

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

COMPARAISON DE LA CROISSANCE DU PIN GRIS ET DE L'ÉPINETTE
BLANCHE EN PLANTATION EN MILIEU FORESTIER ET AGRICOLE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE EXTENSIONNÉE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
INÈS NELLY MOUSSAVOU BOUSSOUGOU

OCTOBRE 2006

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
RÉSUMÉ.....	vii

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
1.2.1 Modification de la structure du sol.....	4
1.2.2 Masse volumique et résistance du sol.....	4
1.2.3 Macroporosité et aération du sol.....	5
1.2.4 Microporosité, rétention en eau du sol et infiltration.....	6
1.2.5 Modification de la répartition de la matière organique.....	7
1.2.6 La quantité et la qualité de la matière organique.....	7
1.2.7 Compactage et activité biologique.....	8
1.2.8 Compactage et croissance.....	9
1.2.9 Nutrition et croissance.....	10
1.3 Objectifs.....	12
1.4 Hypothèses.....	12

CHAPITRE II

COMPARAISON DE LA CROISSANCE DU PIN GRIS ET DE L'ÉPINETTE BLANCHE EN PLANTATION EN MILIEU FORESTIER ET AGRICOLE.....	13
2.1 RÉSUMÉ.....	13
2.2 ABSTRACT.....	13

2.3 INTRODUCTION	14
2.4 MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	15
2.4.1 Sites échantillonnés.....	15
2.4.2 Dispositif de mesure et collecte des données.....	17
2.4.3 Analyses de laboratoire	19
2.4.3.1 Propriétés physiques	19
2.4.3.2 Propriétés chimiques	20
2.4.3.3 Analyse de la croissance.....	21
2.4.4 Analyses statistiques	21
2.5. RÉSULTATS.....	21
2.5.1 Conditions physiques du sol dans les plantations	22
2.5.2 Conditions chimiques du sol dans les plantations	26
2.5.3 Croissance dans les plantations.....	30
2.5.4 Relations croissance et qualité des sols	30
2.6 DISCUSSION.....	34
2.6.1 Propriétés physiques des sols.....	34
2.6.1.1 Effet du milieu sur les conditions physiques du sol.....	35
2.6.1.2 Effet de l'essence sur les conditions physiques du sol.....	36
2.6.2 Propriétés chimiques des sols.....	36
2.6.2.1 Effet du milieu sur les conditions chimiques du sol.....	36
2.6.2.2 Effet de l'essence sur les conditions chimiques du sol.....	37
2.6.3 Relation âge - croissance	38
2.6.4 Relation sol - croissance.....	39
2.6.5 Relation milieu – croissance	39
2.7 CONCLUSION	40
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	41
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	42

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Sites échantillonnés à l'intérieur de la région écologique 5a	16
2.2 Masse volumique (a) et macroporosité (b) à 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur en fonction des milieux et des essences.....	23
2.3 Capacité au champ (a), point de flétrissement (b) et capacité de rétention en eau disponible (c) des sols à 0 - 10 cm et 10 - 20 cm de profondeur en fonction du milieu et de l'essence. Rétention en eau disponible (d) pour chaque combinaison essence - milieu.	25
2.4 Relation entre point de flétrissement des sols et la concentration en carbone organique à 0-10 cm (a) et 10-20 cm (b) de profondeur.....	27
2.5 Carbone organique (a), N. Kjeldahl (b) et qualité de la matière organique (c) du sol (Qualité MO) à 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur en fonction du milieu.....	28
2.6 Minéralisation nette de l'azote entre 0 – 10 cm et entre 10 - 20 cm pour chaque combinaison de milieu et d'essence.....	29
2.7 Croissance annuelle en hauteur et en diamètre de 2001 à 2004 de l'épinette blanche (a) et du pin gris (b) en fonction des milieux.....	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Caractéristiques générales des plantations échantillonnées en fonction du milieu et de l'essence forestière	18
2.2 Effet du type du milieu, de l'essence et de leur interaction sur les propriétés physiques et chimiques des sols	24
2.3 Effet de l'âge de la plantation et du milieu sur la croissance en hauteur et en diamètre pour l'épinette blanche et le pin gris.....	31
2.4 Relation entre la croissance en hauteur et en diamètre du pin gris et de l'épinette blanche et les paramètres de sol	35

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail a été rendue possible grâce à la collaboration de plusieurs personnes.

Je remercie l'Agence Canadienne pour le Développement International (ACDI) et le Programme Canadien de Bourse de la Francophonie (PCBF) qui ont bien voulu financer mes études de maîtrise au Canada. Mes remerciements s'adressent également au Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) sans qui cette étude n'aurait jamais vu le jour.

J'adresse mes remerciements à mes directrices, Suzanne Brais et Francine Tremblay qui ont accepté de diriger cette recherche. Mes sincères remerciements à Stéphane Gaussiran du Réseau de Ligniculture Québec (RLQ), qui a travaillé sur les aspects méthodologiques et le suivi des équipes de terrain. Je n'oublie pas Jean-Marc St-Amand de la compagnie forestière Tembec et les propriétaires privés qui ont bien voulu prêter les sites de plantations pour l'étude.

Je remercie tous les techniciens et techniciennes qui ont participé à la collecte de données durant deux étés successifs 2004 et 2005, soit Thuy Nguyen, Alain Arseneault, Josée Chrétien, Émilie Leduc, Josée Frenette, Maude Baril-Létourneau, Charline Larivière, Alfred Coulombe, Lise Guillermin, stagiaire et Jean Goyard de la Coop Kinojévis. J'adresse ma profonde gratitude aux techniciens de laboratoire qui ont analysé les échantillons de sol; il s'agit de Linda Perreault de l'UQAT et de Alain Brousseau de l'Université Laval.

Un grand merci à ceux qui de près ou de loin ont participé de quelque façon que ce soit en rapport avec cette recherche.

J'accorde une attention particulière à Monique Fay, responsable de l'immigration à l'UQAT, qui s'est occupée au même titre que le PCBF de mon intégration à Rouyn-Noranda.

Ma reconnaissance s'adresse à Julie Lacerte, Steve Lalancette et familles pour la sympathie et l'enthousiasme dont ils ont fait preuve durant tout mon séjour au Canada.

Je n'oublie pas de remercier mes amis (es) et condisciples, Ingrid Cea, Lihong Zhai, Marie Eve Sigouin, Saloumeh Momenipour, Venceslas Goudiaby, et Arvin Beekhary à l'UQAT, pour le soutien moral et avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

J'adresse ma reconnaissance à tous les professeurs (es) qui ont été impliqué (es) dans ma formation.

J'adresse mes remerciements à mes parents, dont ma mère Élisabeth Ngueba pour le réconfort et l'incitation à fournir le meilleur de moi-même. Un merci particulier à Koumakpayi Raphiou qui a toujours cru en moi et encourager à aller de l'avant.

J'adresse ma profonde gratitude à mon amour, Serge Corbet du Gabon pour ses encouragements et qui a su maintenir mon équilibre sentimental pendant ces deux années d'études au Canada.

RÉSUMÉ

L'installation des zones de sylviculture intensives vise à établir un équilibre entre les objectifs de conservation et de production de fibre ligneuse. En Abitibi-Témiscamingue le reboisement des friches agricoles constitue un élément de l'aménagement forestier durable des régions périphériques. Le milieu agricole offre-t-il une productivité comparable au milieu forestier, compte tenu du compactage causé par l'utilisation des machines et le labourage plus accentué? Les objectifs de l'étude étaient de comparer la croissance du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) en plantations établies sur sols agricoles et forestiers, d'évaluer les indices de qualité du sol et la productivité des espèces. L'échantillonnage comprenait 20 plantations de pin gris et 20 plantations d'épinette blanche en milieu agricole et forestier dans la région écologique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest du Québec. Les paramètres de croissance des arbres mesurés étaient la hauteur totale, le diamètre et la longueur des cinq derniers verticilles. Les indices de qualité du sol évalués comprenaient les propriétés physiques et chimiques du sol. La comparaison des propriétés des sols entre les deux milieux a révélé que les sols agricoles sont modifiés par l'effet du compactage. Les macroporosités étaient plus élevées de 3 et 4% en milieu forestier. La capacité au champ était de 3 et 5% plus élevée en milieu agricole et les points de flétrissement de 6 et 5% supérieurs à ceux des sols forestiers. L'épinette blanche augmentait la masse volumique du sol au fil du temps, le pin gris favorisait une macroporosité plus élevée des sols. Les sols forestiers avaient un taux de minéralisation de l'azote plus élevé et une meilleure qualité de la matière organique. L'augmentation de la capacité au champ en milieu agricole favorisait la croissance en hauteur du pin gris, l'azote minéralisé favorisait la croissance de l'épinette blanche. La croissance des deux essences n'a pas été pour autant différente d'un milieu à l'autre.

Mots clés : *Pin gris, Épinette blanche, Plantations, Croissance, Compactage du sol, Propriétés physiques et chimiques du sol, Région écologique de la sapinière à bouleau blanc du Québec (5a).*

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 PROBLÉMATIQUE

Alors que la consommation mondiale de bois est en augmentation, les superficies forestières sont en pleine régression (FAO, 2003). Les résultats d'une étude de la FAO prévoient une augmentation dans l'évolution générale de la demande jusqu'à l'an 2010 que pourra couvrir les stocks de bois existant à condition que les ressources forestières soient aménagées de manière durable (FAO, 2003). La prise de conscience des populations face aux problèmes des changements climatiques, ainsi que les enjeux de conservation de la forêt et de sa diversité a entraîné des engagements à travers de nouvelles politiques mondiales (Nations-Unies, 1992) en favorisant par exemple le recours aux plantations d'arbres et à la sylviculture intensive.

Par ailleurs, l'aménagement des sols agricoles était l'une des préoccupations débattues dans le protocole de Kyoto lors de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (Nations-Unies, 1992). Les sols agricoles et forestiers constituent des puits de carbone non négligeables pour la mitigation des gaz à effet de serre (FAO, 2002). Le protocole de Kyoto, dans son article 3 (alinéas 3 et 4) souligne l'intérêt de disposer de nouvelles techniques d'utilisation des terres et également l'importance du reboisement pour accroître la séquestration de carbone (Nations-Unies, 1992).

La nouvelle vision canadienne de la forêt vise à établir un équilibre entre les objectifs de conservation et de production de fibre ligneuse par l'installation des zones de ligniculture intensive. En Abitibi-Témiscamingue, la ressource forestière occupe une place importante. Les sites alloués au reboisement dans cette région sont constitués des anciennes friches agricoles et des forêts publiques. Le plan de mise en valeur initié par le Syndicat des Producteurs de Bois de l'Abitibi-Témiscamingue en 2000

visait une augmentation du rendement des peuplements résineux¹ (SPBAT, 2000). C'est dans cette même visée que s'inscrivaient les propositions de l'Association forestière de l'Abitibi-Témiscamingue (A.F.A.T *et al.*, 1998) faites au Ministre des ressources naturelles et de la faune (MRNF). Ce dernier donna l'aval de faire de l'Abitibi-Témiscamingue, une région pilote pour l'application du rendement forestier accru. Les friches à aménager en Abitibi couvrent une superficie de plus de 100 000 hectares. Ce qui est d'autant plus intéressant pour le boisement car ces terres sont situées près des infrastructures et de la population (A.F.A.T *et al.*, 1998; Côté, 1998a), et permet également de créer des emplois à proximité des milieux habités² (Côté, 1998b).

En milieu forestier et agricole, les espèces végétales sont soumises à des conditions de croissance différentes (Murty *et al.*, 2002; Pagliai *et al.*, 2003). Le sol en milieu forestier apparaît comme relativement peu perturbé par rapport au sol agricole, le cycle de la matière organique est en équilibre avec la dynamique végétale. D'un autre côté, en milieu agricole, la transformation de la forêt originale et l'utilisation des machines ont modifié les conditions initiales (Murty *et al.*, 2002).

L'aménagement des terres pour le reboisement est confronté au problème du compactage des sols. Le compactage modifie les propriétés physiques du sol. Elle augmente la résistance, la rétention en eau et diminue la porosité à l'air du sol ou macroporosité (Pagliai *et al.*, 2003) et réduit la minéralisation de la matière organique (Murty *et al.*, 2002). La sévérité du compactage varie selon qu'on se situe en milieu forestier ou agricole. En milieu forestier, il se fait essentiellement sous les roues de la machinerie lors de la récolte des bois, alors qu'en milieu agricole, le compactage est plus étendu (Pagliai *et al.*, 2004). Le labourage fréquent des terres conduit à un tassement à long terme du sol (Murty *et al.*, 2002). Aussi, les sols

¹ La forêt privée compte 18% de résineux dans toute sa superficie contre 71 % des feuillus.

² L'A.F.A.T a initié des travaux sylvicoles après son congrès annuel tenu en Novembre 1997 sur le rendement accru, ce qui s'est traduit par la mise en place du projet d'intensification de l'aménagement forestier dans la région 08 du M.R.N.

forestiers disposent d'une couche de matière organique en surface riche en nutriments alors que les sols agricoles en sont dépourvus, ou celle-ci est incorporée dans le sol lors du labourage. Ce dernier entraîne initialement la dégradation rapide de la matière organique, ce qui crée un déficit à long terme par rapport aux sols forestiers.

Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) sont deux essences qui présentent un potentiel économique certain. Elles sont couramment plantées dans la région. Aussi, le pin gris croît sensiblement plus vite que les autres résineux de la région, en dehors du mélèze (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch). Il peut atteindre une hauteur moyenne de 2,1 m en 10 ans de croissance comparable à celle du mélèze (SPBAT, 2000).

Nous avons mené une étude comparative de la croissance du pin gris et de l'épinette blanche dans deux milieux, à savoir des plantations en milieu agricole et des plantations en milieu forestier, afin d'établir le lien entre la croissance et les propriétés du sol. Les questions à la base de notre étude sont :

Dans quelle mesure, les propriétés physiques des sols agricoles sont-elles différentes de celles des sols forestiers et ces différences ont-elles une incidence sur la croissance des arbres?

La croissance des espèces forestières est-elle affectée par la baisse de matière organique en milieu agricole?

La qualité de la matière organique est-elle différente en milieu agricole et cette qualité a-t-elle une incidence sur la croissance des arbres en plantations?

1.2 REVUE DE LITTÉRATURE

La circulation des machines avec les fortes pressions ainsi que les vibrations qu'elles exercent, modifie la structure du sol (Marsili *et al.*, 1998; Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2001). Elle affecte ainsi la masse volumique ou densité du sol, la macroporosité, la rétention en eau. La modification des propriétés physiques peut affecter à son tour la transformation biochimique des nutriments, en réduisant la minéralisation de la matière organique du sol (Blumfield *et al.*, 2005; Brevik *et al.*, 2002; Etana *et al.*, 1999; Gomez *et al.*, 2002; McNabb *et al.*, 2001).

1.2.1 Modification de la structure du sol

À titre d'exemple, dans une étude portant sur un sol argileux, l'examen microscopique des sections de sols montre que dans un sol non compacté, il y a présence de structure en blocs angulaires et sub-angulaires (Marsili *et al.*, 1998; Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2005). Ces derniers sont répartis de manière homogène entre 0 et 20 cm, tandis que dans le sol compacté, la structure est plutôt massive entre 0 et 10 cm. Aussi dans la couche 0 à 5 cm, les pores allongés sont minces et orientés de façon parallèle à la surface (Marsili *et al.*, 1998; Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2005). Cette orientation parallèle des micropores à la surface et sans continuité dans la direction verticale favorise l'érosion des sols (Marsili *et al.*, 1998; Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2005). De même, le labourage intensif conduit à la rupture des agrégats du sol (Plante et McGill, 2002). Ce dernier devient alors plus susceptible au compactage.

1.2.2 Masse volumique et résistance du sol

La masse volumique du sol augmente avec le nombre de passages exercés par la machinerie (Franzluebbers, 2002b; Siegel_Issem *et al.*, 2005). L'étude de Marsili *et*

al. (1998), réalisée sur un terrain plat argileux bien drainé, a montré que, pour un engin déterminé, la masse volumique du sol après un passage était de $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ tandis qu'elle augmentait légèrement à $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ après quatre passages. Les valeurs de la masse volumique ainsi trouvées sont corroborées par les résultats de l'étude de Siegel-Issem *et al.* (2005).

L'étude comparative entre deux types de sol, un sol compacté et un autre non compacté a montré que la masse volumique sur la partie compactée est supérieure à celle non compactée dans les 10 premiers cm de profondeur (Brais et Camiré, 1998; Brevik *et al.*, 2002). L'intensité du compactage est également liée à la texture. Pour des sols ayant subi une intensité identique de compactage, le sol argileux présenterait une masse volumique élevée par rapport à un sol sablo-argileux ou sableux (Gomez *et al.*, 2002).

Le compactage augmente la résistance physique du sol à l'élongation des racines (Gomez *et al.*, 2002). Cette dernière augmente progressivement dans les 5 premiers cm du sol avec le nombre de passage (Brais et Camiré, 1998). La comparaison des propriétés morphologiques et physiologiques entre un sol agricole cultivé et un sol forestier de même origine dans le nord de la Norvège a montré que l'horizon de surface du sol agricole cultivé et plus compacté offrait une haute résistance à la pénétration des racines (Sveistrup *et al.*, 2005). Aussi, cette résistance est encore plus élevée lorsque le sol est sec par rapport à un sol humide (Bullock *et al.*, 1986; Gerard *et al.*, 1982).

1.2.3 Macroporosité et aération du sol

La macroporosité regroupe les pores dont le diamètre est supérieur à $30 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ ou $60 \mu\text{m}$ dépendant des auteurs (Brais, 1994; Bullock *et al.*, 1986; Marsili *et al.*, 1998; Shestak et Busse, 2005) et dans lesquels l'eau circule par gravité et laissent donc la place aux gaz qui permettent l'aération du sol. Selon, Pagliai *et al.* (2004), un sol est dense et compact lorsque la macroporosité est inférieure à 10%,

modérément poreux lorsqu'elle est comprise entre 10 et 25 %, poreux lorsqu'elle est comprise entre 25 et 40% et extrêmement poreux lorsqu'elle est au dessus de 40%. Le compactage réduit la macroporosité du sol (Gomez *et al.*, 2002; McNabb *et al.*, 2001; Shestak et Busse, 2005; Siegel_Issem *et al.*, 2005). Selon Shestak et Busse (2005), la macroporosité d'un sol après compactage peut décroître de 26 % dans une terre argileuse. En milieu forestier, la diminution de la macroporosité du sol dans l'horizon de surface 0 – 10 cm augmente avec le nombre de passage des engins (Brais et Camiré, 1998; Pagliai *et al.*, 2003). Après un seul passage de l'engin, la macroporosité passe d'un niveau poreux à modérément poreux voire dense, tandis qu'après quatre passages, le sol devient très dense, la macroporosité est alors inférieure à 5 % (Pagliai *et al.*, 2003). Ces valeurs obtenues sont corroborées par les études antérieures de Marsili *et al.* (1998), où après un à quatre passages, le sol devient dense : entre 0 - 10 cm la macroporosité est égale à 8,5% et entre 10 et 20 cm de profondeur, la macroporosité passe à 7,5%. La réduction du diamètre des macropores suite au compactage entraîne des difficultés à la circulation de l'air dans le sol (Matko, 2004), ce qui peut avoir un effet sur l'activité microbologique et la croissance des plants (Blumfield *et al.*, 2005; Siegel_Issem *et al.*, 2005).

Le compactage affecte aussi l'infiltration des gaz dans le sol, notamment le dioxyde de carbone. Selon Hamza et Anderson (2005), le pourcentage de dioxyde de carbone trouvé était de 2,77 % dans la partie non compactée d'un sol tandis qu'elle n'était que de 1,60 % dans la partie compactée.

1.2.4 Microporosité, rétention en eau du sol et infiltration

Par ailleurs, le compactage augmente le nombre de pores dont le diamètre est inférieur à 60 μm (microporosité) et dans lesquels les mouvements d'eau disponible pour les plantes, se font lentement par capillarité (Hillel, 1998). Le compactage sévère peut augmenter la quantité de micropores plus fins ($< 0,2 \mu\text{m}$) de 61% (Shestak et Busse, 2005).

Cette augmentation conduit généralement à une plus forte rétention en eau et augmente l'humidité du sol (Gemtos et Lellis, 1997). La comparaison du taux d'humidité dans un sol compacté et non compacté, montre que le contenu en eau est plus élevée dans la couche 0 - 10 cm pour un sol compacté ($0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) par rapport au sol non compacté ($0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Blumfield *et al.*, 2005).

L'analyse dans deux types de sol dans le nord de la Norvège a montré que l'horizon de surface plus compact freinait aussi l'infiltration de l'eau dans les sols agricoles par rapport aux sols forestiers (Sveistrup *et al.*, 2005). La conductivité hydraulique est directement corrélée à la continuité des pores dans le sol (Pagliai *et al.*, 2003). Cette continuité de transmission des pores est réduite par le compactage (Pagliai *et al.*, 2004). On observe aussi que l'infiltration des eaux dans un sol non labouré est trois fois plus grande que dans un sol ayant été intensément labouré, et que la matière organique ralentie la vitesse de l'eau et la retient évitant ainsi le départ des particules du sol (Franzluebbers, 2002a).

1.2.5 Modification de la répartition de la matière organique

Le labourage agricole dans l'aménagement des terres modifie aussi la répartition de la matière organique dans le sol. Par contre l'incorporation de la matière organique a pour effet de diminuer la masse volumique du sol, et cela permet de réduire l'effet du compactage (Gemtos et Lellis, 1997).

1.2.6 La quantité et la qualité de la matière organique

En forêt boréale, la matière organique provenant de la litière aérienne des plantes, s'accumule à la surface du sol. Celle-ci est ensuite décomposée par les micro-organismes conduisant à la formation d'une couche humique en surface. Ces micro-organismes assurent la migration progressive des éléments minéraux dans les

autres horizons du sol (Franzluebbers, 2002a). En milieu forestier, la couche de matière organique en surface constitue un réservoir de nutriments dans le sol et facilite l'infiltration des eaux (Bigras et Margolis, 1997; Franzluebbers, 2002b; Plante et McGill, 2002; Six *et al.*, 2002). Dans les sites agricoles par contre, la matière organique en surface est presque inexistante à cause du labourage qui intègre la matière organique au sol minéral (Murty *et al.*, 2002). L'enrichissement en matière organique se fait principalement via la litière des racines et les résidus de carbone provenant des racines demeurent longtemps dans le sol à cause de la rigidité de la lignine (Puget et Drinkwater, 2001).

L'incorporation de la matière organique fraîche constitue un moyen de maintenir la matière organique dans les sols agricoles (Hadas *et al.*, 2004). Cette incorporation d'engrais vert ou de paille entraîne une dégradation plus rapide de la matière organique, intensifiant ainsi la minéralisation (Fontaine *et al.*, 2003; Hadas *et al.*, 2004) et une assimilation rapide.

La matière organique est composée des fractions ayant des taux de décomposition distincts. Il y a une fraction qui est facilement décomposée par la biomasse microbienne, et une autre fraction difficilement décomposable, comportant des substances humiques au poids moléculaire élevé (Bolinder *et al.*, 1994; Hadas *et al.*, 2004; Parton *et al.*, 1993; Sjoberg *et al.*, 2004). La qualité de la matière organique peut donc varier selon le type de résidus apporté au sol. Les résidus des plantes se décomposent plus rapidement alors que les litières des arbres, plus lignifiées, sont difficilement dégradées (Hadas *et al.*, 2004).

1.2.7 Compactage et activité biologique

Le compactage peut aussi avoir un impact sur l'activité microbologique (Dick *et al.*, 1988; Jordan *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2004). Un changement de propriétés physiques du sol, incluant la baisse de la macroporosité, du contenu en air, de l'infiltration des

eaux peut réduire l'activité enzymatique. Selon Dick *et al* (1988), le compactage diminue la biomasse de carbone ainsi que l'activité enzymatique.

Par contre le rapport C/N qui permet de déterminer le degré d'activité de la matière organique dans le sol, révèle que dans un sol compacté ce rapport est plus faible par rapport à un sol non compacté (Brevik *et al.*, 2002; DeGryze *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2004). Les valeurs du rapport C/N dans l'étude de Brevik *et al.* (2002) sont de 10,00 dans un sol non compacté et 8,58 dans la partie compactée.

L'analyse des sols agricoles non labourés en Colombie Britannique a montré qu'il y avait une forte concentration de carbone organique (6.1 kg.m^{-2}) dans la couche de surface du sol non labouré par rapport à un sol labouré et cette concentration diminuait avec la profondeur. La même observation a été faite pour la minéralisation de l'azote (Franzluebbers, 2002a).

1.2.8 Compactage et croissance

La diminution de la productivité des sols est souvent reliée au degré de compactage (Benjamin *et al.*, 2003; Powers *et al.*, 2005; Rosenberg, 1964). La croissance des arbres est limitée par la réduction de la perméabilité, la macroporosité des sols et de l'espace alloué aux racines (Grigal, 2000). Le compactage agit particulièrement au niveau des racines de la plante, et cause l'envoi d'un signal chimique au niveau des feuilles et affecter la croissance de la plante (Passioura, 2002).

Le compactage en milieu agricole retarde l'émergence des plantes. Ce retard est plus grand dans les sols argileux que dans des sols sableux (Gemtos et Lellis, 1997). La résistance du sol ainsi que la masse volumique ont un impact sur la croissance des racines en limitant l'accès à l'eau et aux nutriments (Siegel_Issem *et al.*, 2005).

Les modifications des propriétés physiques du sol et de la dynamique de la décomposition de la matière organique peuvent avoir des impacts sur la nutrition des plantes. Le compactage conduit à la réduction de l'accès aux nutriments disponibles

dans le sol. La diminution de la macroporosité et la faible infiltration des eaux et des gaz réduit l'immobilisation de l'azote indispensable aux plantes (Jordan *et al.*, 2003).

1.2.9 Nutrition et croissance

La principale source d'azote prélevée par les plantes dans les écosystèmes terrestres provient de la minéralisation de la matière organique. Aussi, l'azote est généralement le nutriment limitant de la croissance des plants de conifère (Hangs *et al.*, 2002). Certains conifères, dont l'épinette blanche et le pin gris, prélèvent sélectivement l'ammonium par rapport aux nitrates (Hangs *et al.*, 2002; Kronzucker *et al.*, 1996). L'azote du sol favorise l'accroissement en diamètre et en hauteur des plantes (Carlyle, 1998; Hamel *et al.*, 2004). Cependant, la nutrition minérale des arbres peut être limitée par le prélèvement des nutriments par la végétation compétitrice (Jobidon, 2000).

Outre les propriétés physiques du sol, d'autres facteurs ne faisant pas partie de la problématique actuelle de l'étude, interviennent dans la croissance du pin gris et de l'épinette blanche. La croissance des arbres en forêt boréale est influencée par la compétition interspécifique (Hangs *et al.*, 2002; Kronzucker *et al.*, 1996). La concurrence interspécifique diminue la surface terrière des arbres (Lauer et Glover, 1999). Aussi, le pin gris est une espèce intolérante à l'ombre (Yorks et Adams, 2003), alors que l'épinette blanche est semi-tolérante et se régénère mieux sous couvert (Chhin et Wang, 2002).

Le climat en forêt boréale est marqué par une forte variation de température qui influence fortement la productivité des espèces forestières. Les températures de sol élevées facilitent le prélèvement des nutriments dans le sol en augmentant la croissance en longueur des racines, et accélèrent la minéralisation dans le sol (Domisch *et al.*, 2001). Les températures élevées facilitent la croissance radiale du pin gris tandis que l'épinette blanche est adaptée à des températures basses (Dang et Cheng, 2004).

Des études ont été effectuées sur l'adaptation des espèces boréales au gel (Bigras et Margolis, 1997; Jonsson *et al.*, 2004a; Jonsson *et al.*, 2004b). Le gel tardif cause des dommages aux plants d'épinettes lorsque les températures du milieu restent longtemps en dessous du niveau d'endurcissement, notamment les températures en dessous de zéro qui subsiste après la période de dégel (Bigras et Margolis, 1997).

En résumé, nous retenons que les opérations forestières et les pratiques agricoles engendrent le compactage du sol. L'effet du compactage s'observe sur les propriétés physiques du sol, ce qui modifie la qualité des sols pour la croissance des arbres. Les deux principales différences observées dans les milieux agricole et forestier sont l'étendue et la sévérité du compactage d'une part et la distribution de la qualité de la matière organique dans le sol.

Le compactage est plus accentué dans le milieu agricole que dans le milieu forestier. En milieu agricole, on note une macroporosité plus faible, une capacité de rétention en eau du sol plus élevée du fait de l'augmentation de la microporosité, ainsi que la résistance du sol élevée par rapport au milieu forestier. De ce fait, il est probable que les racines des plantes aient du mal à se développer dans les sols agricoles. Le prélèvement des nutriments par les racines dans le sol peut être également entravé par le compactage. Tous ces facteurs regroupés pourraient affecter la croissance des arbres.

Par ailleurs, la distribution de la matière organique dans le sol est différente d'un milieu à l'autre. On note qu'il y a une couche superficielle importante de matière organique à la surface en milieu forestier. La matière organique en milieu agricole provient essentiellement de restes des cultures et des racines et se dégrade plus rapidement dans le sol par rapport à celle provenant des litières plus lignifiées des arbres, plus coriace et difficilement dégradable.

Il est probable que le compactage ait un effet sur la croissance du pin gris et/ou de l'épinette blanche, car il affecte l'activité biologique dans le sol et le prélèvement des nutriments. Aussi, le pin gris et l'épinette blanche ont des exigences et des

sensibilités différentes. Les épinettes sont plus adaptées au sols humides (Chhin et Wang, 2002; Van Cleve *et al.*, 1993), mais poussent mieux dans un substrat plus riche en nutriments (Dang et Cheng, 2004).

1.3 OBJECTIFS

Les objectifs de cette étude sont (i) de comparer des indices de qualité du sol sous des aménagements contrastants, (ii) de comparer la croissance de deux espèces aux exigences différentes et (iii) d'évaluer la productivité des plantations établies sur sols agricoles relativement à celles établies en milieu naturel.

1.4 HYPOTHÈSES

Les hypothèses à la base de cette étude sont :

1. La modification des conditions physiques du sol due au compactage du sol est plus élevée en milieu agricole qu'en milieu forestier, et cela peut modifier la croissance des espèces en milieu agricole par rapport au milieu forestier ;
2. Le milieu forestier est plus riche en nutriments que le milieu agricole;
3. Le pin gris et l'épinette blanche auront une meilleure croissance en milieu forestier en raison des conditions physiques plus favorables et de la disponibilité plus élevée en nutriments.

CHAPITRE II

COMPARAISON DE LA CROISSANCE DU PIN GRIS ET DE L'ÉPINETTE BLANCHE EN PLANTATION EN MILIEU FORESTIER ET AGRICOLE

2.1 RÉSUMÉ

Le reboisement des friches agricoles constitue un des éléments de l'aménagement forestier durable des régions périphériques de l'Abitibi-Témiscamingue. Une étude comparative entre le milieu forestier et agricole des conditions physiques de sols, de la qualité de la matière organique et de la croissance du pin gris (*Pinus banksiana* (Lamb.)) et de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) a été réalisée dans 40 plantations. Les sols en milieu agricole ont une capacité au champ plus élevée et une faible macroporosité du sol de 3 à 5%. La qualité de matière organique définie comme la proportion de l'azote total susceptible de se minéraliser, était meilleure en milieu forestier. Malgré les différences des conditions de sols entre les milieux, la croissance était similaire entre les deux milieux. Le pin gris a montré un patron de croissance en hauteur stable. L'âge expliquait 88% de la variation en hauteur. L'épinette blanche contribuait particulièrement à augmenter la masse volumique du sol au fil du temps.

Mots clés : Croissance, compactage du sol, épinette blanche, pin gris, plantations

2.2 ABSTRACT

The afforestation of old fields represents an essential element of sustainable forest management in regions of Abitibi-Témiscamingue. A comparative study of plantations productivity established in old fields and after forest harvesting, based on soil physical properties, organic matter quality, jack pine (*Pinus banksiana* (Lamb.)) and white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss.) growth was conducted in 40 plantations. Plantations in old fields had higher field capacity and weak macroporosity ranging from 3 to 5%. Organic matter defined as the proportion of total nitrogen likely to be mineralized, was higher in forest plantations with a high nitrogen availability. In spite of the differences in soils conditions, jack pine and white spruce growth was similar in both environments. Jack pine height growth did not change over time and the age explained 88% of the variation. White spruce particularly contributed to increasing soil bulk density.

Key words: Growth, Compaction, White spruce, Jack pine, Plantations

2.3 INTRODUCTION

La nouvelle vision canadienne de la forêt vise à établir un équilibre entre les objectifs de conservation et de production de fibre ligneuse par l'installation de zones de ligniculture intensive. La ressource forestière occupe une place importante en Abitibi-Témiscamingue dans le nord-ouest québécois où les friches agricoles et forestières à aménager couvrent une superficie de plus de 100 000 hectares. Cette région est caractérisée par la présence de dépôts riches en argile jadis utilisés pour l'agriculture (Veillette *et al.*, 2000).

Les conditions de sol en milieu agricole peuvent être différentes de celles en milieu forestier. La circulation des machines avec des fortes pressions ainsi que les vibrations qu'elles exercent modifient la structure du sol (Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2001). L'utilisation des machines conduit à l'augmentation de la masse volumique du sol et à la diminution de la macroporosité avec le nombre de passage des engins (Brais et Camiré, 1998; Marsili *et al.*, 1998), entraînant des difficultés à la circulation de l'air dans le sol (Blumfield *et al.*, 2005; Matko, 2004). Par ailleurs, le compactage augmente la microporosité du sol (Pagliai *et al.*, 2004; Shestak et Busse, 2005), entraînant ainsi une augmentation de la rétention en eau. La productivité des arbres est réduite aussi par la réduction de la perméabilité des sols, de la macroporosité et de l'espace alloué aux racines (Grigal, 2000).

En forêt, la matière organique provenant des litières aériennes, s'accumule à la surface du sol pour former la couverture morte. Celle-ci est ensuite décomposée par les organismes du sol. Les éléments minéraux migrent ensuite dans les autres horizons du sol. Les sols forestiers non perturbés ont une forte accumulation de carbone organique et d'azote en surface (Franzluebbers, 2002a). En milieu agricole, la matière organique est distribuée dans les couches profondes par le labourage (Murty *et al.*, 2002) et la pénétration des racines.

Les conditions de sol en milieu forestier apparaissent relativement peu perturbées par rapport au sol agricole et le cycle de la matière organique est en équilibre avec

la dynamique végétale (Murty *et al.*, 2002). D'un autre côté, nous avons un milieu agricole où la conversion de la forêt originale et l'utilisation des machines ont modifié les conditions initiales (Pagliai *et al.*, 2003). Ce qui laisse penser que la modification des conditions physiques du sol due au compactage est plus élevée en milieu agricole qu'en milieu forestier, et cela peut modifier la croissance des espèces en milieu agricole par rapport au milieu forestier.

Les objectifs de cette étude étaient de comparer les conditions physiques et chimiques des sols agricoles forestiers et d'examiner si la croissance du pin gris et de l'épinette blanche en plantations différait de façon significative entre les milieux agricoles et forestiers. L'intérêt de l'étude réside dans l'obtention des informations nécessaires pour le reboisement des terres agricoles par le pin gris et l'épinette blanche, qui sont deux espèces susceptibles de fournir un bon rendement pour la région étudiée.

2.4 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.4.1 Sites échantillonnés

L'étude a été réalisée dans le nord-ouest du Québec dans la région écologique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest du Québec (Figure 2.1), entre le 48^e et le 49^e parallèle nord, et le 77^e et le 80^e méridien ouest (Saucier *et al.*, 1998). Le climat est de type continental avec des moyennes annuelles de 1.2° C et des précipitations moyennes de 918.4 mm (Environnement-Canada, 2000).

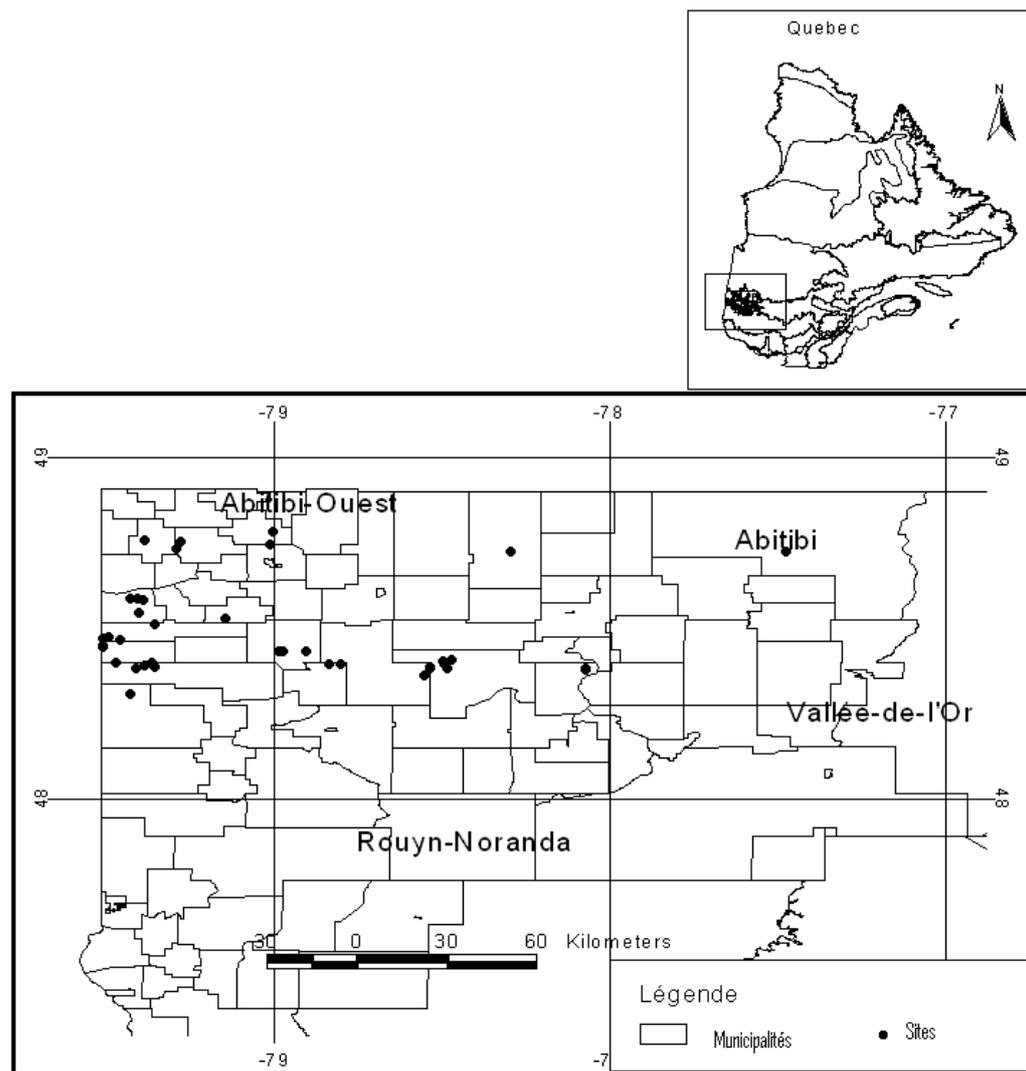


Figure 2.1 Sites échantillonnés à l'intérieur de la région écologique 5a.

Sur le plan géologique, l'Abitibi-Témiscamingue fait partie du bouclier canadien, elle se présente comme une plateforme d'argile avec des accumulations glaciaires de blocs et de graviers (Veillette *et al.*, 2000). Les accumulations glacio lacustres ont été laissées par le lac Objibway formé par la fonte des glaciers (Blanchard, 1954; Dugas, 1975; Rowe, 1972; Veillette *et al.*, 2000). L'agriculture dans la région qui a débuté au début du 20^{ième} siècle, a été favorisée par l'existence de ces vastes étendus d'argiles (Veillette *et al.*, 2000). Cependant, depuis une trentaine d'années les terres agricoles sont reconverties en plantations forestières.

2.4.2 Dispositif de mesure et collecte des données

Dix plantations par combinaison d'essence (pin gris, épinette blanche) et de milieux (agricole, forestier) ont été sélectionnées, pour un total de 40 plantations. Les plantations avaient entre 8 et 29 ans et étaient localisées sur des sols argileux et bien drainés (Tableau 2.1). Dans chaque plantation, trois placettes circulaires (100 m²) espacées de 50 m ont été échantillonnées. La hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) et la longueur des cinq derniers verticilles ont été mesurés sur les trois arbres dominants de chaque placette. La densité des arbres dans chaque placette a été déterminée. Une carotte a été prélevée à la base de l'arbre avec une sonde de Presler, afin de déterminer l'âge des plantations et de mesurer la largeur des cernes des cinq dernières années de croissance.

Dans chaque placette, des échantillons de sol non perturbés (deux par placette) ont été prélevés entre 0 - 10 et 10 - 20 cm de profondeur dans la couche minérale à l'aide d'une carotteuse à double cylindre. Des échantillons en vrac ont aussi été prélevés aux mêmes profondeurs pour des analyses biochimiques et la mesure du point de flétrissement. Un dernier échantillon a été prélevé à 25 cm pour les analyses granulométriques.

Tableau 2.1 Caractéristiques générales des plantations échantillonnées en fonction du milieu et de l'essence forestière

Essence	Milieu	N	Classes texturales	Age (années)	Densité ⁽¹⁾ (tiges/ha)	Hauteur (m)	Dhp (cm)
Pin gris	Forestier	10	Argiles-argiles lourdes	11 - 21	600-2300	9.16	13.04
Pin gris	Agricole	10	Argiles-argiles lourdes	10 - 29	1100-3000	8.63	13.34
Épinette blanche	Forestier	10	Argiles-argiles lourdes	8 - 24	1100-2900	5.03	28.68
Épinette blanche	Agricole	10	Argiles-argiles lourdes	8 - 17	1500-3200	5.23	30.54

⁽¹⁾ : Densité des essences commerciales

2.4.3 Analyses de laboratoire

2.4.3.1 Propriétés physiques

La texture du sol a été déterminée par la méthode de Bouyoucos (Gee et Bauder, 1986). La macroporosité, la capacité au champ et la masse volumique du sol ont été déterminées à partir des échantillons de sol non perturbés (100 cm³). Les échantillons de sol ont été saturés et placés sous vide pendant 24 h. Une fois saturés, ils ont été pesés (P₁), puis ils ont été placés sur une table à tension (-10 Kpa). Les échantillons ont été pesés à la sortie de la table à tension (P₂), puis les échantillons ont été mis à sécher 48 heures à l'étuve (105°C) et peser à la sortie du four (P₃). Ainsi, la macroporosité du sol, la masse volumique et la capacité au champ ont été déterminée à l'aide des formules suivantes :

$$\text{Macroporosité (\%)} = [(P_1 - P_2) / 100 \text{ cm}^3] \times 100$$

$$\text{Masse volumique (Mg/m}^3\text{)} = P_3 / 100 \text{ cm}^3$$

$$\text{Capacité au champ (\%)} = [(P_2 - P_3) / P_3] \times 100$$

Afin de déterminer le point de flétrissement, un poids prédéterminé (15g ou 25 g) de sol a été placé dans des anneaux numérotés dans un extracteur sous pression (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek, The Netherlands). Les anneaux ont été placés dans de l'eau pendant 24h. L'excès d'eau a été éliminé, et une pression de -1500 Kpa a été appliquée pendant 48 h. À la sortie, les échantillons étaient pesés (P₄) et transférés à l'étuve pendant 48h, puis pesés à nouveau (P₅). Le point de flétrissement a été ensuite déterminé par la formule suivante :

$$\text{Point de flétrissement (\%)} = [(P_4 - P_5) / P_5] \times 100$$

La capacité de rétention en eau disponible a été déduite par la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

2.4.3.2 Propriétés chimiques

L'azote disponible a été évalué par incubation anaérobie (Binkley et Hart, 1989; Bundy et Meisinger, 1994). Comme le passage de la forme NH_4^+ à la forme NO_3^- se fait en présence d'oxygène, en absence d'oxygène il n'y a pas formation de NO_3^- . Les échantillons ont subi des extractions initiales et finales, afin de déterminer la minéralisation nette de l'azote. L'extraction initiale a été faite sur un filtrat obtenu avec 5 g de sol brassé dans 250 ml de KCl, 1 N pendant 30 minutes. Pour l'extraction finale, 5 g de sol ont été d'abord incubés dans de l'eau distillée pendant deux semaines. Puis à volume égal la solution a été complétée avec du KCl, 2 N, agitée pendant 30 min et filtrée. La minéralisation nette de l'azote a été obtenue par la différence entre les concentrations en NH_4^+ initiales et finales.

La quantité de carbone organique du sol a été déterminée par la méthode de combustion sèche à l'aide d'un analyseur à Carbone de type LECO et l'azote total par la méthode de Kjeldahl (McKeague, 1977).

La qualité d'un sol se définit comme la capacité d'un sol à fonctionner dans un écosystème, en maintenant la qualité environnementale et promouvant la santé des plantes et des animaux (SSSA, 1998). Ainsi, les mesures de structure et de résistance du sol, la capacité de rétention en eau disponible et la disponibilité en nutriments permettent d'évaluer la qualité d'un sol (SSSA, 1998). Pour notre cas les indices testés sont la macroporosité ou porosité à l'air la rétention en eau disponible, et l'azote minéralisé. La minéralisation anaérobie (azote disponible sous forme NH_4^+) est sensible à la qualité d'un substrat et est corrélée positivement avec le carbone organique et l'azote total (SSSA, 1998). Dans cette étude, l'indice de qualité de la matière organique a été déterminé par un rapport entre l'azote minéralisé net et l'azote total.

2.4.3.3 Analyse de la croissance

Les mesures de largeur des cernes annuels ont été prises avec une résolution de 0,001 mm par le système de mesure de cernes Unislide (Velmex Inc.). Puis, les données de croissance annuelle en hauteur et en diamètre ont servi à déterminer les mesures relatives de croissance (CR) (Margolis et Brand, 1990). La formule utilisée a été la suivante :

$$CR = [\ln (X_t Hi) - \ln (X_{t-1} Hi)] / [t - t_{-1}]$$

Où $X_t Hi$ est la hauteur ou la largeur du cerne à l'an t et $X_{t-1} Hi$ la hauteur ou la largeur du cerne à l'an $t-1$

2.4.4 Analyses statistiques

Les données ont été analysées à l'aide du progiciel SAS (SAS Institute INC, version 9.1.3, Cary, NC, USA). La distribution des données et l'égalité des variances ont été vérifiées. Les comparaisons des moyennes entre les milieux et les essences ont été réalisées à l'aide de la procédure GLM. L'analyse de corrélation entre les paramètres de croissance et la densité des arbres puis l'âge des plantations a été faite. La relation entre différents paramètres de sol, puis entre les paramètres de sol et la croissance a été testée à l'aide des régressions linéaires.

2.5. RÉSULTATS

L'âge des plantations variait de 8 à 29 ans (Tableau 2.1). Toutes les plantations étaient localisées sur des sols argileux. Les densités en essences commerciales variaient de 600 à 3200 tiges ha^{-1} . Les plantations de pin gris présentaient des hauteurs plus élevées que celles d'épinette blanche alors que ces dernières étaient caractérisées par un diamètre plus important.

Le pourcentage d'argile des sols variait de 37 à 84%. Les valeurs moyennes de masses volumiques étaient de 1.01 Mg/m³ entre 0 – 10 cm de profondeur et de 1.14 Mg/m³ entre 10 et 20 cm de profondeur. La macroporosité ou porosité à l'air se situait en moyenne entre 8.8 et 27.0% à 0 - 10 cm et entre 3.3 et 25.5% à 10 – 20 cm, alors que la capacité au champ était de 42.5 et 38.3% pour les mêmes profondeurs respectivement.

2.5.1 Conditions physiques du sol dans les plantations

Les masses volumiques du sol présentaient des valeurs similaires entre 0 – 10 cm et 10 – 20 cm de profondeur sous les deux milieux (Figure 2.2, Tableau 2.2). Par contre, les plantations d'épinettes blanches étaient caractérisées par des masses volumiques plus élevées entre 10 - 20 cm que les plantations de pin gris (Figure 2.2, Tableau 2.2) et ce indépendamment du milieu (Tableau 2.2).

Les macroporosités du sol étaient relativement plus élevées de 3 et 4% en milieu forestier qu'en milieu agricole (Figure 2.2, Tableau 2.2). Indépendamment du milieu de plantation et pour les deux profondeurs échantillonnées, la macroporosité était plus faible de 7 à 9% sous l'épinette blanche que sous le pin gris (Figure 2.2).

La capacité au champ était de 3 et 5% plus élevée en milieu agricole qu'en milieu forestier aux deux profondeurs échantillonnées (Figure 2.3). Cependant, la différence entre les deux milieux était significative seulement entre 10 - 20 cm de profondeur (Tableau 2.2). La capacité au champ était aussi plus élevée dans les plantations de pin gris que dans les plantations d'épinette (Figure 2.3), cependant, l'effet de l'essence n'était significatif qu'à 10 - 20 cm de profondeur (Tableau 2.2). Nous avons observé une corrélation significative et négative ($r = -0,54$, $p = 0,029$, $n = 16$) entre la capacité au champ à 10 – 20 cm de profondeur et l'âge des plantations d'épinette blanche. Les sols agricoles étaient caractérisés par des points de flétrissement de 6 et 5% relativement supérieurs à ceux des sols forestiers, respectivement entre 0 - 10 et 10 - 20 cm (Figure 2.3, Tableau 2.2).

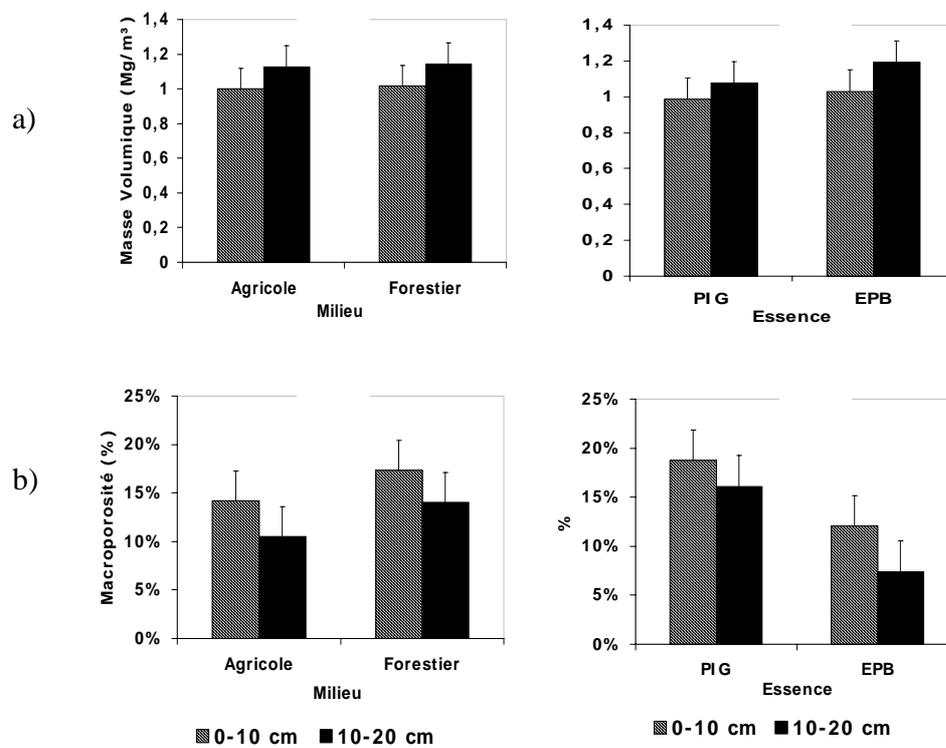


Figure 2.2 Masse volumique (a) et macroporosité (b) à 0 - 10 cm et 10 - 20 cm de profondeur en fonction des milieux et des essences. Les barres verticales représentent l'écart type de la population.

Tableau 2.2 Effet du type du milieu, de l'essence et de leur interaction sur les propriétés physiques et chimiques des sols (analyse de variance, n = 40)

Propriétés	Ecart Type	Aménagement		Essence		Interaction	
		F	Pr > F	F	Pr > F	F	Pr > F
Sol minéral entre 0 - 10 cm de profondeur							
Masse volumique (Mg/m ³)	0.1162	0.22	0.639	1.35	0.254	0.16	0.694
Macroporosité (%)	0.0308	9.47	0.004	41.20	<.001	3.85	0.059
Capacité au champ (%)	0.0778	0.93	0.342	3.19	0.084	0.00	0.951
Point de flétrissement (%)	0.0560	9.70	0.004	4.39	0.043	0.09	0.771
Capacité de rétention en eau disponible (%)	0.0573	0.98	0.330	7.26	0.011	0.29	0.592
C. organique (%)	1.4390	7.47	0.010	1.50	0.229	0.73	0.398
Minéralisation nette, NH ₄ ⁺ (g/m ³)	10.034	0.48	0.493	12.24	0.001	4.03	0.052
N. Kjeldahl (%)	0.0591	9.87	0.003	0.58	0.452	3.30	0.078
Qualité de M.O	0.0105	6.64	0.014	6.83	0.013	0.03	0.866
Sol minéral entre 10 - 20 cm de profondeur							
Masse volumique (Mg/m ³)	0.1197	0.20	0.655	9.35	0.004	2.45	0.126
Macroporosité (%)	0.0313	11.45	0.002	68.70	<.001	1.54	0.223
Capacité au champ (%)	0.0706	5.04	0.032	4.16	0.050	1.44	0.239
Point de flétrissement (%)	0.0497	9.61	0.004	4.19	0.048	0.01	0.918
Capacité de rétention en eau disponible (%)	0.0513	0.01	0.938	14.38	0.001	5.05	0.032
C. organique (%)	1.5503	8.33	0.007	0.14	0.715	1.15	0.292
Minéralisation nette, NH ₄ ⁺ (g/m ³)	5.5462	0.01	0.923	0.03	0.870	7.68	0.009
N. Kjeldahl (%)	0.0470	9.82	0.003	1.32	0.258	0.53	0.472
Qualité de M.O	0.0065	7.08	0.012	0.01	0.926	1.74	0.196

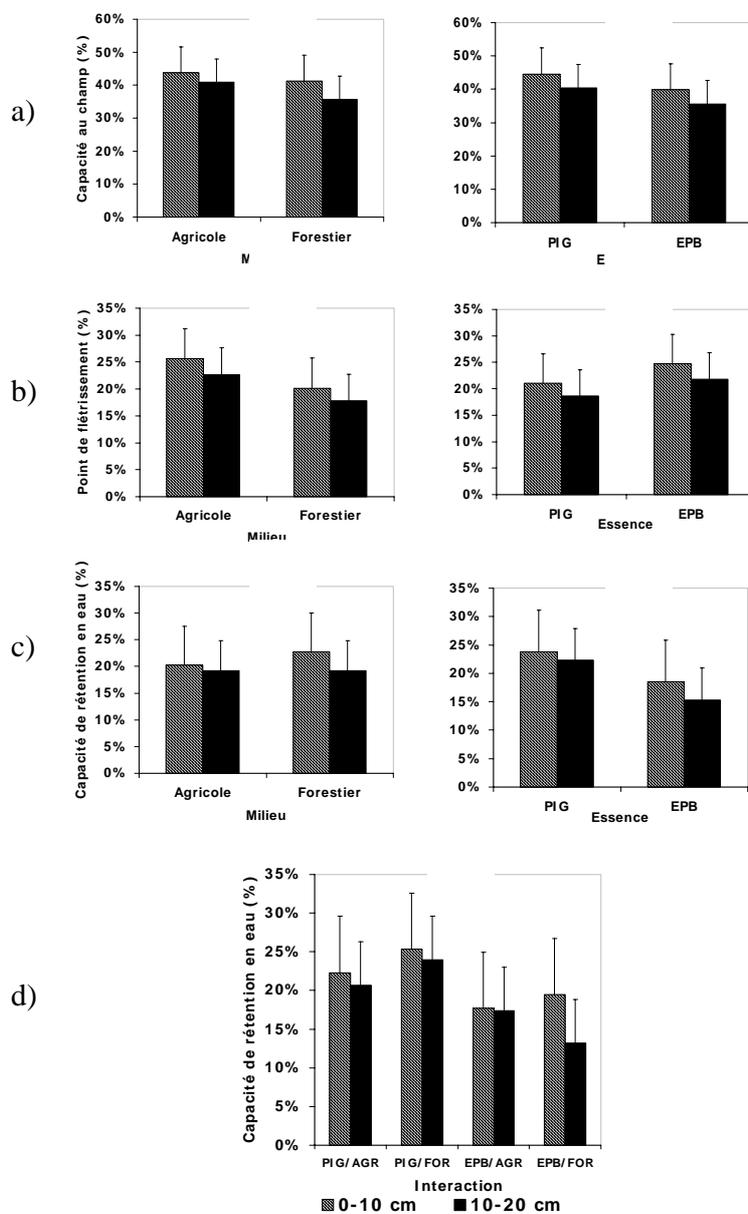


Figure 2.3 Capacité au champ (a), point de flétrissement (b) et capacité de rétention en eau disponible (c) des sols à 0 - 10 cm et 10 - 20 cm de profondeur en fonction du milieu et de l'essence. Rétention en eau disponible (d) pour chaque combinaison essence - milieu. Les barres verticales représentent l'écart type de la population.

Indépendamment du milieu, les plantations d'épinette blanche présentaient des points de flétrissement relativement plus élevés de 4 et 3% que les plantations de pin gris, respectivement entre 0 - 10 et 10 - 20 cm. Sous le pin gris, le point de flétrissement du sol entre 10 – 20 cm diminuait avec l'âge de la plantation ($r = 0,46$, $p = 0,043$, $n = 20$). Aux deux profondeurs et quelque soit le milieu, le point de flétrissement augmentait avec la concentration en carbone organique (Figure 2.4).

La capacité de rétention en eau disponible entre 0 et 10 cm n'était pas affectée par le milieu de plantation alors que les valeurs observées étaient plus élevées sous le pin gris que sous l'épinette blanche (Figure 2.3, Tableau 2.2). Entre 10 et 20 cm de profondeur, les plantations de pin gris présentaient des valeurs de capacité de rétention en eau disponible plus élevées en milieu forestier qu'en milieu agricole alors que l'inverse était observé dans les plantations d'épinette blanche (Figure 2.3, Tableau 2.2).

2.5.2 Conditions chimiques du sol dans les plantations

Les concentrations de carbone organique étaient relativement plus élevées de 1.24 et de 1.41% respectivement à 0 - 10 et 10 - 20 cm en milieu agricole. Il y avait 29 et 34% (respectivement à 0 - 10 et 10 - 20 cm) plus d'azote Kjeldahl en milieu agricole qu'en milieu forestier (Figure 2.5). L'essence reboisée n'avait pas d'incidence sur ces deux paramètres.

La minéralisation nette de l'azote entre 0 et 10 cm de profondeur était significativement plus élevée sous l'épinette blanche que sous le pin gris (Tableau 2.2). Entre 10 et 20 cm de profondeur, elle était plus élevée en milieu forestier qu'en milieu agricole sous le pin gris alors que l'inverse était observé sous l'épinette blanche (Figure 2.6).

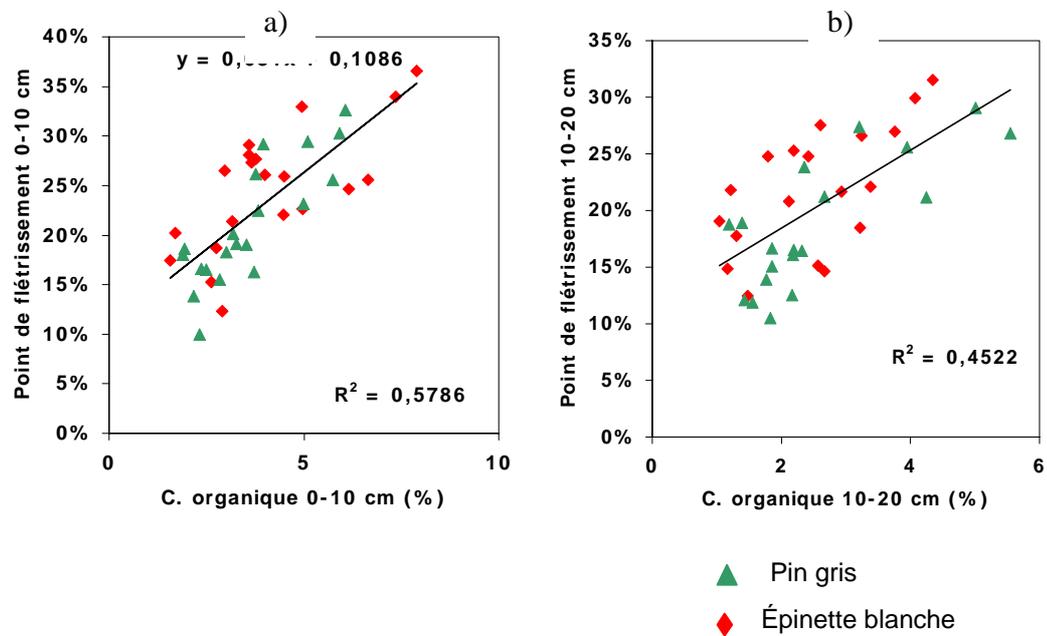


Figure 2.4 Relation entre point de flétrissement des sols et la concentration en carbone organique à 0 - 10 cm (a) et 10 - 20 cm (b) de profondeur.

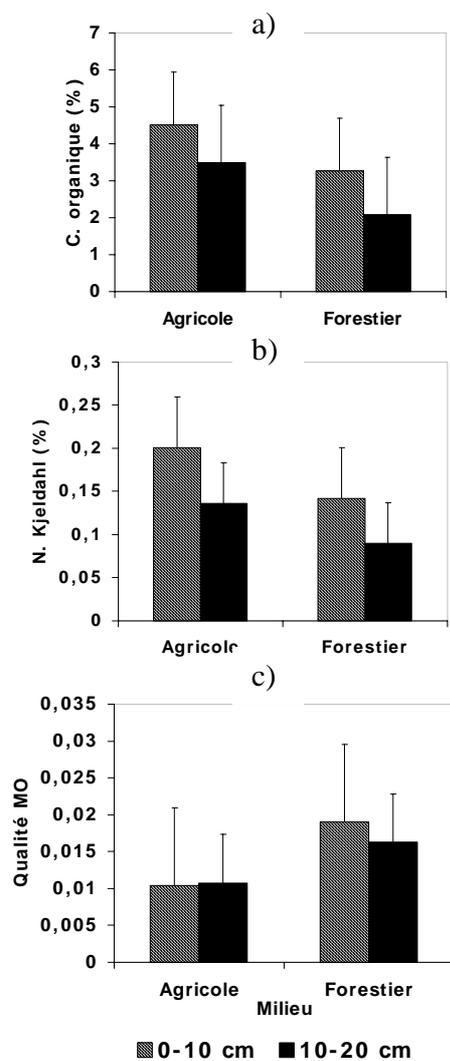


Figure 2.5 Carbone organique (a), N. Kjeldahl (b) et qualité de la matière organique (c) du sol (Qualité MO) à 0 - 10 cm et 10 - 20 cm de profondeur en fonction du milieu. Les barres verticales représentent l'écart type de la population.

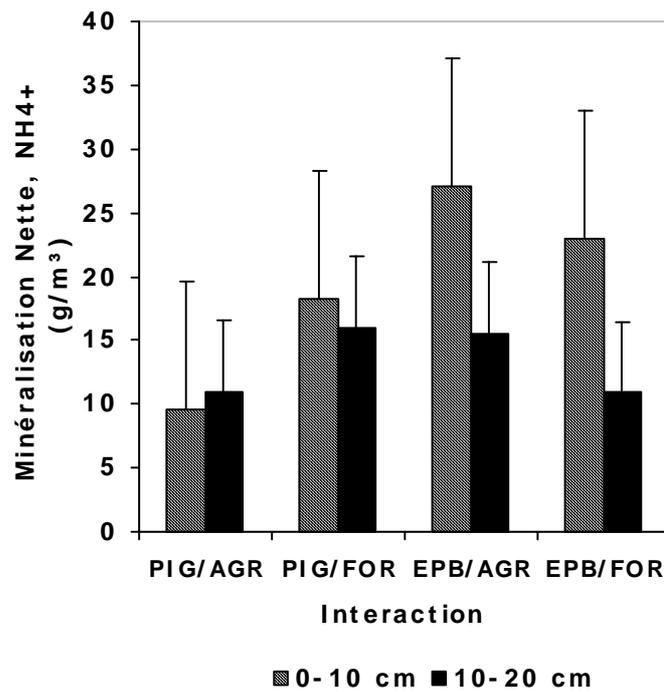


Figure 2.6 Minéralisation nette de l'azote entre 0 – 10 cm et entre 10 - 20 cm pour chaque combinaison de milieu et d'essence. Les barres verticales représentent l'écart type de la population.

La qualité de la matière organique était plus élevée dans les sols forestiers que dans les sols agricoles aux deux profondeurs (Figure 2.5). Entre 0 et 10 cm de profondeur, la qualité de la matière organique était plus élevée sous l'épinette blanche que sous le pin gris (Tableau 2.2). Les moyennes étaient de 0.019 sous l'épinette blanche et de 0.010 sous le pin gris (écart type 0.01).

2.5.3 Croissance dans les plantations

Le diamètre des arbres n'a pas montré de corrélation significative avec la densité des plantations alors que l'âge des plantations expliquait une large proportion de la variance associée aux mesures de croissance. Le pourcentage de la variance totale expliquée par l'âge était de 28% et de 88% pour la hauteur totale et de 35% et 9% pour le diamètre respectivement chez l'épinette blanche et le pin gris (Tableau 2.3).

La croissance annuelle des quatre dernières années en hauteur et en diamètre chez l'épinette blanche augmentait avec l'âge. Pour le pin gris la croissance annuelle en hauteur et en diamètre des quatre dernières années diminuait avec l'âge sauf pour la croissance en hauteur en milieu agricole (Figure 2.7). Une fois corrigé, l'effet de l'âge de la plantation sur les paramètres de croissance, aucune différence significative n'a été observée entre les deux milieux sur ces paramètres (Tableau 2.3).

Les croissances relatives en hauteur et en diamètre variaient beaucoup d'un site à l'autre pour les deux essences. La différence entre les milieux n'était pas significative pour les deux essences (Tableau 2.3).

2.5.4 Relations croissance et qualité des sols

Nous avons effectué une analyse en covariance en utilisant l'âge des plantations comme covariable. Les modèles qui s'adaptent le mieux aux patrons de croissance du pin gris et de l'épinette blanche ($p < 0.05$) sont représentés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.3 Effet de l'âge de la plantation et du milieu sur la croissance en hauteur et en diamètre pour l'épinette blanche et le pin gris. Analyse de covariance (âge) pour les valeurs absolues et analyse de variance pour les valeurs relatives

Essences	Variables (cm)	Année	Moy. (cm)	Ecart. Type	Age		Milieu	
					F	Pr>F	F	Pr>F
Épinette Blanche	Hauteur totale	2005	513.12	107.7812	7.65	0.013	0.95	0.343
	Dhp	2005	29.61	6.9845	11.52	0.003	1.67	0.214
	Croissance en hauteur	2004	50.11	9.7293	0.68	0.421	3.11	0.096
		2003	49.18	12.6294	1.01	0.330	1.87	0.189
		2002	46.43	9.2147	2.27	0.150	2.09	0.166
		2001	43.43	8.0415	4.06	0.060	1.58	0.225
	Croissance en diamètre	2004	0.51	0.1301	0.66	0.428	0.55	0.467
		2003	0.53	0.1030	0.75	0.398	2.88	0.108
		2002	0.45	0.0906	0.96	0.341	0.98	0.337
		2001	0.47	0.0933	2.63	0.123	5.39	0.033
	Croissance Relative en hauteur	04/03	0.015	0.1803	-	-	0.47	0.501
		03/02	0.046	0.1454	-	-	0.33	0.576
		02/01	0.059	0.1230	-	-	0.20	0.660
		04/03	-0.047	0.1331	-	-	0.62	0.443
Croissance Relative en Diamètre	03/02	0.144	0.1072	-	-	1.30	0.271	
	02/01	-0.013	0.1155	-	-	4.05	0.060	
Pin Gris	Hauteur totale	2005	889.51	71.3167	117.09	<.001	0.00	0.994
	Dhp	2005	13.19	3.1573	1.84	0.193	0.18	0.678
	Croissance en hauteur	2004	30.82	12.4121	2.37	0.142	1.23	0.283
		2003	29.29	12.3893	1.50	0.237	0.60	0.449
		2002	30.79	15.0186	0.96	0.340	0.01	0.907
		2001	29.09	10.8059	0.03	0.855	0.13	0.728
	Croissance en diamètre	2004	0.30	0.0694	35.15	<.001	0.12	0.731
		2003	0.33	0.0544	62.99	<.001	0.42	0.525
		2002	0.35	0.0442	79.98	<.001	0.11	0.749
		2001	0.37	0.0613	49.92	<.001	0.08	0.778
	Croissance Relative en hauteur	04/03	0.011	0.2202	-	-	0.22	0.645
		03/02	-0.086	0.2208	-	-	0.96	0.342
		02/01	-0.013	0.2168	-	-	3.53	0.078
		04/03	-0.124	0.1216	-	-	0.49	0.494
Croissance Relative en diamètre	03/02	-0.053	0.1293	-	-	1.06	0.318	
	02/01	-0.079	0.0918	-	-	0.09	0.766	

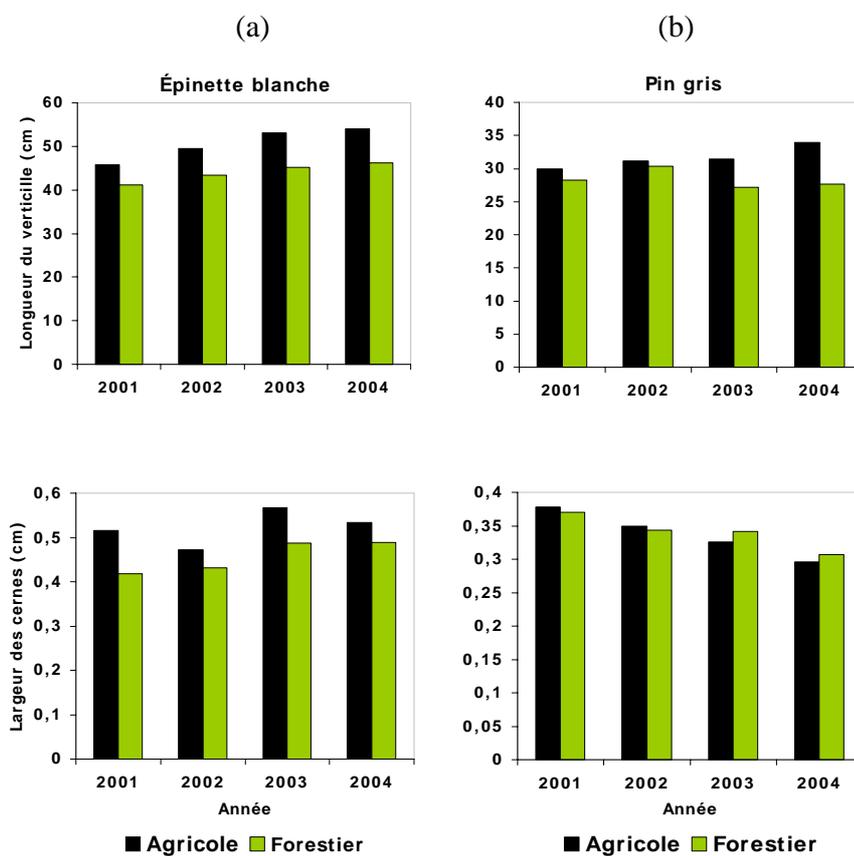


Figure 2.7 Croissance annuelle en hauteur et en diamètre de 2001 à 2004 de l'épinette blanche (a) et du pin gris (b) en fonction des milieux. Les écart types sont présentés au tableau 3.

Tableau 2.4 Relation entre la croissance en hauteur et en diamètre du pin gris et de l'épinette blanche et les paramètres de sol. Régression linéaire multiple en utilisant l'âge de la plantation comme covariable

	Variables dépendantes	R ² ⁽¹⁾	Variables indépendantes	Paramètres de régression	R ² ⁽²⁾ partiel	<i>p</i>	<i>p</i> modèle
EpB	Hauteur	0.28	Macroporosité 0 - 10 cm	4028.43	0.14	0.020	0.049
			Macroporosité 10 - 20 cm	-2308.66	0.18	0.068	
			N. Minéralisé, NH ₄ ⁺ 0 - 10 cm	11.95	0.15	0.055	
	Diamètre	0.35	N. Minéralisé, NH ₄ ⁺ 10 - 20 cm	0.82	0.22	0.064	0.064
PiG	Hauteur	0.88	Capacité au champ 0 - 10 cm	689.93	0.58	<.001	<.001
			Diamètre	0.09	Capacité au champ 10 - 20 cm	23.18	
			C. Organique 10 - 20 cm	1.24	0.11	0.073	
			N. Kjeldahl 0 - 10 cm	-35.14	0.12	0.015	

⁽¹⁾: Pourcentage de la variance totale expliquée par l'âge de la plantation.

⁽²⁾: Proportion de la variance résiduelle expliquée par les paramètres de sol.

Dans le cas de l'épinette blanche, la hauteur totale augmentait avec la macroporosité et le taux de minéralisation net de l'horizon 0 - 10 cm tandis qu'elle baissait avec la macroporosité entre 10 - 20 cm. Le pourcentage de variance totale expliqué par le modèle était de 47%. Aucun modèle de régression significatif n'a été trouvé pour le dhp de l'épinette blanche.

En ce qui concerne le pin gris, la hauteur totale augmentait avec la capacité au champ à 0 - 10 cm, et le pourcentage de variance totale expliqué par le modèle était de 58%. Le dhp augmentait avec la capacité au champ à 10 - 20 cm et la concentration du carbone organique à 10 - 20 cm tandis qu'elle diminuait avec l'azote Kjeldahl à 0 - 10 cm. Dans ce modèle, le pourcentage de variance totale expliqué était de 52% (Tableau 2.4).

2.6 DISCUSSION

2.6.1 Propriétés physiques des sols

Les sols argileux de l'Abitibi-Témiscamingue ont évolué sur des dépôts quaternaires mis en place par la sédimentation en milieu glacio-lacustre. La pédogenèse de ces sols, ayant débuté il y a moins de 9000 ans, est relativement récente (Veillette *et al.*, 2000). La texture du sol est lourde puisque la matrice est essentiellement composée de farine de roche constituée de minéraux primaires (Veillette *et al.*, 2000). Les masses volumiques observées en milieu forestier représentent les conditions naturelles de ces sols. Elles sont comparables à celles observées dans des milieux forestier non coupés (Brais et Camiré, 1998). Malgré la texture lourde de ces sols, les valeurs de macroporosité observées en surface montrent que l'altération physico-chimique permet d'atteindre des conditions qui pourraient être qualifiées de modérément poreuses selon Pagliai *et al.* (Pagliai *et al.*, 2004). Par contre, les conditions physiques du sol se modifient rapidement avec la profondeur reflétant le développement pédogénique limité.

L'utilisation à des fins agricoles de ces sols est aussi relativement récente, la colonisation de la région ayant débuté il y a moins de 100 ans et pour certaines des plantations échantillonnées en milieu agricole, l'utilisation des sols à des fins agricoles a été de courte durée (Boucher, 1985; Tabi *et al.*, 1990). Ces conditions nous permettent encore aujourd'hui de comparer les conditions des sols agricoles avec celles en milieu forestier.

2.6.1.1 Effet du milieu sur les conditions physiques du sol

Conformément à notre première hypothèse, les conditions physiques du sol ont été altérées par l'agriculture. Ces modifications peuvent être attribuées à une fréquence plus élevée de l'utilisation des machines ainsi qu'aux passages répétés pendant la mise en production de ces terres (Brais et Camiré, 1998; Marsili *et al.*, 1998; Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2001). Le compactage du sol se traduit par une perte de macroporosité, les valeurs moyennes (15.79 et 12.25%, respectivement entre 0 - 10 et 10 - 20 cm de profondeur) obtenues en milieu agricole permettent de classer les sols dans le type modérément poreux (Pagliai *et al.*, 2004). Ces valeurs sont similaires à celles obtenues par Brais (2001) dans la partie sud de la ceinture d'argile, où les moyennes de macroporosité entre 10 - 20 cm sous les roues et entre les roues ne dépassait pas les 15%. Le compactage se caractérise aussi par l'augmentation de la capacité au champ qui est la conséquence de l'augmentation du nombre des micropores dans le sol (Shestak et Busse, 2005; Wall et Heiskanen, 2003). Par ailleurs les différences observées de 3 à 5 % pour la macroporosité et la capacité au champ entre les deux milieux ne sont pas très prononcées. Des études ont montrés que les effets du compactage sont souvent bien plus élevées (Chan *et al.*, 2006; Pagliai *et al.*, 2003; Servadio *et al.*, 2005). Ces faibles valeurs peuvent indiquer que la machinerie utilisée n'est pas très lourde ou encore que la matière organique du sol joue peut être un rôle d'éponge en freinant l'impact de la machinerie sur le sol (Bazzoffi *et al.*, 1998). Les effets de la mise en culture sont plus prononcés sur le point de flétrissement. L'augmentation des concentrations de

carbone organique en milieu agricole a un effet indirect sur le point de flétrissement du sol conduisant à une augmentation de ce dernier (Ferrerias *et al.*, 2006; Hamza et Anderson, 2005). L'absence d'effet du type du milieu sur la capacité de rétention en eau du sol résulte de l'augmentation simultanée des deux paramètres qui en déterminent les limites supérieures et inférieures (capacité au champ et point de flétrissement).

2.6.1.2 Effet de l'essence sur les conditions physiques du sol

Compte tenu de l'établissement récent des plantations, nous n'avons pas émis d'hypothèse relativement aux effets des essences sur le milieu. Les corrélations significatives entre l'âge des plantations d'épinette blanche et la capacité au champ, puis entre l'âge des plantations de pin gris et le point de flétrissement montrent un effet progressif et différentiel des essences sur les conditions de sol. L'épinette blanche relativement au pin gris est associée une dégradation de la structure du sol. Les sols sous l'épinette blanche présentent une distribution de la taille des pores caractérisée par des valeurs de macroporosité et de la capacité au champ plus faibles et des valeurs de point de flétrissement (capillarité très fine et eau liée chimiquement) plus élevées. Le pin gris et l'épinette blanche pourraient affecter le milieu de par leurs caractéristiques écologiques. Le pin gris a la capacité de développer un système racine profond par rapport à l'épinette blanche dont le système est plutôt superficiel (Grossnickle et Blake, 1987; Heineman *et al.*, 1999).

2.6.2 Propriétés chimiques des sols

2.6.2.1 Effet du milieu sur les conditions chimiques du sol

Contrairement à notre deuxième hypothèse, les sols agricoles dans cette étude sont enrichis en carbone organique et en azote Kjeldahl relativement au milieu forestier. La comparaison de la concentration en carbone organique entre des sols labourés et

non labourés a été faite dans diverses études, lesquelles montraient une baisse de la concentration en carbone organique avec le labourage des sols (Brevik *et al.*, 2002; Franzluebbers, 2002a). Ici, les concentrations carbone organique plus élevées en milieu agricole peuvent être issues de la matière organique native de ces sols qui reste stable quelque soit le labourage et la perturbation des agrégats du sol (Plante et McGill, 2002). Les sols de l'Abitibi-Témiscamingue ont été cultivés peu de temps et la matière organique était encore bien incorporée au sol minéral. Cette matière organique serait plus stable et se minéralise moins vite comme l'indique la qualité de la matière organique plus faible en milieu agricole. L'enrichissement des sols agricoles peut aussi se faire par la suite via la litière des racines dans le sol (Puget et Drinkwater, 2001). Par ailleurs, la comparaison effectuée ici se limite aux horizons minéraux du sol. En milieu forestier, l'horizon organique de surface était souvent présent.

L'hypothèse selon laquelle le milieu forestier serait plus riche en nutriment que le milieu agricole a été partiellement validée. Les sols agricoles contiennent plus d'azote que les sols forestiers. Cependant une plus grande proportion de l'azote totale est minéralisable dans les sols forestiers..

2.6.2.2 Effet de l'essence sur les conditions chimiques du sol

La minéralisation nette de l'azote observée entre 0 - 10 cm plus élevée dans les plantations d'épinette blanche pourrait être liée à la concentration élevée de l'azote dans les aiguilles d'épinette blanche composant la litière du sol (Wang et Klinka, 1997). Aussi les taux de minéralisation élevés, observés sous épinette blanche en milieu agricole pourrait être attribuables aux conditions de pH favorable à la minéralisation de l'azote (Ste-Marie et Paré, 1999). Le taux d'azote minéralisé, élevé en milieu forestier dans les plantations de pin gris pourrait s'expliquer par les conditions physiques du sol minéral, une bonne macroporosité favorisant une bonne minéralisation de la matière organique.

2.6.3 Relation âge - croissance

Les relations âge-hauteur ou âge-diamètre étaient prévisibles et l'utilisation de l'âge des plantations comme covariable nous a permis de contrôler pour cette dernière et de vérifier si les conditions de sol avaient un effet sur la croissance. La croissance en hauteur du pin gris est fortement prévisible donnant un coefficient de détermination de 88 % avec une régression linéaire simple. Celle de l'épinette blanche est plus susceptible de varier d'une plantation ou d'une année à l'autre. Il serait donc plus facile de prédire le patron de croissance en hauteur du pin gris dans cette étude. Par contre, le dhp du pin gris est probablement plus susceptible de varier en fonction des conditions de compétition initiales (Hangs *et al.*, 2002; Kronzucker *et al.*, 1996; Lauer et Glover, 1999) qui peuvent être variables. L'épinette blanche croit beaucoup plus en diamètre dans les premières années d'établissement de la plantation (Jobidon, 2000), ce qui expliquerait la meilleure relation âge-dhp obtenue pour cette dernière. Dans les premières années de croissance l'épinette est aussi susceptible de subir des dommages causés par le gel printanier qui retarde sa croissance en hauteur en causant la mort des bourgeons apicaux et freinant le prélèvement de l'eau par les racines (Bigras et Margolis, 1997; Colombo, 1997; Dumais *et al.*, 2002) et qui demeure un facteur imprévisible.

Les patrons de croissance annuels différents observés entre l'épinette blanche et le pin gris indiquent aussi que les essences sont à des stades différents de leur croissance. La variation dans la croissance des essences a été étudiée par divers auteurs. Le pin gris par rapport à l'épinette blanche est une espèce pionnière (Dang et Cheng, 2004), il augmente sa croissance jusqu'à une certaine période qui correspond à la fermeture de la canopée et cette croissance est visible dans les cernes annuels (Copenheaver et Abrams, 2003), alors que l'épinette blanche croit mieux à l'ombre dans les premières années de sa croissance (Chhin et Wang, 2002).

2.6.4 Relation sol - croissance

La croissance de l'épinette blanche était favorisée par des taux de minéralisation de l'azote et des conditions de porosité à l'air élevées en surface. La grande majorité des espèces végétales prélèvent de l'azote minéral pour leur croissance (Lafleur *et al.*, 2005). Aussi, ces résultats reflètent l'exigence plus grande de l'épinette blanche pour l'azote ammoniacale dans le sol (Kronzucker *et al.*, 1995; Kronzucker *et al.*, 1996).

La hauteur totale du pin gris était mieux corrélée avec la capacité au champ qu'avec la capacité de rétention en eau disponible, ce qui indiquerait que le pin gris soit capable d'aller chercher l'eau à des tensions supérieures au point de flétrissement. Plusieurs études ont démontré que bien que le pin gris puisse croître sur des sols à texture grossière, mais il atteint des meilleures performances sur les sols à texture fine (Béland *et al.*, 2003). Nos résultats indiquent que même sur des sols argileux, les variations dans la disponibilité en eau affectent la croissance du pin gris (Brais, 2001). Les résultats similaires obtenus pour la hauteur et le diamètre à la base montrent la stabilité de la relation.

2.6.5 Relation milieu – croissance

Malgré les différences significatives observées entre les milieux pour l'ensemble des conditions de sol et malgré les modèles de régression qui indiquent que les conditions de sol influencent la croissance des deux espèces, les conditions en milieu agricole ne sont pas suffisamment différentes de celles du milieu forestier pour en modifier significativement la croissance.

2.7 CONCLUSION

Les sols argileux de l'Abitibi-Témiscamingue représentent les sols les plus productifs de cette région. Les activités agricoles et forestières peuvent modifier les conditions physiques et biochimiques des sols et en réduire la productivité. Notre étude montre bien que les activités agricoles réalisées dans le passé ont affecté les conditions physiques et biochimiques du sol, la croissance des essences n'est pas affectée pour autant.

Par ailleurs, les essences ont aussi la capacité de modifier les conditions du sol. Le sol sous l'épinette blanche était plus dense que sous le pin gris. Ce qui pourraient entraîner une dégradation à long terme de la structure du sol. Les effets des deux essences sur le sol étant contraires, il serait intéressant d'envisager des plantations mélangées pour diminuer à long terme l'impact sur le sol.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La comparaison des indices de qualité de sols entre le milieu agricole et forestier réalisée a effectivement révélé que le milieu agricole avait été modifié par les pratiques agricoles réalisées et l'utilisation des machines. De l'ensemble des indices physiques utilisés pour caractériser les sols, la macroporosité, le point de flétrissement et la capacité au champ en milieu agricole sont les facteurs qui reflètent mieux les conditions de compactage des sols agricoles dans cette étude. Les conditions de sols observés sous le pin gris et sous l'épinette blanche étaient différentes. Les espèces pourraient avoir un effet à long terme sur la structure du sol.

L'absence de différence dans la croissance du pin gris et de l'épinette blanche entre les deux milieux peut impliquer que les conditions de compactage des sols étudiés ne sont pas néfastes à la croissance de ces derniers. D'autre part, la quantité des éléments nutritifs en milieu agricole bien qu'étant de moindre qualité par rapport au milieu forestier, cela n'influence pas la croissance des essences. Les conditions actuelles des sols agricoles de l'Abitibi-Témiscamingue pourraient de ce fait être favorable à la croissance du pin gris et de l'épinette blanche.

Les capacités au champ enregistrées en milieu agricole sont favorables à la croissance du pin gris. L'épinette blanche est plutôt sensible à la minéralisation de l'azote dans le sol. Le pin gris et l'épinette blanche réagissent différemment face aux conditions du milieu.

En perspectives, il serait très intéressant, pour allier aménagement écosystémique et ligniculture de faire des plantations mélangées. De plus, les conditions du sol engendrées par la litière de pin gris et d'épinette blanche, permettraient de maintenir un équilibre biologique au niveau des sols. La réalisation d'une étude préliminaire afin de déterminer les conditions de sol avant la mise en production des anciennes terres agricoles, permettrait de compléter l'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.F.A.T, C.R.R, et C.R.D.A.T. 1998. Proposition de faire de la région 08 du MRN une « région pilote » pour le rendement accru dans les forêts publiques et privées et sur les blocs de lots intra municipaux. Rapport.
- Bazzoffi, P., S. Pellegrini, A. Rocchini, M. Morandi, et O. Grasselli. 1998. The effect of urban refuse compost and different tractors tyres on soil physical properties, soil erosion and maize yield. *Soil Till. Res.* 48:275-286.
- Béland, M., Y. Bergeron, et R. Zarnovican. 2003. Harvest treatment, scarification and competing vegetation affect jack pine establishment on three soil types of the boreal mixed wood of northwestern Quebec. *For. Ecol. Manage.* 174:477-493.
- Benjamin, J.G., D.C. Nielsen, et M.F. Vigil. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116:137-148.
- Bigras, F.J., et H.A. Margolis. 1997. Shoot and root sensitivity of containerized black spruce, white spruce and jack pine seedlings to late fall freezing. *New For.* 13:29-49.
- Binkley, D., et S.C. Hart. 1989. The Components of Nitrogen Availability Assessments in Forest Soils. *Advances in Soil Science* 10:57-112.
- Blanchard, R. 1954. L'ouest du Canada français, Province du Québec, Montréal.
- Blumfield, T.J., Z.H. Xu, et C. Chen. 2005. Mineral nitrogen dynamics following soil compaction and cultivation during hoop pine plantation establishment. *For. Ecol. Manage.* 204:131-137.
- Bolinder, M.A., D.A. Angers, et R.P. Voroney. 1994. Analyse de la dynamique de la matière organique des sols du Québec sous différents systèmes culturaux à l'aide du modèle de simulation century 7:12-17.
- Boucher, R. 1985. Bilan de la situation agricole en Abitibi-Témiscamingue Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec.
- Brais, S. 1994. Impacts des opérations forestières sur la productivité à long terme des écosystèmes forestiers. Rapport.

- Brais, S. 2001. Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1263-1271.
- Brais, S., et C. Camiré. 1998. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Can. J. Soil Sci.* 78:197-206.
- Brevik, E., T. Fenton, et L. Moran. 2002. Effect of soil compaction on organic carbon amounts and distribution, South-Central Iowa. *Environmental Pollution* 116:S137-S141.
- Bullock, P., A.C.D. Newman, et A.J. Thomasson. 1986. Porosity aspects of the regeneration of soil structure after compaction. *Soil Till. Res.* 8:323-323.
- Bundy, S.C., et J.J. Meisinger. 1994. Nitrogen availability Indices, p. 951-984, *In* SSSA Book series: 5, M., ed. *Methods of soil analysis. Part2 - Microbiological and biochemical properties*, Vol. 5. SSSA, Wisconsin.
- Carlyle, J.C. 1998. Relationships between nitrogen uptake, leaf area, water status and growth in an 11-year-old *Pinus radiata* plantation in response to thinning, thinning residue, and nitrogen fertiliser. *For. Ecol. Manage.* 108:41-55.
- Chan, K.Y., A. Oates, A.D. Swan, R.C. Hayes, B.S. Dear, et M.B. Peoples. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Till. Res.* 89:13-21.
- Chhin, S., et G.G. Wang. 2002. Spatial and temporal pattern of white spruce regeneration within mixed-grass prairie in the Spruce Woods Provincial Park of Manitoba. *Journal of Biogeography* 29:903-912.
- Colombo, S.J. 1997. Frost hardening spruce container stock for overwintering in Ontario. *New For.* 13:449-467.
- Copenheaver, C.A., et M.D. Abrams. 2003. Dendroecology in young stands: case studies from jack pine in northern lower Michigan. *For. Ecol. Manage.* 182:247-257.
- Côté, J.-F. 1998a. Impacts forestiers et retombées économiques découlant de la mise en place d'une stratégie de rendement accru en Abitibi-Témiscamingue. rapport.

- Côté, J.-F. 1998b. Pertinence forestière et retombées économiques des programmes de création d'emplois et de formation de la main d'oeuvre en sylviculture. Administrés par REXFOR en 1997-1998. rapport.
- Dang, Q.-L., et S. Cheng. 2004. Effects of soil temperature on ecophysiological traits in seedlings of four boreal tree species. *For. Ecol. Manage.* 194:379-387.
- DeGryze, S., J. Six, K. Paustian, S.J. Morris, E.A. Paul, et R. Merckx. 2004. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. *Global Change Biology* 10:1120-1132.
- Dick, R.P., D.D. Myrold, et E.A. Kerle. 1988. Microbial Biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, :512-516.
- Domisch, T., L. Finer, et T.S.I.I. Lehto. 2001. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season. *Tree Physiology* 21:465-472.
- Dugas, C. 1975. Le climat et son influence sur l'agriculture abitibienne: sud de la baie james et la partie de l'enclave argileuse de l'Ojibway Centre d'Études Nordiques, Québec.
- Dumais, D., C. Coursolle, F.J. Bigras, et H.A. Margolis. 2002. Simulated root freezing in the nursery: effects on the growth and physiology of containerized boreal conifer seedlings after outplanting. *Can. J. For. Res.* 32:605-615.
- Environnement-Canada. 2000. Normales climatiques au canada [Online] http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca//climate_normals/results_f.html?Province=ALL&StationName=Amos&SearchType=Contains&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=6019&&autofwd=1&b_templatePrint=true.
- Etana, A., I. Hakansson, E. Zagal, et S. Bucas. 1999. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. *Soil Till. Res.* 52:129-139.
- FAO. 2002. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. Rapport.

- FAO. 2003. Situation des forêts du monde (SOFO) 2003. Rapport.
- Ferreras, L., E. Gomez, S. Toresani, I. Firpo, et R. Rotondo. 2006. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology* 97:635-640.
- Fontaine, S., A. Mariotti, et L. Abbadie. 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.* 35:837-843.
- Franzluebbers, A.J. 2002a. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66:95-106.
- Franzluebbers, A.J. 2002b. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Till. Res.* 66:197-205.
- Gee, G.W., et J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, dans l'ouvrage sous la direction de A. Klute. 2^{nde} Ed. ed. Madison, Wisconsin USA.
- Gemtos, T.A., et T. Lellis. 1997. Effects of soil compaction, water and organic matter contents on emergence and initial plant growth of cotton and sugar beet. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66:121-134.
- Gerard, C.J., P. Sexton, et G. Shaw. 1982. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agron. J.* 74:875-879.
- Gomez, A., R.F. Powers, M.J. Singer, et W.R. Horwath. 2002. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1334-1343.
- Grigal, D.F. 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. *For. Ecol. Manage.* 138:167-185.
- Grossnickle, S.C., et T.J. Blake. 1987. Water relations and morphological development of bare-root jack pine and white spruce seedlings: seedling establishment on a boreal cut-over site. *Forest Ecology and Management* 18:299-318.
- Hadas, A., L. Kautsky, M. Goek, et E.E. Kara. 2004. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biol. Biochem.* 36:255-266.

- Hamel, B., N. Belanger, et D. Paré. 2004. Productivity of black spruce and Jack pine stands in Quebec as related to climate, site biological features and soil properties. *For. Ecol. Manage.* 191:239-251.
- Hamza, M.A., et W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82:121-145.
- Hangs, R.D., J.D. Knight, et K.C.J. Van Rees. 2002. Interspecific competition for nitrogen between early successional species and planted white spruce and jack pine seedlings. *Can. J. For. Res.* 32:1813-1821.
- Heineman, J.L., L. Bedford, et D. Sword. 1999. Root system development of 12-year-old white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) on a mounded subhygric-mesic site in northern interior British Columbia. *Forest Ecology and Management* 123:167-177.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics* Academic press, Amherst, Massachusetts.
- Jobidon, R. 2000. Density-dependent effects of northern hardwood competition on selected environmental resources and young white spruce (*Picea glauca*) plantation growth, mineral nutrition, and stand structural development - a 5-year study. *For. Ecol. Manage.* 130:77-97.
- Jonsson, A.M., M. Ingerslev, et K. Raulund-Rasmussen. 2004a. Frost sensitivity and nutrient status in a fertilized Norway spruce stand in Denmark. *For. Ecol. Manage.* 201:199-209.
- Jonsson, A.M., M.-L. Linderson, I. Stjernquist, P. Schlyter, et L. Barring. 2004b. Climate change and the effect of temperature backlashes causing frost damage in *Picea abies*. *Global and Planetary Change* 44:195-207.
- Jordan, D., J.F. Ponder, et V.C. Hubbard. 2003. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. *Applied Soil Ecology* 23:33-41.
- Kronzucker, H.J., M.Y. Siddiqi, et A.D.M. Glass. 1995. Kinetics of NO_3^- Influx in Spruce. *Plant Physiol.* 109:319-326.
- Kronzucker, H.J., M.Y. Siddiqi, et A.D.M. Glass. 1996. Kinetics of NH_4^+ influx in spruce. *Plant Physiol.* 110:773-779.

- Lafleur, B., L.M. Hooper-Bi, E. Paul Mumma, et J.P. Geaghan. 2005. Soil fertility and plant growth in soils from pine forests and plantations: Effect of invasive red imported fire ants *Solenopsis invicta* (Buren). *Pedobiologia* 49:415-423.
- Lauer, D.K., et G.R. Glover. 1999. Stand level pine response to occupancy of woody shrub and herbaceous vegetation. *Can. J. For. Res.* 29:979-984.
- Li, Q., H. Lee Allen, et I.I.A.G. Wollum. 2004. Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biol. Biochem.* 36:571-579.
- Margolis, H.A., et D.G. Brand. 1990. An Ecophysiological Basis for Understanding Plantation Establishment. *Can. J. For. Res.* 20:375-390.
- Marsili, A., P. Servadio, M. Pagliai, et N. Vignozzi. 1998. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. *Soil Till. Res.* 49:185-199.
- Matko, V. 2004. Porosity determination by using two stochastic signals. *Sensors and Actuators A: Physical* 112:320-327.
- McKeague, J.A. 1977. *Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols*, Ottawa, Canada.
- McNabb, D.H., A.D. Startsev, et H. Nguyen. 2001. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1238-1247.
- Murty, D., M.U.F. Kirschbaum, R.E. McMurtrie, et A. McGilvray. 2002. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature. *Global Change Biology* 8:105-123.
- Nations-Unies. 1992. Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques [Online] <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>.
- Pagliai, M., A. Marsili, P. Servadio, N. Vignozzi, et S. Pellegrini. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Till. Res.* 73:119-129.
- Pagliai, M., N. Vignozzi, et S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.* 79:131-143.

- Parton, W.J., J.M.O. Scurlock, D.S. Ojima, T.G. Gilmanov, R.J. Scholes, D.S. Schimel, T. Kirchner, J.C. Menaut, T. Seastedt, E.G. Moya, A. Kamnalrut, et J.I. Kinyamario. 1993. Observations and Modeling of Biomass and Soil Organic-Matter Dynamics for the Grassland Biome Worldwide. *Global Biogeochemical Cycles* 7:785-809.
- Passioura, J.B. 2002. 'Soil conditions and plant growth'. *Plant, Cell and Environment* 25:311-318.
- Plante, A.F., et W.B. McGill. 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil Till. Res.* 66:79-92.
- Powers, R.F., D. Andrew Scott, F.G. Sanchez, R.A. Voldseth, D. Page-Dumroese, J.D. Elioff, et D.M. Stone. 2005. The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research. *For. Ecol. Manage.* 220:31-50.
- Puget, P., et L.E. Drinkwater. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:771-779.
- Rosenberg, N.J. 1964. Response of plants to the physical effects of soil compaction. *Advances in Agronomy* 16:181-196.
- Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada
- Saucier, J.-P., J.-F. Bergeron, P. Grondin, et A. Robitaille. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (3^e version): un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des ressources naturelles du Québec. *L'Aubelle*:1-12.
- Servadio, P., A. Marsili, M. Pagliali, S. Pellegrini, et N. Vignozzi. 2001. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. *Soil Till. Res.* 61:143-155.
- Servadio, P., A. Marsili, N. Vignozzi, S. Pellegrini, et M. Pagliai. 2005. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. *Soil Till. Res.* 84:87-100.
- Shestak, C.J., et M.D. Busse. 2005. Compaction alters physical but not biological indices of soil health. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:236-246.

- Siegel_Issem, C.M., J.A. Burger, R.F. Powers, F. Poner, et S.C. Patterson. 2005. Seedlings root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:215-226.
- Six, J., P. Callewaert, S. Lenders, S. De Gryze, S.J. Morris, E.G. Gregorich, E.A. Paul, et K. Paustian. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1981-1987.
- Sjoberg, G., S.I. Nilsson, T. Persson, et P. Karlsson. 2004. Degradation of hemicellulose, cellulose and lignin in decomposing spruce needle litter in relation to N. *Soil Biol. Biochem.* 36:1761-1768.
- SPBAT. 2000. Plan régional de protection et de mise en valeur des forêts privées de l'agence de l'Abitibi : Calcul des possibilités forestières. Rapport 2.
- SSSA. 1998. The contribution of soil science to the development of an implementation of criteria and indicators of sustainable forest management. Madison ed. Soil Science Society of America, Inc., Wisconsin.
- Ste-Marie, C., et D. Paré. 1999. Soil, pH and N availability effects on net nitrification in the forest floors of a range of boreal forest stands. *Soil Biol. Biochem.* 31:1579-1589.
- Sveistrup, T.E., T.K. Haraldsen, R. Langohr, V. Marcelino, et J. Kvaerner. 2005. Impact of land use and seasonal freezing on morphological and physical properties of silty Norwegian soils. *Soil Till. Res.* 81:39-56.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme, et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec: région agricole 9 : Abitibi-Témiscamingue Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec
- Van Cleve, K., C.T. Dyrness, G.M. Marion, et R. Erickson. 1993. Control of soil development on the Tanana River floodplain, interior Alaska. . *Can. J. For. Res.* 23:941-955.
- Veillette, J., Y. Bergeron, L. Gaudrault, F. Miron, et G. Drainville. 2000. Abitibi-Témiscamingue, De l'emprise des glaces à un foisonnement d'eau et de vie: 10 000 ans d'histoire. Multimonde ed., Sainte-Foy, Québec.

- Wall, A., et J. Heiskanen. 2003. Water-retention characteristics and related physical properties of soil on afforested agricultural land in Finland. *For. Ecol. Manage.* 186:21-32.
- Wang, G.G., et K. Klinka. 1997. White spruce foliar nutrient concentrations in relation to tree growth and soil nutrient amounts. *For. Ecol. Manage.* 98:89-99.
- Yorks, T.E., et K.B. Adams. 2003. Restoration cutting as a management tool for regenerating *Pinus banksiana* after ice storm damage. *For. Ecol. Manage.* 177:85-94.