

Isabelle Demers

**Formes et disponibilité du phosphore de composts
utilisés comme amendements de sols agricoles**

Mémoire présenté
à la faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Sols et environnement
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

Département des sols et de génie agroalimentaire
Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation
Université Laval
Québec

2008

Résumé

La pollution des cours d'eau par le phosphore (P) d'origine agricole représente l'une des plus grandes menaces pour la qualité de l'eau dans les pays développés. Une partie de la solution à ce problème réside dans le compostage qui favorise la réutilisation bénéfique des déchets organiques à la fois comme amendement du sol et comme agent fertilisant. Cependant, les apports de compost pourraient aussi induire des pertes de P. Pour une utilisation durable des composts en agriculture, il faut minimiser les risques de pertes de P lors de leur application. L'objectif principal de la présente étude était d'effectuer une caractérisation de divers composts et de leurs formes de P, et d'évaluer la disponibilité du P lors d'un essai d'incubation.

Seize composts de natures diverses (composts de fumier d'animaux, de sous-produits de transformation de fruits de mer, pommes de terre, biosolides municipaux, résidus forestiers) et huit sols ont été analysés pour déterminer leurs principales caractéristiques chimiques et les différentes formes de P présentes grâce à une méthode d'extraction séquentielle. Sept composts et trois sols ont ensuite été sélectionnés pour réaliser un essai d'incubation afin d'évaluer l'influence des propriétés du sol sur les formes et la disponibilité du P des composts.

La première partie de l'étude a révélé que les caractéristiques chimiques de même que les formes du P étaient variables dans les différents composts. Les résultats de l'extraction séquentielle appliquée aux mélanges sol-compost ont par ailleurs indiqué que le P inorganique était une fraction dominante par rapport au P organique. De plus, la forme de P extraite en plus grande quantité dans les mélanges sol-compost était la fraction modérément labile soulignant l'importance du type du compost dans la gestion du P. Le comportement du P provenant de divers composts appliqués au sol lors d'un essai d'incubation a permis d'évaluer la biodisponibilité du P des composts, un aspect jusqu'à présent peu documenté. La diversité des composts et des sols canadiens utilisés constituait un aspect innovateur de cette étude.

Avant-Propos

Le présent projet de maîtrise a bénéficié du soutien de plusieurs personnes que je me dois de remercier ici. Je tiens ainsi à remercier mon directeur et ma co-directrice de recherche Dr. Léon-Étienne Parent et Dr. Noura Ziadi, ainsi que Dr. Martin Chantigny, pour leur support et leur disponibilité tout au long du travail. Toute ma reconnaissance va également à M. Bernard Gagnon qui a grandement facilité la réalisation de cette étude par ses nombreuses explications et sa grande disponibilité. De plus, je me dois de souligner la précieuse contribution de Mme Sylvie Michaud lors des analyses de laboratoire. Merci également à Agriculture et Agroalimentaire Canada pour le financement de cette étude.

Finalement, merci à mes ami(e)s (une pensée particulière pour Céline qui a contribué à rendre plus agréable mon séjour au Centre de recherche!) et à ma famille qui m'ont aidée à persévérer grâce à leurs encouragements qui furent très appréciés.

Table des matières

Résumé	iii
Avant-Propos	iv
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
1. Introduction	11
2. Revue de littérature	13
2.1 Le cycle du phosphore en agroenvironnement	13
2.2 Principes de base du compostage	15
2.3 Avantages et limites à l'utilisation des composts en agriculture	15
2.4 Formes du phosphore dans les sols agricoles et forestiers	17
2.5 Influence des propriétés des sols sur la disponibilité du P	18
2.5.1 Le pH et le contenu en Fe, Al et Ca	18
2.5.2 La texture	19
2.5.3 La matière organique	19
2.6 Formes du phosphore dans les amendements du sol (fumiers et composts)	19
2.7 Effets à long terme des applications de fumier et lisiers (matière organique) sur le P du sol	22
2.8 Méthodes d'extraction et de fractionnement du phosphore dans les sols agricoles et leurs amendements	22
3. Hypothèses de recherche	26
4. Objectifs de recherche	26
5. Matériel et méthodes	27
5.1 Caractérisation physico-chimique de divers composts et sols agricoles	27
5.1.1 Analyses de base des composts	27
5.1.2 Analyses de base des sols	29
5.2 Caractérisation et fractionnement du phosphore de divers composts et sols agricoles	30
5.3 Essai d'incubation	31
5.4 Analyses statistiques	32
6. Résultats et discussion	33
6.1 Caractérisation des sols et des composts	33
6.2 Essai d'incubation et résultats du fractionnement du P	43
6.2.1 Résultats du fractionnement du P à court terme	50
6.2.1.1 Effets des sols	52

6.2.1.2	Effet des composts.....	52
6.2.1.3	Comparaison inter-groupes.....	53
6.2.1.4	Comparaison intra-groupes.....	53
6.2.2	Résultats du fractionnement du P à long terme.....	54
6.2.2.1	Effet des composts.....	54
6.2.2.2	Effet du sol.....	55
6.2.2.3	Comparaison inter-groupes.....	55
6.2.2.4	Comparaisons intra-groupes.....	56
6.2.2.5	Interaction sols-composts.....	56
6.2.3	Résultats en fonction de la dose de P.....	58
6.2.3.1	Effet des composts.....	59
6.2.3.2	Interaction sols-composts.....	66
7.	Conclusion.....	68
	Bibliographie.....	70
	Annexe A :Données complémentaires sur la caractérisation des composts et des sols.....	75
	Annexe B :Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P suite à l'incubation.....	78

Liste des figures

Figure 2.1	Le cycle du phosphore (adapté de Pierzynski et al. 2002).....	13
Figure 2.2	Disponibilité du phosphore en fonction du pH (adapté de Busman et al. 2002).....	18
Figure 2.3	Mécanisme de compétition des ligands organiques avec le phosphate sur les sites de fixation de Al, Fe et Ca (adapté de Parent 2002).....	20
Figure 5.1	Méthode du fractionnement du P dans le sol de Hedley adaptée par O'Halloran et al. (1987), Tiessen et Moir (1993) et Zheng et al. (2001).....	30

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Résumé du fractionnement séquentiel de Hedley (adapté de Stevenson (1986)).....	24
Tableau 5.1	Description des composts.....	27
Tableau 5.2	Description des sols.....	29
Tableau 5.3	Quantité de compost ajoutée par 100 g de sol.....	31
Tableau 6.1	Caractéristiques des composts regroupés par la procédure Cluster et valeur de F associée à chaque paramètre	34
Tableau 6.2	Caractéristiques des sols regroupés par la procédure Cluster et valeur de F associée à chaque paramètre	36
Tableau 6.3	Caractéristiques chimiques des composts sélectionnés...	37
Tableau 6.4	Fractions du P des composts employés dans l'essai d'incubation.....	39
Tableau 6.5	Caractéristiques des sols sélectionnés pour l'essai d'incubation.....	41
Tableau 6.6	Fractions du P des sols employés dans l'essai d'incubation.....	41
Tableau 6.7a	Résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation.....	44
Tableau 6.7b	Résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation.....	45
Tableau 6.7c	Résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation.....	46
Tableau 6.8a	Résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation.....	47
Tableau 6.8b	Résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation.....	48
Tableau 6.8c	Résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation.....	49
Tableau 6.9	Interaction sols composts pour le P_o - $NaHCO_3$ à la 16 ^e semaine.....	57

Tableau 6.10	Interaction sols composts pour le P-HCl à la 16 ^e semaine.....	57
Tableau 6.11a	Fractionnement du P pour la 2 ^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	60
Tableau 6.11b	Fractionnement du P pour la 2 ^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	61
Tableau 6.11c	Fractionnement du P pour la 2 ^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	62
Tableau 6.12a	Fractionnement du P pour la 16 ^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	63
Tableau 6.12b	Fractionnement du P pour la 16 ^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	64
Tableau 6.12c	Fractionnement du P pour la 16 ^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	65
Tableau 6.13	Interaction sols composts pour le P-NaOH à la 16 ^e semaine.....	66
Tableau 6.14	Interaction sols composts pour le P-HCl à la 16 ^e semaine.....	67
Tableau 6.15	Interaction sols composts pour le P _o -NaHCO ₃ à la 16 ^e semaine.....	67
Tableau A.1	Caractéristiques chimiques des composts non sélectionnés pour l'essai d'incubation.....	75
Tableau A.2	Fractions du P des composts non sélectionnés pour l'essai d'incubation.....	76
Tableau A.3	Caractéristiques des sols non sélectionnés pour l'essai d'incubation.....	77
Tableau A.4	Fractions du P des sols non sélectionnés pour l'essai d'incubation.....	77
Tableau B.1a	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation.....	78
Tableau B.1b :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation.....	79
Tableau B.1c :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation.....	80

Tableau B.2a :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation.....	81
Tableau B.2b :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation.....	82
Tableau B.2c :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation.....	83
Tableau B.3 :	Analyse de variance : Interaction sol compost pour le Po-NaHCO ₃ à la semaine 16.....	84
Tableau B.4 :	Analyse de variance : Interaction sols-composts pour le P-HCl à la semaine 16.....	84
Tableau B.5a :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 2e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	85
Tableau B.5b :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 2e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	86
Tableau B.5c :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 2e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	87
Tableau B.6a :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 16e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	88
Tableau B.6b :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 16e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	89
Tableau B.6c :	Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 16e semaine d'incubation en fonction du P ajouté.....	90
Tableau B.7 :	Analyse de variance : Interaction sol compost pour le P-NaOH à la 16e semaine en fonction du P ajouté.....	91
Tableau B.8 :	Analyse de variance : Interaction sol compost pour le P-HCl à la 16e semaine en fonction du P ajouté.....	91
Tableau B.9 :	Analyse de variance : Interaction sols-composts pour le Po-NaHCO ₃ à la 16e semaine en fonction du P ajouté.....	92

1. Introduction

La question environnementale fait partie des enjeux mondiaux actuels. La protection des ressources naturelles est devenue une priorité. Les multiples problèmes environnementaux, de plus en plus criants, interpellent nos façons de faire.

L'agriculture intensive telle que pratiquée de nos jours peut, dans certains cas, représenter une menace pour la pérennité des ressources naturelles. Le devenir du phosphore (P) découlant des activités agricoles et son impact sur la qualité des cours d'eau représente une situation préoccupante. En effet, la pollution des cours d'eau par le ruissellement du P provenant de sols amendés avec du fumier représente l'une des plus grandes menaces pour la qualité de l'eau dans les pays développés (Turner et Leytem 2004). Une partie de la solution à ces problèmes réside dans le compostage puisqu'il favorise une réutilisation des déchets organiques à la fois comme amendements du sol et comme fertilisants.

Au Québec, la production et l'utilisation de compost à la ferme est une activité relativement récente. Elle est en majeure partie réalisée dans les entreprises de productions animales, en particulier les entreprises laitières. Le fumier de bovins laitiers est le matériau le plus utilisé, mélangé la plupart du temps à de la paille comme litière. Il y aurait environ 400 000 m³ de fumiers mis à composter chaque année au Québec (Robitaille et Gagnon 1994). De plus, une enquête de statistique Canada révèle que 37,8% des fermes du Canada compostent leurs fumiers. Toutefois, certains producteurs confondent compostage avec entreposage conventionnel de fumiers solides, ce qui peut gonfler les statistiques (Beaulieu 2004). Par ailleurs, environ 800 000 tonnes de résidus industriels, municipaux et agricoles sont compostées dans les centres de compostage du Québec (Potvin 2003).

De plus, au cours des dernières années, on dénote un intérêt grandissant pour les méthodes de production biologiques, favorisant ainsi l'usage de compost. Cependant, il faut se demander si les systèmes culturaux profitant d'apports de compost peuvent conduire à des pertes de P. Ce n'est que récemment que l'intérêt s'est tourné vers

l'influence du compostage sur la disponibilité du P dans le sol. Il serait ainsi important d'étudier la disponibilité du P provenant de diverses sources de composts afin de minimiser les risques environnementaux liés aux pertes de P du sol lors de l'application du compost.

2. Revue de littérature

2.1 Le cycle du phosphore en agroenvironnement

Dans la nature, le P existe sous forme de phosphate plutôt que sous sa forme élémentaire. Dans la solution du sol, les deux principales formes d'ions phosphatés sont le H_2PO_4^- (conditions acides) et le HPO_4^{2-} (conditions alcalines) (Busman et al. 2002). Ces ions subissent des transformations comme l'adsorption, la minéralisation, la précipitation, l'altération et la réorganisation microbienne. Ainsi, le cycle du P comprend le processus de prélèvement du P par la plante, les transformations des formes organiques du P et les réactions chimiques de fixation et d'immobilisation dans le sol (Figure 2.1). Le P est un élément peu mobile dans le sol. (Barber 1995; Holford 1997). Certaines formes de P dans le sol sont insolubles ou ont une solubilité modérée. Sous les conditions du Québec, les teneurs moyennes en P total de la couche arable des sols agricoles varient entre 200 et 5000 kg P ha⁻¹ (Giroux et Tran 1996).

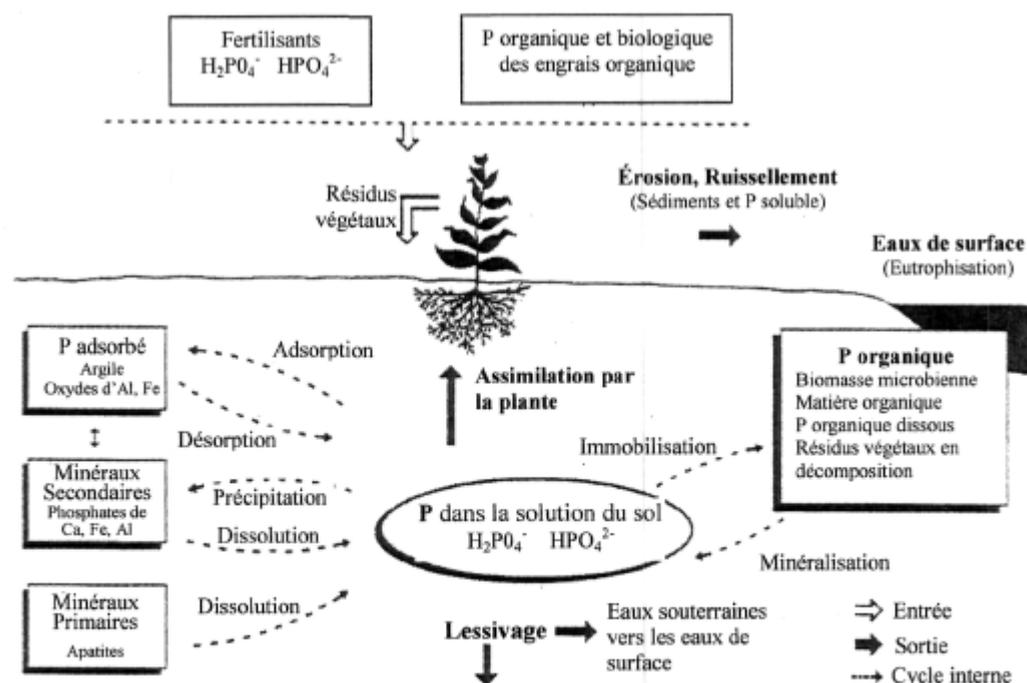


Figure 2.1 : Le cycle du phosphore dans le sol (adapté de Pierzynski et al. 2002)

Le P n'a pas d'effets toxiques directs sur les humains ou les animaux (Pierzynski et al. 2000), mais il peut causer l'eutrophisation des eaux de surface. L'eutrophisation se définit par une croissance accélérée des algues ou des plantes aquatiques. Les effets négatifs associés à ce phénomène sont importants d'un point de vue écologique, économique et sanitaire : dégradation de l'habitat (réduction de la teneur en oxygène dissous), réduction de la biodiversité, diminution de la valeur économique et des usages récréatifs (Pierzynski et al. 2000).

Plusieurs régions du monde présentent de fortes densités animales et des applications répétées d'effluents d'élevage basées sur les besoins des cultures en azote. Ceci a contribué d'une part à accroître les teneurs en P des sols au-delà des niveaux requis pour l'obtention de rendements optimaux et, d'autre part, à augmenter les pertes de P par ruissellement et lessivage. L'agriculture est souvent ciblée comme la cause principale de la teneur élevée du P dans les cours d'eau. De nombreuses recherches ont été menées pour mieux comprendre les mécanismes de mise en disponibilité du P des sols (Webber 2003). La notion de degré de saturation en P d'un sol a mené à une meilleure gestion du P. En effet, le degré de saturation en P donne une mesure de la proportion des sites d'adsorption déjà occupés par le P et détermine en même temps le potentiel de désorption du P (Beauchemin et Simard 1999). De plus, la saturation du sol en P selon la méthode Mehlich-III (Mehlich 1984) permet d'évaluer la capacité du milieu récepteur (P_{M-III}/A_{M-III}). Cet indice, intégré dans la réglementation environnementale québécoise, est employé comme concept limitant la fertilisation phosphatée des cultures (Khiari et al. 2000).

En somme, le développement de méthodes qui favorisent une réutilisation bénéfique des déchets organiques comme amendements du sol sans accroître les pertes en P vers les cours d'eau représente sans doute l'enjeu environnemental le plus considérable auquel nous faisons face aujourd'hui (Pierzynski et al. 2000).

2.2 Principes de base du compostage

Le compostage est un procédé biologique contrôlé de conversion et de valorisation des substrats organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique, etc.) en un produit stabilisé et assaini semblable à un terreau et riche en composés humiques (Mustin 1987). Le compostage est un mode de traitement sanitaire des produits organiques puisque, par la chaleur générée et en combinaison avec de nombreux facteurs internes, il se produit une destruction des germes et des parasites vecteurs de maladies (à l'exception des virus qui requièrent une augmentation de température beaucoup plus élevée pour en garantir la destruction), de même que des graines d'adventices indésirables. Au terme de son évolution, le compostage génère des substances humifiées comparables à celles retrouvées dans l'humus du sol. Comparativement aux autres amendements apportés au sol (les résidus de cultures, les fumiers frais, les boues de papetière, etc.), la matière organique d'un compost est dans un état de décomposition beaucoup plus avancé. En effet, durant la décomposition, les micro-organismes utilisent les sucres simples, les protéines et les acides aminés contenus dans la matière organique de départ comme source de carbone et d'azote. Cette décomposition par les micro-organismes est suivie d'un processus d'humification. Le compost doit cependant passer par une phase de maturation, où la biosynthèse des substances humiques prend place, avant de devenir stable et mûr (Mustin 1987).

2.3 Avantages et limites à l'utilisation des composts en agriculture

Dans les pays industrialisés, la consommation accrue pour les biens « jetables », combinée à une réglementation environnementale de plus en plus sévère, a remis en question les méthodes traditionnelles de disposition des déchets telles que l'enfouissement et l'incinération. On a donc dû se tourner vers d'autres façons de se départir des matières résiduelles : le compostage est l'une de ces solutions (Hue et al. 1994).

Dans le milieu agricole, la situation n'est pas différente. Au cours des dernières années, certaines régions ont vu leur agriculture s'intensifier de manière fulgurante, entraînant une production accrue de déjections animales. La gestion durable et efficace des

effluents d'élevage est, par conséquent, devenue une préoccupation majeure. Or, le compostage se présente comme une partie de la solution au problème puisqu'il permet, entre autres, de réduire la masse et le volume du fumier, ce qui permet d'apporter les éléments nutritifs au champ de façon plus économique (Larney et al. 2000). Le compostage augmente la valeur du fumier en tant qu'amendement et fertilisant (DeLuca et DeLuca 1997). La popularité grandissante de l'agriculture biologique, où le fumier composté constitue la principale source d'éléments nutritifs, est une autre raison justifiant l'intérêt porté aux composts (Lampkin 1990).

L'apport de compost au sol a plusieurs effets bénéfiques. La matière organique apportée augmente la rétention de l'eau dans le sol et stimule l'activité microbienne du sol. Une plus grande activité microbienne favorise la formation d'agrégats stables, ce qui diminue l'érodabilité du sol. Avec plus d'agrégats stables, la porosité du sol et l'infiltration augmentent, ce qui favorise le développement racinaire (moins de résistance à l'enfoncement et meilleurs échanges gazeux) (Mustin 1987). Le compost représente également une source d'éléments nutritifs. La valeur nutritive potentielle à court terme en N et en P est cependant dépendante de la source des matériaux compostés (Gagnon et Simard 1999). En somme, l'ajout de compost permet de corriger un déficit des sols en matière organique (Devisscher 1997) et constitue une source intéressante de nutriments pour les cultures (Gagnon et Simard 1999).

Par contre, l'utilisation des composts en milieu agricole n'est pas sans risque. En effet, au cours du processus de compostage, il y a d'importantes pertes de N et de K (Elustondo et Gagnon 1992). Pour les producteurs agricoles, cette pratique peut également s'avérer coûteuse et exigeante en main d'œuvre (VanHorn et al. 1994). De plus, lors de l'application au champ, du P provenant des composts peut être perdu par ruissellement de surface vers les cours d'eaux. Les risques de pertes en P associées aux composts pourraient représenter une limite à leur utilisation (Sharpley et Moyer 2000). Cependant, le degré et l'importance de la disponibilité du P à la suite de l'apport de compost au sol demeure un sujet peu documenté.

2.4 Formes du phosphore dans les sols agricoles et forestiers

Dans les sols, on retrouve le P sous différentes formes. La connaissance de la dynamique de ces fractions est utile pour prédire la bio-disponibilité du P et son risque de transfert vers les eaux de surface (Zheng et al. 2001). Ces formes peuvent être classées en différentes catégories comme suit (Stevenson 1986):

1. Formes solubles inorganiques et organiques présentes dans la solution du sol;
2. Phosphates inorganiques faiblement retenus (labile);
3. Phosphates de fer (Fe) et d'aluminium (Al) insolubles (dans les sols acides) et phosphates de calcium (Ca) insolubles (dans les sols calcaires et alcalins);
4. Phosphates fortement retenus par les oxydes hydratés de Fe et d'Al;
5. Phosphate fixé par les minéraux silicatés;
6. Formes organiques insolubles contenues dans la biomasse microbienne du sol, dans les résidus végétaux et animaux non décomposés et dans la matière organique du sol (humus).

Dans les sols, la majorité du P inorganique existe sous forme d'orthophosphates ou de dérivés d'acides phosphorique (H_3PO_4). Les principaux composés sont les phosphates de Ca, d'Al et de Fe en plus de certains autres cations sous formes de traces (Stevenson 1986).

Le P labile est une fraction d'importance en agriculture puisqu'elle est facilement disponible aux plantes et peut être facilement lessivée (Hedley et al. 1982; Sharpley et Moyer 2000). Cette fraction représente le P présent dans la solution du sol, le P organique facilement minéralisé et les phosphates faiblement retenus sur les colloïdes argileux. D'autre part, la biomasse microbienne du sol renferme de 1 à 2 % du P du sol. La majeure partie du P du sol (> 90%) est cependant sous forme insoluble ou fixée, comme les minéraux phosphatés primaires, le P des humus, les phosphates insolubles de Ca, de Fe et de Al et les phosphates fixés par les oxydes colloïdaux et les minéraux silicatés (Stevenson 1986). Ce P non labile est très peu disponible pour la plante. Les formes de P labile et non labile peuvent renfermer des constituants autant organiques qu'inorganiques.

2.5 Influence des propriétés des sols sur la disponibilité du P

Plusieurs études ont démontré l'influence des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol sur le comportement du P (Giroux et Tran. 1994). Ainsi, le pH, la concentration en Fe, Al et Ca, la texture et le contenu en matière organique sont autant de propriétés du sol qui affectent la disponibilité du P (Mkhabela et Warman 2005).

2.5.1 Le pH et le contenu en Fe, Al et Ca

Dans les sols alcalins (sols ayant un $\text{pH} > 7$), le Ca est le cation dominant qui réagit avec le phosphate. La réaction se produisant entre le Ca et le phosphate entraîne la formation de précipités insolubles, diminuant donc la solubilité et la disponibilité du P. Par ailleurs, l'acidité d'un sol exerce également un impact négatif sur la disponibilité du P, surtout quand le sol contient un niveau élevé d'aluminium, un élément dont la solubilité augmente avec l'acidité de la solution du sol. Ainsi, dans les sols acides (plus spécialement les sols ayant un pH inférieur à 5,5), l'ion dominant réagissant avec le phosphate est l'Al. Les composés résultant de ces réactions sont assez insolubles et ne sont généralement pas disponibles aux plantes. Les réactions réduisant la disponibilité du P se produisent à toutes les valeurs de pH mais sont plus prononcées dans les sols alcalins ayant un $\text{pH} > 7,3$ et dans les sols acides ayant un $\text{pH} < 5,5$ (Busman et al. 2002). Ainsi, la plus grande solubilité du P dans les sols minéraux se situe entre les pH de 6,2 et de 7,0 (Lindsay 1979). La figure 2.2 illustre l'importance du pH dans la fixation du P.

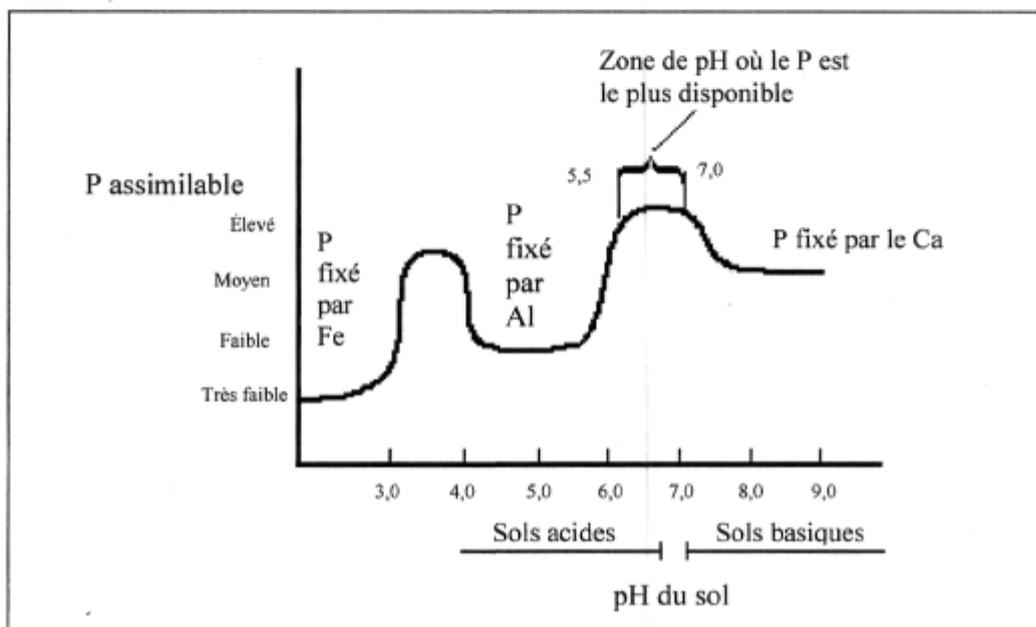


Figure 2.2 : Disponibilité du phosphore en fonction du pH (adapté de Busman et al. 2002)

2.5.2 La texture

D'autre part, l'effet de la texture du sol sur les formes et la distribution du P dans les sols a également été étudié (O'Halloran et al. 1987). Ainsi, la quantité de P inorganique en solution dans le sol augmente quand la teneur en argile diminue. Ceci s'expliquerait par le fait qu'à mesure que la quantité d'argile augmente, il y a augmentation du nombre de sites d'adsorption du P et, par conséquent, une diminution des quantités de P inorganique libre dans la solution du sol. Donc, plus de P devient échangeable avec la solution d'un sol ayant une teneur élevée en argile. La proportion du P total du sol sous forme inorganique et organique échangeable, labile, adsorbée sur les surfaces du sol ou liée aux composés de Fe et d'Al est inversement proportionnelle à la teneur en sable (O'Halloran et al. 1987).

2.5.3 La matière organique

La matière organique et ses produits de décomposition ont aussi leur influence sur la disponibilité et les formes du P dans les sols. Par l'action de certains mécanismes, où les acides organiques jouent un rôle prépondérant, la matière organique peut augmenter la disponibilité du P. Ce phénomène s'explique par différentes réactions ayant lieu dans le sol. Les acides organiques entrent en compétition avec le P dans le sol et peuvent occasionner une dissolution des complexes Fe-P ou Al-P. Ces acides organiques sont produits lors de la décomposition de la matière organique dans le sol et par certains microorganismes. Ces acides organiques se lient au Fe et à l'Al pour former des complexes stables favorisant le maintien du P en solution (Figure 2.3). Certains acides organiques provenant de l'humus et de la lignine peuvent se substituer au P pour former des complexes stables avec le Fe et l'Al. En somme, la décomposition de la matière organique favorise une compétition entre les acides organiques et le P pour les sites de fixation (Swenson et al. 1949). Par ailleurs, il y a augmentation des charges négatives du sol avec une augmentation du contenu en matière organique. L'attraction électrostatique du P est alors réduite, ce qui influence positivement le maintien en solution (Iyamuremye et Dick 1996).

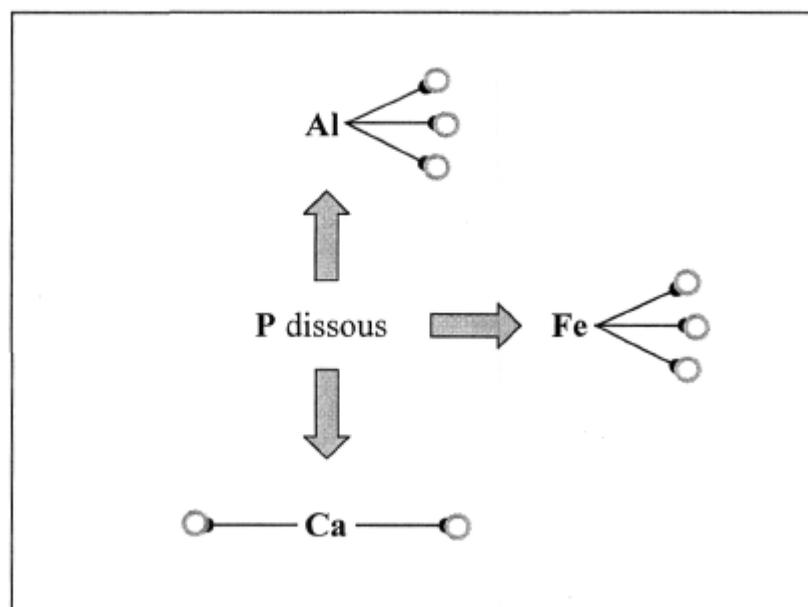


Figure 2.3 : Mécanisme de compétition des ligands organiques (représentés par les cercles gris) avec le phosphate sur les sites de fixation de Al, Fe et Ca (adapté de Parent 2002).

Par ailleurs, les amendements organiques comme les fumiers et les composts représentent une source de carbone stimulant l'activité des microorganismes. Cette activité libère des ligands rendus disponibles pour des réactions d'adsorption, de précipitation et de solubilisation du P dans le sol. D'autre part, les amendements organiques sont une source de P organique minéralisable (Iyamuremye et Dick 1996). La matière organique a donc un impact non négligeable sur les formes du P du sol.

2.6 Formes du phosphore dans les amendements du sol (fumiers et composts)

L'utilisation des composts en agriculture présente de nombreux avantages. Il est cependant nécessaire d'en déterminer le contenu en P et les formes présentes. Il existe différentes formes de P dans les fumiers ayant divers degrés de solubilité. Une caractérisation du P des fumiers représente donc une étape importante vers une meilleure compréhension de la dynamique du P des fumiers dans le sol en vue de réduire la pollution des eaux (Dou et al. 2000).

Le contenu total en P des amendements est utile pour déterminer le taux d'application et les apports à long terme (Barnett 1994b). Par contre, il est important de connaître la proportion du P qui est biodisponible et qui aura tendance à être plus facilement lessivée. Le mouvement du P vers les cours d'eau est fortement lié aux formes présentes. La concentration en P des fumiers est généralement beaucoup plus élevée que dans les sols (Barnett 1994b; Sharpley 1996; Dou et al. 2000). Dans les régions où les productions animales sont intensives, les pertes en P peuvent être importantes en raison de la concentration élevée de P soluble dans les fumiers et, par conséquent, dans la couche de surface des sols récepteurs. Ainsi, une large proportion du P des fumiers est susceptible d'être entraînée par ruissellement lorsque les conditions s'y prêtent. A des taux d'application équivalents, le P provenant du fumier se déplace plus profondément dans le sol que le P d'un fertilisant minéral. Ceci peut être dû au contenu plus élevé en P organique des fumiers par rapport aux fertilisants minéraux (Eghball et al. 1996).

Dou et al. (2000) ont décrit la première procédure de fractionnement du P pour des fumiers de différentes sources. Ils ont catégorisé le P des fumiers en P lipidique, P inorganique, P organique soluble à l'acide et P résiduel. Eghball et al. (1996) ont également procédé de cette façon. L'acide phytique était le composé principal du P organique dans la plupart des fumiers, suivi d'une portion plus faible de phospholipides. Barnett (1994a) indique que le P contenu dans les fumiers frais se compose de P organique et inorganique mais que le P inorganique constitue généralement la fraction dominante. De plus, le contenu total en P des fumiers varie considérablement en fonction des espèces et des conditions d'élevage.

Plus récemment, Turner et Leytem (2004) ont extrait des fractions solubles et faiblement solubles dans différents fumiers. La fraction soluble du P comprenait des phosphates et de faibles concentrations de phospholipides, d'acides nucléiques et de phosphates monoestérifiés. Ces composés sont non négligeables étant donné leur grande mobilité dans le sol et leur biodisponibilité dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. La fraction faiblement soluble renfermait aussi des phosphates et des acides phytiques dans des fumiers d'animaux nourris aux grains, et différents phosphates mono- et di-estérifiés dans des fumiers de bovins nourris aux fourrages.

Les formes du P dans les fumiers et les composts ont été déterminées par Sharpley et Moyer (2000). Les amendements organiques renfermaient en majeure partie du P inorganique (2520 à 30127 mg P kg⁻¹). Le P organique était présent en plus faible quantité (850 à 3920 mg P kg⁻¹), de même que la fraction du P stable et insoluble (101 à 487 mg P kg⁻¹). Les procédés de compostage et les matériaux utilisés influencent les quantités et la distribution relative des fractions inorganiques et organiques du P dans les composts. Le compostage se traduit par une augmentation de la teneur en P étant donné que cet élément est conservé alors que les pertes de CO₂ et NH₃ viennent réduire de 30 à 50% la masse de C et de N (DeLuca et DeLuca 1997). Par ailleurs, étant donné la prépondérance du P inorganique, d'importantes quantités de P peuvent être lessivées lorsque les composts sont appliqués au champ. Déterminer la disponibilité du P une fois l'amendement apporté au sol peut conduire à une meilleure gestion du P et ainsi à minimiser les risques environnementaux associés à leur application au champ.

2.7 Effets à long terme des applications de fumier et lisiers le P du sol

D'un point de vue environnemental, il est pertinent de se pencher sur le mouvement du P dans le sol à la suite d'applications à long terme de fumier puisque le P peut rejoindre les eaux de surface ou souterraines (Eghball et al. 1996). Sims et al. (2000) rapportent que des applications à long terme de fumier au champ peuvent conduire à une accumulation de P dans le sol et à un transfert accéléré du P vers les cours d'eau par ruissellement. De plus, à la suite d'applications répétées de fumier sur un sol neutre la fraction du phosphate de Fe peut augmenter en quantité et en pourcentage du P échangeable dû à la formation de complexes entre le P, le Fe et la matière organique (Weir et Soper 1962; Khasawneh et al. 1980).

2.8 Méthodes d'extraction et de fractionnement du phosphore dans les sols agricoles et leurs amendements

De nombreuses méthodes d'extraction du P sont utilisées dans différentes régions du monde, toutes ayant leurs avantages et leurs limites. Des solutions au pH modérément bas ou élevé libèrent le P associé à la phase minérale du sol. En alternance ou combiné à

ces changements de pH, on introduit des anions spécifiques qui entraînent le P en solution par compétition sur les sites d'adsorption ou en abaissant la solubilité des cations qui se lient au P dans le sol (Tiessen et Moir 1993).

Comme nous l'avons vu précédemment, des variations considérables existent entre les types et les quantités des différentes formes du P retrouvées dans le sol et dans les amendements organiques. Nos connaissances des formes du P du sol nous proviennent principalement de méthodes de fractionnement séquentiel basées sur la spécificité de certains réactifs chimiques envers différentes formes du P (Stevenson 1986). Caractériser les fractions du P du sol selon leur mode d'extraction et observer ensuite le changement de ces fractions produit par la croissance des plantes ou par des essais d'incubation, nous permet d'améliorer notre compréhension du cycle biogéochimique du P (Hedley et al. 1982).

Hedley et al. (1982) ont élaboré une procédure de fractionnement du P dont le but était de séparer les formes inorganiques et organiques du P en fractions variant quant à leur disponibilité aux plantes. Cette extraction séquentielle permet de quantifier le P inorganique labile, le P inorganique lié au Ca, au Fe et à l'Al, de même que le P organique sous des formes plus stables.

Le P inorganique biodisponible est d'abord extrait à l'aide d'une résine d'échange anionique. Ensuite, un extractif de force moyenne est utilisé pour retirer les formes inorganiques et organiques labiles. Ce P organique labile, ou facilement minéralisable, contribue au réservoir de P disponible aux plantes (Tiessen et Moir 1993). Selon la force de l'extractif, différentes formes de P peuvent être obtenues. Cette méthode, résumée au tableau 2.1, convient pour mesurer les changements du P du sol à court terme comme, par exemple, lors de l'addition de matière organique (Stevenson 1986).

Tableau 2.1 : Résumé du fractionnement séquentiel de Hedley (adapté de Stevenson (1986))

Fraction	Traitement	Explication
1	Extraction à l'aide d'une résine d'échange anionique	Libère le P inorganique le plus biodisponible
2a	Extraction au NaHCO_3 0,5 M	Libère le P inorganique et organique labile adsorbés sur les minéraux du sol et une petite quantité de P microbien
2b	Traitement au chloroforme (CHCl_3) suivi d'une extraction au NaHCO_3 0,5 M	La différence entre 2a et 2b représente le P contenu dans les cellules microbiennes détruites par la fumigation
3	Extraction au NaOH 0,1 M	Libère les formes inorganiques et organiques retenues plus fortement par les composés de Fe et d'Al sur les surfaces minérales
4	Extraction au NaOH 0,1 M suivi d'une ultrasonification	Permet l'extraction du P inorganique et organique retenu sur la surface interne des agrégats de sol
5	Extraction au HCl 1M	Libère le P retenu par les minéraux de type apatite
6	Oxydation (H_2O_2) et digestion acide (H_2SO_4) du résidu final de sol	Formes stables du P organique et composés relativement insolubles de P inorganique

Dans le cadre d'une étude portant sur l'influence de la texture et des pratiques culturales sur les formes du P du sol, O'Halloran et al. (1987) ont employé la méthode de fractionnement originale de Hedley et al. (1982). Ils y ont par contre apporté certaines modifications. Ainsi, la seconde étape d'extraction à l'hydroxyde de sodium suivie de l'ultrasonification des échantillons a été éliminée puisque des analyses préliminaires avaient révélé que moins de 5% du P se retrouvait dans cette fraction. De plus, ils ont acidifié une portion des extraits au bicarbonate de soude et à l'hydroxyde de sodium

afin de faire précipiter la matière organique dans ces deux fractions. Comme la matière organique peut causer des interférences et conduire à une surestimation du P, on minimise le problème en la faisant précipiter.

3. Hypothèses de recherche

3.1 Hypothèse 1

Les formes du phosphore dans différents composts déterminées selon une méthode de fractionnement séquentiel sont variables qualitativement et quantitativement.

3.2 Hypothèse 2

L'interaction entre les sols et les composts détermine la disponibilité à court terme du phosphore des composts.

4. Objectifs de recherche

L'objectif principal du présent projet de recherche est d'évaluer les formes et la disponibilité du P dans les composts utilisés comme amendements des sols agricoles lors d'un essai d'incubation effectué en laboratoire. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

4.1 Objectif 1

Effectuer une caractérisation détaillée d'une série de composts provenant de l'Île-du-Prince-Édouard, du Québec, du Manitoba, de l'Alberta et de la Colombie-britannique et les classer selon leurs propriétés physiques et chimiques de base et les formes du phosphore.

4.2 Objectif 2

Sélectionner des composts à partir des classes définies pour l'objectif 1 et évaluer leurs effets sur des sols dont les propriétés physiques et chimiques de base et les formes de phosphore varient.

5. Matériel et méthodes

5.1 Caractérisation physico-chimique de divers composts et sols agricoles (objectif 1)

5.1.1 Analyses de base des composts

Seize composts provenant de différentes régions du Canada ont été analysés : fumier de porcs sur litière, de bovins laitiers, de moutons, de poulets et de bovins de boucherie, sous-produits de la transformation de fruits de mer ou de pommes de terre, déchets et biosolides municipaux et résidus forestiers (Tableau 5.1). Ces composts provenaient de diverses expériences à long terme à travers le pays dans le cadre d'une étude nationale sur la disponibilité du P des composts utilisés en horticulture.

Tableau 5.1 : Description des composts

Code	Origine	Matériaux de base	Stade (âge)
P.E.I.-1	Î.-P.-É ¹	Homard	15 mois
P.E.I.-2	Î.-P.-É	Moules	31 mois
P.E.I.-3	Î.-P.-É	Pommes de terre	3 mois
P.E.I.-4	Î.-P.-É	Déchets municipaux	8-12 semaines
QUE-1	Québec	Fumier de porcs	Stabilisé
QUE-2	Québec	Fumier de bovins laitiers	12 mois
QUE-3	Québec	Fumier de moutons	24 mois
QUE-4	Québec	Fumier bovins laitiers/poulets	15 mois
BRA-1	Brandon	Fraction solide de lisier de porcs	14 mois
BRA-2	Brandon	Fumier de porcs	11 mois
LETH-1	Lethbridge	Fumier de bovins de boucherie	6 mois
LETH-2	Lethbridge	Fumier de bovins de boucherie	6 mois
SUM-1	Summerland	Biosolides municipaux	5 mois
AGA-1	Agassiz	Fumier de poulet	inconnu
AGA-2	Agassiz	Résidus forestiers	4 mois
AGA-3	Agassiz	Fumier de poules pondeuses	3 mois

¹ Î.P.E. : Île-du-Prince-Édouard

Le pH à l'eau du compost fut mesuré dans un mélange de rapport 1:4 compost : eau, agité pendant 30 minutes, suivi d'un temps d'équilibre de 30 minutes. La conductivité électrique a été mesurée dans un mélange de rapport 1:10, agité pendant 30 minutes. Le contenu en matière sèche fut déterminé par séchage à 55 °C jusqu'à poids constant; le carbone (C) total par combustion sèche (LECO CNS-1000, Leco Corp., St. Joseph, MI); le C organique soluble par combustion sèche après traitement au HCl 4 M pour éliminer les carbonates (on agite le mélange régulièrement pendant 1h, puis on fait sécher à 55°C pendant 2h 30 pour permettre l'évaporation du HCl) (Goh et al. 1993). Les teneurs en N, P, K, Ca et Mg totaux ont été mesurées après digestion acide au H₂SO₄-H₂O₂ (Isaac et Johnson 1976). Le N et le P furent déterminés à l'aide d'un colorimètre automatisé en flux continu (Modèle QuickChem 8000, Lachat Instruments) et K, Ca et Mg par absorption atomique (Perkin Elmer 3300, Überlingen, Allemagne). Les rapports C/N et C/P ont été calculés. Les éléments solubles à l'eau, à savoir le P-PO₄, le N-NO₃, le N-NH₄, le Cu, le Zn et l'Al ont été extraits dans un mélange de rapport 1:4 compost : eau agité pendant 30 minutes, centrifugé pendant 10 minutes à 15000 x g suivi d'une filtration à 0,45 µm sur papier filtre. Le contenu en P-PO₄ fut déterminé par colorimétrie (Murphy et Riley 1962). Le dosage du Cu, Zn, et Al a été réalisé par spectrométrie d'absorption atomique (Perkin Elmer 3300, Überlingen, Allemagne). Le N-NO₃ et le N-NH₄ furent aussi extraits au KCl 1M (Maynard et Kalra 1993) selon un rapport 1:8 compost : KCl (agitation de 30 minutes, filtration sur papier filtre Whatman) et dosés plus tard avec un colorimètre automatisé en flux continu (Modèle QuickChem 8000, Lachat Instruments). Les éléments mineurs totaux (Cu, Zn, Fe) ont été déterminés après calcination à 500 °C pendant 4 h. Les cendres ont été récupérées dans du HCl 2 N puis dosées par spectrométrie d'absorption atomique.

Le P organique des composts a également été calculé suivant la méthode de Kuo (1996). Cette analyse a été réalisée uniquement sur les composts sélectionnés pour l'essai d'incubation (objectif 2). Le P total et le P inorganique ont été extraits à l'aide d'acide sulfurique (H₂SO₄, 0,5 M). Le mélange a été agité pendant 16 h à 300 x g à l'aide d'un agitateur horizontal, centrifugé pendant 30 minutes à 2000 x g puis filtré sur Büchner à 0,45 µm sous vide. Une calcination à 550°C a précédé l'extraction du P total. La différence entre le P total et le P inorganique a permis de calculer le P organique (Kuo 1996).

5.1.2 Analyses de base des sols

Huit sols de provenance diverses (Île-du-Prince-Édouard, Québec, Manitoba, Alberta, et Colombie-Britannique) ont été caractérisés (Tableau 5.2). Tout comme pour les composts, ces sols provenaient d'expériences à travers le Canada dans le cadre d'une étude nationale portant sur la disponibilité du P des composts utilisés en horticulture.

Tableau 5.2 : Description des sols

Code	Origine	Texture	Culture présente
sol P.E.I.-1	Î.-P.-É ¹	Loam sableux fin	Pommes de terre
sol P.E.I.-2	Î.-P.-É	Loam sableux fin	Pommes de terre
sol BRA	Brandon	Loam argileux	Luzerne
sol SUM	Summerland	Sable loameux	Pommiers
sol QUE-1	Québec	Sable fin loameux	Pommes de terre
sol QUE-2	Québec	Loam sableux	Pommes de terre
sol AGA	Agassiz	Loam limoneux	Framboises
sol LETH	Lethbridge	Loam sableux fin	Pommes de terre

¹ Î.P.E. : Île-du-Prince-Édouard

Le pH à l'eau des sols fut mesuré dans un rapport sol : eau de 1:2 et la conductivité électrique dans un mélange de rapport 1:10. Le C total fut déterminé par combustion (CNS-1000, Leco Corp., St. Joseph, MI). Le N-NO₃ et le N-NH₄ ont été extraits au KCl 2 M (Maynard et Kalra 1993) dans un rapport 1:10 et dosés à l'aide d'un colorimètre automatisé en flux continu (Modèle QuickChem 8000, Lachat Instruments). On a aussi mesuré le P extractible au Mehlich-3 (Mehlich 1984). Finalement, la texture de ces huit sols a été déterminée par la méthode de l'hydromètre après oxydation de la matière organique (Sheldrick et Wang 1993).

5.2 Caractérisation et fractionnement du phosphore des composts et des sols agricoles

Le fractionnement du P a été effectué selon la méthode de Hedley et al. (1982). Le P est extrait de façon séquentielle (Figure 5.1) au moyen (1) d'une résine d'échange pour obtenir le P le plus biodisponible, (2) au NaHCO_3 pour extraire le P labile (rapidement disponible), (3) au NaOH pour extraire le P associé au Fe et à l'Al, et (4) au HCl , pour le P lié au Ca. Ceci laisse le P résiduel qui est stable et insoluble. Le P organique des fractions extraite au NaHCO_3 et au NaOH fut calculé en soustrayant, pour chaque fraction, le P inorganique du P total des extractions. Le pourcentage de récupération du P est calculé en additionnant toutes les fractions et en les comparant au P total d'échantillons digérés à l'autoclave. La méthode originale de Hedley et al. (1982) a été modifiée par O'Halloran et al. (1987), Tiessen et Moir (1993) et Zheng et al. (2001).

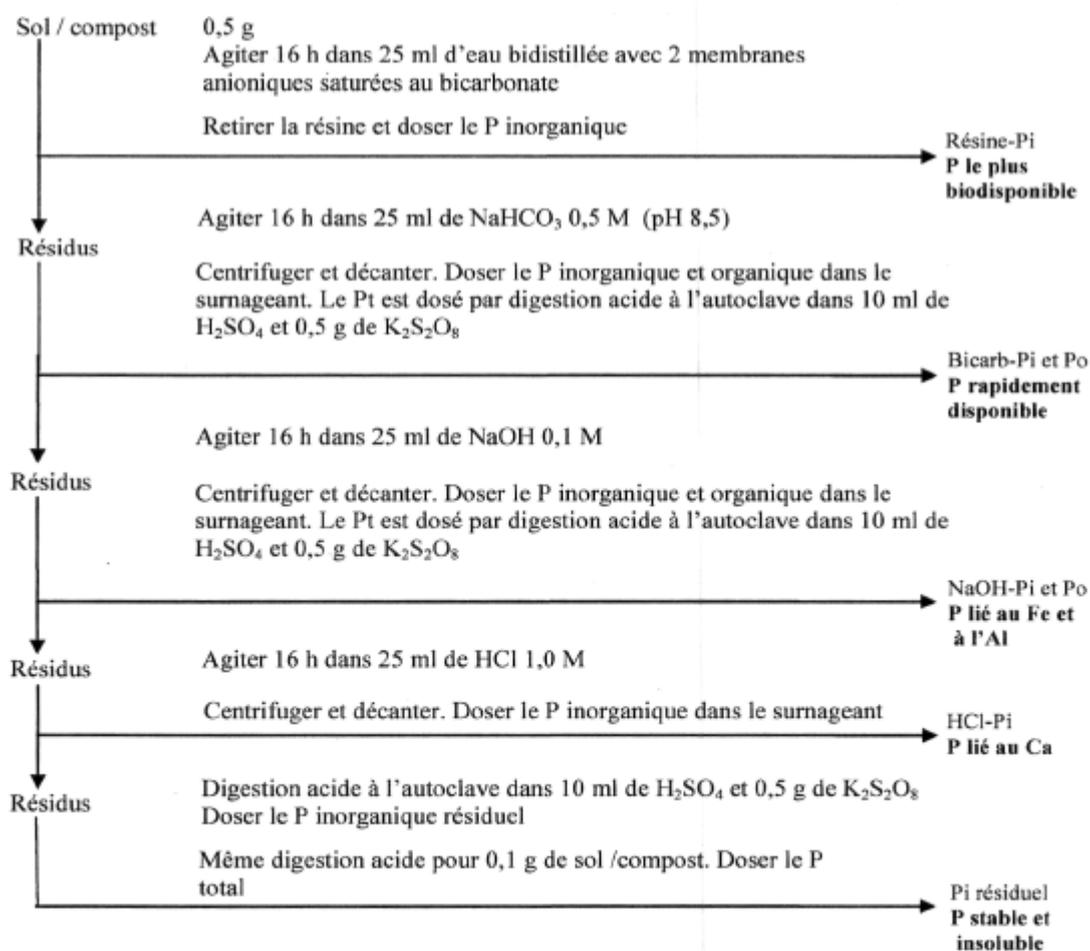


Figure 5.1 : Méthode du fractionnement du P dans le sol de Hedley adapté selon O'Halloran et al. (1987), Tiessen et Moir (1993) et Zheng et al. (2001)

Les extractions ont été dosées par colorimétrie par la méthode à l'acide ascorbique (Watanabe et Olsen 1965). De plus, tel que recommandé par Tiessen et Moir (1993), les extraits Pi-NaHCO_3 et Pi-NaOH ont été acidifiés au H_2SO_4 0.9 M avant de les doser pour éliminer les interférences par la matière organique.

5.3 Essai d'incubation

L'incubation s'est déroulée sur une période de 16 semaines. Sept composts furent mélangés à 100 g de sol (3 sols). Une dose d'application de $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ fut ajustée en se basant sur le P total des composts et en se référant aux recommandations pour la production de pommes de terres (CRAAQ 2003). Cette culture fut choisie puisque les trois sols sélectionnés sont cultivés en pommes de terre. Une dose de $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ représente 0,01 g de P pour 100 g de sol. En moyenne, entre 0,795 et 9,813 g de compost ont été ajoutés (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 : Quantité de compost ajoutée par 100 g de sol

Composts	g compost/100g de sol
PEI-1	1,185
PEI-3	9,813
QUE-2	5,914
BRA-1	2,210
LETH-1	1,927
SUM-1	1,211
AGA-3	0,795

Un traitement témoin de même qu'un fertilisant minéral (KH_2PO_4) furent également inclus dans le dispositif expérimental. Les unités expérimentales ont été disposées dans une chambre d'incubation selon un plan en blocs complets aléatoires. Les mélanges furent conservés dans des pots Mason™ de 500 ml à 25°C et un potentiel hydrique de -

50 kPa. Le contrôle de l'humidité du mélange fut effectué 2 fois par semaine en moyenne par pesée sur une balance et par ajout d'eau pour compenser l'évaporation. Un échantillonnage répétitif a eu lieu après la 2^e et la 16^e semaine d'incubation pour le fractionnement du P (section 2.2) et le pH à l'eau. L'échantillonnage après deux semaines d'incubation permettait de vérifier les effets à court terme des composts, tandis que la période de 16 semaines d'incubation simulait la durée d'une saison de croissance typique.

5.4 Analyses statistiques

La procédure Cluster de SAS (SAS Institute 1999) a permis de former différents groupes de composts et de sols selon un ensemble de caractéristiques de base et liées aux formes de phosphore. En se basant sur les résultats de la procédure Cluster, sept composts ont été sélectionnés pour l'essai d'incubation dans trois sols selon une expérience factorielle avec trois répétitions.

L'effet de composts sur le P des sols ainsi que l'interaction entre le type de compost et le type de sol ont été étudiés par une analyse de variance. Les données ont été transformées (transformations logarithmique et racine carrée inverse) lorsque nécessaire afin d'améliorer l'homogénéité de leur distribution. Les comparaisons entre les composts ont été réalisées par des contrastes en se basant sur les groupes de composts formés dans la première partie de l'expérience selon un ensemble de caractéristiques de base et liées aux formes de P. Les données ont aussi été analysées en terme du pourcentage du P total ajouté. Pour chaque fraction, l'augmentation nette a été déterminée en soustrayant la quantité de P mesurée dans le sol non amendé de la quantité contenue dans le sol amendé. Cette quantité était ensuite divisée par la quantité totale de P ajouté (Équation 1).

Équation 1 : Augmentation du P = $(P \text{ du sol traité} - P \text{ du sol témoin}) / P \text{ ajouté}$

6. Résultats et discussion

6.1 Caractérisation des sols et des composts (composition chimique des composts)

Le tableau 6.1 présente les résultats de l'analyse de groupement pour les composts. Trois groupes ont été formés, le 1^{er} regroupant les composts ayant une teneur plus faible en P (entre 1,6 et 3,8 g P kg⁻¹), le 2^e, les composts ayant une teneur élevée en P (entre 7,1 et 18,1 g P kg⁻¹) et le 3^e, les composts ayant une teneur intermédiaire en P (entre 2,3 et 8,5 g P kg⁻¹). Ainsi, de 2 à 3 composts ont été sélectionnés dans chacun des groupes pour l'essai d'incubation.

Dans le premier groupe, les composts PEI-3 et QUE-2 ont été sélectionnés. Le compost PEI-3 est composé de résidus de pommes de terre (le seul compost d'origine végétale dans cette étude) et est typique de la région de l'Île-du-Prince-Édouard. Les résidus de la culture de pommes de terre sont effectivement générés en grandes quantités dans cette province (Charmley et al. 2006). Le compost QUE-2 est un compost de bovins laitiers, élevage très commun au Québec. Les composts BRA-1, SUM-1 et AGA-3 ont été sélectionnés à partir du 2^e groupe. Le BRA-1 est fait à partir de la fraction solide du lisier de porc. Ce compost a été préféré à BRA-2 puisque ce dernier se composait de fumier de porcs sur litière, un type d'élevage moins répandu que le mode d'élevage conventionnel. Le compost SUM-1 est le seul provenant de biosolides municipaux. La production avicole, répandue en Colombie-Britannique, est représentée par le compost AGA-3, un compost de fumier de poules pondeuses. Ce dernier fut préféré aux autres composts d'Agassiz car il était plus facilement disponible sur le marché. Dans le 3^e groupe les composts LETH-1 et PEI-1 ont été sélectionnés. Le compost LETH-1 a été retenu puisqu'il était constitué à partir de fumier de bovins de boucherie sur litière de paille, un matériel communément utilisé dans les composts de l'ouest canadien. L'unique compost à base de résidus de fruits de mer est le PEI-1. L'industrie de la transformation des fruits de mer, comme le homard et le crabe, génère des quantités considérables de résidus qui peuvent être compostés (Macleod et al. 2006).

Tableau 6.1 : Caractéristiques des composts regroupés par la procédure Cluster et valeur de F associée à chaque paramètre.

composts Paramètres	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	valeurs F
	PEI-3, LETH-2, QUE-2, QUE-3	QUE-1, QUE-4 BRA-1, SUM-1, AGA-1, AGA-2, AGA-3	BRA-2, LETH-1, PEI-1, PEI-2, PEI-4	
PO ₄ soluble à l'eau (mg P kg ⁻¹)	461 ab	1342 a	127 b	7.6**
C soluble (mg C kg ⁻¹)	3441 a	4289 a	2402 a	1.3
C soluble / C total (%)	0.96 a	1.17 a	1.67 b	0.8
C total (%)	37.3 b	36.4 a	15.4 b	31.5**
C organique (%)	35.7 a	31.6 a	10.0 b	25.5**
P total de la digestion (g P kg ⁻¹)	2.93 a	11.6 b	4.59 c	15.0**
Ratio C/P	991 a	814 a	256 a	5.1*
<i>Résultats du fractionnement du P</i>				
P total du fractionnement (mg P kg ⁻¹)	5610 b	11400 a	6890 b	21.0**
P résine (mg P kg ⁻¹)	1688 b	4756 a	1518 b	9.3**
P résine / P total (%)	56.3 a	40.3 ab	29.8 b	3.2
P NaOH (mg P kg ⁻¹)	335 b	1147 a	367 b	5.7*
P NaOH / P total (%)	11.2 a	9.93 a	8.26 a	0.2
P HCl (mg P kg ⁻¹)	387 c	3927 a	1502 b	27.3**
P HCl / P total (%)	13.0 b	37.0 a	35.8 a	4.9*
P labile (mg P kg ⁻¹)	2086 b	5828 a	2516 b	8.6**
P labile / P total (%)	69.5 a	48.7 b	48.5 b	4.0*
P organique (mg P kg ⁻¹)	379 a	538 a	386 a	0.5
P organique / P total (%)	12.9 a	4.59 b	8.58 ab	5.0*
P inorganique (mg P kg ⁻¹)	2452 b	11072 a	4068 b	21.2**
P inorganique / P total (%)	81.8 b	94.0 a	86.3 ab	5.3*
Autres paramètres				
pH _{eau}	7.37 ab	6.53 b	7.85 a	2.7
Humidité (g/kg)	600 a	604 a	409 b	5.0*
Ratio C/N	26.1 a	15.8 a	7.6 b	25.6**
N-NO ₃ KCl (mg/kg)	1075 a	1374 a	739 a	0.6
N-NH ₄ KCl (mg/kg)	167 a	263 a	33.4 a	1.4
N min KCl (mg/kg)	1257 ab	2259 a	819 b	3.4
Cond. Elec. (mS/cm)	6373 a	7903 a	7491 a	0.2
N total (g/kg)	15.4 b	22.5 a	13.8 b	6.7**
Carbonates CaCO ₃ (%)	8.50 b	19.3 b	39.8 a	7.6**

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement.

Les paramètres liés aux diverses fractions du P des composts ont contribué de façon prépondérante dans la formation des groupes (Tableau 6.1). Les teneurs en P total, P-HCl et P inorganique ont été particulièrement discriminantes. Le P résine et le P labile ont aussi eu un effet discriminant pour la formation de groupes, mais à un degré moindre. Le C total, le C organique et le rapport C/N ont également été discriminants pour le regroupement (Tableau 6.1). La nature des matériaux d'origine et un degré différent de maturité pourraient expliquer pourquoi ces paramètres ont permis de séparer les composts.

Le tableau 6.2 présente les résultats de l'analyse de regroupement pour les sols. Quatre groupes de sols ont été formés. Deux de ces groupes ont dû être éliminés au départ en raison de leur teneur élevée en P (groupe 2) et en argile (groupe 4). Ces variables auraient pu diminuer la réponse du sol aux apports de P. Trois sols ont donc été sélectionnés à partir des groupes 1 et 3. Le sol PEI-2 est acide et représentatif des provinces maritimes tandis que le sol LETH est alcalin et représentatif des conditions de l'ouest canadien. Le sol QUE-2 est acide et a été retenu comme sol représentatif des sols de l'est canadien. Les trois sols retenus avaient tous l'avantage d'être sous culture de pomme de terre au moment de l'échantillonnage. Ceci justifiait des apports de P sous forme de composts en se basant sur les recommandations de fertilisation pour la pomme de terre. À noter que dans le tableau 6.2, les ratios ont été calculés avec le P total issu de la digestion, ce qui explique pourquoi la somme du P organique et du P inorganique est différente de la valeur du P total présenté.

Tableau 6.2 : Caractéristiques des sols regroupés par la procédure Cluster et valeur de F associée à chaque paramètre

sols	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	valeurs F
	PEI-1, PEI-2	AGA, QUE-1	LETH, QUE-2, SUM	BRA	
Paramètres					
pH _{eau}	5,17 b	5,72 ab	7,17 a	7,45 a	6,2
P M-III (mg P kg ⁻¹)	114 a	350 a	75,2 a	325 a	2,9
<i>Résultats du fractionnement du P</i>					
P total du fractionnement (mg P kg ⁻¹)	781 a	1889 b	880 a	1250 ab	4,9
P NaOH (mg P kg ⁻¹)	349 b	790 a	146 b	188 b	12,2*
P NaOH / P total	0,474 a	0,479 a	0,186 b	0,153 ab	5,1
P HCl (mg P kg ⁻¹)	103 b	305 a	292 a	300 a	10,0*
P HCl / P total (%)	0,139 b	0,185 ab	0,479 a	0,245 ab	4,1
P labile (mg P kg ⁻¹)	226 b	449 a	111 c	509 a	41,4**
P labile / P total (%)	0,306 ab	0,274 b	0,169 c	0,416 a	12,5*
Autres paramètres					
Conductivité électrique (mS cm ⁻¹)	308 a	368 a	470 a	936 a	2,8
C total (g C kg ⁻¹)	20,3 a	22,6 a	11,3 a	60,8 a	2,3
C organique (g C kg ⁻¹)	15,4 a	17,1 a	7,9 a	427 a	2,1
Carbonates CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	240 a	241 a	297 a	298 a	0,4
Argile(g kg ⁻¹)	120 a	110,5 a	109 a	317 a	1,6
P organique (mg P kg ⁻¹)	54.4 a	84.2 a	-50.5 a	58.0 a	0,8
P organique / P total	0,0745 a	0,0460 a	-11.8 a	0,0470 a	1,3
P inorganique (mg P kg ⁻¹)	622 b	1458 a	592 b	938 ab	17,0**
P inorganique / P total	0,844 a	0,885 a	0,953 a	0,766 a	0,5

*, ** Significatif à $P=0,05$ et $P=0,01$ respectivement.

Les valeurs de F les plus discriminantes ont permis de regrouper les sols. Le P labile, le P-NaOH et le P-HCl montraient les valeurs de F les plus élevées.

Les résultats de la caractérisation des composts sélectionnés à l'aide de la procédure Cluster sont présentés au tableau 6.3. Les résultats de la caractérisation pour les autres composts (non-sélectionnés) se retrouvent à l'annexe A.

Tableau 6.3 : Caractéristiques chimiques des composts sélectionnés

Composts	pH	Humidité	P- PO ₄ (eau)	N- NO ₃ (KCl)	N-NH ₄ (KCl)	C soluble	C organique	C total	Carbonates CaCO ₃	Conductivité électrique	N total	P total (digestion)	P _i ¹	P _o ¹
		--g kg ⁻¹ --	-----mg kg ⁻¹ -----			-----%-----				-----mS cm ⁻¹ -----		-----g kg ⁻¹ -----	----mg kg ⁻¹ ----	
PEI-1	8.20	459	49	686	10	656	74,0	15,7	53	4337	10.76	8.51	9758	3798
PEI-3	7.51	660	403	15	1136	3664	35,7	33,8	—	2135	11.02	1.64	2149	397
QUE-2	7.87	750	737	3216	254	3723	42,4	43,6	3	8852	17.74	3.69	3153	1097
BRA-1	7.28	654	765	534	425	3166	22,9	28,9	21	4585	24.78	7.14	9798	1413
LETH-1	7.83	339	104	742	5	3939	99,0	13,3	25	14050	13.88	4.29	3960	1486
SUM-1	4.65	606	3151	2075	1013	2874	30,6	34,7	12	6232	20.75	11.43	15555	2503
AGA-3	6.88	505	1048	1136	1525.7	6044	27,8	32,9	16	15617	19.3	13.85	18052	3037

¹Kuo (1996)

Tableau 6.3 : Caractéristiques chimiques des composts sélectionnés (suite)

Composts	Cu total	Zn total	Fe total	K total	Ca total	Mg total	Cu eau	Zn eau	Al eau
	-----mg kg ⁻¹ -----			-----g kg ⁻¹ -----			-----mg kg ⁻¹ -----		
PEI-1	23.7	168.0	1877.5	7.6	80.0	5.2	0.221	0.068	1.196
PEI-3	2.5	22.0	1730.6	8.8	0.4	1.0	0.388	0.855	6.015
QUE-2	18.8	168.5	471.6	22.9	11.6	3.3	1.069	3.462	0.726
BRA-1	126.1	431.5	1983.4	6.2	25.5	7.1	2.300	4.058	2.372
LETH-1	23.9	133.5	4692.7	21.4	24.8	6.9	0.552	0.238	5.111
SUM-1	274.7	179.5	2739.1	5.8	11.6	3.8	0.916	1.748	3.158
AGA-3	101.6	848.0	3128.7	17.1	36.1	5.9	3.725	9.724	4.303

Les propriétés chimiques variaient considérablement d'un compost à l'autre (Tableau 6.3). Ces différences peuvent en bonne partie s'expliquer par la diversité des matériaux d'origine ayant servi à composer les composts à l'étude (Tableau 5.1) (Sharpley et Moyer 2000). Dans l'étude actuelle, le contenu en N total des composts à base de solides de fumiers animaux (BRA-1, QUE-2, LETH-1) était plus élevé que les composts contenant peu ou pas de fumier (PEI-1 et PEI-3) (Tableau 6.3). Les teneurs les plus élevées en P-PO₄, P total et P inorganique se retrouvaient dans le compost de biosolides municipaux (SUM-1). Le compost à base de résidus de pommes de terre (PEI-3) montrait la teneur en P total la plus faible.

Le pH des composts était en majorité alcalin, exception faite du compost de biosolides municipaux (SUM-1) qui était plus acide car ce compost contenait des résidus forestiers comme matériaux secondaires (Tableau 6.3). Avec un pH de 8,2, le compost de résidus de fruits de mer était le plus alcalin. Ceci pourrait s'expliquer par sa plus forte teneur en calcium.

Tableau 6.4 : Fractions du P des composts employés dans l'essai d'incubation

Composts	P-résine	P-NaHCO ₃	P-NaOH	P-HCl	P-résiduel	P-total ^z	P-total digestion	P labile ^y	P-organique	P-inorganique	
-----mg kg ⁻¹ -----											
---groupe 1---	P.E.I.-3	1101	460	598	296	66	2522	2385	1562	540	1916
	QUE-2	2173	178	267	450	179	3247	3964	2351	289	2779
---groupe 2---	BRA-1	4438	747	621	2181	266	8252	9419	5184	668	7318
	SUM-1	5690	941	2348	2994	133	12105	12033	6631	285	11687
	AGA-3	4130	1638	1623	8316	218	15925	14464	5768	111	15595
---groupe 3---	P.E.I.-1	2060	2556	289	3993	235	9134	8885	4617	493	8406
	LETH-1	1625	840	427	780	376	4048	4885	2465	456	3216

^z Ce P-total est la somme des fractions P-résine, P-NaHCO₃, P-NaOH, P-HCl et P résiduel.

^y P labile = P-résine + P-NaHCO₃

Le contenu en P total des composts variait de 2385 mg P kg⁻¹ dans le compost de pommes de terre à 14 464 mg P kg⁻¹ dans le compost de volaille, la moyenne étant de 8005 mg P kg⁻¹ (Tableau 6.4). De façon générale, la majeure partie du P des composts se retrouvait dans la fraction extraite à l'eau (P-résine représentant en moyenne 43% du P total). Une plus grande proportion du P total était du P inorganique. Sharpley et Moyer (2000) ont également extrait de leurs composts une plus grande proportion du P total sous forme de P inorganique. À l'inverse, le P organique formait, une plus faible proportion du P total (Tableau 6.4). Malgré sa faible concentration, le P organique représente tout de même une forme importante d'un point de vue environnemental puisqu'il est faiblement retenu par le sol et peut donc se déplacer plus facilement que le P inorganique à travers le profil de sol (Turner et Leytem 2004).

Les résines ont extrait 56% du P total dans le 1^{er} groupe de composts, 42% dans le 2^e et 31% dans le 3^e (Tableau 6.4). Environ 13% du P du 1^{er} groupe a été extrait par le NaHCO₃, 9% du 2^e et 25% du 3^e. Une solution extractive plus forte, le NaOH, a permis d'extraire 16%, 12% et 7% du P, respectivement. L'acide chlorhydrique a extrait 13% du P dans le 1^{er} groupe, 34 % dans le 2^e et 32% dans le 3^e. Le P résiduel représentait moins de 9% du P total dans l'ensemble. Le P labile (somme des fractions du P-résine et du P-NaHCO₃) représentait 67%, 51% et 57% du P total dans les 1^{er}, 2^e et 3^e groupes, respectivement. Il est possible de comparer ces résultats avec ceux obtenus par une autre équipe de recherche. La teneur élevée en P total d'un fumier de porcs (14,6 g P kg⁻¹) analysé par Turner et Leytem (2004) le classerait dans notre deuxième groupe de composts. Ce fumier, analysé selon la méthode de Hedley, contenait 55% de P extrait à l'eau, 23% de P-NaHCO₃, 6% de P-NaOH et 9% de P-HCl.

Une petite proportion du P n'a pu être récupérée par comparaison avec le P total extrait par digestion acide. Pour l'ensemble des composts, la récupération du P par la somme des fractions extraites a varié entre 82% et 110% du P total obtenu par digestion (Tableau 6.4). En comparaison, Turner et Leytem (2004) ont obtenu un recouvrement de 79% pour du fumier de bovins, de 92% pour du fumier de porcs et de 94% pour de la litière de poulets d'élevage. Les fractions du P des composts qui n'ont pas été employés dans l'essai d'incubation sont présentés à l'annexe A.

Le tableau 6.5 rassemble les caractéristiques des trois sols sélectionnés pour l'essai d'incubation. Bien que les deux sols de l'est du pays se ressemblent quant à leurs caractéristiques de base, les sols se distinguent tout de même par la proportion des diverses formes de P (Tableau 6.6).

Tableau 6.5 : Caractéristiques des sols sélectionnés pour l'essai d'incubation

Sols	pH	CE	P M-III	C total	C organique	Carbonates CaCO ₃	Sable	Argile	Texture
		--µS cm ⁻¹ --	--mg kg ⁻¹ --	-----g kg ⁻¹ -----			-----g g ⁻¹ -----		
sol PEI-2	5,2	288	91	19,6	14,3	27	0,784	0,101	Loam sableux fin
sol QUE-2	6,2	341	116	21	16,5	21	0,585	0,122	Loam sableux
sol LETH	7,7	866	86	14,6	9,76	33	0,422	0,317	Loam sableux fin

Tableau 6.6 : Fractions du P des sols employés dans l'essai d'incubation

Sols	P- résine	P- NaHCO ₃	P- NaOH	P- HCl	P-rési- duel	P- total ²	P- digestion	P labile ³	P-orga- nique	P-inorga- nique
	-----mg kg ⁻¹ -----									
sol PEI- 2	60	88	338	54	75	618	730	147	137	403
sol QUE-2	58	76	309	268	120	876	944	135	125	587
sol- LETH	89	37	68	220	144	559	644	127	46	368

² Ce P-total est la somme des fractions P-résine, P-NaHCO₃, P-NaOH, P-HCl et P résiduel.

³ P labile = P-résine + P-NaHCO₃

Le P lié au Fe et à l'Al (fraction moyennement labile extraite au NaOH) représentait 55% du P total dans le sol de l'Île-du-Prince-Édouard (PEI-2) (Tableau 6.6). Le reste du P était partagé entre les autres fractions, à savoir 10% du P total pour le P résine (P extrait à l'eau), 14% pour le P extrait au NaHCO₃, 9% pour le P extrait au HCl et 12% de P résiduel. Dans le sol du Québec (QUE-2), les fractions extraites au NaOH (35% du P total) et au HCl (31% du P total) étaient les plus importantes tandis que 7% du P total se retrouvait dans la fraction P-résine par rapport à 9% pour P-NaHCO₃ et 14% pour le P résiduel. Les résultats obtenus pour ce sol se rapprochaient des valeurs rapportées par Gagnon et Simard (2003) pour un sol du Québec de même texture (loam sableux). Quant au sol de Lethbridge (LETH), une proportion de 39% du P total était sous forme peu labile et liée au Ca (fraction extraite au HCl). Le pH de ce sol étant plus élevé, il est compréhensible qu'une plus grande quantité de P soit lié au Ca. Le P-résine, le P-NaHCO₃ et le P-NaOH constituaient respectivement 16, 7 et 12% du P total. Finalement, le P résiduel de ce sol représentait une plus grande proportion du P total comparativement aux autres sols, à savoir 26%.

À l'instar des composts, la majeure partie du P présent dans les sols était inorganique (65% dans le sol de l'Île du Prince Édouard, 67% dans le sol du Québec et 66% dans le sol de Lethbridge) (Tableau 6.6). La teneur en P organique était de 22% (PEI-2), 14% (QUE-2) ou 8% (LETH). Le taux de récupération du P par la méthode de Hedley se situait entre 85 et 93% dans les 3 sols. Qian et al. (2004) ont obtenu un recouvrement moyen de 89% pour divers sols avec le fractionnement de Hedley.

6.2 Essai d'incubation et résultat du fractionnement du P

Afin de répondre à notre 2^e objectif de recherche, qui était d'évaluer les effets de certains composts sur des sols dont les propriétés et les formes de P variaient, les composts et les sols ont été incubés et les formes de P analysées. La distribution des formes de P déterminées par l'extraction séquentielle après l'incubation est présentée aux tableaux 6.7 (a, b et c) et 6.8 (a, b et c). Les fractions du P ont été extraites à partir d'échantillons recueillis après 2 et 16 semaines d'incubation. L'expérience se terminait à la 16^e semaine.

Tableau 6.7a : Résultat du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation

Semaine 2	fraction	P résine	P _i NaHCO ₃	P NaHCO ₃ total	P _o NaHCO ₃	P labile
Composts		-----mg kg ⁻¹ -----				
1-BOVINS LAITIERS	<i>QUE-2</i>	71.5 c*	44.0 bc	62.1 bc	18.1 a	133.6 c
2-BOVINS DE BOUCHERIE	<i>LETH-1</i>	84.3 b	47.8 ab	68.0 ab	20.2 a	152.2 b
3-PORCS	<i>BRA-1</i>	82.7 b	48.6 ab	67.1 ab	18.5 a	149.8 b
4-POULES PONDEUSES	<i>AGA-3</i>	80.4 bc	48.9 a	66.2 ab	17.3 a	146.6 b
5-POMMES DE TERRE	<i>PEI-3</i>	75.2 bc	50.3 a	70.3 a	20.0 a	145.5 bc
6-HOMARD	<i>PEI-1</i>	84.4 b	47.0 ab	63.8 bc	16.8 a	148.2 b
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	<i>SUM-1</i>	76.7 bc	51.6 a	71.6 a	20.0 a	148.3 b
8-MINÉRAL		94.8 a	51.2 a	71.6 a	20.4 a	166.4 a
9-TÉMOIN		61.0 d	41.1 c	58.3 c	17.19 a	119.3 d
Sols						
1-LETHBRIDGE		115.8 a	31.3 c	39.2 c	7.93 c	155.0 a
2-Î-P-É		59.5 b	60.9 a	86.5 a	25.7 a	146.0 b
3-QUÉBEC		61.8 b	51.7 b	74.5 b	22.8 b	136.3 c

*À noter que pour ce tableau et l'ensemble de ceux qui suivent, les lettres permettent de comparer les moyennes en colonnes (de façon verticale).

Tableau 6.7b : Résultat du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation

Semaine 2	fraction	P _i NaOH	P NaOH total	P _o NaOH	P HCl
Composts		-----mg kg ⁻¹ -----			
1-BOVINS LAITIERS	<i>QUE-2</i>	103.8 c	227.7 bc	85.7 bc	136.3 bc
2-BOVINS DE BOUCHERIE	<i>LETH-1</i>	128.5 a	264.3 a	99.6 ab	143.5 bc
3-PORCS	<i>BRA-1</i>	113.4 b	238.9 bc	83.0 ab	147.7 ab
4-POULES PONDEUSES	<i>AGA-3</i>	111.0 bc	240.5 abc	85.2 a	157.4 a
5-POMMES DE TERRE	<i>PEI-3</i>	113.3 b	243.7 ab	88.6 ab	142.1 bc
6-HOMARD	<i>PEI-1</i>	107.3 bc	234.2 bc	87.7 a	143.8 bc
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	<i>SUM-1</i>	107.7 bc	242.2 ab	89.8 ab	160.2 a
8-MINÉRAL		105.7 bc	244.2 ab	92.8 ab	135.1 c
9-TÉMOIN		93.1 d	215.7 c	86.4 c	130.1 c
Sols					
1-LETHBRIDGE		30.0 b	70.2 b	40.2 b	242.5 b
2-I-P-É		209.6 a	323.9 a	113.6 a	43.3 c
3-QUÉBEC		211.6 a	326.0 a	112.8 a	313.6 a

Tableau 6.7c : Résultat du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation

Semaine 2	fraction	P organique ¹	P inorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
Composts		-----mg kg ⁻¹ -----				
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	192.8 a	430.4 bc	72.7 a	683.2 b	641.3 bc
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	213.4 a	474.2 ab	85.5 a	757.4 a	701.5 a
3-PORCS	BRA-1	194.4 a	472.9 ab	80.6 a	743.9 ab	687.4 ab
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	186.5 a	477.9 a	74.7 a	737.8 ab	676.3 ab
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	202.0 a	458.2 ab	82.8 a	742.4 ab	676.4 ab
6-HOMARD	PEI-1	196.9 a	490.4 a	83.4 a	706.3 ab	670.0 ab
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	202.7 a	459.4 ab	82.2 a	759.2 a	671.7 ab
8-MINÉRAL		201.9 a	468.1 ab	78.3 a	752.1 a	678.6 ab
9-TÉMOIN		192.8 a	402.5 c	78.7 a	705.0 ab	608.4 c
Sols						
1-LETHBRIDGE		168.4 b	419.5 b	118.0 a	639.4 b	582.4 b
2-I-P-É		181.1 b	372.4 c	41.2 b	669.5 b	554.7 b
3-QUÉBEC		245.0 a	626.5 a	107.4 a	906.3 a	877.6 a

¹ P organique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² P inorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau 6.8a : Résultat du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation

Semaine 16	fraction	P résine	P _i NaHCO ₃	P NaHCO ₃ total	P _o NaHCO ₃	P labile
Composts		-----mg kg ⁻¹ -----				
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	70.8 c	47.4 d	57.7 cde	15.8 b	133.9 b
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	79.0 ab	47.1 de	56.6 de	16.5 b	144.2 ab
3-PORCS	BRA-1	75.8 bc	49.7 cd	61.4 bcd	17.8 b	143.3 ab
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	80.8 ab	52.2 bc	63.9 bc	17.1 b	150.2 a
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	68.8 c	58.5 a	77.7 a	23.4 a	150.8 a
6-HOMARD	PEI-1	84.7 a	50.3 bed	62.6 bcd	17.1 b	152.0 a
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	81.5 ab	51.6 bed	62.2 bcd	16.0 b	149.1 a
8-MINÉRAL		79.7 ab	54.6 ab	67.2 b	15.9 b	155.7 a
9-TÉMOIN		57.8 d	42.8 e	52.6 e	15.7 b	116.3 c
Sols						
1-LETHBRIDGE		113.9 a	29.3 c	34.2 c	5.4 c	148.7 a
2-Î-P-É		56.4 b	67.0 a	91.0 a	24.6 a	148.0 a
3-QUÉBEC		56.0 b	55.1 b	77.7 b	22.2 b	134.8 b

Tableau 6.8b : Résultat du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation

Semaine 16	fraction	-----mg kg ⁻¹ -----			
		P _i NaOH	P NaOH total	P _o NaOH	P HCl
Composts					
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	97.3 def	171.5 c	70.7 a	137.1 cd
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	101.4 bcd	183.9 abc	79.3 a	146.1 bcd
3-PORCS	BRA-1	92.2 f	174.8 bc	81.0 a	148.9 b
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	105.0 abc	180.6 abc	73.7 a	153.8 ab
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	111.5 a	200.0 a	85.2 a	146.7 bcd
6-HOMARD	PEI-1	99.7 cde	176.4 bc	72.2 a	157.7 ab
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	108.0 ab	193.9 ab	84.2 a	157.4 ab
8-MINÉRAL		102.6 bcd	177.6 bc	71.9 a	164.0 a
9-TÉMOIN		94.7 ef	167.8 c	71.1 a	135.7 d
Sols					
1-LETHBRIDGE		28.7 b	60.8 b	31.9 b	236.4 b
2-I-P-É		191.7 a	312.5 a	118.3 a	43.6 c
3-QUÉBEC		193.8 a	309.2 a	118.2 a	308.1 a

Tableau 6.8c : Résultat du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation

Semaine 16	fraction	P organique ¹	P inorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
-----mg kg ⁻¹ -----						
Composts						
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	178.8 a	433.0 de	72.1 ab	689.3 cd	599.2 de
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	184.9 a	436.8 de	79.2 a	720.8 bc	621.6 cde
3-PORCS	BRA-1	198.3 a	444.1 cde	67.9 abc	684.7 cd	642.4 abcd
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	188.2 a	484.1 a	72.5 ab	721.7 bc	672.3 ab
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	199.9 a	469.2 abc	71.2 ab	772.1 a	669.1 ab
6-HOMARD	PEI-1	179.2 a	478.9 ab	70.7 ab	747.1 ab	658.2 abcd
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	196.4 a	488.7 a	68.2 abc	717.3 bc	685.1 a
8-MINÉRAL		177.4 a	452.9 bcd	63.7 bc	684.6 cd	630.3 bcde
9-TÉMOIN		170.3 a	418.5 e	57.5 c	667.1 d	588.8 e
Sols						
1-LETHBRIDGE		139.0 c	409.5 b	100.0 a	627.2 b	548.5 b
2-I-P-É		183.7 b	358.1 c	36.0 b	641.8 b	541.8 b
3-QUÉBEC		239.3 a	607.5 a	92.1 a	873.5 a	849.8 a

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Le P inorganique est potentiellement assimilable par les végétaux, tandis que la disponibilité du P organique est étroitement reliée à sa minéralisation. Ces formes de P peuvent être labiles ou non labiles. Le P inorganique se retrouvait dans une proportion de 66 à 75% du P total alors que le P organique se situait entre 28 et 34%. Pierzynski et al. (2000) ont aussi trouvé que l'apport d'amendements organiques au sol augmentait le P inorganique plus que le P organique.

Le P labile (P-résine + P-NaHCO₃) constitue la fraction de P disponible aux végétaux sous forme de P inorganique faiblement retenu ou de P organique facilement minéralisé. C'est la réserve de P qui, en réaction à l'assimilation du P par la culture, reconstitue le pool de P en solution (Iyamuremye et Dick 1996). Le P labile a été retrouvé en quantité considérable (27% du P total) dans les échantillons de la 2^e et de la 16^e semaine d'incubation.

Cependant, la forme de P extraite en plus grande quantité dans les mélanges sol-compost (entre 11 et 58%) était associée à la fraction modérément labile. Le P-NaOH est une forme moyennement labile liée au Fe et à l'Al qui contribue à la réserve de P disponible aux plantes. De façon particulière, les sols du Québec et de l'Île du Prince Édouard, de nature acide et montrant un contenu élevé en P-NaOH, sont riches en Fe et en Al. Ceci explique que les formes de P liées au Fe et Al soient particulièrement abondantes dans ces sols.

Pour l'ensemble des échantillons, entre 86 et 96% du P total obtenu par digestion fut récupéré par l'extraction séquentielle, dû à la variation intrinsèque du mélange sol-compost ou à l'erreur expérimentale qui s'additionne lorsque l'extraction des différentes fractions se fait séquentiellement à partir du même échantillon (Gagnon et Simard 2003).

6.2.1 Résultat du fractionnement du P à court terme (2 semaines)

Le P-résine, le P_i-NaHCO₃, le P-NaHCO₃ total, le P_i-NaOH et le P labile ont été affectés de façon significative par le type de compost (Tableau 6.7a). Ces formes de P du sol

sont d'ailleurs celles ayant été les plus affectées par des apports de fumiers et de composts dans l'étude de Gagnon et Simard (2003).

La fraction extraite au NaOH (P moyennement labile lié au Fe et à l'Al) s'est avérée être, de façon générale, la plus abondante (Tableaux 6.7a et 6.8a). Les composts ayant favorisé cette fraction sont souvent plus riches en Fe et Al (Tableau 6.3). Le compost de fumier de bovins de boucherie (LETH-1) a été celui qui a produit la plus forte augmentation de la fraction P-NaOH. Cette contribution pourrait s'expliquer par la teneur élevée de ce compost en Fe total (Tableau 6.3). Les composts de résidus de pommes de terre ou de biosolides municipaux et l'engrais minéral ont aussi augmenté de manière significative le P-NaOH du sol par rapport au témoin (Tableaux 6.7b et 6.8b). SUM-1 (compost de biosolides) est d'ailleurs celui représentant la plus grande quantité de Fe apporté (Tableau 6.3). Gagnon et Simard (2003) ont aussi trouvé qu'une grande partie du P apporté par divers fumiers et composts se retrouvait dans cette fraction modérément labile extraite au NaOH.

Le P-HCl, une fraction de P peu labile et fortement liée au Ca, fut retrouvée dans des proportions de 20% à 24% du P total (Tableau 6.7b). La nature alcaline du sol de Lethbridge a favorisé la présence de cette fraction de P. L'augmentation du contenu en P-HCl pourrait aussi être causée par l'ajout de Ca avec les composts. McKenzie et al. (1992) rapportent en effet que des ajouts de Ca par des fertilisants phosphatés ou des amendements chaulants ont causé la précipitation du P ajouté sous forme de phosphate de Ca, provoquant ainsi un transfert des formes liées au Fe et Al (P_i-NaOH) vers celle liée au Ca (P-HCl). Nos composts renfermaient des quantités variables de Ca échangeable pouvant contribuer à l'augmentation de la teneur en P-HCl (Tableau 6.3).

Les fractions de P organique ont été peu affectées par les traitements. En effet, aucun apport de P, que ce soit sous forme de compost ou d'engrais minéral, n'a entraîné d'augmentation significative des formes de P organique. Le sol du Québec s'est toutefois distingué du sol de l'Île du Prince Édouard de façon significative (Tableau 6.7c). En plus des conditions environnementales, la minéralisation du P organique est en bonne partie contrôlée par la quantité relative de C dans le substrat de départ, le C agissant comme source d'énergie pour les microorganismes décomposeurs (Pierzynski

et al., 2000). Des rapports C/P élevés stimulent la croissance des microorganismes qui consomment tout le P disponible alors que, à l'inverse, des rapports C/P faibles peuvent entraîner des quantités de P soluble dépassant les besoins des microorganismes, le rendant ainsi plus disponible aux plantes (Pierzynski et al., 2000). Ainsi, une minéralisation rapide du P pourrait expliquer la faible variation de cette fraction.

6.2.1.1 Effets des sols

L'effet des trois sols fut significatif pour toutes les fractions de P (Tableaux B.1a,b et c). La différence entre les sols de l'est (Québec et Île du Prince Édouard) avec celui de l'ouest (Lethbridge) était significative pour la plupart des fractions. Le P n'était pas distribué de la même façon dans les sols de l'est par rapport à ceux de l'ouest. Ces sols se distinguaient par leurs caractéristiques de bases (pH, teneur en P, teneur en argile, etc.) (Tableau 6.5). Le caractère différent des sols pourrait donc expliquer pourquoi les formes du P ne sont pas réparties de la même façon entre les deux régions. La teneur en Fe, Al et Ca pourrait également expliquer la répartition différente du P. Le sol du Québec se différenciait de celui de l'Île-du-Prince-Édouard d'une façon significative pour P_i -NaHCO₃, P-NaHCO₃ total, P labile, P_o-NaHCO₃, P organique, P-HCl, P-résiduel et P total (Tableaux B.1a, b et c).

6.2.1.2 Effet des composts

Le 1^{er} contraste (Tableaux B.1a, b et c) indique une différence significative entre les traitements (composts et engrais minéral) et le témoin (sans apport de P) pour P-résine, P_i -NaHCO₃, P-NaHCO₃ total, P labile, P_i -NaOH, P inorganique et le P représentant la somme de toutes les fractions (P sum). Ainsi, le fait d'apporter du P au sol sous forme de compost ou d'engrais minéral a fait augmenter significativement les formes de P les plus disponibles (Tableau 6.7a). Une étude sur les effets à long terme de l'application de fertilisants et de fumiers sur les formes du P du sol (Tran et N'dayegamiye 1995) a montré aussi des augmentations significatives des fractions de P-résine, P_i -NaHCO₃, P_i -NaOH et P total.

Le P-résine et le P labile ont été plus élevés après 2 semaines d'incubation pour les sols ayant reçu l'engrais minéral que pour ceux ayant reçu des composts (2^e contraste, tableaux B.1a, b et c). Dans une étude où des apports de fumiers et d'engrais minéraux étaient comparés, une partie du P des fumiers devait d'abord être minéralisée avant d'être détectée comme du P labile inorganique (Dormaar et Chang 1995). De plus, Øgaard (1996) a trouvé que le P d'un fumier frais était fixé plus faiblement au sol que celui d'un fumier composté. Le P des composts semble donc moins disponible que celui des fumiers frais. Les résultats obtenus ici indiquent que le P des composts serait aussi moins disponible que celui d'un engrais minéral.

6.2.1.3 Comparaison inter-groupes

Par rapport aux composts du groupe 1 (teneur faible en P), ceux du groupe 2 (teneur élevée en P) montraient une différence significative pour P-résine, P-NaHCO₃ total, P labile et P-HCl (3^e contraste, tableaux B.1a, b et c). Ainsi, ces fractions étaient significativement plus faibles pour les composts du groupe 1 que pour ceux du groupe 2. Les composts du 1^{er} groupe (teneur faible en P) différaient des composts du 3^e groupe (teneur intermédiaire en P) pour P-résine, P labile et P-HCl (4^e contraste, tableaux B.1a, b et c). Ces fractions étaient encore une fois plus faibles pour les composts du groupe 1 que pour ceux du groupe 3. Les mêmes tendances se sont retrouvées pour les échantillons prélevés après 16^e semaines d'incubation. L'interprétation de ces résultats sera faite à la section 6.2.2.3.

6.2.1.4 Comparaison intra-groupes

Une seule différence a été obtenue au sein des composts du 1^{er} groupe, à savoir entre les composts de bovins laitiers (QUE-2) et de pommes de terre (PEI-3) (6^e contraste, tableaux B.1a, b et c). Par rapport à QUE-2, PEI-3 avait une teneur significativement plus grande en P_i-NaHCO₃ et en P_i-NaOH. Ce regroupement de composts pourrait donc être remis en question. Cependant, une combinaison de facteurs, comme la nature des matériaux d'origine et un degré différent de maturité des composts pourrait également avoir influencé la répartition du P. Le groupe 1 est le seul composé d'un compost d'origine végétale et d'un autre d'origine animale. Par ailleurs, PEI-3 contenait

davantage de Fe et d'Al que QUE-2 (Tableau 6.3), ce qui pourrait expliquer pourquoi PEI-3 contenait plus de P extractible au NaOH. De plus, une plus grande quantité de P-NaHCO₃ a été ajouté au sol avec PEI-3 car ce dernier en contenait davantage au départ (Tableau 6.4), ce qui expliquerait le fait que cette fraction ait été retrouvée en plus grande quantité dans ce mélange sol-compost.

6.2.2 Résultat du fractionnement du P à long terme (16 semaines)

De façon générale, les résultats obtenus au terme de l'essai d'incubation (16 semaines) se sont avérés plus significatifs que lors de l'échantillonnage après 2 semaines d'incubation, notamment pour P-NaOH qui est resté prédominant (Tableaux 6.8a, b et c). L'apport de compost ou d'engrais minéral n'a pas eu d'effet significatif sur les fractions du P organique. Comme lors du 1^{er} échantillonnage, ces fractions n'ont pas été influencées par les apports de P, mais uniquement par le type de sol.

Cependant, en mettant en parallèle les traitements de composts avec celui à l'engrais minéral phosphaté (2^e contraste, tableaux B.2a, b et c), on remarque une différence par rapport aux résultats du premier échantillonnage. En effet, pour les fractions de P-résine et de P labile, pour lesquelles on obtenait une différence hautement significative entre les apports de composts versus l'apport du fertilisant minéral à la 2^e semaine, on ne relève aucun effet à la 16^e semaine. L'apport de compost a été significativement différent par rapport à celui d'un engrais minéral phosphaté, et ce seulement dans le cas des fractions P₁-NaHCO₃ et P total. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le P de l'engrais, très disponible après l'application, s'est déplacé vers des formes moins disponibles au cours de l'incubation.

6.2.2.1 Effet des composts

L'effet à plus long terme des composts s'est fait sentir très significativement sur P-résine, P₁-NaHCO₃, P₀-NaHCO₃, P-NaHCO₃ total, P labile, P₁-NaOH, P inorganique, P-HCl, P total et P-résiduel (Tableaux 6.8a, b, c). Comme à la 2^e semaine, il y avait une

différence significative entre le témoin et les traitements avec P pour les fractions de P-résine, P_1 -NaHCO₃, P-NaHCO₃ total, P labile, P_1 -NaOH, et P inorganique (1^{er} contraste, tableaux B.2a, b et c). Ces fractions étaient significativement inférieures pour le témoin. Le P demeure donc relativement disponible même à la 16^e semaine, qu'il provienne de compost ou du fertilisant phosphaté. Cependant, à la différence de la 2^e semaine, en comparant le témoin avec les autres traitements pour les fractions de P-HCl, de P-résiduel et de P sum (somme de toutes les fractions), les traitements au P étaient très significativement supérieurs au témoin. Pour le P total déterminé par digestion, les traitements ont également été significativement supérieurs par rapport au témoin.

6.2.2.2 Effet du sol

Les sols ont produit des effets significatifs sur toutes les fractions du P, sauf P-NaOH total. Ainsi, comme dans le cas des échantillons de la 2^e semaine d'incubation, ce sont les sols qui ont le plus fortement influencé les résultats du fractionnement du P. En effectuant un parallèle entre les sols plus acides provenant de l'est du pays avec le sol plus alcalin provenant de l'ouest, on observe des différences significatives pour toutes les fractions du P (9^e contraste, tableaux B.2a, b et c). Les sols de l'est avaient une teneur plus élevée en P_1 -NaHCO₃, P_0 -NaHCO₃, P-NaHCO₃ total, P_1 -NaOH, P_0 -NaOH, P-NaOH total et P organique. Il y avait des différences significatives entre les deux sols acides QUE et PEI pour presque toutes les fractions à l'exception de P-résine, P_1 -NaOH, P_0 -NaOH et P-NaOH total.

6.2.2.3 Comparaison inter-groupes

Par rapport aux composts à teneur intermédiaire en P (groupe 3), les composts à teneur faible en P (groupe 1) présentaient des valeurs significativement plus faibles pour P-résine, P-NaHCO₃ total, P_1 -NaHCO₃, P_0 -NaHCO₃ et P-HCl (4^e contraste, tableaux B.2a, b et c). Entre les composts du premier groupe (faibles en P) et ceux du deuxième (forts en P), il y avait des différences significatives pour P-résine, du P-HCl, P_0 -NaHCO₃ et P inorganique; ces fractions étant significativement plus faibles pour les composts du premier groupe (3^e contraste, tableaux B.2a, b et c). Lors de l'analyse de groupement, certaines fractions de P associées à des valeurs de *F* plus élevées, à savoir P-HCl, P

inorganique, P résine, P labile et P total, avaient davantage contribué à la formation des trois groupes de composts. Ces fractions plus discriminantes sont, dans plusieurs cas, les mêmes fractions de P que celles où il y a des différences significatives entre les groupes. Ceci indique que le regroupement a été réalisé adéquatement. Cependant, le contraste entre les groupes 2 et 3 n'était pas significatif. Il est donc possible que le regroupement de ces composts ait été moins efficace. Tous les composts ayant été appliqués pour procurer une quantité similaire de P, il est également possible que les teneurs en P des composts des groupes 2 et 3 n'étaient pas suffisamment différentes pour induire un effet significativement différent sur les formes de P.

6.2.2.4 Comparaisons intra-groupes

Il y avait plusieurs différences à l'intérieur même du premier groupe (6^e contraste, tableaux B.2a, b et c), tout comme à la 2^e semaine. En effet, pour les fractions P_1 -NaHCO₃, P-NaHCO₃ total, P_1 -NaOH, P-NaOH total, P total, P_0 -NaHCO₃, P labile et P inorganique, les différences entre les composts à faible teneur en P (QUE-2 et PEI-3) étaient significatives. On pourrait donc penser que ce regroupement effectué serait inadéquat. Cependant, il est important de noter que PEI-3 est un compost d'origine végétale qui s'est retrouvé groupé avec un compost d'origine animale. Cette différence intra-groupe pourrait donc être interprétée comme une indication de l'influence des matériaux de départ sur la répartition du P. Par ailleurs, comme il n'y avait pas de différence significative entre les composts à l'intérieur des groupes 2 et 3, la formation de ces groupes apparaît adéquate.

6.2.2.5 Interaction sols-composts

Pour P_0 -NaHCO₃ et P-HCl, il y avait une interaction significative entre les sols et les composts (Tableaux 6.9 et 6.10). Contrairement au sol de Lethbridge, où l'effet des composts ne fut pas significatif, les sols de l'Île du Prince Édouard et du Québec combinés avec le compost de pommes de terre (PEI-3) montraient une teneur en P_0 -NaHCO₃ plus élevée que les autres traitements. Par contre, l'effet des composts sur P-HCl était significatif pour le sol de Lethbridge alors qu'il ne l'était pas pour les autres

sols. Pour le sol de Lethbridge, les teneur les plus élevées en P-HCl ont été causées par les composts de biosolides municipaux et de fumier de poules. Pour les autres sols, le compost de biosolides (SUM-1) ne s'est pas démarqué mais le compost de homard (PEI-1) a apporté une quantité maximale de P-HCl. Cette augmentation de la fraction liée au Ca pourrait s'expliquer par les carbonates apportés par PEI-1 (Tableau 6.3) qui pourrait être des carbonates de calcium.

Tableau 6.9 : Interaction sol compost pour le $P_o\text{-NaHCO}_3$ à la semaine 16

Semaine 16		P NaHCO_3 organique		
		LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Composts		mg kg^{-1}		
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	6.6 a	19.2 d	21.7 b
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	4.1 a	26.1 abc	20.9 b
3-PORCS	BRA-1	4.4 a	29.2 ab	19.7 b
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	4.2 a	26.2 abc	21.1 b
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	7.8 a	31.3 a	31.1 a
6-HOMARD	PEI-1	6.6 a	21.8 dc	22.9 b
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	3.5 a	26.1 abc	18.3 b
8-MINÉRAL		6.1 a	23.8 bcd	18.9 b
9-TÉMOIN		5.4 a	17.8 d	23.9 b

*, ** Significatif à $P=0,05$ et $P=0,01$ respectivement.

Tableau 6.10 : Interaction sols-composts pour le P-HCl à la semaine 16

Semaine 16		P HCl		
		LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Composts		mg kg^{-1}		
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	225.5 c	40.4 bc	282.3 bc
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	228.0 c	45.1 ab	303.5 abc
3-PORCS	BRA-1	228.8 c	44.2 ab	326.3 ab
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	261.4 ab	43.3 ab	321.9 ab
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	220.6 c	45.3 ab	315.9 abc
6-HOMARD	PEI-1	236.6 bc	48.5 a	341.8 a
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	280.0 a	45.9 ab	303.2 abc
8-MINÉRAL		231.5 c	45.0 ab	275.1 c
9-TÉMOIN		221.2 c	36.5 c	309.0 abc

*, ** Significatif à $P=0,05$ et $P=0,01$ respectivement.

6.2.3 Résultats en fonction de la dose de P

Les fractions du P relatives au P total ajouté sont présentées aux tableaux 6.11a, b, c et 6.12a, b et c. Pour chaque fraction du P, l'augmentation nette a été déterminée en soustrayant la quantité de P dans le sol non amendé de la quantité contenue dans la combinaison sol compost, puis en divisant cette quantité par la quantité totale de P ajoutée. Ce calcul permet d'isoler l'effet net des composts. De façon générale, les formes organiques et inorganiques du P ont augmenté comme prévu, mais la teneur en P organique s'est accrue dans une moindre mesure. Le P labile a montré une forte augmentation par rapport aux autres fractions principalement à cause de l'accroissement marqué du P-résine et dans une moindre mesure du P-NaHCO₃. Ainsi, contrairement aux valeurs brutes, le P labile net a le plus fort taux d'augmentation. Au cours de l'analyse des données brutes, nous avons noté que la forme de P extraite en plus grande quantité dans les mélanges sol compost était celle associée à la fraction modérément labile (P-NaOH). Donc, les sols ont influencé grandement le résultat du fractionnement du P et le P apporté par les composts avait tendance à être plutôt labile.

Il y avait par ailleurs une différence marquée entre le P organique de la 2^e semaine et celui de la 16^e semaine (Tableaux 6.11a, b, c et 6.12a, b, c). À la 2^e semaine, l'effet net moyen était de -7,9% alors qu'à la 16^e, il était de 47,2%. Ceci est attribuable au P inorganique des composts qui se serait transformé en P organique par l'action des microorganismes. En effet, il y a eu une diminution du P organique dans les sols témoins (Tableaux 6.7c et 6.8c). Plusieurs données, surtout pour le P organique, sont également négatives. La diminution de cette fraction est attribuable à une fixation ou au déplacement du P d'une forme plus disponible vers une forme moins disponible (P-NaOH total et P-HCl par exemple).

Le contraste entre les sols de l'est et celui de l'ouest ne montre pas d'effet à la 2^e semaine et un faible effet à la 16^e sur le P-résine, le P-NaHCO₃, le P-HCl et le P-résiduel (Tableaux B.5a, b, c et B.6a, b et c). Cependant, le contraste opposant les deux sols de l'est entre eux présente un effet significatif pour la plupart des fractions, et ce pour les 2 semaines d'échantillonnage (Tableaux B.5a, b, c et B.6a, b et c). Le P des composts avait tendance à être plus disponible avec le sol de l'Île-du-Prince-Édouard.

La composition du sol, par exemple son contenu en Fe et en Al, pourrait expliquer cet effet en le rendant plus fixateur (Stevenson 1986).

6.2.3.1 Effet des composts

L'effet des composts s'est surtout manifesté au niveau de P-résine et donc du P labile. À la 2^e semaine d'incubation, cet effet était significatif pour P-résine, P labile, $P_1\text{-NaHCO}_3$, et le P- NaHCO_3 total (Tableau 6.11a). Donc, à court terme, le P apporté restait surtout sous une forme biodisponible. Après 16 semaines, plusieurs fractions de P ont été influencées par les composts, mais elles furent en général les mêmes qu'après 2 semaines d'incubation (Tableau 6.12). Les P résine et P labile étaient les deux formes de P ayant augmenté le plus mais le P extrait au NaOH a également augmenté considérablement. Ceci indique qu'après 16 semaines, le P apporté par les composts est demeuré encore biodisponible et qu'une portion du P a été fixée par le Fe et l'Al des sols, rendant cette portion moins disponible. Gagnon et Simard (2003) ont aussi trouvé qu'après ajout de différents composts à un sol, la fraction de P-NaOH avait augmenté le plus.

Le compost de bovins laitiers (QUE-2) présentait un effet différent des autres composts et ce pour la plupart des fractions (Tableaux 6.11a, b, c, 6.12 a, b et c). Le P labile est notamment plus faible que pour les autres composts et le P-NaOH total, le Po-NaOH, le P-HCl et le P-total présentent des teneurs négatives pour les deux échantillonnages. Ces résultats démontrent que le P de ce compost a été moins disponible au cours de l'incubation. Cependant, le pH ou la teneur en Fe et Al de QUE-2 ne permettent pas d'expliquer cet effet (Tableau 6.3). Une étude plus poussée du C organique, pouvant jouer un rôle sur l'immobilisation du P par les microorganismes ou sur la libération du P organique, pourrait amener des explications supplémentaires.

Tableau 6.11a : Fractionnement du P pour la 2^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 2		P résine	P NaHCO ₃ inorganique	P NaHCO ₃ total	P NaHCO ₃ organique	Plabile
Composts	fractions	%				
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	18.4 c	2.0 b	1.3 b	-0.7 a	19.7 c
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	38.0 b	7.8 ab	10.3 ab	2.5 a	48.3 b
3-PORCS	BRA-1	35.5 b	9.0 ab	8.9 ab	-0.1 a	44.5 b
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	32.1 bc	9.6 a	7.6 ab	-2.0 a	39.7 bc
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	24.0 bc	11.7 a	13.9 a	2.2 a	38.0 bc
6-HOMARD	PEI-1	38.1 b	6.6 ab	3.9 b	-2.7 a	42.0 b
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	26.4 bc	13.7 a	15.8 a	2.2 a	42.2 b
8-MINÉRAL		54.0 a	13.1 a	15.9 a	2.8 a	69.9 a
Sols						
1-LETHBRIDGE		34.8 a	10.3 a	12.2 a	1.9 a	47.0 a
2-Î-P-É		31.7 a	11.7 a	14.1 a	2.4 a	45.8 a
3-QUÉBEC		33.5 a	5.5 b	2.8 b	-2.8 b	36.3 a

Tableau 6.11b : Fractionnement du P pour la 2^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 2		P NaOH inorganique	P NaOH total	P NaOH organique	P HCl
	fractions				
Composts			%		
1-BOVINS LAITIERS	<i>QUE-2</i>	-14.1 ab	-1.6 b	-2.7 a	-28.5 ab
2-BOVINS DE BOUCHERIE	<i>LETH-1</i>	2.9 ab	22.8 ab	8.7 a	-4.7 ab
3-PORCS	<i>BRA-1</i>	12.7 ab	15.4 ab	-6.8 a	6.3 a
4-POULES PONDEUSES	<i>AGA-3</i>	13.2 ab	17.9 ab	-3.4 a	4.7 a
5-POMMES DE TERRE	<i>PEI-3</i>	16.5 b	22.8 ab	1.8 a	-11.0 a
6-HOMARD	<i>PEI-1</i>	-1.8 ab	8.2 ab	0.4 a	5.0 a
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	<i>SUM-1</i>	19.1 b	34.3 ab	8.1 a	-242.6 b
8-MINÉRAL		19.7 b	41.3 a	13.6 a	-8.5 ab
Sols					
1-LETHBRIDGE		2.5 a	10.5 b	8.0 a	6.3 a
2-Î-P-É		28.7 b	39.4 a	4.6 a	7.4 a
3-QUÉBEC		-4.4 a	8.9 b	-6.1 a	-130.5 a

Tableau 6.11c : Fractionnement du P pour la 2^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 2	fractions	Porganique ¹	Pinorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
Composts		%				
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	-28.6 a	-5.1 b	-12.8 a	-63.3 c	-22.1 b
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	18.1 a	55.3 a	2.5 a	61.7 ab	70.0 ab
3-PORCS	BRA-1	-10.3 a	74.7 a	-3.1 a	29.5 abc	66.1 ab
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	-36.0 a	69.9 a	-17.0 a	58.6 ab	49.2 ab
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	2.0 a	46.3 ab	-3.0 a	27.2 abc	49.3 ab
6-HOMARD	PEI-1	-7.2 a	57.9 a	-4.0 a	-28.0 bc	69.7 ab
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	-9.3 a	60.0 a	-20.2 a	52.9 ab	15.7 ab
8-MINÉRAL		8.1 a	84.5 a	-6.1 a	80.4 a	96.8 ab
Sols						
1-LETHBRIDGE		-13.2 a	54.0 ab	-16.0 a	26.7 a	54.1 ab
2-Î-P-É		-8.9 a	84.8 ab	-8.2 a	81.3 a	83.8 ab
3-QUÉBEC		-2.6 a	24.4 b	0.1 a	-36.2 b	8.5 b

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau 6.12a : Fractionnement du P pour la 16^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 16	fractions	P résine	P NaHCO ₃ inorganique	P NaHCO ₃ total	P NaHCO ₃ organique	Plabile
Composts		%				
1-BOVINS LAITIERS	<i>QUE-2</i>	19.8 c	7.0 d	7.2 c	0.2 b	27.0 b
2-BOVINS DE BOUCHERIE	<i>LETH-1</i>	32.4 ab	6.6 d	8.7 bc	2.8 b	42.1 ab
3-PORCS	<i>BRA-1</i>	27.6 bc	10.6 cd	13.7 bc	3.1 b	41.3 ab
4-POULES PONDEUSES	<i>AGA-3</i>	35.2 ab	14.4 bc	16.6 b	2.2 b	51.8 a
5-POMMES DE TERRE	<i>PEI-3</i>	16.9 c	24.1 a	35.8 a	11.7 a	52.7 a
6-HOMARD	<i>PEI-1</i>	41.0 a	11.5 bcd	13.6 bc	2.1 b	54.6 a
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	<i>SUM-1</i>	36.2 ab	13.6 bcd	14.0 bc	0.4 b	50.2 a
8-MINÉRAL		33.4 b	18.1 ab	18.3 b	1.9 b	60.3 a
Sols						
1-LETHBRIDGE		38.3 a	13.4 b	13.5 b	0.1 b	51.8 a
2-Î-P-É		24.2 b	18.2 a	29.8 a	11.6 a	54.0 a
3-QUÉBEC		28.5 b	8.1 c	3.9 c	-2.9 c	36.5 b

Tableau 6.12b : Fractionnement du P pour la 16^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 16	fractions	P NaOH inorganique	P NaOH total	P NaOH organique	P HCl
Composts		%			
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	4.4 ab	-22.4 d	-10.3 b	-20.9 c
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	19.4 a	48.2 a	24.1 a	3.5 ab
3-PORCS	BRA-1	-16.2 b	9.5 bcd	6.2 ab	13.5 ab
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	19.9 a	21.1 abc	1.2 ab	27.8 a
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	29.2 a	42.4 ab	13.3 ab	6.9 ab
6-HOMARD	PEI-1	9.1 ab	0.8 cd	-8.2 ab	29.1 a
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	25.0 a	47.2 a	22.3 a	23.3 a
8-MINÉRAL		14.9 ab	8.7 bcd	-6.2 ab	-9.1 bc
Sols					
1-LETHBRIDGE		4.0 b	14.5 a	10.4 a	23.7 a
2-Î-P-É		37.0 a	33.2 a	0.03 a	8.5 ab
3-QUÉBEC		-1.5 b	11.5 a	4.5 a	-5.3 b

Tableau 6.12c : Fractionnement du P pour la 16^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 16		Porganique¹	Pinorganique²	P résiduel	P total	P sum³
Composts		%				
1-BOVINS LAITIERS	<i>QUE-2</i>	48.0 a	22.1 d	22.4 ab	-5.2 c	56.1 b
2-BOVINS DE BOUCHERIE	<i>LETH-1</i>	56.5 a	63.4 abcd	27.9 a	42.9 bc	90.3 ab
3-PORCS	<i>BRA-1</i>	47.4 a	39.1 cd	1.1 c	-12.2 c	81.9 ab
4-POULES PONDEUSES	<i>AGA-3</i>	51.2 a	100.2 a	13.2 abc	44.2 bc	127.5 ab
5-POMMES DE TERRE	<i>PEI-3</i>	65.4 a	77.4 abc	11.0 abc	121.3 a	122.6 ab
6-HOMARD	<i>PEI-1</i>	33.5 a	92.2 ab	10.2 abc	83.1 ab	105.9 ab
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	<i>SUM-1</i>	57.0 a	107.2 a	10.8 abc	37.5 bc	147.0 a
8-MINÉRAL		19.3 a	52.5 bcd	6.6 bc	-12.4 c	63.4 b
Sols						
1-LETHBRIDGE		25.7 b	83.7 a	-0.2 b	8.4 b	103.1 a
2-Î-P-É		28.1 b	89.1 a	7.6 b	5.1 b	108.9 a
3-QUÉBEC		87.5 a	35.0 b	37.8 a	98.7 a	87.2 a

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

6.2.3.2 Interaction sols composts

À la 16^e semaine, l'interaction entre les sols et les composts a été significative pour trois fractions de P (Tableaux 6.13, 6.14 et 6.15), surtout P- NaOH (Tableau 6.13). Les sols de l'Île du Prince Édouard et du Québec combinés à certains composts ont montré une teneur en P-NaOH plus élevée que la somme des fractions dans le sol et le compost.

Tableau 6.13 : Interaction sol compost pour le P-NaOH à la 16^e semaine

Semaine 16		P NaOH total					
		sol	LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC		
Composts			%				
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	13.4	ab	-75.9	c	-22.5	cd
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	9.1	b	27.7	ab	137.6	a
3-PORCS	BRA-1	7.9	b	48.6	a	-27.9	cd
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	9.1	b	43.1	ab	11.2	bcd
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	30.7	a	41.6	ab	55.0	b
6-HOMARD	PEI-1	16.0	ab	-12.9	bc	-0.5	bcd
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	15.4	ab	84.4	a	41.9	bc
8-MINÉRAL		14.0	ab	72.7	a	-60.6	d

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement.

Une interaction significative a eu lieu au niveau de la fraction de P-HCl (Tableau 6.14). Les composts ont eu un effet significatif sur les sols de Lethbridge et du Québec. Le sol du Québec combiné à PEI-1 (un compost de homard faisant partie du groupe à teneur en P intermédiaire) montrait l'augmentation du P-HCl la plus élevée. Cet effet pourrait s'expliquer par le fait que le compost de homard, ayant un pH alcalin et étant riche en carbonates (Tableau 6.3), aurait contribué à l'augmentation de la fraction liée au Ca de par sa teneur en carbonates de calcium. Pour le sol de Lethbridge, c'est en le mélangeant au compost de biosolides (faisant partie du groupe à teneur élevé en P) que la fraction de P-HCl augmentait le plus. Finalement, tout comme chez les données brutes, les sols de l'Île du Prince Édouard et du Québec ont montré une réaction particulière envers la fraction du P_o-NaHCO₃ (Tableau 6.15). Contrairement au sol de Lethbridge où l'effet des composts ne fut pas significatif, les deux autres sols combinés avec le compost de pommes de terre (PEI-3 ayant une teneur intermédiaire en P) se sont enrichis en P_o-NaHCO₃.

Tableau 6.14 : Interaction sol compost pour le P-HCl à la 16^e semaine

Semaine 16		P HCl			
		sol	LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Composts			% -----		
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	6.5 c	5.7 ab	-69.6 c	
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	9.8 c	12.9 ab	-10.6 ab	
3-PORCS	BRA-1	10.3 c	11.4 ab	18.9 ab	
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	59.7 ab	10.1 ab	18.4 ab	
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	-1.0 c	13.1 ab	9.2 ab	
6-HOMARD	PEI-1	22.8 bc	18.2 a	48.2 a	
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	86.8 a	14.1 ab	-12.8 ab	
8-MINÉRAL		15.6 bc	-14.4 b	-31.3 bc	

*, ** Significatif à P =0,05 et P = 0,01 respectivement.

Tableau 6.15 : Interaction sols-composts pour le P_o-NaHCO₃ à la 16^e semaine

Semaine 16		P _o -NaHCO ₃ organique			
		sol	LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Composts			% -----		
1-BOVINS LAITIERS	QUE-2	2.0 a	2.1 dc	-3.4 b	
2-BOVINS DE BOUCHERIE	LETH-1	-2.0 a	12.6 abc	-4.6 b	
3-PORCS	BRA-1	-1.5 a	17.4 ab	-6.5 b	
4-POULES PONDEUSES	AGA-3	-1.8 a	12.7 abc	-4.4 b	
5-POMMES DE TERRE	PEI-3	3.7 a	20.5 a	11.0 a	
6-HOMARD	PEI-1	1.8 a	6.0 dc	-1.6 b	
7-BIOSOLIDES MUNICIPAUX	SUM-1	-2.8 a	12.7 abc	-8.5 b	
8-MINÉRAL		1.1 a	9.0 bcd	-7.7 b	

*, ** Significatif à P =0,05 et P = 0,01 respectivement.

7. Conclusion

La présente étude avait pour but de caractériser divers composts quant à leurs formes de P. Le comportement du P provenant de divers composts appliqués au sol lors d'un essai d'incubation a permis d'évaluer la biodisponibilité du P des composts, un aspect jusqu'à présent peu documenté. La diversité des composts (origine, maturité) et des sols canadiens utilisés constituait un aspect innovateur de cette étude.

La première partie de l'étude, où la caractérisation de l'ensemble des composts a été effectuée, a révélé que les caractéristiques chimiques de même que les formes du P étaient variables dans les différents composts. Ceci confirme donc notre première hypothèse voulant que les formes du P dans différents composts déterminées selon une méthode de fractionnement séquentiel soient variables qualitativement et quantitativement. La seconde hypothèse formulée dans le cadre de l'étude était que l'interaction entre les sols et les composts détermine la disponibilité à court terme du P des composts, ce qui fut démontré dans la deuxième partie de l'expérience par l'essai d'incubation.

Les résultats de l'extraction séquentielle appliquée aux mélanges de sol et de compost ont par ailleurs indiqué que P inorganique était une fraction dominante par rapport à P organique. De plus, la forme de P extraite en plus grande quantité dans les mélanges sol compost a été la fraction modérément labile liée au Fe et à l'Al pour les sols acides de l'est et la fraction peu labile liée au Ca pour le sol alcalin de l'ouest. Le P labile ayant été retrouvé en quantité considérable dans les échantillons, ceci pourrait indiquer qu'une bonne quantité de P amené par les composts demeure labile donc disponible à la plante, mais également propice à rejoindre les cours d'eau par ruissellement ou lessivage. La biodisponibilité du P des composts variait d'un compost à l'autre.

Il serait maintenant intéressant de répéter le même type d'expérience sur une plus longue période. De cette façon, les répercussions à plus long terme de l'application de composts sur le devenir du P dans les sols agricoles pourraient être mieux documentées pour l'utilisation durable des composts en agriculture.

Bibliographie

- Barber, S. A. 1995. Soil nutrient bioavailability: a Mechanistic Approach. John Wiley & Son, N.Y. 398 p.
- Barnett, G. M., 1994a. Phosphorus forms in animal manure. *Bioresource Technol.* **49**(2): 139-147.
- Barnett, G. M., 1994b. Manure P fractionation. *Bioresource Technol.* **49**(2): 149-155.
- Beauchemin, S. et R. R. Simard, 1999. Soil phosphorus saturation degree: Review of some indices and their suitability for P management in Quebec, Canada. *Can. J. Soil Sci.* **79**: 615-625.
- Beaulieu, M. S., 2004. Manure management in Canada. Farm environmental management in Canada, research paper. Statistic Canada, Agricultural division, Ottawa, On. Catalogue no.21-021-MIE-No.002.
- Busman, L., J. Lamb, G. Randall, G. Rehm et M. Schmitt. (2002). "The nature of phosphorus in soils." Retrieved 2005-01-27, 2005, from <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC6795.html>.
- Charmley, E., D. Nelson et F. Zvomuya, 2006. Nutrient cycling in the vegetable processing industry: Utilization of potato by-products. *Can. J. Soil Sci.* **86**: 621-629.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation, 1ère éd., Sainte-Foy, QC. 294 pages.
- DeLuca, T. H. et D. K. DeLuca, 1997. Composting for feedlot manure management and soil quality. *J. Prod. Agric.* **10**: 235-241.
- Devisscher, S. (1997). Le compost, Université Picardie: 60 pages.
- Dormaar, J. F. et C. Chang, 1995. Effect of 20 annual applications of excess feedlot manure on labile soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* **75**: 507-512.
- Dou, Z., J. D. Toth, D. T. Galligan, C. F. Ramberg et J. D. Ferguson, 2000. Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus. *J. Environ. Qual.* **29**: 508-514.
- Eghball, B., G. D. Binford et D. D. Baltensperger, 1996. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application. *J. Environ. Qual.* **25**: 1339-1343.

- Elustondo, J. et M. Gagnon, 1992. Bilan massique de deux régies du fumier incluant le compostage sur la ferme laitière québécoise. Symposium sur la recherche et le développement en gestion environnementale des effluents d'élevage au Québec, Sainte-Foy.
- Gagnon, B. et R. R. Simard, 1999. Nitrogen and phosphorus release from on-farm and industrial composts. *Can. J. Soil Sci.* **79**: 481-489.
- Gagnon, B. et R. R. Simard, 2003. Soil P fractions as affected by on-farm composts in a controlled incubation study. *Can. J. Soil Sci.* **83**: 223-226.
- Giroux, M. et T. S. Tran, 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation du phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol* **9**(2): 51-57.
- Giroux, M. et T. S. Tran., 1994. Étude des facteurs affectant l'évolution des teneurs en P et K des sols agricoles. *Agrosol* **7**(2): 23-30.
- Goh, T. B., R. J. Arnaud et A. R. Mermut, 1993. Carbonates. Pages 177-185 *dans* Soil Sampling and Methods of Analysis. M. R. Carter ed., Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Hedley, M. J., J. W. B. Stewart et B. S. Chauhan, 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **46**: 970-976.
- Holford, I. C. R., 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* **35**: 227-39.
- Hue, N. V., H. Ikawa et J. A. Silva, 1994. Increasing plant-available phosphorus in an ultisol with a yard-waste compost. *Commun. soil. sci. plant. anal.* **25**: 3291-3303.
- Isaac, R. A. et N. W. C. Johnson, 1976. Determination of total nitrogen of plant tissue using BD-40 digestion. *J. AOAC* **59**: 98-100.
- Iyamuremye, F. et R. P. Dick, 1996. Organic amendments and phosphorus sorptions by soils. *Adv agron* **56**: 139-185.
- Khasawneh, F. E., E. C. Sample et E. J. Kamprath. 1980. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy Inc., Crop Science Society of America Inc., Soil Science Society of America Inc., Madison, WIS. 910 pages.
- Khiari, L., L. E. Parent, A. Pellerin, A. R. A. Alimi, C. Tremblay, R. R. Simard et J. Fortin, 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. of Environ. Qual.* **29**: 1561-1567.

- Kuo, S., 1996. Phosphorus p.869-919 *dans* Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical methods. D. L. Sparks ed., SSSA, Madison, WI.
- Lampkin, N. 1990. Organic farming. Farming Press Books, Ipswich, UK. 701 p.
- Larney, F. J., A. F. Olson, A. A. Carcamo et C. Chang, 2000. Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer. *Bioresource Technol.* **75**: 139-148.
- Lindsay, W. L. 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, NY. 449 pages.
- Macleod, J. A., S. Kuo, T. L. Gallant et M. Grimmett, 2006. Seafood processing wastes as nutrient sources for crop production. *Can. J. Soil Sci.* **86**: 631-640.
- Maynard, D. G. et Y. P. Kalra, 1993. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. Pages 25-38 *dans* Soil sampling and methods of analysis, Canadian Society of Soil Science. M. R. Carter ed., Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- McKenzie, R. H., J. W. B. Stewart, J. F. Dormaar et G. B. Schaalje, 1992. Long term crop rotation and fertilizer effects on phosphorus transformations. II. In a luvisolic soil. *Can. J. Soil Sci.* **72**: 581-589.
- Mehlich, A., 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of the Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* **15**: 1409-1416.
- Mkhabelaa, M. S. et P. R. Warman, 2005. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agr. Ecosys. Environ.* **106**: 57-67.
- Murphy, J. et J. P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta* **27**: 31-36.
- Mustin, M. 1987. Le compost : Gestion de la matière organique. Éditions François Dubusc, Paris. 954 p.
- O'Halloran, I. P., J. W. B. Stewart et R. G. Kachanoski, 1987. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* **67**: 147-163.
- Ogaard, A. F., 1996. Effect of fresh manure on phosphate retention in soil. *Acta Agri. Scand.* **46**: 98-105.

- Parent, L.-É., 2002. Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore - Ordre des agronomes du Québec, Drummondville.
- Pierzynski, G. M., J. T. Sims et G. F. Vance. 2000. Soils and environmental quality. CRC Press.
- Potvin, D., 2003. Compostage au Québec - enquête 2002. 4e Colloque québécois sur la gestion des matières résiduelles, 21-22 octobre 2003 St-Hyacinthe, Qc. Association québécoise des industriels du compostage.
- Qian, P., J. J. Schoenau, T. Wu et P. Mooleki, 2004. Phosphorus amounts and distribution in a Saskatchewan soil after five years of swine and cattle manure application. *Can. J. Soil Sci.* **84**: 275-281.
- Robitaille, R. et B. Gagnon. 1994. Enquête sur les méthodes de fabrication et d'utilisation de compost à la ferme au Québec. Centre d'agriculture biologique de La Pocatière. 66 pages.
- SAS, Institute. 1999. SAS/STAT user's guide. Version 8., Cary, NC.
- Sharpley, A. N., 1996. Availability of residual phosphorus in manured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**: 1459-1466.
- Sharpley, A. N. et B. Moyer, 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *J. Environ. Qual.* **29**: 1462-1469.
- Sheldrick, B. H. et C. Wang, 1993. Particle size distribution. Pages 499-511 *dans* Soil sampling and methods of analyses, Canadian Society of Soil Science. M. R. Carter ed., Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Sims, J. T., A. C. Edwards, O. F. Schoumans et R. R. Simard, 2000. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *J. Environ. Qual.* **29**(60-71).
- Stevenson, F. J. 1986. Cycles of soil - Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons Inc. 380p.
- Swenson, R. M., C. V. Cole et D. H. Sieling, 1949. Fixation of phosphate by iron and aluminium and replacement by organic and inorganic ions. *Soil Sci.* **67**: 3-22.
- Tiessen, H. et J. O. Moir, 1993. Characterization of available P by sequential extraction. Pages 75-86 *dans* Soil sampling and methods of analysis. M. R. Carter ed., Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

- Tran, T. S. et A. N'dayegamiye, 1995. Long-term effects of fertilizers and manure application on the forms and availability of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* **75**: 281-258.
- Turner, B. L. et A. B. Leytem, 2004. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: Chemical speciation and a novel fractionation procedure. *Environ. Sci. Technol.* **38**: 6101-6108.
- VanHorn, H. H., A. C. Wilkie, W. J. Powers et R. A. Nordstedt, 1994. Components of dairy manure management systems. *J. Dairy Sci.* **77**: 2008-2030.
- Watanabe, F. S. et S. R. Olsen, 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO_3 extracts from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **29**: 677-678.
- Webber, M. D., 2003. Valorisation agricole des biosolides municipaux: Revue de littérature et recommandations concernant l'impact des sels d'aluminium et de fer sur la disponibilité du phosphore du sol. *Agrosol* **14**(1): 22-28.
- Weir, C. C. et R. J. Soper, 1962. Adsorption and exchange studies of phosphorus in some Manitoba soils. *Can. J. Soil Sci.* **42**: 31-42.
- Zheng, Z., R. R. Simard, J. Lafond et L. E. Parent, 2001. Changes in phosphorus fractions of a humic gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources. *Can. J. Soil Sci.* **81**: 175-183.

Annexe A : Données complémentaires sur la caractérisation des composts et des sols

Tableau A.1: Caractéristiques chimiques des composts non-sélectionnés pour l'essai d'incubation

Composts	pH	Humidité	P-PO ₄ (eau)	N-NO ₃ (KCl)	N-NH ₄ (KCl)	C soluble	C organique	C total	Carbonates CaCO ₃	Conductivité électrique	N total	P total (digestion)
PEI-2	7,67	358	8	758	7	262	53,0	15,1	64,9	2908	8,35	2,27
PEI-4	8,20	466	9	39	255	3602	19,1	21,7	12,0	5025	23,45	3,01
QUE-1	8,60	720	973	56	3850	8380	39,0	42,1	7,4	8427	27,25	18,14
QUE-3	6,50	683	722	689	23	2638	39,4	42,1	6,4	3588	16,58	2,60
QUE-4	6,56	630	1272	1984	19	2011	30,0	37,3	19,6	7592	18,10	8,75
BRA-2	7,33	423	1111	1468	521	3550	8,3	11,3	26,6	11133	12,59	4,87
LETH-2	7,61	306	139	380	117	3741	25,2	29,6	14,9	10917	16,20	3,79
AGA-1	6,83	518	545	969	6	1451	32,5	38,0	14,5	4270	20,09	10,11
AGA-2	4,90	596	2504	2866	282	6098	38,2	40,8	6,4	8602	27,30	11,65

Tableau A.2 : Fractions du P des composts non sélectionnés pour l'essai d'incubation

Composts	P-résine	P-NaHCO ₃	P-NaOH	P-HCl	P-total ^z	P-total digestion	P labile ^y	P-organique	P-inorganique	
-----.mg kg ⁻¹ .-----										
-----groupe 1-----	LETH-2	1675	801	406	476	3635	4190	2575	575	2881
	QUE-3	1802	152	194	356	2588	2273	1955	210	2294
-----groupe 2-----	QUE-1	8213	1085	985	4961	15682	20281	8466	113	14299
	QUE-4	3332	683	441	3389	8006	9527	4015	456	7389
	AGA-1	2295	709	526	6195	9926	9943	3004	110	9616
	AGA-2	5195	1700	4845	2546	14642	17674	6895	1190	13097
-----groupe 3-----	BRA-2	3140	521	293	1450	5563	4777	3313	-31	5087
	PEI-2	480	536	229	926	2362	2458	1015	157	2013
	PEI-4	285	533	809	1828	3654	3809	821	508	2950

^z Ce P-total est la somme des fractions P-résine, P-NaHCO₃, P-NaOH, P-HCl et P résiduel.

^y P labile = P-résine + P-NaHCO₃

Tableau A.3 : Caractéristiques des sols non sélectionnés pour l'essai d'incubation

Sols	pH	Conductivité électrique	P M-III	C total	C organique	Carbonates CaCO ₃	Sable	Argile	Texture
		----- μS cm ⁻¹ -----	----- mg kg ⁻¹ -----	----- %-----			----- g g ⁻¹ -----		
sol PEI-1	5,2	331	142	2,10	1,66	21	0,867	0,46	Loam sableux fin
sol BRA	7,5	936	325	6,08	4,27	30	0,858	0,59	Loam argileux
sol SUM	7,7	436	42	0,47	0,31	35	0,199	0,175	Sable loameux
sol QUE-1	5,8	373	723	1,92	1,61	16	0,554	0,167	Sable fin loameux
sol-AGA	5,6	363	170	2,66	1,81	32	0,583	0,118	Loam limoneux

Tableau A.4 : Fractions du P des sols non sélectionnés pour l'essai d'incubation

Sols	P-résine	P-NaHCO ₃	P labile	P-organique	P-inorganique	P-NaOH	P-HCl	P-total
	----- mg kg ⁻¹ -----							
sol PEI-1	101	148	249	45,8	668,0	357	107	774
sol BRA	277	125	402	161	672	176	255	1109
sol SUM	33	22	56	---	471	35	350	481
sol QUE-1	218	250	469	---	1528,0	741	282	1880
sol-AGA	177	186	363	136	1361	838	296	1794

Annexe B : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P suite à l'incubation

Tableau B.1a : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation

Semaine 2		fraction	P résine	P _i NaHCO ₃	P NaHCO ₃ total	P _o NaHCO ₃	Plabile
Analyse de la variance							
Degré de liberté			79	79	79	79	79
			-----Somme des carrés-----				
Répétition			148	152	324	38	80
Compost			837 **	94 **	158 **	17	1461 **
Sol			27509 **	6164 **	16235 **	2430 **	2556 **
Sol*compost			164	30	64	21	164
Erreur			100	24	44	18	183
Contrastes composts							
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem		3472 **	363 **	484 **	9	6547 **
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		1889 **	67	167	23	3180 **
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		474 *	69	46 *	2	817 *
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		1090 **	0	1	3	1024 *
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		207	58	63	0	42
1 vs 5	intra Gr 1		61	181 **	306	16	640
3, 4 vs 7	intra Gr 2		142	50	147	26	0
2 vs 6	intra Gr 3		0	2	79	53	75
Contrastes sols							
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		54930 **	11047 **	30217 **	4723 **	3665 **
2 vs 3	Que vs Pei		31	1160 **	1990 **	111 *	1522 **

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.1b : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation

Semaine 2		fraction			
		P _i NaOH	P NaOH total	P _o NaOH	P HCl
Analyse de la variance					
Degré de liberté		76	76	76	74
		-----Somme des carrés-----			
Répétition		145 600	10782 **	8094	380 000
Compost		369 000 *	867	123	280 000
Sol		6051 960 000 **	550162 **	45639 **	529 960 000 **
Sol*compost		136 000	626	228	230 000
Erreur		145 000	678	325	150 000
Contrastes composts					
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem	1 316 000 **	2308	4	100 000
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	161 000	1217	266	0
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	449 000	861	1	1 410 000 **
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	1 000	20	44	950 000 *
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	474 000	566	41	10 000
1 vs 5	intra Gr 1	648 000 *	1152	39	150 000
3, 4 vs 7	intra Gr 2	176 000	1251	529	30 000
2 vs 6	intra Gr 3	18 000	159	49	0
Contrastes sols					
2, 3 vs 1	Est vs Ouest	1210 207 000 **	1100059 **	91146 **	149 580 000 **
2 vs 3	Que vs Pei	2 000	4	54	891 560 000 **

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.1c : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 2 semaines d'incubation

Semaine 2	fraction	P organique ¹	P inorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
Analyse de la variance						
Degré de liberté		75	76	75	77	73
-----Somme des carrés-----						
Répétition		5768	60 000	620 000	58380	17962 **
Compost		400	430 000 *	470 000	6810	4613
Sol		39959 **	34 250 000 **	161 970 000 **	513683 **	763502 **
Sol*compost		676	150 000	610 000	2486	3221
Erreur		866	190 000	860 000	4393	3011
Contrastes composts						
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem	32	1 360 000 *	10 000	1173	14424 *
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	606	230 000	10 000	7962	5490
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	57	520 000	260 000	16532.3	4213
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	250	900 000 *	970 000	3272.1	7268
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	623	100 000	2 550 000	4439.3	988
1 vs 5	intra Gr 1	479	330 000	430 000	15797.8	7422
3, 4 vs 7	intra Gr 2	703	27	80 000	618.4	1837
2 vs 6	intra Gr 3	449	19	360 000	11776.9	25
Contrastes sols						
2, 3 vs 1	Est vs Ouest	32352 **	643 **	103 400 000 **	383105.2 **	299343 **
2 vs 3	Que vs Pei	48667 **	6261 **	216 280 000 **	690613.0 **	1260433 **

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.2a : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation

Semaine 16		fraction				
		P résine	P _i NaHCO ₃	P NaHCO ₃ total	P _o NaHCO ₃	Plabile
Analyse de la variance						
Degré de liberté		80	80	79	78	79
		-----Somme des carrés-----				
Répétition		71	118	95 000	86	68
Compost		628 **	189 **	2 001 000 **	51 **	1332 **
Sol		29960 **	9995 **	139 020 000 **	2888 **	1626 **
Sol*compost		106	29	339 000	29 **	117
Erreur		68	23	249 000	11.3	211
Contrastes composts						
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem	3150 **	601 **	5 357 000 **	27	7638 **
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	43	106 *	613 000	17	745
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	992 **	33	969 000	76 *	290
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	1304 **	162 *	1 821 000 **	59 *	211
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	65	67	262 000	0.0	1
1 vs 5	intra Gr 1	16	561 **	7 541 000 **	258 *	1273 *
3, 4 vs 7	intra Gr 2	59	2.8	5000	13	34
2 vs 6	intra Gr 3	142	45	456 000	0	366
Contrastes sols						
2, 3 vs 1	Est vs Ouest	59918 **	18081 **	270 182 000 **	5635 **	959 *
2 vs 3	Que vs Pei	3	1910 **	6 422 000 **	87 **	2341 **

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.2b : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation

Semaine 16		fraction			
Analyse de la variance		P _i NaOH	P NaOH total	P _o NaOH	P HCl
Degré de liberté		79	80	80	79
-----Somme des carrés-----					
Répétition		42 000	1 024 000	8 743 000	30000
Compost		442 000 **	547 000	970 000	510 000 **
Sol		609 633 000 **	451 857 000	291 325 000 **	551 210 000 **
Sol*compost		117 000	314 000	1 281 000	250 000 *
Erreur		95 000	255 000	1 116 000	130 000
Contrastes composts					
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem	1 056 000 **	1 012 000	995 000	1 240 000 **
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	3000	122 000	956 000	340 000
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	0.0	32 000	120 000	1 250 000 **
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	209 000	132 000	110 000	800 000 *
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	227 000	48 000	505 000	20 000
1 vs 5	intra Gr 1	1 561 000 **	2 006 000 **	2 921 000	390 000
3, 4 vs 7	intra Gr 2	349 000	865 000	846 000	170 000
2 vs 6	intra Gr 3	24 000	146 000	758 000	500 000
Contrastes sols					
2, 3 vs 1	Est vs Ouest	1 219 064 000 **	903 687 000 **	582 650 000 **	170 350 000 **
2 vs 3	Que vs Pei	15 000	28 000	0	944 880 000 **

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.2c : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P après 16 semaines d'incubation

Semaine 16		fraction	P organique ¹	P inorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
Analyse de la variance							
Degré de liberté			78	79	79	79	78
-----Somme des carrés-----							
Répétition			4728	1247	1 310 000	18805	1873
Compost			926	5172 **	1 550 000 *	8754 **	7558 **
Sol			64043 **	449968 **	165 040 000 **	485666 **	773028 **
Sol*compost			833	1300	640 000	3868	2407
Erreur			1105	977	650 000	2082	2186
Contrastes composts							
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem		2907	15909 **	6 800 000 **	8496 *	33448 **
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		1466	1089	2 380 000	10912 *	5569
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		22	4851 *	790 000	5630	3453
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		551	2098	20 000	96	76
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		951	322	1 110 000	7353	2406
1 vs 5	intra Gr 1		827	5905 *	500 000	30859 **	7206
3, 4 vs 7	intra Gr 2		60	3618	90 000	1185	4609
2 vs 6	intra Gr 3		485	2465	1 090 000	3111	782
Contrastes sols							
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		92535 **	95393 **	100 080 000 **	297358 **	381412 **
2 vs 3	Que vs Pei		39220 **	813405 **	225 000 000 **	688502 **	1205832 **

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.3 : *Analyse de variance* : Interaction sol compost pour le P_o-NaHCO₃ à la semaine 16

Semaine 16		P NaHCO ₃ organique		
		sol	LETHBRIDGE	Î-P-É
Analyse de la variance				
Degré de liberté		26	26	24
		-----Somme des carrés-----		
Répétition		17.8	45	36
Compost		6.30	58 **	42 **
Erreur		6.32	15	15
Contrastes composts				
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem	0.01	154 **	11
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	1.70	10	17
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	36.03 *	14	162
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	10.70	5	50
3, 7, 4 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	5.85	38	17
1 vs 5	intra Gr 1	2.18	218 **	134 **
3, 4 vs 7	intra Gr 2	1.25	5	8.1
2 vs 6	intra Gr 3	9.15	27.87	4

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement.

Tableau B.4 : *Analyse de variance* : Interaction sols-composts pour le P-HCl à la semaine 16

Semaine 16		P HCl		
		sol	LETHBRIDGE	Î-P-É
Analyse de la variance				
Degré de liberté		26	25	26
		-----Somme des carrés-----		
Répétition		63000	172000	44000
Compost		374000 **	393000	266000
Erreur		87000	154000	155000
Contrastes composts				
1 à 8 vs 9	AllP vs Tem	280000	2064000 **	500
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	54000	24000	825000 *
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	1277000 **	99000	242000
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	92000	454000	323000
3, 7, 4 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	635000 *	180000	17000
1 vs 5	intra Gr 1	14000	361000	357000
3, 4 vs 7	intra Gr 2	691000 *	87000	167000
2 vs 6	intra Gr 3	39000	152000	401000

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement.

Tableau B.5a : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 2^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 2		fr action	P résine	P NaHCO ₃ inorganique	P NaHCO ₃ total	P NaHCO ₃ organique	Plabile
Analyse de la variance							
Degré de liberté			71	71	71	71	71
-----Somme des carrés-----							
Répétition			270	426	894	99	241
Compost			1075 **	131 *	261 *	43	1713 **
Sol			59	254 *	889 **	194 *	833
Sol*compost			434	81	170	55	437
Erreur			251	58	106	44	456
Contrastes composts							
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		4409 **	156	390	52.8	7421 **
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		1105 *	162	108	5.4	1906 *
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		2543 **	1	2	6.4	2390 *
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		484	136	146	0.2	98
1 vs 5	intra Gr 1		142	423 **	714 *	37.7	1494
3, 4 vs 7	intra Gr 2		332	116	344	60.7	0
2 vs 6	intra Gr 3		0	6	184	124.8	175
Contrastes sols							
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		78	48	226	65.8	569
2 vs 3	Que vs Pei		40	460 **	1553 **	322.2 **	1096

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.5b : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 2^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 2		fr action	P NaOH inorganique	P NaOH total	P NaOH organique	P HCl
Analyse de la variance						
Degré de liberté			67	68	68	67
			-----Somme des carrés-----			
Répétition			314 000	24336	19224	17 118 000
Compost			305 000	1599	319	11 537 000
Sol			877 000 **	7876 *	1226	20 963 000
Sol*compost			235 000	1570	589	13 747 000
Erreur			166 000	1711	766	16 326 000
Contrastes composts						
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		184 000	2874	607	1 939 000
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		719 000 *	2019	1	8 850 000
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		57 000	42	98	16 000
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		340 000	1355	93	8 760 000
1 vs 5	intra Gr 1		1 217 000 **	2688	91	181 000
3, 4 vs 7	intra Gr 2		42 000	2947	1209	69 327 000 *
2 vs 6	intra Gr 3		7000	353	108	40 000
Contrastes sols						
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		72 000	3887	823	6 912 000
2 vs 3	Que vs Pei		1 669 000 **	11865 *	1629	35 014 000

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.5c : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 2^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 2		fr action	Porganique ¹	Pinorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
Analyse de la variance							
Degré de liberté			67	66	67	68	65
-----Somme des carrés-----							
Répétition			12753	1123	220 000	122108	44445
Compost			2178	6077	300 000	18097	7300
Sol			599	21552 **	830 000	77793 **	28396 *
Sol*compost			4217	3211	510 000	5340	8619
Erreur			5469	3443	790 000	10857	7589
Contrastes composts							
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		2090	4954	43 000	18739	13284
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		471	23697 *	230 000	39008	9750
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		1594	8462	200 000	8302	16045
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		4309	2358	940 000	8885	1988
1 vs 5	intra Gr 1		2822	11879	220 000	36868	16895
3, 4 vs 7	intra Gr 2		1370	630	340 000	1352	4049
2 vs 6	intra Gr 3		1661	1	69 000	27799	64
Contrastes sols							
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		827	197	1 180 000	119	171
2 vs 3	Que vs Pei		370	42823 **	520 000	155567 **	56490 **

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.6a : Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 16^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 16		fraction				
		P résine	P NaHCO ₃ inorganique	P NaHCO ₃ total	P NaHCO ₃ organique	Plabile
Analyse de la variance						
Degré de liberté		71	71	69	69	70
		-----Somme des carrés-----				
Répétition		210	173.8	66.9	230.7	351
Compost		624 **	302.5 **	714.4 **	125.1 **	986
Sol		1264 **	612.8 **	4082.2 **	1403.4 **	2191 *
Sol*compost		263	67.0	86.3	54.7 *	275
Erreur		167	55.6	80.7	23.1	522
Contrastes composts						
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	100	246.7 *	5.8	36.6	1730
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	2314 **	78.1	489.0 *	176.3 **	676
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	3042 **	378.2 *	1097.8 **	134.1 *	508
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	152	155.5	212.8	0.1	1
1 vs 5	intra Gr 1	38	1309.0 **	3684.2 **	601.1 **	2971 *
3, 4 vs 7	intra Gr 2	138	6.6	8.1	29.3	79
2 vs 6	intra Gr 3	333	105.1	184.3	0.1	825
Contrastes sols						
2, 3 vs 1	Est vs Ouest	2304 **	1.2	144.6	265.7 **	726
2 vs 3	Que vs Pei	223	1224.3 **	7927.6 **	2476.0 **	3715 *

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.6b :Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 16^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 16		fr action	P NaOH inorganique	P NaOH total	P NaOH organique	P HCl
Analyse de la variance						
Degré de liberté			71	69	69	69
			-----Somme des carrés-----			
Répétition			763	5752	10530	1 123 000
Compost			1849	6033 **	1772	5 521 200 **
Sol			10396 **	1614	671	10 000 300 **
Sol*compost			1705	4858 **	1896	3 275 500 **
Erreur			1120	1423	1161	998 800
Contrastes composts						
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		29	1295	1482	5 394 000
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		560	3192	758	17 983 900
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		58	3238	633	10 974 500
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		236	48	0	413 400
1 vs 5	intra Gr 1		2769	19245 **	2498	10 929 000
3, 4 vs 7	intra Gr 2		3202	6100 *	1989	54 900
2 vs 6	intra Gr 3		482	12325 **	5523 *	3 560 100
Contrastes sols						
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		3019	1061	739	13 493 900 **
2 vs 3	Que vs Pei		17772 **	2167	557	7 222 000 *

*, ** Significatif à P =0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.6c :Analyse de variance sur les résultats du fractionnement du P pour la 16^e semaine d'incubation en fonction du P ajouté

Semaine 16		fr action	Porganique ¹	Pinorganique ²	P résiduel	P total	P sum ³
Analyse de la variance							
Degré de liberté			68	71	68	71	69
			-----Somme des carrés-----				
Répétition			10075	1384	7 580 000	50253	2885
Compost			2155	21270 **	12 160 000	20516 **	8807
Sol			28820 **	8276 **	126 360 000 *	67645 **	3409
Sol*compost			4382	3162	8 260 000	8409	6307
Erreur			4473	2492	5 780 000	4819	5444
Contrastes composts							
1 à 7 vs 8	Comp vs Min		8431	2901	5 210 000	25465 *	13021
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2		2807	11322 *	19 500 000	13138	8293
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3		2715	7073	20 000	224	257
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3		18	204	23 020 000	17161	5358
1 vs 5	intra Gr 1		6	13781 *	9 530 000	72016 **	17243
3, 4 vs 7	intra Gr 2		1137	8444	4 780 000	2765	10755
2 vs 6	intra Gr 3		2747	3745	16 240 000	7260	1641
Contrastes sols							
2, 3 vs 1	Est vs Ouest		20483 *	7508	138 690 000 **	30319 *	571
2 vs 3	Que vs Pei		47757 **	35032 **	118 300 000 **	104971 **	6373

¹ Porganique = P_o NaHCO₃ + P_o NaOH

² Pinorganique = P résine + P_i NaHCO₃ + P_i NaOH + P HCl

³ P sum = P résine + P NaHCO₃ total + P NaOH total + P HCl + P résiduel

*, ** Significatif à P =0,05 et P = 0,01 respectivement

Tableau B.7 : *Analyse de variance* : Interaction sol compost pour le P-NaOH à la 16^e semaine en fonction du P ajouté

Semaine 16		P NaOH total		
		sol LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Analyse de la variance				
Degré de liberté		23	22	22
		-----Somme des carrés-----		
Répétition		24	14834	3696
Compost		158	4732 **	8246 **
Erreur		112	1048	1677
Contrastes composts				
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	1	5636 *	19603 **
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	453	12066 **	222
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	271	340	5707
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	11	9463 *	9120 *
1 vs 5	intra Gr 1	449	9686 **	9006 *
3, 4 vs 7	intra Gr 2	96	2967	5043
2 vs 6	intra Gr 3	70	2475	18757 **

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement.

Tableau B.8 : *Analyse de variance* : Interaction sol compost pour le P-HCl à la 16^e semaine en fonction du P ajouté

Semaine 16		P HCl		
		sol LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Analyse de la variance				
Degré de liberté		23	23	21
		-----Somme des carrés-----		
Répétition		520000	303000	417000
Compost		2410000 *	481000	7757000 *
Erreur		590000	514000	2349000
Contrastes composts				
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	250000	3030000 *	2909000
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	8160000 **	31000	17322000 *
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	730000	146000	18731000 *
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	3690000 *	60000	318000
1 vs 5	intra Gr 1	130000	109000	27931000 **
3, 4 vs 7	intra Gr 2	3910000 *	28000	3016000
2 vs 6	intra Gr 3	310000	51000	6194100

*, ** Significatif à P = 0,05 et P = 0,01 respectivement.

Tableau B.9 : *Analyse de variance* : Interaction sols-composts pour le $P_o\text{-NaHCO}_3$ à la 16e semaine en fonction du P ajouté

Semaine 16		$P_o\text{-NaHCO}_3$ organique		
		sol LETHBRIDGE	Î-P-É	QUÉBEC
Analyse de la variance				
Degré de liberté		23	23	21
		-----Somme des carrés-----		
Répétition		28.4	107.9	129.8
Compost		16.8	104.7 *	108.9 *
Erreur		15.1	27.9	28.8
Contrastes composts				
1 à 7 vs 8	Comp vs Min	4.0	22.7	37.8
1, 5 vs 3, 7, 4	Gr 1 vs Gr 2	84.1 *	31.8	379.1 **
1, 5 vs 2, 6	Gr 1 vs Gr 3	25.0	12.0	114.1
3, 4, 7 vs 2, 6	Gr 2 vs Gr 3	13.7	89.0	41.0
1 vs 5	intra Gr 1	5.1	508.0 **	312.3 **
3, 4 vs 7	intra Gr 2	2.9	11.0	18.9
2 vs 6	intra Gr 3	21.4	65.0	7.3

*, ** Significatif à $P=0,05$ et $P=0,01$ respectivement.

