	27,72 b ± 2,16
Mg (mg / L)	8,18 c ± 0,36	18,93 a ± 1,63	9,45 c ± 0,90	14,15 b ± 1,20
Na (mg / L)	49,4 b ± 2,02	60,78 a ± 5,91	8,75 c ± 0,24	5,53 c ± 0,53
S-SO ₄ (mg / L)	50,0 b ± 1,8	108,5 a ± 11,03	9,25 c ± 0,5	5,25 c ± 0,5
Cl (mg / L)	108,5 a ± 3,32	83,25 b ± 8,34	18,75 d ± 2,06	28,25 c ± 2,22
Indice de germination (%)	97,53 a	100,32 a	96,71 a	100,55 a

Les résultats d'une même rangée suivis de lettres différentes sont significativement différents selon un LSD ($\alpha = 0,05$)

5.3.2 Effets des EC appliqués sur le feuillage du soya : bioessai

Ce volet détermine si les applications d'EC sur le feuillage stimulaient la croissance du soya, la nodulation par *Bradyrhizobium* et l'absorption des éléments minéraux par le soya. La première étape dans toutes démarches statistiques consiste à évaluer la qualité des données. Il y a une très grande variabilité entre les blocs et l'observation des données permet d'identifier que c'est le quatrième bloc qui crée cette forte variabilité. Idéalement, il aurait fallu faire plus de blocs pour limiter cette variation ou éliminer ce bloc des analyses statistiques. De plus, le traitement non inoculé du soya a présenté des données aberrantes, car une nodulation fréquente et abondante du soya a été notée. Un traitement non inoculé devrait présenter quelques petites nodosités inefficaces sur les racines d'une plante sur 10 plantes (Danielle Prévost, communication personnelle). Ces données aberrantes ont pu masquer des effets. La nodulation trop abondante pourrait s'expliquer par une contamination croisée entre les traitements, la présence de *Bradyrhizobium* dans le compost ajouté au substrat sableux, une population de *Bradyrhizobium* importante dans la semence utilisée et non détruite par la stérilisation de surface de la semence, etc.

C'est seulement une fois que l'interprétation des données dans leur ensemble ait été complétée que l'idée d'éliminer certains contrastes sans valeur est survenue. Dans un objectif pédagogique de niveau maîtrise, aucune donnée n'a été éliminée pour compléter les analyses statistiques. Cependant, l'interprétation des résultats doit être considérée avec prudence, et le contraste «arrosage avec de l'eau du soya inoculé (oi)» versus «arrosage avec de l'eau du soya non inoculé (oNi)» est sans valeur. Des effets ont pu être masqués, mais ceux présents doivent être très importants pour réussir à se démarquer.

5.3.2.1 Paramètres physiologiques de croissance: hauteur, diamètre du collet et stades de développement

Les ANOVAs de la hauteur, du diamètre du collet et des stades de développement indiquent que le facteur «temps» représente respectivement 94, 54 et 96 % de la variation totale (tableau 5.24). Alors que les facteurs «vaporisation des EC» et «solution nutritive» représentent respectivement 0,8 et 0,2 % de la variation totale pour la hauteur, 5,0 et 1,5 % pour le diamètre du collet, et 0,28 et 0,05 % pour les stades de développement. Il faut aussi noter la très grande variabilité entre les blocs.

Dans tous les cas, les effets des facteurs principaux «vaporisation des EC», et «temps» sont significatifs. Les interactions «vaporisation des EC*solution nutritive» et «vaporisation des EC temps» sont significatives pour toutes ces variables. L'interaction «solution nutritive*temps» est significative pour les stades de développement. Pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures illustrent les interactions significatives.

Tableau 5.24 : Résumé de l'analyse de variance de la hauteur, du diamètre du collet et des stades de développement du soya en fonction de l'arrosage avec une solution nutritive, de la vaporisation avec des EC fortifiés et du temps.

Sources de variation	d.l.	Moyennes des carrés		
		Hauteur	Diamètre du collet	Stades de croissance
Bloc	3	0,099 ***	0,1252 ***	0,2347 ***
Solution nutritive (SN)	1	0,053 *	0,0697 *	0,0767 ns
Vap. ¹ EC fortifiés (VECF)	5	0,053 ***	0,0474 *	0,0867 **
oi ² vs oNi ³	1	0,151 ***	0,0268 ns	0,1848 **
oi vs Fcre ⁴	1	0,015 ns	0,0068 ns	0,0964 *
oi vs Vers ⁵	1	0,001 ns	0,0708 *	0,0002 ns
Fcre + Bma ⁶ vs Vers	1	0,000 ns	0,0932 **	0,0295 ns
Bim ⁷ vs Bma	1	0,002 ns	0,0001 ns	0,0131 ns
VECF * SN	5	0,030 *	0,0137 ns	0,0551 ns
oi vs oNi * SN	1	0,058 **	0,0035 ns	0,2412 ***
oi vs Fcre * SN	1	0,030 ns	0,0001 ns	0,0168 ns
oi vs Vers * SN	1	0,047 *	0,0194 ns	0,0538 ns
Fcre+Bma vs Vers * SN	1	0,017 ns	0,0134 ns	0,0159 ns
Bim vs Bma * SN	1	0,080 **	0,0242 ns	0,0073 ns
Erreur a)	33	0,013	0,0197	0,0310
Temps (T)	8	3,948 ***	0,3158 ***	18,4816 ***
Temps linéaire (tlin)	1	30,788 ***	2,4988 ***	146,0765 ***
Temps quadratique	1	0,766 ***	0,0242 ***	0,0467 **
SN * T	8	0,000 ns	0,0004 ns	0,0188 **
VECF * T	40	0,006 ***	0,0022 ns	0,0182 ***
oi vs oNi * tlin	1	0,125 ***	0,0242 ***	0,1011 ***
oi vs Vers * tlin	1	0,002 ns	0,0011 ns	0,0348 ns
Fcre + Bma vs Vers * tlin	1	0,002 ns	0,0017 ns	0,0610 **
SN * VECF * T	40	0,001 ns	0,0013 ns	0,0078 ns
Erreur b)	288	0,001	0,0022	0,0093
Coef. ⁸ de variation (%)		2,32	5,43	4,67

¹ = vaporisation; ² = eau inoculé; ³ = eau non-inoculé; ⁴ = Tourbe et Crevette;

⁵ = Fumier de vers; ⁶ = biodynamique 24 mois; ⁷ = biodynamique 3 mois; ⁸ = coefficient

*, **, *** = significatif à $P \leq 0,1, 0,05$ et $0,001$; ns = non-significatif

Les plantes ayant reçu la solution nutritive étaient plus hautes (47,42 cm) que celles ayant reçu de l'eau (45,38 cm). La présence d'éléments minéraux en abondance permet aux plantes de croître davantage en hauteur.

En général, les plantes vaporisées avec de l'eau et inoculées atteignaient des stades de développement plus avancée et des hauteur plus importantes (respectivement 50,63 cm et 4,67) que lorsque les plantes étaient vaporisées avec de l'eau et non inoculées (40,69 cm et 4,31). C'est l'apport en azote issu de la symbiose entre *Bradyrhizobium* et le soya qui est

responsable de ces différences. Pour la hauteur, l'interaction «vaporisation avec des EC*solution nutritive» est significative (tableau 5.24). Elle s'explique principalement par trois contrastes d'interaction : «oi vs oNi*solution nutritive», «oi vs vers*solution nutritive» et «Bim vs Bma*solution nutritive». En présence de solution nutritive, la hauteur moyenne des plantes de soya vaporisées avec de l'eau et non inoculées, et vaporisées avec l'EC «biodynamique 3 mois» ou «Fumier de vers» ont augmenté (figure 5.11). À l'opposé, en présence de solution nutritive, la hauteur moyenne des plantes de soya vaporisées avec de l'eau et inoculées, et vaporisées avec l'EC «biodynamique 24 mois» ont diminué. La hauteur d'une plante est fonction de son statut nutritionnel d'où l'augmentation de la hauteur en présence de solution nutritive pour celles vaporisées avec de l'eau et non inoculées. Des nodosités ont été retrouvés sur certaines plantes non inoculées créant ainsi beaucoup de variation entre les blocs et limitant la portée de ces résultats. L'augmentation de la hauteur en présence de solution nutritive suite à une vaporisation avec les EC «biodynamique 3 mois» et «Fumier de vers» pourrait aussi être le résultat de composés spécifiques retrouvés dans ces EC telles les phytohormones (Tomati et coll., 1998). En présence de solution nutritive, la diminution de la hauteur pour les vaporisations avec de l'eau des plantes inoculées, et avec l'EC «biodynamique 24 mois» pourrait être le résultat de leur emplacement dans la chambre de croissance. En effet, une variation de l'intensité lumineuse à certains points dans le cabinet de croissance est plausible créant de la variation entre et à l'intérieur d'un même bloc. Ces résultats doivent aussi être pondérés par les observations faites sur les plantes ayant reçu la solution nutritive. En effet, des symptômes de chlorose vraisemblablement causés par un apport trop élevé en éléments nutritifs ont été notés pour les plantes ayant reçu la solution nutritive. Ce pourrait être la raison pour laquelle certains EC ont causé des diminutions de hauteur en présence de solution nutritive.

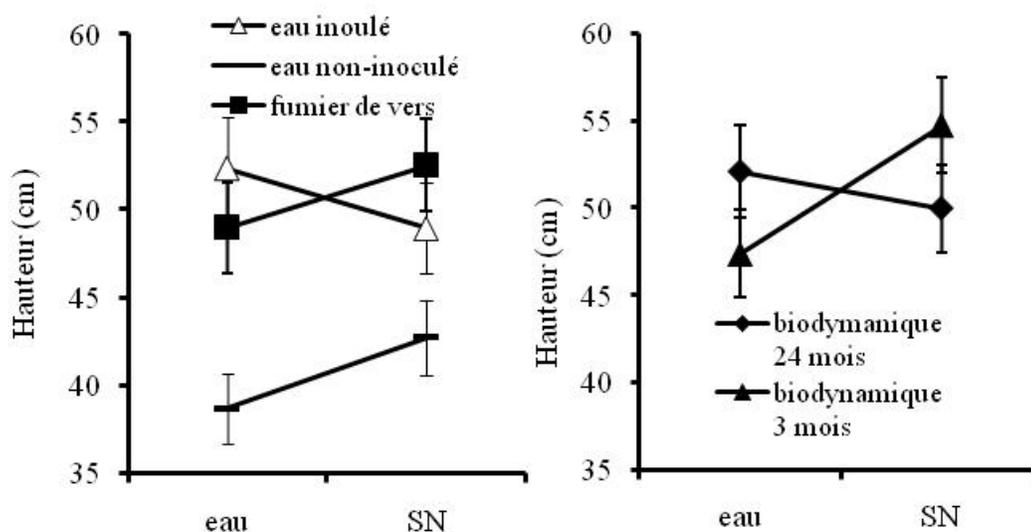


Figure 5.11 : Effet de la solution nutritive sur la hauteur moyenne des plantes de soya inoculées ou non et vaporisées avec de l'eau et celles inoculées et vaporisées avec les EC «biodynamique 24 mois», «biodynamique 3 mois» et «Fumier de vers». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

Les plantes ayant reçu la solution nutritive avaient un diamètre du collet plus élevé (2,444 mm) que celles ayant reçu de l'eau (2,373 mm). La croissance en hauteur nécessiterait un collet structurellement plus fort ce qui pourrait entraîner une augmentation du diamètre du collet.

Pour le diamètre du collet, ce sont les contrastes «oi vs Vers» et «Fcre + Bma vs vers» qui sont significatifs (tableau 5.24). Le diamètre du collet était plus important pour la vaporisation avec l'EC «Fumier de vers» (2,512 mm) qu'avec les vaporisations avec l'eau (2,404 mm). De même, le diamètre du collet était plus important pour la vaporisation avec l'EC «Fumier de vers» (2,512 mm) et avec les EC «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois» (2,407 mm). La vaporisation avec des EC aurait pu provoquer l'augmentation du diamètre du collet par la stimulation de certains mécanismes de la plante, dont ceux de défense. Cette dernière hypothèse n'a pas été vérifiée dans la littérature.

Les stades de croissance des plantes de soya n'ont pas évolué dans le temps de la même manière selon la vaporisation avec des EC fortifiés, d'où l'interaction «vaporisation avec des EC*temps» significative (tableau 5.24). Deux contrastes d'interaction sont significatifs, soient «oi vs oNi*temps linéaire» et «Fcre + Bma vs vers*temps linéaire». À partir de la

27^e journée de croissance, le stade de développement des plantes vaporisées avec l'EC «Fumier de vers» devance celles vaporisées avec les EC «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois» (figure 5.12). Les plantes vaporisées avec l'EC «Fumier de vers» atteignent donc le stade floraison (représenté par le nombre 8) avant celles vaporisées avec les EC «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Il est peu probable que cette différence soit attribuable aux quantités d'éléments minéraux contenues dans les EC puisque l'EC «Fumier de vers» contient moins d'éléments minéraux que les EC «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Une hypothèse plausible pour expliquer le phénomène est la présence d'hormones de croissance dans l'EC «Fumier de vers». Tomati et coll. (1998) rapportent que les effets courants d'hormones sur la plante sont l'élongation ou le raccourcissement de la tige et l'apparition hâtive des fleurs.

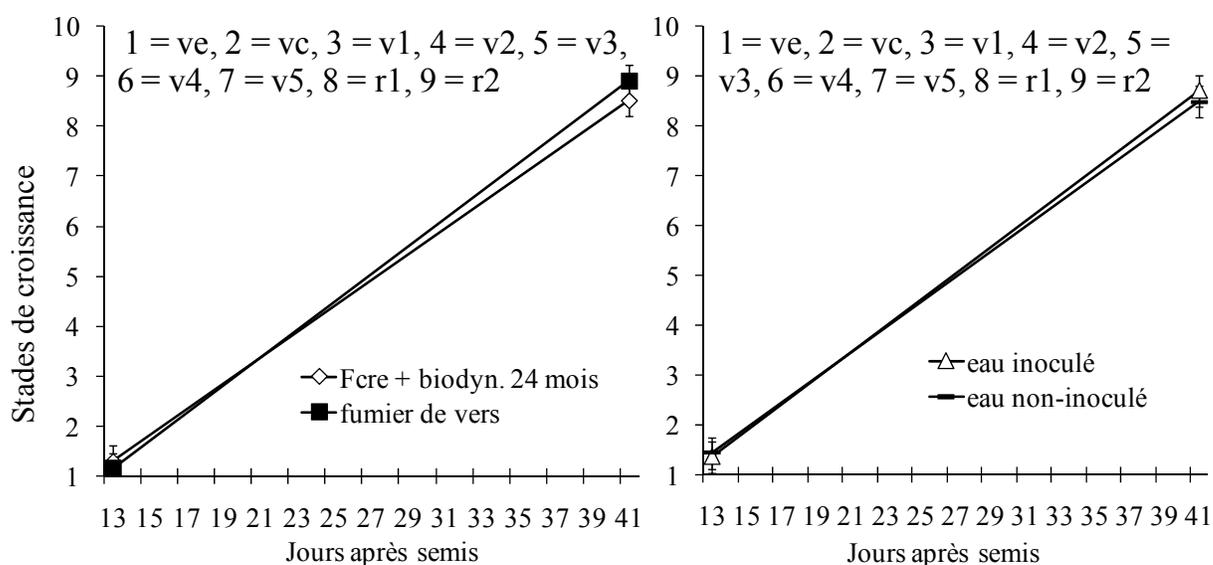


Figure 5.12 : Effet du temps sur les stades de développement des plantes de soya inoculées et vaporisées avec les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois» puis sur les plantes de soya inoculées ou non et vaporisées avec de l'eau. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 8).

5.3.2.2 Paramètres physiologiques à la récolte : le poids sec des parties aériennes, des racines, des nodosités et du nombre de nodosités

Les ANOVAs des poids secs des parties aériennes et des nodosités, ainsi que le nombre de nodosités, indiquent que le facteur «vaporisation avec des EC» représente respectivement 49, 45 et 48 % de la variation totale (tableau 5.25). Alors que c'est l'interaction «vaporisation avec des EC*solution nutritive» qui explique l'effet du facteur «solution nutritive» pour certains EC sur les poids secs des parties aériennes et des racines. Il faut noter la très grande variabilité entre les blocs.

Pour les poids secs des parties aériennes et des nodosités, ainsi que le nombre de nodosités, l'effet du facteur principal «vaporisation des EC» est significatif. De plus, certains contrastes d'interaction «vaporisation avec des EC * solution nutritive» sont aussi significatifs.

Une brève description des résultats des poids secs des parties aériennes, racinaires et des nodosités, ainsi que le nombre de nodosités suite aux applications d'EC montre les moyennes globales des effets principaux des vaporisations d'EC et de la solution nutritive (tableau 5.26). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre ces deux facteurs sont aussi présentées dans ce tableau. Pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures illustrent les interactions significatives.

Pour les poids secs des parties aériennes et des nodosités, ainsi que le nombre de nodosités, seul le contraste «oi vs oNi» explique l'effet du facteur «vaporisation avec des EC fortifiés». L'inoculation a permis de faire augmenter le poids sec des parties aériennes et des nodosités, et le nombre de nodosités (tableau 5.26). Rappelons que les plantes non inoculées ont aussi été les hôtes de quelques nodosités créant ainsi de la variation.

En général, l'utilisation d'une solution nutritive plutôt que l'eau pour arroser les plantes n'a pas influencé les paramètres physiologiques à la récolte chez le soya (tableaux 5.25 et 5.26). Ceci a semblé, à première vue, surprenant. Le fait que chaque pot ait reçu un apport en compost équivalent à 20 t/ha et que les températures étaient près des températures optimales de minéralisation des composts pourrait expliquer cette observation.

Tableau 5.25 : Résumé de l'analyse de variance du poids sec des parties aériennes, du poids sec des racines, du poids sec des nodosités et du nombre de nodosités du soya en fonction de l'arrosage avec une solution nutritive et de la vaporisation avec des EC fortifiés.

Source de variation	Degrés de liberté	Moyennes des carrés			
		poids secs des parties aériennes	poids sec des racines	poids secs des nodules	nombre de nodules
Bloc	3	0,1359 ***	0,2343 ***	0,0223 ***	1,0699 **
Solution nutritive (SN)	1	0,0101 ns	0,0120 ns	0,0008 ns	0,1567 ns
Vaporisation EC fortifiés (VECF)	5	0,2732 ***	0,0041 ns	0,0325 ***	3,2188 ***
eau inoculé (oi) vs eau non-inoculé (oNi)	1	0,8511 ***	0,0054 ns	0,0913 ***	10,0099 ***
oi vs Tourbe et Crevette (Fcre)	1	0,0617 ns	0,0153 ns	0,0026 ns	0,0994 ns
oi vs Fumier de vers (Vers)	1	0,0004 ns	0,0022 ns	0,0008 ns	0,0025 ns
Fcre + biodyn. 24 mois (Bma) vs Vers	1	0,0183 ns	0,0005 ns	0,0032 ns	0,0159 ns
biodyn. 3 mois (Bim) vs Bma	1	0,0043 ns	0,0011 ns	0,0004 ns	0,0002 ns
VECF * SN	5	0,0355 ns	0,0074 ns	0,0032 ns	0,2220 ns
oi vs oNi * SN	1	0,0309 ns	0,0091 ns	0,0009 ns	0,0068 ns
oi vs Fcre * SN	1	0,0076 ns	0,0061 ns	0,0011 ns	0,0887 ns
oi vs Vers * SN	1	0,1346 **	0,0343 **	0,0032 ns	0,1766 ns
Fcre + Bma vs Vers * SN	1	0,1220 **	0,0110 ns	0,0095 ns	0,5263 ns
Bim vs Bma * SN	1	0,0005 ns	0,0022 ns	0,0006 ns	0,2180 ns
Erreur	33	0,0075	0,0257	0,0034	0,3846
Coefficient de variation (%)		13,42	15,74	23,35	16,75

, * = significatif à $P \leq 0,05$ et $0,01$; ns = non-significatif

Tableau 5.26 : Poids secs des parties aériennes, des racines, et des nodosités, et nombre de nodosités par plante de soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.

VECF ¹	Poids sec des parties aériennes			Poids sec des racines		
	eau	SN	Moy. ⁷ VECF	eau	SN	Moy. ⁷ VECF
	g / plante ± erreur type					
oi ²	1,815 ± 0,211	1,455 ± 0,184	1,635	0,316 ± 0,103	0,266 ± 0,083	0,321
oNi ³	0,678 ± 0,122	0,719 ± 0,125	0,699	0,298 ± 0,089	0,276 ± 0,085	0,287
Fcre ⁴	1,390 ± 0,185	1,293 ± 0,169	1,342	0,286 ± 0,086	0,242 ± 0,080	0,264
Vers ⁵	1,382 ± 0,179	1,930 ± 0,206	1,656	0,273 ± 0,084	0,338 ± 0,094	0,306
Bim ⁶	1,784 ± 0,203	1,606 ± 0,188	1,695	0,324 ± 0,094	0,273 ± 0,085	0,299
Bma ⁷	1,766 ± 0,197	1,500 ± 0,182	1,633	0,327 ± 0,093	0,319 ± 0,092	0,323
Moy. ⁸	1,469	1,417		0,314	0,286	
SN						

	Nombre de nodosité			Poids sec des nodosités		
	eau	SN	Moy. ⁷ VECF	eau	SN	Moy. ⁷ VECF
	Nombre / plante ± erreur type			g / plante ± erreur type		
oi ²	58,3 ± 8,3	46,1 ± 10,0	52,2	0,0757 ± 0,0109	0,0641 ± 0,0112	0,0699
oNi ³	17,6 ± 2,0	11,7 ± 3,0	14,6	0,0212 ± 0,0038	0,0108 ± 0,0055	0,0160
Fcre ⁴	45,7 ± 8,5	47,0 ± 7,5	46,4	0,0566 ± 0,0108	0,0636 ± 0,0126	0,0601
Vers ⁵	72,7 ± 6,6	38,6 ± 11,9	55,7	0,0840 ± 0,0104	0,0840 ± 0,0105	0,0840
Bim ⁶	46,3 ± 9,8	57,0 ± 7,6	52,7	0,0721 ± 0,0121	0,0877 ± 0,0105	0,0799
Bma ⁷	56,0 ± 8,4	51,0 ± 9,2	53,5	0,0735 ± 0,0104	0,0796 ± 0,0106	0,0766
Moy. ⁸	49,5	41,9		0,0670	0,0619	
SN						

1 = vaporisation avec des extraits de compost fortifiés; 2 = eau inoculé; 3 = eau non-inoculé; 4 = Tourbe et crevette; 5 = Fumier de vers; 6 = Biodynamique 3 mois; 7 = Biodynamique 24 mois; 8 = moyenne

En détail, les traitements «vaporisation avec des EC» n'ont pas le même effet en présence ou en absence de solution nutritive. Deux contrastes d'interactions sont significatifs pour le poids sec des parties aériennes : «oi vs vers * solution nutritive», «Fcre + Bma vs vers * solution nutritive» et un contraste d'interaction est significatif pour le poids sec des racines. En présence de solution nutritive, le poids sec des parties aériennes du soya vaporisées avec l'EC «Fumier de vers» a augmenté tandis que le poids sec des parties aériennes des plantes inoculées, vaporisées avec de l'eau, a diminué (figure 5.13). De la même manière, les plantes vaporisées avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» a diminué en présence de la solution nutritive par rapport à un arrosage avec de l'eau (figure 5.13). Il

est intéressant de noter que les EC fortifiés les plus riches en éléments minéraux n'ont pas produit d'interactions significatives avec la présence d'une solution nutritive. Il semble donc que l'action des EC fortifiés ne serait pas liée à la quantité d'éléments minéraux qu'ils contiennent. Les données de ce travail ne permettent pas d'expliquer complètement ce phénomène, mais trois hypothèses sont avancées : 1) la solution nutritive a causé une diminution du poids sec des parties aériennes pour les plantes vaporisées avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» et les plantes vaporisées avec de l'eau et inoculées; 2) les SH présents dans l'EC «Fumier de vers» peuvent modifier la capacité d'absorption des plantes en influençant les mpH^+ ATPases (Canellas et coll., 2002) rendant du même coup possible une augmentation de la biomasse aérienne et racinaire; 3) la présence des SH dans l'EC «Fumier de vers» aurait permis l'immobilisation de certains éléments minéraux, de par leur grande capacité d'échange cationique (CÉC), évitant du même coup un excès d'éléments nutritifs en présence de la solution nutritive.

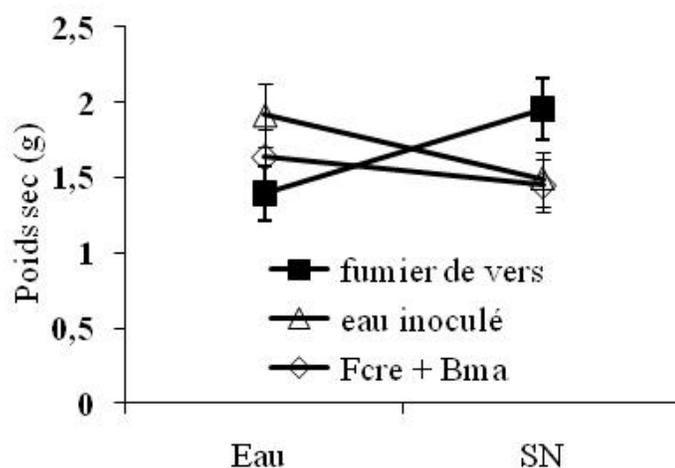


Figure 5.13 : Effet de la solution nutritive sur le poids sec des parties aériennes du soya inoculé vaporisé avec les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois» et avec de l'eau. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

En présence de solution nutritive, le poids sec des racines des plantes vaporisées avec l'EC «Fumier de vers» a augmenté tandis que le poids sec des racines des plantes inoculées et vaporisées avec de l'eau a diminué en présence de solution nutritive (figure 5.14). Les trois hypothèses émises au paragraphe précédent s'appliquent donc aussi au poids sec des racines.

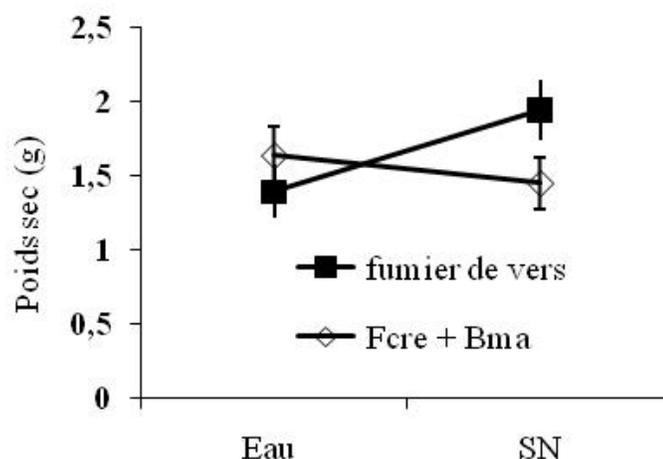


Figure 5.14 : Effet de la solution nutritive sur le poids sec des racines du soya inoculé et vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» et de l'eau. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

5.3.2.2.1 Teneur en éléments minéraux des parties aériennes

Les ANOVAs des teneurs du soya en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn, indiquent que le facteur «vaporisation avec des EC» représente respectivement 58, 83, 56, 6, 13, 9, 14, 3 10 % de la variation totale (tableau 5.27). Il faut aussi noter la variabilité entre les blocs.

Pour les teneurs du soya en P, K, Ca, Mg, Fe, Cu et Zn, l'effet du facteur principal «solution nutritive» est significatif. Pour les teneurs en N, P, K, Mg et Cu, l'effet du facteur principal «vaporisation des EC» est significatif. De plus, certains contrastes d'interaction «vaporisation avec des EC*solution nutritive» sont aussi significatifs.

Une brève description des résultats des teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn du soya, suite aux applications d'EC, montre les moyennes globales des effets principaux des vaporisations d'EC et de la solution nutritive (tableau 5.28). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre ces deux facteurs sont aussi présentées dans ce tableau. Pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures illustrent les interactions significatives.

Tableau 5.27 : Résumé de l'analyse de variance des teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn des parties aériennes du soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.

Sources de variation	d.l.	Moyenne des carrés								
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
Bloc	3	0,048	0,0057	0,018	0,0096	0,0059	0,070	0,083	49,53	0,0042
		ns	ns	ns	***	**	ns	***	ns	ns
Solution nutritive (S)	1	0,016	2,14	3,293	0,079	0,062	1,327	0,076	117,2	0,091
		ns	***	***	***	***	***	***	ns	***
Vap. ¹ EC fortifiés (VECF)	5	0,45	0,031	0,167	0,0017	0,0044	0,074	0,0258	32,08	0,0047
		***	**	***	ns	*	ns	**	ns	ns
oi ² vs oNi ³	1	1,3856	0,0135	0,208	0,0004	0,0033	0,279	0,0215	5,1	0,0227
		***	ns	**	ns	ns	**	**	ns	***
oi vs Fcre ⁴	1	0,0002	0,0711	0,784	0,0065	0,0079	0,042	0,0010	36,0	0,0029
		ns	***	***	**	*	ns	ns	ns	ns
oi vs Vers ⁵	1	0,0078	0,0005	0,095	0,0000	0,0001	0,044	0,0112	138,1	0,0066
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fcre + Bma ⁶ vs Vers	1	0,0121	0,0342	0,107	0,0037	0,0024	0,001	0,0057	44,1	0,0004
		ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
Bim ⁷ vs Bma	1	0,0022	0,0030	0,011	0,0001	0,0002	0,021	0,0003	0,1	0,0000
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
VECF * S	5	0,0348	0,0185	0,077	0,001	0,0007	0,029	0,0053	34,94	0,0037
		ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
oi vs oNi * S	1	0,0876	0,0198	0,001	0,0012	0,0003	0,133	0,0037	126,6	0,0134
		ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
oi vs Fcre * S	1	0,0001	0,0099	0,238	0,0004	0,0000	0,068	0,0066	12,3	0,0000
		ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
oi vs Vers * S	1	0,0025	0,0158	0,145	0,0005	0,0013	0,047	0,0024	0,1	0,0003
		ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fcre+Bma vs Vers * S	1	0,0029	0,0032	0,010	0,0000	0,0010	0,000	0,0000	14,1	0,0001
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bim vs Bma * S	1	0,0011	0,0003	0,005	0,0000	0,0001	0,002	0,0023	0,6	0,0000
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Erreur	33	0,0400	0,0067	0,041	0,0009	0,0020	0,065	0,0044	139,9	0,0026
Coef. ⁸ de variation (%)		18,53	-27,04	25,04	14,88	-11,23	5,59	6,36	19,97	3,33

1 : Vap. = vaporisation, 2 : oi = eau inoculé, 3 : oNi = eau non-inoculé, 4 : Fcre = Tourbe et Crevette, 5 : Vers = Fumier de vers, 6 : Bma = biodynamique 24 mois, 7 : Bim = biodynamique 3 mois, 8 : Coef = coefficient

Tableau 5.28 : Teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn des parties aériennes du soya arrosé ou non avec une solution nutritive et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.

VECF ¹	N			P		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
g kg-1 ± erreur type						
oi ²	35,2 ± 5,0	32,9 ± 4,7	34,1	2,7 ± 0,2	7,9 ± 0,5	5,3
oNi ³	16,9 ± 2,4	21,2 ± 3,0	19,0	3,1 ± 0,2	0,6 ± 0,6	6,9
Fcre ⁴	34,8 ± 4,9	32,9 ± 4,6	33,8	3,2 ± 0,2	9,6 ± 0,6	4,9
Vers ⁵	34,6 ± 4,9	30,7 ± 4,3	32,6	3,0 ± 0,2	6,7 ± 0,4	5,5
Bim ⁶	35,8 ± 5,1	31,8 ± 4,5	33,8	3,2 ± 0,2	7,8 ± 0,5	5,2
Bma ⁷	36,0 ± 5,1	33,1 ± 4,7	34,6	4,2 ± 0,2	7,5 ± 0,4	5,3
Moy. ⁸ SN	32,2	30,4		2,7	8,3	

VECF ¹	K			Ca		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
g kg-1 ± erreur type						
oi ²	13,4 ± 1,9	27,6 ± 4,0	20,5	17,8 ± 0,4	15,1 ± 0,3	16,4
oNi ³	17,2 ± 2,5	34,0 ± 4,9	25	16,7 ± 0,4	15,3 ± 0,3	16,0
Fcre ⁴	26,7 ± 3,8	33,7 ± 4,8	30,2	18,3 ± 0,3	13,4 ± 0,3	15,0
Vers ⁵	18,9 ± 2,7	26,6 ± 3,8	22,8	17,6 ± 0,4	14,6 ± 0,3	16,5
Bim ⁶	17,9 ± 2,6	30,9 ± 4,4	24,4	17,6 ± 0,4	14,1 ± 0,3	15,8
Bma ⁷	16,4 ± 2,4	30,4 ± 4,4	23,4	17,4 ± 0,4	14,3 ± 0,3	16,0
Moy. ⁸ SN	18,4	30,5		16,6	14,5	

VECF ¹	Mg			Fe		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
g kg-1 ± erreur type			mg kg-1 ± erreur type			
oi ²	4,4 ± 0,1	3,8 ± 0,1	4,1	84,12 ± 15,12	143,95 ± 25,87	114,04
oNi ³	4,6 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,4	77,54 ± 13,93	92,08 ± 16,55	84,81
Fcre ⁴	4,0 ± 0,1	3,4 ± 0,1	3,7	86,50 ± 15,54	114,14 ± 20,51	100,32
Vers ⁵	4,6 ± 0,1	3,6 ± 0,1	4,1	84,49 ± 15,18	116,29 ± 20,90	100,39
Bim ⁶	4,4 ± 0,1	3,6 ± 0,1	4,0	91,35 ± 16,42	131,51 ± 23,63	111,43
Bma ⁷	4,4 ± 0,1	3,7 ± 0,1	4,1	86,66 ± 15,57	119,96 ± 21,56	103,31
Moy. ⁸ SN	4,4	3,7		85,11	119,66	

1 = vaporisation avec des extraits de compost fortifiés; 2 = eau inoculé; 3 = eau non-inoculé; 4 = Tourbe et crevette; 5 = Fumier de vers; 6 = Biodynamique 3 mois; 7 = Biodynamique 24 mois; 8 = moyenne

VECF ¹	Cu			Mn		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
	mg kg-1 ± erreur type			mg kg-1 ± erreur type		
oi ²	12,02 ± 0,56	10,57 ± 0,49	11,29	61,75 ± 8,36	62,00 ± 8,36	61,88
oNi ³	13,26 ± 0,62	13,42 ± 0,63	13,34	66,25 ± 8,36	55,25 ± 8,36	60,75
Fcre ⁴	12,73 ± 0,59	9,28 ± 0,43	11,00	60,50 ± 8,36	57,25 ± 8,36	58,88
Vers ⁵	11,25 ± 0,53	8,84 ± 0,41	10,05	55,75 ± 8,36	56,25 ± 8,36	56,00
Bim ⁶	11,96 ± 0,56	9,12 ± 0,43	10,54	60,50 ± 8,36	57,50 ± 8,36	59,00
Bma ⁷	11,52 ± 0,54	9,83 ± 0,46	10,68	60,00 ± 8,36	57,75 ± 8,36	58,88
Moy. ⁸ SN	12,12	10,18		60,79	57,67	

VECF ¹	Zn		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
	mg kg-1 ± erreur type		
oi ²	36,37 ± 1,31	27,31 ± 0,98	31,84
oNi ³	37,85 ± 1,36	37,11 ± 1,34	37,48
Fcre ⁴	38,57 ± 1,39	29,17 ± 1,05	33,8
Vers ⁵	39,20 ± 1,41	30,57 ± 1,10	34,89
Bim ⁶	37,65 ± 1,36	31,11 ± 1,12	34,38
Bma ⁷	37,46 ± 1,35	31,43 ± 1,13	34,44
Moy. ⁸ SN	37,85	31,12	

1 = vaporisation avec des extraits de compost fortifiés; 2 = eau inoculé; 3 = eau non-inoculé; 4 = Tourbe et crevette; 5 = Fumier de vers; 6 = Biodynamique 3 mois; 7 = Biodynamique 24 mois; 8 = moyenne

Pour la teneur en N du soya, c'est le contraste «oi vs. oNi» qui explique l'effet du facteur «vaporisation avec des EC fortifiés» (tableau 5.27). *Bradyrhizobium* en symbiose avec le soya a la capacité de fixer l'azote de l'air. En échange de sucrose qui est fourni par la plante, celle-ci reçoit l'azote sous une forme utilisable (Chalifour, 2006). Pour le soya non inoculé, l'azote provient de la minéralisation du compost, et malheureusement, pour certaines plantes de l'azote fixé par les nodosités présentes sur les racines. La solution nutritive ne contenant pas de N, il est normal de ne pas voir de différence significative dans la teneur en N du soya quant à ce traitement.

Il y a une différence significative dans la teneur en P lorsque le feuillage du soya est vaporisé avec l'EC «Tourbe et Crevette» comparativement au témoin vaporisé avec de

l'eau et inoculé (oi vs Fcre, tableaux 5.27 et 5.28). De même, il y a une différence significative dans la teneur en P lorsque le feuillage du soya est vaporisé avec l'EC «Tourbe et Crevette» comparativement à la moyenne des EC «biodynamique 24 mois et Fumier de vers» (Fcre vs Bma + Vers, tableaux 5.27 et 5.28). L'EC «Tourbe et Crevette» étant riche en P comparativement aux autres EC explique cette augmentation de la teneur en P. Le contraste d'interaction «oi vs oNi * SN» est sans valeur puisqu'il démontre uniquement l'effet de la symbiose *Bradyrhizobium*-soya, et que dans cette expérience il y a eu des contaminations croisées. La solution nutritive contenant du P, il est normal d'observer une différence significative dans la teneur en P du soya quant à ce traitement. Pour le K, l'effet «vaporisation avec des EC * solution nutritive» est principalement attribuable aux contrastes «oi vs Fcre * solution nutritive » et «oi vs. vers * solution nutritive» (tableau 5.27). En présence de solution nutritive, les teneurs en K des parties aériennes du soya vaporisé avec les EC «Tourbe et Crevette et Fumier de vers» ont tous augmenté, passant respectivement de 0,94 à 1,17 % et de 0,60 à 0,94 % tandis que l'augmentation de la teneur en K des parties aériennes du soya vaporisé avec de l'eau et inoculé a été plus prononcée passant de 0,25 à 0,98 % (figure 5.15). Cette augmentation plus prononcée serait attribuable à l'absence d'apport en K des plantes vaporisées avec de l'eau et inoculées. L'EC «Tourbe et Crevette» contient une bonne quantité de K (tableau 5.23). Il n'est donc pas surprenant que les plantes de soya vaporisées avec cet EC contiennent une plus grande quantité de K. La solution nutritive contenant du K, il est normal d'observer une différence significative dans la teneur en K du soya quant à ce traitement.

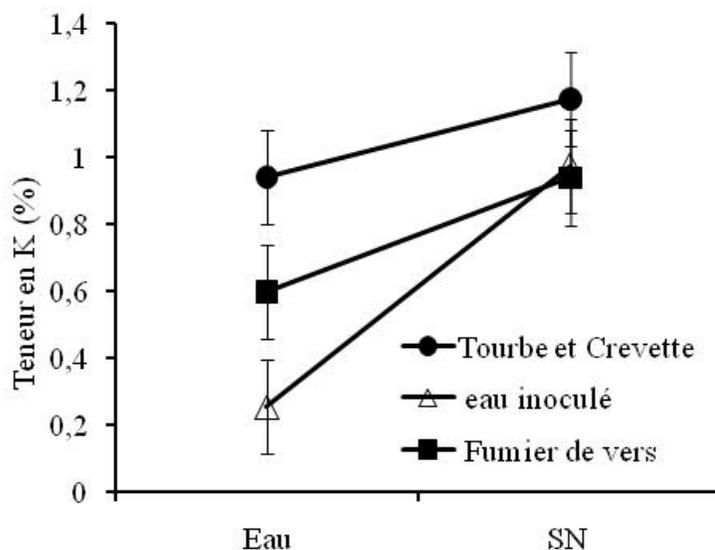


Figure 5.15 : Effet de l'arrosage avec la solution nutritive ou de l'eau sur la teneur en K des parties aériennes du soya pour les vaporisations avec les EC «Tourbe et Crevette», «eau» et «Fumier de vers». Tous ces traitements avaient été inoculés avec *Bradyrhizobium*. Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

Il y a une différence significative dans les teneurs en Ca et Mg lorsque le feuillage du soya est vaporisé avec l'EC «Tourbe et Crevette» comparativement au témoin vaporisé avec de l'eau et inoculé (oi vs Fcre, tableaux 5.27 et 5.28). L'EC «Tourbe et Crevette» contient plus de Ca et de Mg que l'eau et la diminution dans les teneurs en Ca et Mg pourraient être liées à des interactions entre les éléments nutritifs dans la plante ou la disponibilité de ces éléments. Liu et coll. (1998) ont déjà démontré qu'une application foliaire de SH peut influencer significativement l'absorption du K et du Mg. Mais il est impossible, avec les données de cette expérience, d'attribuer les diminutions des teneurs en Mg aux SH dans les EC. J'ai comparé mes résultats d'analyse minérale de la plante entière à ceux du CRAAQ (2003). Bien que non comparable parce que le CRAAQ procède à l'échantillonnage de certaines feuilles à un stade de développement particulier, je juge non déficitaire les teneurs en P et en K pour les plantes ayant reçu la solution nutritive. Fageria et al. (1991) rapportent des teneurs en éléments minéraux pour les feuilles supérieures pleinement déployées et à un stade de développement précédant le développement des gousses. Ainsi, les teneurs en P et K sont suffisantes pour les traitements sans solution nutritive, et élevées pour les traitements avec solution nutritive.

Les teneurs en Ca, en Mg, en Cu, en Mn et en Zn du soya sont significativement inférieures lorsque les plantes sont arrosées avec la solution nutritive, plutôt qu'avec de l'eau. À l'inverse, la teneur en Fe du soya est significativement inférieure lorsque les plantes sont arrosées avec la solution nutritive, plutôt qu'avec de l'eau. La solution nutritive contenant ces éléments nutritifs pour la plante, les différences significatives dans leurs teneurs quant à ce traitement sont probablement liées à des interactions dans le prélèvement de ces éléments par la plante. Les teneurs en Ca sont relativement faibles comparativement à ce que Fageria et al. (1991) rapportent pour les feuilles supérieures pleinement déployées et à un stade de développement précédant le développement des gousses. Cependant, comparativement aux valeurs publiées par Fageria et al. (1991), les teneurs en Mg, Fe, Cu, Mn et Zn sont suffisantes.

Je soulève l'hypothèse que les teneurs non déficitaires en P et en K (CRAAQ, 2003) pour les plantes ayant reçu la solution nutritive expliqueraient la faible teneur en Ca pour ces mêmes plantes.

5.3.2.2.2 Prélèvement en éléments minéraux

Les ANOVAs des prélèvements par plante en N, Mg, Fe, Mn et Zn par le soya, indiquent que le facteur «vaporisation avec des EC» représente respectivement 10, 7, 9, 7 et 8 % de la variation totale (tableau 5.29). Le facteur «solution nutritive» représente respectivement 60, 28 et 9 % de la variation totale du prélèvement par plante du P, du K et du Ca. Plusieurs effets d'interaction entre les facteurs principaux sont aussi présents. Il faut aussi noter la variabilité entre les blocs.

Pour les prélèvements en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu et Zn par plante de soya, l'effet du facteur principal «solution nutritive» est significatif. Pour tous les éléments à l'étude, l'effet du facteur principal «vaporisation des EC» est significatif. De plus, plusieurs contrastes d'interaction «vaporisation avec des EC*solution nutritive» sont aussi significatifs.

Une brève description des résultats des prélèvements, par plante, en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn du soya, suite aux applications d'EC, montre les moyennes globales des effets principaux des vaporisations d'EC et de la solution nutritive (tableau 5.30). De plus, les moyennes d'effet d'interaction entre ces deux facteurs sont aussi présentées dans ce

tableau. Pour faciliter la compréhension de certaines interactions, des figures illustrent les interactions significatives.

Tableau 5.29 : Résumé de l'analyse de variance du prélèvement en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn par du soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.

Sources de variation	d.l.	Moyenne des carrés								
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
Bloc	3	1457,54 ***	0,0651 ***	0,294 ***	369,8 ***	21,84 ***	0,57 **	305E-06 ***	0,0038 **	0,097 ***
Solution nutritive (SN)	1	533,35 *	1,9356 ***	2,724 ***	436,4 ***	20,34 ***	0,97 **	174E-06 ***	0,0004 ns	0,133 ***
Vap. ¹ EC fortifiés (VECF)	5	2244,31 ***	0,1552 ***	0,894 ***	365,8 ***	20,78 ***	1,54 ***	106E-06 ***	0,0046 ***	0,144 ***
oi ² vs oNi ³	1	7278,83 ***	0,4151 ***	1,674 ***	1184,6 ***	62,98 ***	5,20 ***	395E-06 ***	0,0152 ***	0,376 ***
oi vs Fcre ⁴	1	493,44 ns	0,0077 ns	0,225 **	206,3 **	13,29 **	0,38 ns	55,2E-06 *	0,0019 ns	0,015 ns
oi vs Vers ⁵	1	83,61 ns	0,0013 ns	0,075 ns	4,7 ns	0,21 ns	0,06 ns	14,3E-06 ns	0,0003 ns	0,005 ns
Fcre + Bma ⁶ vs Vers	1	8,66 ns	0,0064 ns	0,007 ns	51,5 ns	2,70 ns	0,04 ns	3,24E-06 ns	0,0000 ns	0,017 ns
Bim ⁷ vs Bma	1	8,11 ns	0,0131 ns	0,059 ns	2,8 ns	0,02 ns	0,08 ns	3,36E-06 ns	0,0000 ns	0,004 ns
VECF * SN	5	290,16 ns	0,0300 ***	0,092 **	68,5 ns	3,35 ns	0,08 ns	36,1E-06 **	0,008 ns	0,022 ns
oi vs oNi * SN	1	588,24 *	0,0642 ***	0,049 ns	138,0 *	6,46 ns	0,01 ns	49,1E-06 *	0,0004 ns	0,051 *
oi vs Fcre * SN	1	126,68 ns	0,0023 ns	0,136 *	24,9 ns	1,29 ns	0,02 ns	1,08E-06 ns	0,0001 ns	0,003 ns
oi vs Vers * SN	1	936,49 **	0,0131 ns	0,029 ns	216,5 **	11,00 *	0,11 ns	99,5E-06 **	0,0035 *	0,066 *
Fcre+Bma vs Vers * SN	1	591,00 *	0,0376 **	0,228 **	152,5 *	7,54 ns	0,36 ns	99,2E-06 **	0,0029 *	0,058 *
Bim vs Bma * SN	1	18,89 ns	0,0009 ns	0,002 ns	1,2 ns	0,10 ns	0,02 ns	4,09E-06 ns	0,0000 ns	0,002 ns
Erreur	33	183,36	0,0051	0,0359	38,6	2,73	0,19	14,3E-06	0,0001	0,017
Coef. ⁸ de variation (%)		28,65	8,55	5,53	25,95	27,41	20,98	23,31	34,15	9,87

¹ = vaporisation; ² = eau inoculé; ³ = eau non-inoculé; ⁴ = Tourbe et Crevette; ⁵ = Fumier de vers; ⁶ = biodynamique 24 mois;

⁷ = biodynamique 3 mois; ⁸ = coefficient

*, **, *** = significatif à $P \leq 0,1, 0,05$ et $0,001$; ns = non-significatif

Pour les prélèvements en K, Mg, Fe, et Mn par plante, c'est le contraste «oi vs oNi» qui explique principalement l'effet du facteur «vaporisation avec des EC» (tableau 5.29). Les plantes de soya vaporisées avec de l'eau et inoculées ont prélevé plus d'éléments minéraux par plante que le soya vaporisé avec de l'eau et non inoculé (tableau 5.30). D'autre part, le prélèvement en K, lorsque le feuillage du soya est vaporisé avec l'EC «Tourbe et Crevette» comparativement au témoin vaporisé avec de l'eau et inoculé, est supérieur lorsque les plantes sont arrosées avec la solution nutritive plutôt qu'avec de l'eau (oi vs Fcre*SN, tableaux 5.29 et 5.30). L'EC «Tourbe et Crevette» contient une quantité importante de K par plante, ce qui explique l'augmentation du prélèvement en K par le soya ayant reçu les vaporisations de cet EC. En présence de solution nutritive, les plantes de soya ont prélevé par plante plus de K et de P, et moins de Ca qu'en absence de solution nutritive (tableau 5.30). Ces résultats appuient l'hypothèse d'une surfertilisation causant une diminution du prélèvement en Ca.

Ce sont les effets d'interaction «vaporisation avec des EC * SN» qui expliquent principalement les prélèvements en N, P, Ca, Cu, et Zn, par plante (tableau 5.29). Les prélèvements en N, P, Ca, Cu, et Zn lorsque le feuillage du soya est vaporisé avec de l'eau et inoculé sont souvent supérieurs lorsque les plantes sont arrosées avec de l'eau plutôt qu'avec la solution nutritive (oi vs oNi*SN, tableaux 5.29 et 5.30). C'est l'apport en N au soya par la symbiose avec le *Bradyrhizobium* via l'augmentation de la biomasse aérienne et racinaire qui fait possiblement augmenter le prélèvement par plante de tous les autres éléments minéraux. L'arrosage à l'eau semble répondre aux besoins nutritifs du soya par le compost qui minéralise dans le substrat, et la solution nutritive semble répondre de façon supplémentaire aux besoins nutritifs du soya.

Le contraste d'interaction «oi vs vers*SN» est aussi significatif pour le prélèvement en N, Ca, Mg, Cu, Mn et Zn (oi vs vers*SN, tableaux 5.29 et 5.30). En présence de solution nutritive, le prélèvement en N par le soya vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» a augmenté passant de 46,85 à 57,88 mg N/plante tandis que le prélèvement en N du soya vaporisé avec de l'eau et inoculé, a diminué en présence de solution nutritive passant de 66,73 à 47,15 mg N/plante (figure 5.16). De même, en présence de solution nutritive, le prélèvement en Ca par le soya vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» a légèrement augmenté passant de 26,04 à

28,65 mg Ca/plante (figure 5.17). En présence de solution nutritive, le prélèvement en Mg par le soya vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» a légèrement augmenté passant de 6,48 à 7,13 mg Mg/plante (figure 5.18). Tandis que le prélèvement en Mg par le soya vaporisé avec de l'eau et inoculé avec *Bradyrhizobium*, a diminué en présence de solution nutritive passant de 8,36 à 5,70 mg Mg/plante (figure 5.18). En présence de solution nutritive, le prélèvement en Cu par le soya vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» a augmenté passant de 0,016 à 0,019 mg Cu/plante (figure 5.19); le prélèvement en Mn a augmenté passant de 0,078 à 0,112 mg Mn/plante (figure 5.20); et le prélèvement en Zn par le soya a augmenté passant de 0,055 à 0,061 mg Zn/plante (figure 5.21).

Tableau 5.30 : Prélèvements en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn et Zn par plante de soya, arrosé ou non avec une solution nutritive, et vaporisé avec de l'eau ou des extraits de composts fortifiés.

VECF ¹	N			P		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁷ VECF
mg plante-1 ± erreur type						
oi ²	66,73 ± 9,57	47,15 ± 9,57	56,94	4,21 ± 0,25	11,55 ± 0,58	8,28
oNi ³	11,94 ± 9,57	16,62 ± 9,57	14,28	5,77 ± 0,09	7,37 ± 0,37	4,58
Fcre ⁴	49,99 ± 9,57	41,67 ± 9,57	45,83	5,21 ± 0,29	12,1 ± 0,61	8,98
Vers ⁵	46,85 ± 9,57	57,88 ± 9,57	52,37	4,21 ± 0,21	12,65 ± 0,64	8,43
Bim ⁶	65,81 ± 9,57	49,74 ± 9,57	57,78	5,77 ± 0,29	12,44 ± 0,63	9,10
Bma ⁷	62,22 ± 9,57	50,49 ± 9,57	56,35	5,2 ± 0,26	10,53 ± 0,53	7,88
Moy. ⁸ SN	50,59	43,92		4,64	11,11	

VECF ¹	K			Ca		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
mg plante-1 ± erreur type						
oi ²	24,43 ± 3,27	40,45 ± 5,42	32,44	34,48 ± 4,39	22,37 ± 4,39	28,42
oNi ³	11,45 ± 1,53	23,65 ± 3,17	17,55	11,39 ± 4,39	11,04 ± 4,39	11,22
Fcre ⁴	37,25 ± 4,99	42,63 ± 5,71	39,94	24,80 ± 4,39	17,69 ± 4,39	21,44
Vers ⁵	25,72 ± 3,44	50,55 ± 6,77	38,13	26,04 ± 4,39	28,65 ± 4,39	27,34
Bim ⁶	31,98 ± 4,28	49,13 ± 6,58	40,55	31,75 ± 4,39	22,70 ± 4,39	27,22
Bma ⁷	28,90 ± 3,87	42,53 ± 5,71	35,76	33,15 ± 4,39	22,98 ± 4,39	28,06
Moy. ⁸ SN	26,62	41,51		26,93	20,90	

VECF ¹	Mg			Fe		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁷ VECF
mg plante-1 ± erreur type						
oi ²	8,36 ± 1,17	5,70 ± 1,17	7,03	0,17 ± 0,05	0,24 ± 0,07	0,21
oNi ³	3,13 ± 1,17	3,01 ± 1,17	3,07	0,06 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,07
Fcre ⁴	5,97 ± 1,17	4,45 ± 1,17	5,21	0,14 ± 0,04	0,16 ± 0,05	0,15
Vers ⁵	6,48 ± 1,17	7,13 ± 1,17	6,81	0,13 ± 0,04	0,25 ± 0,08	0,19
Bim ⁶	8,16 ± 1,17	5,92 ± 1,17	7,04	0,18 ± 0,06	0,24 ± 0,07	0,21
Bma ⁷	7,94 ± 1,17	6,02 ± 1,17	6,98	0,17 ± 0,05	0,19 ± 0,06	0,18
Moy. ⁸ SN	6,67	5,37		0,14	0,19	

VECF ¹	Cu			Mn		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF	eau	SN	Moy. ⁷ VECF
mg plante-1 ± erreur type						
oi ²	0,023 ± 0,003	0,016 ± 0,003	0,019	0,116 ± 0,02	0,091 ± 0,02	0,104
oNi ³	0,009 ± 0,003	0,009 ± 0,003	0,009	0,045 ± 0,02	0,040 ± 0,02	0,042
Fcre ⁴	0,018 ± 0,003	0,012 ± 0,003	0,015	0,088 ± 0,02	0,076 ± 0,02	0,082
Vers ⁵	0,016 ± 0,003	0,019 ± 0,003	0,017	0,078 ± 0,02	0,112 ± 0,02	0,095
Bim ⁶	0,022 ± 0,003	0,015 ± 0,003	0,018	0,11 ± 0,02	0,096 ± 0,02	0,103
Bma ⁷	0,020 ± 0,003	0,015 ± 0,003	0,018	0,108 ± 0,02	0,096 ± 0,02	0,102
Moy. ⁸	0,018	0,014		0,091	0,085	
SN						

VECF ¹	Zn		
	eau	SN	Moy. ⁸ VECF
mg plante-1 ± erreur type			
oi ²	0,069 ± 0,006	0,042 ± 0,004	0,055
oNi ³	0,026 ± 0,002	0,027 ± 0,002	0,026
Fcre ⁴	0,056 ± 0,005	0,039 ± 0,004	0,047
Vers ⁵	0,055 ± 0,005	0,061 ± 0,006	0,058
Bim ⁶	0,070 ± 0,007	0,051 ± 0,005	0,061
Bma ⁷	0,068 ± 0,006	0,046 ± 0,004	0,057
Moy. ⁸	0,057	0,044	
SN			

1 = vaporisation avec des extraits de compost fortifiés; 2 = eau inoculé; 3 = eau non-inoculé; 4 = Tourbe et crevette; 5 = Fumier de vers; 6 = Biodynamique 3 mois; 7 = Biodynamique 24 mois; 8 = moyenne

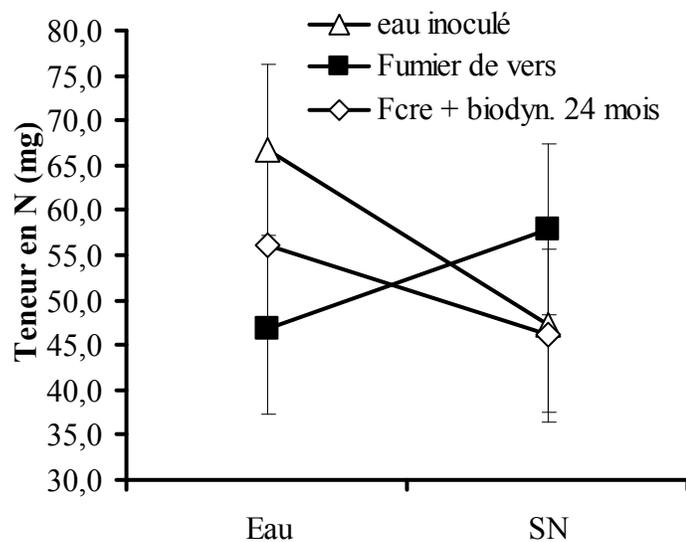


Figure 5.16 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en N par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

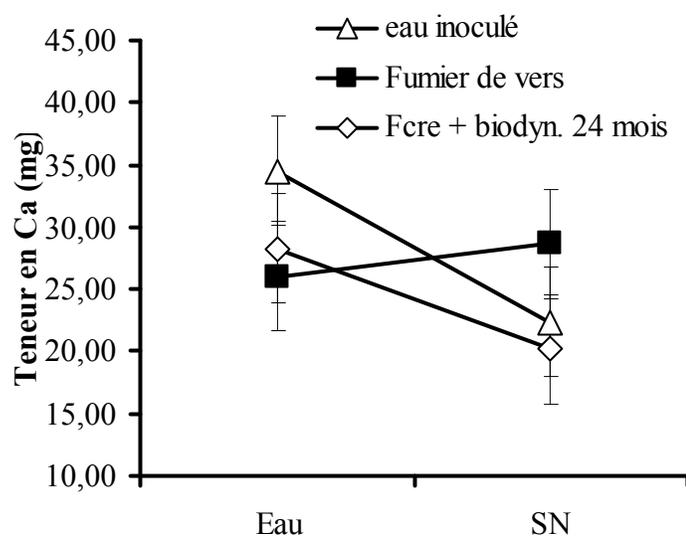


Figure 5.17 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Ca par par plante de le soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

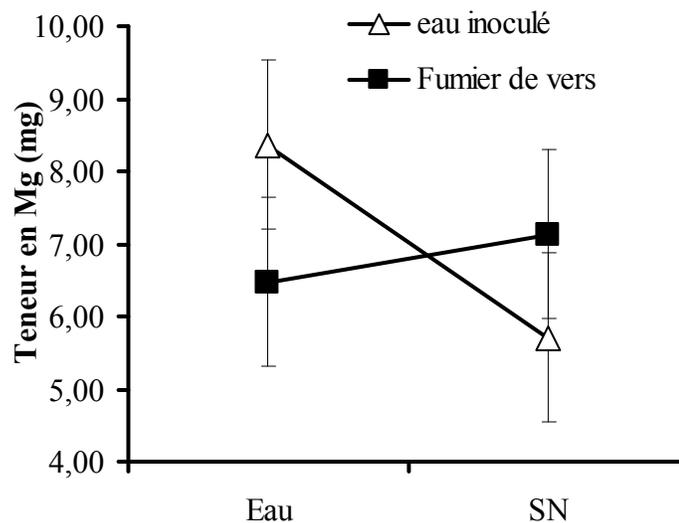


Figure 5.18 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Mg par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et l'EC «Fumier de vers». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

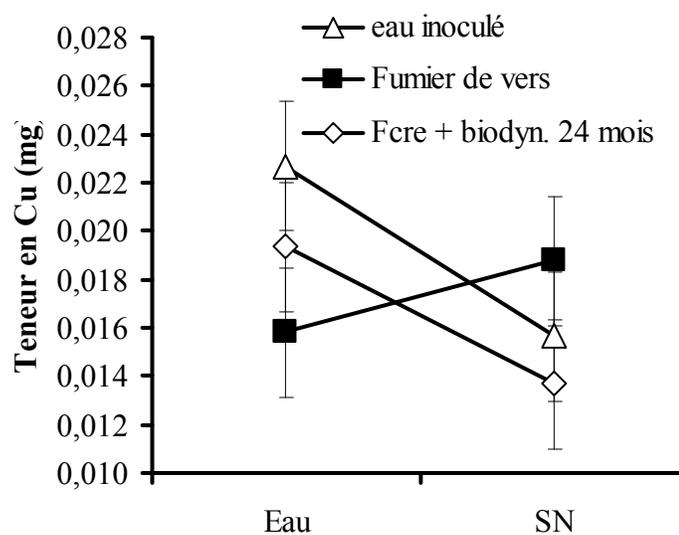


Figure 5.19 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Cu par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

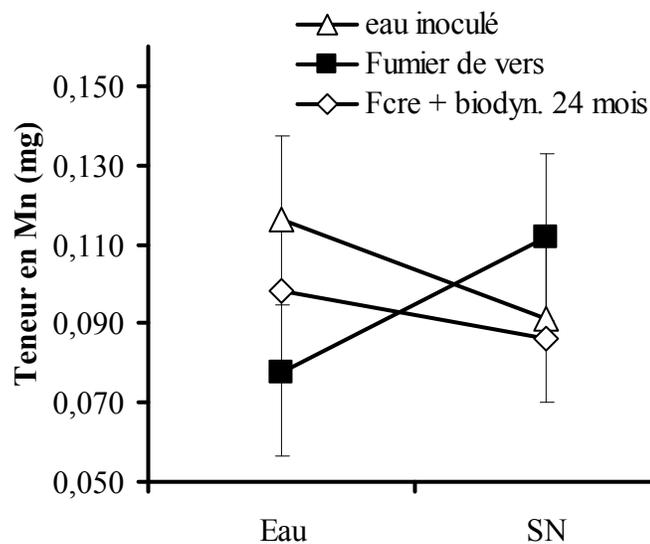


Figure 5.20 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Mn par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

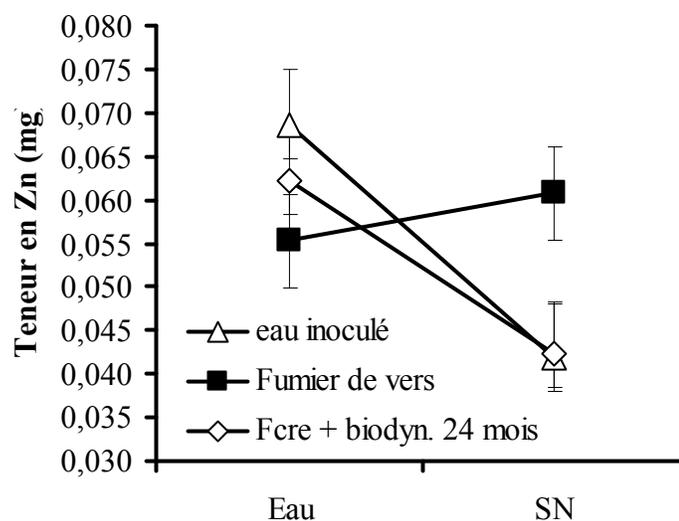


Figure 5.21 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en Zn par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau, les EC «Fumier de vers» et «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

Le contraste d'interaction «Fcre + Bma vs vers * SN» est aussi significatif pour le prélèvement en N, K, Ca, Cu, Mn et Zn (Fcre + Bma vs vers*SN, tableaux 5.29 et 5.30). Le prélèvement en N par plante de soya vaporisée avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» a diminué en présence de la solution nutritive par rapport à un arrosage avec de l'eau passant de 56,10 à 46,08 mg N/plante (figure 5.16). En présence de solution nutritive, le prélèvement en K par le soya vaporisé avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» a augmenté moins rapidement que pour le soya vaporisé avec de l'eau et inoculé, passant respectivement de 33,07 à 42,63 mg K/plante et de 24,43 à 40,45 mg K/plante (figure 5.22). L'absence d'apport en K pour le traitement «oi» explique le prélèvement par plante plus prononcé en présence de solution nutritive. Le prélèvement en Ca par le soya vaporisé avec de l'eau et inoculé et par le soya vaporisé avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» ont tous deux diminué en présence de solution nutritive, passant respectivement de 34,48 à 22,37 mg Ca/plante et de 28,28 à 20,19 mg Ca/plante (figure 5.17). Le prélèvement en Cu par le soya vaporisé avec de l'eau et inoculé et par le soya vaporisé avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» ont tous deux diminué en présence de solution nutritive, passant respectivement de 0,023 à 0,016 mg Cu/plante et de 0,019 à 0,014 mg Cu/plante (figure 5.19). Le prélèvement en Mn par le soya vaporisé avec de l'eau et inoculé et celui vaporisé avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» ont tous deux diminué en présence de solution nutritive, passant respectivement de 0,116 à 0,091 mg Mn/plante et de 0,098 à 0,086 mg Mn/plante (figure 5.20). Le prélèvement en Zn par le soya vaporisé avec de l'eau et inoculé et par le soya vaporisé avec les EC «Tourbe et Crevette et biodynamiques 24 mois» ont tous deux diminué en présence de solution nutritive, passant respectivement de 0,069 à 0,042 mg Zn/plante et de 0,062 à 0,042 mg Zn/plante (figure 5.21).

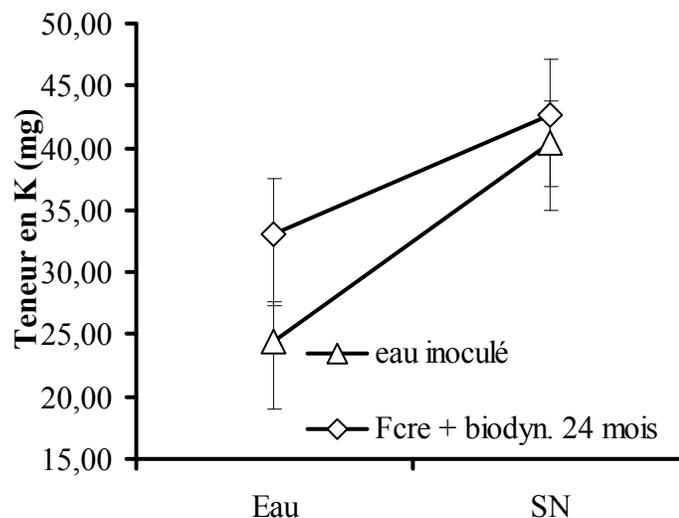


Figure 5.22 : Effet de la solution nutritive sur le prélèvement en K par plante de soya inoculé et vaporisé avec de l'eau et l'EC «Tourbe et Crevette + biodynamique 24 mois». Les barres d'erreur montrent l'erreur type de la moyenne (n = 4).

Le soya vaporisé avec l'EC «Tourbe et Crevette» et inoculé a prélevé plus de K et moins de Mg et Cu que le soya inoculé et vaporisé avec de l'eau (tableau 5.30). L'EC «Tourbe et Crevette» contient une quantité importante de K, ce qui explique l'augmentation du prélèvement par plante du K par le soya ayant reçu les vaporisations de cet EC.

Exception faite du K et malgré une forte variation entre les blocs (tableau 5.29) une constante se dégage des figures 5.16 à 5.21 : une vaporisation avec l'EC «Fumier de vers» a fait augmenter le prélèvement par plante en éléments minéraux du soya en présence de solution nutritive. Trois hypothèses seront émises pour expliquer ce phénomène. Premièrement, les plantes de soya vaporisées avec l'EC «Fumier de vers» avaient une biomasse plus importante en présence de solution nutritive ce qui nécessite un prélèvement par plante plus important d'éléments minéraux. Deuxièmement, ces contrastes pourraient avoir été accentués par la fertilisation ayant causé des diminutions du prélèvement par plante en éléments minéraux en présence de solution nutritive. Troisièmement, la présence de molécules propres à l'EC «Fumier de vers» aurait permis un prélèvement plus important d'éléments minéraux. Les interactions entre une solution nutritive et des EC ou des solutions contenant des SH ont été observées par d'autres chercheurs (Tan et

Tantiwiranond, 1983; Liu et coll., 1998) et particulièrement avec des lombricomposts (Atiyeh et coll., 2002). Ces interactions seraient le résultat de la stimulation des mpH^+ ATPases par des SH présentes dans les EC (Canellas et coll., 2002).

Conclusion volet 3

Ce volet démontre que l'EC obtenu à partir du «Fumier de vers» stimulait l'absorption des éléments minéraux, la nodulation et le développement du soya. L'effet est assez important pour ressortir, malgré la variabilité des blocs, et du traitement non inoculé, mais nodulé par *Bradyrhizobium*.

Le soya vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» a atteint le stade floraison avant le soya vaporisé avec de l'eau ou les EC «Fcre + Bma», ce qui renforce l'idée selon laquelle le fumier de vers contient des molécules pouvant favoriser le développement du soya. Des interactions significatives avec l'EC «Fumier de vers» en présence de solution nutritive démontrent le potentiel de cet EC à augmenter les poids sec des parties aériennes, racinaire, ainsi que le prélèvement par plante du N, du Ca, du Mg, du Cu, du Mn et du Zn chez le soya malgré le fait qu'il contienne, en général, moins d'éléments minéraux que certains autres EC. L'EC «Tourbe et Crevette» a quant à lui permis une augmentation de la teneur et du prélèvement par plante en K du soya.

Le poids sec des nodosités et le nombre de nodosités ne semble pas influencés par les vaporisations d'EC.

Cette expérience devrait être répétée en augmentant le nombre de blocs et en limitant la variabilité.

6. Conclusion

Les EC contiennent plusieurs éléments majeurs et éléments traces en faible concentration. La teneur en éléments minéraux des EC est fortement corrélée à la teneur en éléments minéraux solubles du compost à partir duquel il est fabriqué. Il est donc possible de prédire la quantité de certains éléments minéraux d'un EC à partir de la quantité d'éléments minéraux du compost initial. Il est donc important de bien connaître les paramètres du compost initial quand vient le temps de produire un EC.

Si les composts sont des matériaux très variables qui évoluent dans le temps, les EC le sont tout autant. Le compost même mature contient encore beaucoup de microorganismes qui lorsqu'ils sont mis dans l'eau se réactivent par la libération du carbone et autres éléments solubles. En effet, les propriétés physicochimiques et biologiques des EC évoluent dans le temps. En affectant le pH et le PR, l'aération module certaines réactions qui ont lieu dans les EC et ultimement interfère sur la quantité de certains éléments minéraux comme le N-NO₃. Il faut limiter les conditions sans aération à moins de 2 d pour conserver les nitrates en solution.

La vaporisation d'EC «Tourbe et Crevette» sur le soya a permis de faire augmenter la teneur et le prélèvement en K du soya, mais non de faire augmenter la biomasse aérienne et racinaire. Seules les vaporisations avec l'EC «Fumier de vers» en présence de solution nutritive ont fait augmenter les poids secs des parties aériennes et des racines et le prélèvement du N, du Ca, du Mg, du Cu, du Mn et du Zn. De plus, le soya vaporisé avec l'EC «Fumier de vers» a atteint le stade floraison avant le soya vaporisé avec les EC «Fcre + Bma» malgré le fait qu'il contienne, en général, moins d'éléments minéraux que certains autres EC. Le poids sec des nodosités et le nombre de nodosités n'ont pas été influencés par les vaporisations d'EC. Ces résultats viennent renforcer l'idée selon laquelle la teneur en éléments minéraux de cet EC ne serait pas la seule cause des phénomènes décrits ci-dessus. L'EC «Fumier de vers» contiendrait des molécules ayant la capacité de venir modifier la capacité d'absorption des éléments minéraux du soya.

Les résultats contenus dans ce mémoire permettent d'observer que les effets bénéfiques reliés aux EC ne sont pas nécessairement liés aux éléments minéraux solubles qu'ils

contiennent. La diversité chimique qui compose les EC laisse la porte ouverte sur la ou les causes exactes des phénomènes discutés dans ce mémoire. Il serait d'intérêt de caractériser les éléments organiques solubles contenus dans les EC pour confirmer leur rôle et leur mode d'action en tant que stimulant du développement du soya.

Bibliographie

- Acadian seaplant limited (ASL). Date inconnue. Kelp meal fertilizer for soil application. . <http://www.acadianseaplants.com/soilapplication.html> (Page consultée le 25 juin 2009).
- American society for testing and material (ASTM). 2001. D2974 Standard test for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils. 100 Barr Harbor Drive West, Conshohocken, PA 19428-2959, USA. Pages 319–321.
- Anonyme. 2005. Méthodes d'essais des inoculants à légumineuses et des semences préinoculées, Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA). Fertilizer act, Plant product division. . <http://www.inspection.gc.ca/francais/plaveg/fereng/legumef.shtml> (Page consultée le 13 septembre 2009).
- Atiyeh, R.M., Domínguez, J., Subler, S. et Edwards. C.A. 2000. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia* 44: 709–724.
- Atiyeh, R.M., Lee, S., Edwards, C.A., Arancon, N.Q. et Metzger, J.D. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresour. Technol.* 84: 7–14.
- Beauchamp, C.J. 2006. *Compostage et utilisation du compost en agriculture biologique*. [Notes de cours électroniques ENV-2900]. Université Laval. Automne 2006.
- Benhamou, N. 2009. La résistance chez les plantes. Principes de la stratégie défensive et applications agronomiques. Éditions TEC & DOC Lavoisier, Paris. 376 Pages
- Blunden, G., Jenkins, T. et Liu, Y.-W. 1997. Enhanced leaf chlorophyll levels in plants treated with seaweed extract. *J. Appl. Phycol.* 8: 535–543.
- Born, H. 2006. Edamame : vegetable soybean. National center for appropriate technology (NCAT) a publication of ATTRA - National sustainable agriculture information service. Paul Driscoll (ed.) Disponible à: <http://attra.ncat.org/attra-pub/PDF/edamame.pdf> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Boyer, G.L. et Dougherty, S.S. 1988. Identification of abscisic acid in the seaweed *Ascophyllum nodosum*. *Phytochemistry* 27(5): 1521–1522.
- Brady, N.C. et Weil, R.R. 2002. The nature and properties of soils. Thirteenth edition. Pearson education inc., Publishers, Prentice hall, New Jersey. 960 Pages.

- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen total. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3*. Book series no. 5. Soil Science Society of America, Am. Soc. Agron., Madison, WI 53711, USA Pages 1085–1121.
- Bremner, J.M. et Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen-total. Dans: A.L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbial properties*. Agronomy Monograph No. 9 (2nd edition). ASA, SSA, Madison, WI, USA. Pages 595–624.
- Brinton, W. F. 1998. Volatile organic acids in compost: production and odorant aspects. *Compost Sci. Util.* 6: 75–82.
- Brinton, W.F., Tränkner, A. et Droffner, M. 1996. Investigations into liquid compost extracts. *BioCycle* 37: 68–70.
- Broughton, W.J., Zhang, F., Perret, X. et Staehelin, C. 2003. Signals exchanged between legumes and *Rhizobium*: agricultural uses and perspectives. *Plant Soil* 252: 129–137.
- Bureau de normalisation du Québec. 2005. Projet norme P 0413-200-5 Amendements organiques – composts. Disponible à: <http://www.compost.org/pdf/bnq.0413-200-5-FR.pdf> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Canadian organic growers. 2001. Guide de production biologique des grandes cultures deuxième édition revue et augmentée. Ottawa, ON. 306 pages.
- Canellas, P.L., Lopes Olivares, F., Okorokova-Façanha, A.L. et Rocha Façanha, A. 2002. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiol* 130: 1951–1957.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2003. Guide de référence en fertilisation 1^{re} édition. St-Foy, QC, Canada. 294 pages.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2006. *Priorités de recherche, d'innovation et de transfert technologique en agriculture biologique*. Document révisé. Présenté par le groupe de travail sur les priorités de recherche, comité agriculture biologique. http://www.organicagcentre.ca/Docs/PRIORIT%C9S_DE_RECHERCHE_CRAAQ.pdf (Page consultée le 18 janvier 2010).
- Chalifour, F.P. 2006. *Fixation biologique de l'azote atmosphérique*. [Notes de cours BVG 60669]. Université Laval. Hiver 2006. 39 pages.
- Chefetz, B., Chen, Y. et Hadar, Y. 1998. Water-extractable component released during composting of municipal solid waste. *Acta Hort.* 469 : 111–118.

- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1997. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux, Agdex 533. 177 pages.
- Craigie, J.S., MacKinnon, S.L. et Walter, J.A. 2007. Liquid seaweed extracts identified using ^1H NMR profiles. *J. Appl. Phycol.* 42: 652–659.
- Delfine, S. Tognetti, R. Desiserio, e. et Alvino, A. 2005. Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat. *Agron.Sustain. Dev.* 25: 183–191.
- Diver, S. 2002. Notes on compost teas: A Supplement to the ATTRA Publication. Compost teas for plant disease control. Pest management Technical note. National center for appropriate technology (NCAT) a publication of ATTRA - National sustainable agriculture information service. Disponible à: <http://www.attra.ncat.org/attra-pub/PDF/compost-tea-notes.pdf> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Djordjevic M A, Redmond J W, Batley M et Rolfe B G. 1987. Clovers secrete specific phenolic compounds which either stimulate or repress nod gene expression in *Rhizobium trifolii*. *EMBO J.* 6: 1173–1179.
- Duval, J. 1991. «La culture biologique du soya». Site du Ecological agriculture project (EAP) <http://eap.mcgill.ca/AgroBio/ab340-01.htm> (Page consultée le 13 octobre 2008).
- Edwards, C.A. et Bohlen P.J. 1996. Biology and ecology of earthworms, third edition. Chapman & Hall London, UK. 412 pages.
- Elad, Y. et Shtienberg, D. 1994. Effect of compost water extracts on grey mould (*Botrytis cinerea*). *Crop Prot.* 13: 109–114.
- Epstein, E. et Bloom, A.J. 2005. *Mineral nutrition of plants : principles and perspectives*. Sinauer associates, inc., publishers, Sunderland, Massachusetts, USA. 400 pages.
- Estevez, B. 2006. L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité, une préoccupation en agriculture biologique? Publication rendue possible grâce au soutien du ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) pour le Syndicat des producteurs de grains biologiques du Québec (SPGBQ). Disponible à : http://www.fabqbio.ca/meganet/media/docs/pdf/grains_elements_mineurs.pdf (Page consultée le 25 juin 2009).
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. et Jones, C.A. 1991. *Growth and mineral nutrition of field crops. Second edition revised and expanded*. Marcel Dekker Inc. New York, USA. 602 pages.

- Firestone, M.K., Firestone, R.B. et Tiedje, J.M. 1980. Nitrous oxide from soil denitrification: factors controlling its biological production. *Science* 208: 749–751
- Fortin, J. 2006. *Humus dans les sols*. [Notes de cours SLS 63067]. Université Laval. Hiver 2006. 237 pages.
- Ghosh, M., Chattopadhyay, G.N. et Baral, K. 1999. Transformation of phosphorus during vermicomposting. *Bioresour. Technol.* 69: 149–154.
- Gouvernement du Canada. 2006. Systèmes de production biologique, principes généraux et normes de gestion. Office des normes générales du Canada (ONGC), Gatineau, Canada. 45 pages.
- Goyal, S., Dhull, S.K. et Kapoor, K.K. 2005. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresour. Technol.* 96: 1584–1591.
- Hall, S.G., Schellinger, D.A. et Carney, W.A. 2006. Enhancing sugarcane field residue biodegradation by grinding and use of compost tea. *Compost Sci. Util.* 14: 32–39.
- Hewitt, E.J. 1966. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Commonwealth Agriculture Bureaux, Farnham Royal, Bucks, England. 547 pages
- Higa, T. et Parr, J. F. 1994. Beneficial and effective microorganism for a sustainable agriculture and environment. International nature farming research center, Japan. Disponible à: <http://www.agriton.nl/higa.html> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Hirsch, R.E., Lewis, B.D., Spalding, E.P. et Sussman, M.R. 1998. A role for the AKT1 potassium channel in plant nutrition. *Science* 280: 918–21
- Hussain, A. et Boney, A.D. 1969. Isolation of kinin-like substances from *Laminaria digitata*. *Nature* 223: 504–505.
- Ingham, E. 1999. What is compost tea – part I. *Biocycle*. 40: 74–75.
- Isaac, R.A. et Johnson, W.C. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of the AOAC*. 59: 98-100.
- Janeczek, E., A. Kotecki, M. Kozak. 2004. Effect of foliar fertilisation with microelements on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) development and seed yielding. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Agronomy* 7: 16 pages.
- Kannangara, T., Forge, T. et Dang, B. 2006. Effects of aeration, molasses, kelp, compost type, and carrot juice on the growth of *Escherichia Coli* in compost teas. *Compost Sci. Util.* 14: 40–47.

- Kaplan, D.L., Hartenstein, R., Neuhauser, E.F., Maleck, M.R. 1980. Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*. *Soil Biol. Biochem.* 12: 347–352.
- Keeling, A.A., McCallum, K.R. et Beckwith, C.P. 2003. Mature green waste compost enhances growth and nitrogen uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and oilseed rape (*Brassica napus* L.) through the action of water-extractable factors. *Bioresour. Technol.* 90: 127–132.
- Körner, I. et Stegmann, R. 1998. Influence of biowaste composting and composting parameters on the nitrogen dynamics during composting and on nitrogen content in composts. *Acta Hort.* 469: 97–109.
- Kuepper, G. 2003. Foliar fertilisation. National center for appropriate technology (NCAT) a publication of ATTRA - National sustainable agriculture information service. Richard Earles et David Zodrow (Eds.) Disponible à : www.attra.org/attra-pub/PDF/foliar.pdf (Page consultée le 25 juin 2009).
- Larsen, K.L. et McCartney, D.M. 2000. Effect of C:N ratio on microbial activity and N retention: bench-scale study using pulp and paper biosolids. *Compost Sci. Util.* 8: 147–159.
- Levanon, D. et Pluda, D. 2002. Chemical, physical and biological criteria for maturity in composts for organic farming. *Compost Sci. Util.* 10: 339–346.
- Little, T.L. et Hills, F. J. 1978. Agricultural experimentation design and analysis. John Wiley & Sons, Inc. 368 pages.
- Liu, C.H., Cooper, R.J., Bowman, D.C., 1998. Humic acid application affects photosynthesis, root development and nutrient content of creeping bentgrass. *HortScience* 33: 1023–1025.
- Macey, A. 2006. Production biologique certifiée au Canada en 2005. Canadian organic growers inc. Ottawa ON. 34 pages. Disponible à : <http://www.cog.ca/documents/certifiedorganicproduction05F.pdf> (Page consultée le 13 octobre 2008).
- Malik, K.A. et Azam, F. 1985. Effect of humic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling growth. *Environ. Exp. Bot.* 25: 245–252.
- Marais, M.-F. et Joseleau, J.-P. 2001. A fucoidan fraction from *Ascophyllum nodosum*. *Carbohydr. Res.* 336: 155–159.
- McWilliams, D.A. Berglund, D.R. et Endres, G.J. 2004. Soybean; growth and management quick guide. North Dakota State University Extension Service.

- Merrill, R. et McKeon, J. 2001. Apparatus design and experimental protocol for organic compost teas. Organic farming research foundation (OFRF). Information bulletin. Winter 2001 no 9. p. 9–15. Erica Walz (ed.). Disponible à: <http://ofrf.org/publications/ib/ib09.pdf> (Page consultée le 13 octobre 2008).
- Michel, F.C. Jr. et Reddy, C.A. 1998. Effect of oxygenation level on yard trimmings composting rate, odor production, and compost quality in bench-scale reactors. *Compost Sci. Util.* 6: 6–14.
- Moen, E., Horn, S. et Østgaard, K. 1997. Biological degradation of *Ascophyllum nodosum*. *J. Appl. Phycol.* 9: 347–357.
- Morsomme, P. et Boutry, M. 2000. The plant plasma-membrane H⁺-ATPase: structure, function and regulation. *Biochim. Biophys. Acta.* 1465: 1–16.
- Muscolo, A., Felici, M., Concheri, G. et Nardi, S. 1993. Effect of earthworm humic substances on esterase and peroxidase activity during growth of leaf explants of *Nicotinia plumbaginifolia*. *Biol. Fertil. Soils.* 15: 127–131.
- Muscolo, A., Panuccio, M.R., Abenavoli, M.R., Concheri, G. et Nardi, S. 1996. Effect of molecular complexity and acidity of earthworm faeces humic fractions on glutamate dehydrogenase, glutamine synthetase, and phosphoenolpyruvate carboxylase in *Daucus carota* a II cells. *Biol. Fertil. Soils.* 22: 83–88.
- Muscolo, A., Bovalo, F., Gionfriddo, F. et Nardi, S. 1999. Earthworm humic matter produces auxin-like effects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1303–1311.
- Mustin, M. 1987. Le compost: gestion de la matière organique. Paris, Édition François Dubusc. 954 pages.
- National Organic Standard Board. 2004. Compost tea task force report. Disponible à: <http://www.ams.usda.gov/AMSv1.0/getfile?dDocName=STELPRDC5058470> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Ndegwa, P.M. et Thompson, S.A. 2000. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresour. Technol.* 75: 7–12.
- Ndegwa, P.M. et Thompson, S.A. 2001. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolid. *Bioresour. Technol.* 76: 107–112.
- Nelson, D.W. Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3.* Book series no. 5. Soil Science Society of America, Am. Soc. Agron., Madison, WI 53711, USA. Pages 961–1010.

- Nikolic, M., Cesco, S., Römheld, V., Varanini, Z. et Pinton, R. 2003. Uptake of iron (^{59}Fe) complexed to water-extractable humic substances by sunflower leaves. *J. Plant Nutr.* 26: 2243–2252.
- Norrie J. et Keathley J.P. 2006. Benefits of *Ascophyllum nodosum* marine-plant extract applications to ‘Thompson seedless’ grape production. *Acta Hort.* 727: 243–245.
- Oldroyd, G.E.D. et Downie, J.A. 2008. Coordinating nodule morphogenesis with rhizobial infection in legume. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59: 519–546.
- Orozco, E.H., Cegarra, J., Trujillo, I.M. et Roig, A. 1996. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*: Effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Biol. Fert. Soils.* 22: 162–166.
- Palgrem, M.G. 2001. Plant plasma membrane H^+ -ATPases: powerhouses for nutrient uptake. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52: 817–845.
- Pannucio, M.R., Muscolo, A. et Nardi, S. 2001 Effect of humic substances on nitrogen uptake and assimilation in two species of *Pinus*. *J. Plant Nutr.* 24(4 & 5): 693–704.
- Pansu, M. et Gautheyrou, J. 2006. Analysis of Extractable and Total Elements. Dans : Pansu, M. et Gautheyrou, J. 2006. Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. Publié par Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Pages 895–974.
- Patier, P., Yvin, J.-C., Kloareg, B., Liénart, Y. et Rochas, C. 1993. Seaweed liquid fertilizer from *Ascophyllum nodosum* contains elicitors of plant D-glycanases. *J. Appl. Phycol.* 5: 343–349.
- Patrick, W.H. Gambrell, R.P. Faulkner, S.P. 1996. Redox measurements of soils. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of soil analysis, Part 3. Book series no. 5. Soil Science Society of America, Am. Soc. Agron., Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Pages 1255–1273.
- Peoples, M.B., Faizah., A.W., Rerkasem, B. et Herridge, D.F. 1989. Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field. Australian centre for international agricultural research (ACIAR). Canberra, Australia. Pages 6–7.
- Petit, J. et Jobin, P. 2005. La fertilisation organique des cultures, les bases. Fédération d’agriculture biologique du Québec (FABQ). Longueil, Québec. 52 pages. Disponible à : <http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/Brochure%20fertilisation15nov.pdf> .(Page consultée le 25 juin 2009).

- Pfeiffer, E et Koepf, H. 1980. *Biodynamie et compostage*. Traduit par Anietot, N. Éditeur : Le courrier du livre, Paris. 123 pages.
- Pinton, R., Cesco, S., DeNobili, M., Santi, S. et Varanini, Z. 1998. Water- and pyrophosphate-extractable humic substances fractions as a source of iron for Fe-deficient cucumber plants. *Biol. Fert. Soils* 26: 23–27.
- Pinton, R. Cesco, S. Iacoletti, G. Astolfi, S. Varanini, Z. 1999. Modulation of NO₃ uptake by water-extractable humic substances: involvement of root plasma membrane H⁺ATPase. *Plant Soil* 215: 155–161.
- Powelson, D. S., Brookes, P. C. and Christensen, B. T. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19: 159–164.
- Radwan, A., Davies, G., Fataftah, A., Ghabbour, E.A., Jansen, S.A. et Willey, R. J. 1997. Isolation of humic acid from the brown algae *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *Laminaria saccharina* and the marine angiosperm *Zostera marina*. *J. Appl. Phycol.* 8: 553–562.
- Reickenberg, R.L. et Pritts, M.P. 1996. Dynamics of nutrient uptake from foliar fertilizers in red raspberry (*Prunus idaeus* L.). *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121: 158-163.
- Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis*, Part 3. Book series no. 5. Soil Science Society of America, Am. Soc. Agron., Madison, WI 53711, USA. Pages 417–435.
- Rioux, L.-E., Turgeon, S.L. et Beaulieu, M. 2007. Characterization of polysaccharides extracted from brown seaweeds. *Carbohydr. Polym.* 69: 530–537.
- Said-Pullicino, D., Kaiser, K., Guggenberger, G. et Gliotti, G. 2007. Changes in the chemical composition of water-extractable organic matter during composting: distribution between stable and labile organic matter pools. *Chemosphere* 66: 2166–2176.
- Santi, S. Locci, G. Pinton, R. Cesco, S. et Varanini, Z. 1995. Plasma membrane H⁺-ATPase in maize roots induced for NO₃⁻ uptake. *Plant Physiol.* 109: 1277–1283.
- Statistical System Software (SAS). 2004. v. 6.12, SAS Institute Inc., Cary, NC, U.S.A
- Sasaki, H., Maruyama, G., Suzuki, H., Nonaka, J., Sato, M., Sasaki, T., Ohta, M. et Nakai, Y. 2004. Distribution of ammonia assimilating bacteria in the composting process. *Compost Sci. Util.* 12: 108–113.

- Scheuerell, S. et Mahaffee, W. 2002. Compost tea: principles and prospects for plant disease control. *Compost Sci. Util.* 10: 313–338.
- Scheuerell, S. Mahaffee, W. 2004. Compost tea as a container medium drench for suppressing seedling damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology* 94: 1156–1163.
- Scheuerell, S. et Mahaffee, W. 2006. Variability associated with suppression of gray mold (*Botrytis cinerea*) on geranium by foliar applications of nonaerated and aerated compost teas. *Plant Dis.* 90: 1201–1208.
- Schulze, J. 2004. How are nitrogen fixation rates regulated in legumes? *J.Plant Nutr.Soil Sci.* 167: 125–37.
- Soltanpour, P.N. Johnson, G.W. Workman, S.M. Benton Jones, J. Jr. Miller, R.O. 1996. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3. Book series no. 5. Soil Science Society of America, Am. Soc. Agron., Madison, WI 53711, USA. Pages 91–138.*
- Sutton, R. et Sposito, G. 2005. Molecular structure in soil humic substances: the new view. *Environ. Sci.Technol.* 39: 9011–9015.
- Tan, K.H. et Tantiwiramanond, D.1983. Effect of humic acids on nodulation and dry matter production of soybean, peanut, and clover. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1121–1124.
- Tanimoto, E. 2005. Regulation of root growth by plant hormones—roles for auxin and gibberellin. *Crit. Rev. Plant Sci.* 24: 249–265.
- Thompson, W. H., Leege, P. B., Millner, P., and Watson, M. E.. 2002. Test methods for the examination of composting and compost. U.S. Composting Council. Harrisburg, Pa. . Disponible à : <http://www.tmecc.org/tmecc/> (Page consultée le 13 septembre 2009).
- Thomas, G.W. 1996. pH. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3. Book series no. 5. Soil science society of America, Am. Soc. Agron., Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Pages 475–490.*
- Tiquia, S.M. 2005. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. *J. Appl. Microbiol.* 99:816–828.
- Tognetti, C. Laos, F. Mazzarino, M.J. et Hernandez, M.T. 2005. Composting vs. vermicomposting: a comparison of end product quality. *Compost Sci. Util.* 13: 6–13.
- Tomati, U. A., Grappelli, A. et Galli. 1988. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. *Biol. Fert.Soils* 5: 288–294.

- Tränkner, A. 1992. Use of agricultural and municipal organic wastes to develop suppressiveness to plant pathogens. Dans: Biological control of plant diseases: progress and challenges for the future. E. S. Tjamos, G. C. Papavizas, and R. J. Cook, eds. Plenum Press, New York. Pages 35–42.
- VanderGheynst, J.S. Pettygrove, S. Dooley, T.M. et Arnold, K.A. 2004. Estimating electrical conductivity of compost extracts at different extraction ratios. *Compost Sci. Util.* 12: 202–207.
- Verkleij, F.N. 1992. Seaweed extracts in agriculture and horticulture: a review. *Biol. Agric. Hortic.* 8:309–324.
- Walz, E. 2001. Compost teas: a brave new world. Organic farming research foundation (OFRF) Information bulletin. Winter 2001 no 9 p.8. Erica Walz (ed.). Disponible à: <http://ofrf.org/publications/ib/ib09.pdf> (Page consultée le 20 novembre 2007).
- Welke, S. 2001. Effectiveness of compost tea extracts as disease suppressants in fresh market crops. Organic farming research foundation (OFRF) Project report # 00-03. North Okanagan Organic Association, Vernon, BC, Canada.
- Willems, A. 2006. The taxonomy of rhizobia: an overview. *Plant Soil* 287:3–14
- Wittwer, S.H. et Teubner, F.G. 1959. Foliar absorption of mineral nutrients. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 10: 13–30.
- Xu, J.G. et Juma, N.G., 1993. Above- and below-ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare L.*) cultivars in a Typic Cryoboroll. *Soil Biol. Biochem.* 25: 1263–1272.
- Zaccheo, P., Ricca, G. et Crippa, L. 2002. Organic matter characterization of compost from different feedstocks. *Compost Sci. Util.* 10: 29–38.
- Zibilske, L.M. 1996. Carbon mineralization. Dans: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of soil analysis, Part 3. Book series no. 5. Soil Science Society of America, Am. Soc. Agron., Madison, WI 53711, USA. Pages 1085–1121.
- Zucconi, F. Monaco, A. et Forte, M. 1985. Phytotoxins during the stabilisation of organic matter. Dans: Composting of agricultural and other wastes. Gasser J.K.R. (eds.). Elsevier Applied Science Publishers, London, England. Pages 73–86.
- Zumdahl, S.S. 2007. Chemistry. 7th edition. Manuel traduit en français par Riendeau, J.L., Rouleau M. Adaptation : Chabot, G. et Riendeau J.L. Chimie des solutions. Éditions CEC. 3^e édition.

ANNEXE 1

Randomisation du bioessai selon proc PLAN de SAS

```

1                                randomisation pour bioessai
                                10:38 Monday, September
17, 2007

```

```

                                The PLAN Procedure
Factor          Select          Levels          Order
bloc            4                4            Ordered
trait           12              12           Random

bloc            -----trait-----
1              2  8  3  11  4  5  1  7  12  6  10  9
2              7  4  6  12  1  2  11  5  10  8  9  3
3             10 12  2  1  5  3  8  4  11  7  9  6
4              4 12 11  1  2  5  9 10  6  7  3  8

```

L'ordre de placement des pots commence en haut à gauche direction vers la droite.

Les chiffres de 1 à 12 représentent les numéros de traitement :

1 : oNi; 2 : oi; 3 : oFcre; 4 : overs; 5 : obma; 6 : obim; 7 : sNi; 8 : si; 9 :sFcre; 10 : svers;
11 : sbma; 12 : sbim

Les blocs représentent les répétitions de l'expérience.