

Université du Québec

Mémoire
présenté à

l'Institut National de la Recherche Scientifique
(INRS-Eau)

comme exigence partielle
de la
maîtrise ès Sciences de l'Eau
par

Yvon Grenier, ing. f.; B. Sc. A. Génie forestier

La valorisation des boues d'usine d'épuration
des eaux en fertilisation forestière

Novembre 1985

ã Ruth

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement monsieur Denis Couillard pour ses conseils, sa collaboration et sa disponibilité dans la direction de ce mémoire.

Je me dois également d'adresser des remerciements à monsieur Jean-Marc Veilleux qui m'a conseillé pour la partie expérimentale de mon projet de recherche, ainsi qu'à messieurs Gérald Jones et Archibald Jones qui ont corrigé le texte.

De nombreuses autres personnes m'ont apporté leur précieux concours. Ne pouvant pas les remercier individuellement au risque d'en oublier, je remercie les employés des serres, du laboratoire et de l'informatique du service de la recherche du ministère de l'Énergie et des Ressources (Terres et Forêts), du laboratoire du ministère de l'Environnement et de la documentation et informatique de l'INRS-Eau.

Enfin, je ne saurais passer sous silence l'excellent travail de mesdames Sylvie Cloutier et Suzanne Dussault pour la dactylographie du texte.

RÉSUMÉ

Cette thèse comprend deux parties, la première est théorique et la seconde est expérimentale.

Par une revue de littérature, nous avons d'abord constaté que les boues d'usine d'épuration des eaux pourraient avantageusement être employées comme fertilisant forestier. En effet, leur utilisation augmente les quantités de matière ligneuse produite, au même titre que le font les fertilisants chimiques. En plus, les effets adverses ne sont pas importants.

En seconde partie, nous avons fait croître en serres des mélèzes laricins sur du sable. Ils ont été fertilisés avec différentes doses et fréquences de boue anaérobie. Cette expérience est concluante et va dans le même sens que la théorie, soit une augmentation des rendements avec la fertilisation par les boues résiduelles.

ABSTRACT

This thesis is in two parts; the first one is theoretical while the second is practical.

The literature review concludes that wastewater sludge can be used with efficiency in forest fertilization. Their utilization gives better yields, in the same manner as do chemical fertilizers. Also, negative effects are negligible.

In the second part, we grew larches on sand in greenhouse. They were fertilized with different quantities and frequencies of anaerobic sludge. That experience is positive, and agrees with theory, that better yields are obtained using wastewater sludges as fertilizers.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xv
Liste des photos	xvii
Introduction	1
1. Problématique des boues d'épuration au Québec	5
1.1 Production estimée dans l'avenir immédiat	6
1.2 Solutions envisagées pour leur élimination	7
1.3 Composition moyenne des boues	9
2. Potentiel fertilisant des boues d'épuration municipales	13
2.1 Comparaisons des boues résiduares avec les fertilisants commerciaux	14
2.1.1 Teneur des boues résiduares en éléments nutritifs assimilables	15
2.1.2 Transformation de N-organique en N-assimilable	26
2.1.3 Éléments des boues d'épuration qui peuvent devenir disponibles avec le temps	29
2.2 Application des boues d'épuration	31
2.2.1 Application en surface ou enfouissement	31
2.2.2 Fréquence des applications des boues d'épuration	35
2.2.3 Saison pour l'application des boues d'épuration	42
2.2.4 Types de boues résiduares à utiliser	42
2.2.5 Colmatage du sol	45
2.3 Toxicité potentielle	46
2.3.1 Métaux lourds	46
2.3.2 Composés synthétiques toxiques	54
2.3.3 Organismes pathogènes	60
3. Justification de fertiliser les forêts	63
3.1 Augmentation des rendements avec des fertilisants chimiques	65
3.2 Augmentation des rendements avec des boues	67
4. Risques à l'environnement: les nitrates	73

TABLE DES MATIÈRES (suite)

	Pages
5. Culture de mélèze laricin sur sable avec différentes doses de boues secondaires anaérobies	79
5.1 Choix du matériel	80
5.1.1 Choix du médium de culture	80
5.1.2 Choix de l'espèce	82
5.1.3 Choix de la boue d'épuration	83
5.1.4 Lieu de croissance	85
5.2 Mise en place du dispositif expérimental	85
5.2.1 Traitements retenus	85
5.2.2 Application de la boue	90
5.2.3 Mesures effectuées et méthodes d'analyses	94
5.2.4 Essais de percolation en serres	98
5.3 Résultats et discussion	100
5.3.1 Évolution du nombre de plants au cours de l'expérience	100
5.3.2 Concentration des éléments dans les tissus	110
5.3.3 Concentration des éléments dans les sols et dans les percolats	123
5.3.4 Résultats de croissance	144
5.3.4.1 Croissance en hauteur	144
5.3.4.2 Croissance en diamètre	160
5.3.4.3 Mesure de la biomasse	164
5.3.4.4 Conclusions	169
5.3.5 Relations de croissance	171
5.3.5.1 Croissance en hauteur	171
5.3.5.2 Croissance en diamètre	173
5.3.5.3 Masse racinaire	174
5.3.5.4 Masse foliaire	175
5.3.5.5 Conclusions	176
5.4 Analyse complémentaire sur les métaux lourds	177
Conclusion	183
Bibliographie	187
Annexe A Analyses des échantillons des substrats de croissance avec la fertilisation	213
Annexe B Analyses des échantillons des tissus végétaux	215
Annexe C Matrices des corrélations utilisées pour les analyses de régression	221

TABLE DES MATIÈRES (suite)

		Pages
Annexe D	Analyses des échantillons des substrats de croissance à la fin de l'expérience	225
Annexe E	Analyses des percolats	241
Annexe F	Mesures des hauteurs, diamètres et des masses foliaires et racinaires des semis au cours de l'expérience	249
Annexe G	Photographies de tous les pots, regroupés par traitement, après 119 jours de croissance	259
Annexe H	Régressions multiples de croissance	281
Annexe I	Analyses des métaux lourds dans les tissus et les sols	289

LISTE DES TABLEAUX

		Pages
1.1	Cinq analyses de boues anaérobies de 2 usines à différents temps	10
1.2	Analyse comparative des boues d'épuration du Québec avec celles des États-Unis (EPA)	12
2.1	Valeurs des concentrations d'azote exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées, selon quelques auteurs	18
2.2	Valeurs des concentrations d'azote sur une base sèche pour 14 boues, aux États-Unis	20
2.3	Valeurs des concentrations de phosphore exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées, selon quelques auteurs	21
2.4	Valeurs des concentrations de potassium exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées, selon quelques auteurs	23
2.5	Valeurs des concentrations de divers éléments exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées aérobiquement et anaérobiquement, selon Sommers (1977) (Valeurs moyennes pour 250 analyses)	25
2.6	Pourcentage des différentes formes d'azote rencontrées dans les boues résiduares	28
2.7	Pourcentage de minéralisation de l'azote dans le temps, selon quelques auteurs	32
2.8	Concentrations maximales permises ($\mu\text{g/g}$, masse sèche) de métaux lourds dans les boues considérées comme acceptables pour utilisation sur des sols agricoles	52
2.9	Charges maximales permises (kg/ha) de métaux lourds dans les terres agricoles	53
2.10	Caractéristiques de quelques polluants dangereux appliqués sur des sols lors d'épandage de boues municipales	56
2.11	Temps requis pour atteindre une DL_{50} de quelques produits dangereux pour un sol fertilisé avec une boue contaminée et cette boue seule	58

LISTE DES TABLEAUX (suite)

	Pages
2.12a Temps requis par les rats pour atteindre une DL ₅₀ pour quelques polluants dangereux assumant que la boue contaminée représente 10% de la diète de l'animal	59
2.12b Temps requis par les bovins pour atteindre une DL ₅₀ pour quelques polluants dangereux assumant que la boue contaminée représente 10% de la diète de l'animal	59
3.1 Résumé de quelques rendements en hauteur et diamètre pour des arbres fertilisés avec des boues	70
5.1 Moyennes des analyses chimiques des sables et du sol de pépinière utilisés dans les expériences	81
5.2 Analyse chimique de la boue anaérobie de Valcartier utilisée pour l'expérience	84
5.3 Charge totale d'azote en kg/ha	89
5.4 Identification et caractéristiques des traitements	93
5.5 Charge en N par pot et par semaine provenant des boues	95
5.6 Identification et caractéristiques des traitements pour les essais de percolation en serres	99
5.7a Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 1 au cours de l'expérience	103
5.7b Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 2 au cours de l'expérience	104
5.7c Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 3 au cours de l'expérience	105
5.7d Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 4 au cours de l'expérience	106
5.8 Pourcentage de survie des semis selon le temps	108
5.9 Concentrations moyennes des éléments totaux dans les tissus de mélèzes laricins par traitement en mg/kg et coefficients de corrélation entre ces concentrations et les quantités de boues appliquées	111

LISTE DES TABLEAUX (suite)

		Pages
5.10	Concentrations moyennes des éléments par traitement dans les 10 cm supérieurs et coefficients de corrélation entre ces concentrations et les quantités de boues ajoutées	124
5.11	Concentrations moyennes des éléments par traitement dans les 10 cm inférieurs et coefficients de corrélation entre ces concentrations et les quantités de boues ajoutées	125
5.12	Concentration de quelques éléments dans les percolats de 15 traitements et moyennes de 5 analyses de l'eau d'irrigation	126
5.13	Hauteurs moyennes après 69 jours de croissance	147
5.14	Hauteurs moyennes après 105 jours de croissance	148
5.15	Hauteurs moyennes après 119 jours de croissance	150
5.16	Quantités totales d'éléments majeurs fertilisants ajoutés par traitement et par répétition	152
5.17	Diamètres moyens au collet à la fin de l'expérience	163
5.18	Biomasse moyenne des racines à la fin de l'expérience	165
5.19	Biomasse moyenne des tiges à la fin de l'expérience	167
5.20	Résultats des moyennes de croissance en hauteur à divers temps et des diamètres, masses foliaires et racinaires à la fin de l'expérience	170
5.21	Concentrations moyennes des métaux lourds dans quelques tissus végétaux	178
5.22	Concentrations moyennes des métaux lourds dans quelques sols utilisés pour les expériences et dans les percolats	180

LISTE DES FIGURES

		Pages
2.1	Relation entre le taux de croissance d'une plante et la concentration en élément nutritif limitatif	30
2.2	Évolution dans le temps des taux d'application de différentes boues qui ne dépasseront pas 10 mg NO ₃ /l dans les percolats	38
2.3	Niveau de l'azote organique dans le sol pour les taux d'application de boues donnés à la figure 2.2	38
4.1	Courbes des concentrations résiduelles de NO ₃ ⁻ dans les percolats selon les types de boues, les doses appliquées et la culture en place	38
5.0	Distribution des différents traitements	77
5.1	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 1	87
5.2	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 2	155
5.3	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 3	155
5.4	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 4	155
5.5	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 5	155
5.6	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 6	156
5.7	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 7	156
5.8	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 8	156
5.9	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 9	157

LISTE DES FIGURES (suite)

		Pages
5.10	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 10	157
5.11	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 11	157
5.12	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 12	157
5.13	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 13	158
5.14	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 14	158
5.15	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 15	158
5.16	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 16	158
5.17	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 17	159
5.18	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 18	159
5.19	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 19	159
5.20	Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour le traitement 20	159

LISTE DES PHOTOS

		Pages
5.1	Gicleurs en fonctionnement dans la serre	86
5.2	Distribution des pots pour l'expérience dans la serre	91
5.3	Méthode d'application de la boue	92
5.4	La table 2 après une première fertilisation	101
5.5	Dispositif de cueillette des percolats pour les traitements 21 à 25	145
5.6	La table 2 après 15 jours de croissance	145
5.7	Les quatre tables à la fin de l'expérience	161
5.8	Traitement 1, répétition 1 après 25 jours de croissance	161
5.9	Traitement 1, répétition 1 après 69 jours de croissance	161
5.10	Traitement 1, répétition 1 après 105 jours de croissance	161
5.11	Traitement 1, répétition 1 après 119 jours de croissance	162
5.12	Traitement 12, répétition 2 après 25 jours de croissance	162
5.13	Traitement 12, répétition 2 après 69 jours de croissance	162
5.14	Traitement 12, répétition 2 après 105 jours de croissance	162
5.15	Traitement 12, répétition 2 après 119 jours de croissance	261
G.1	Traitement 1, répétition 1, après 119 jours de croissance	261
G.2	Traitement 1, répétition 2, après 119 jours de croissance	261
G.3	Traitement 1, répétition 3, après 119 jours de croissance	261
G.4	Traitement 1, répétition 4, après 119 jours de croissance	262
G.5	Traitement 2, répétition 1, après 119 jours de croissance	262
G.6	Traitement 2, répétition 2, après 119 jours de croissance	262
G.7	Traitement 2, répétition 3, après 119 jours de croissance	262

LISTE DES PHOTOS

		Pages
G.8	Traitement 2, répétition 4, après 119 jours de croissance	262
G.9	Traitement 3, répétition 1, après 119 jours de croissance	263
G.10	Traitement 3, répétition 2, après 119 jours de croissance	263
G.11	Traitement 3, répétition 3, après 119 jours de croissance	263
G.12	Traitement 3, répétition 4, après 119 jours de croissance	263
G.13	Traitement 4, répétition 1, après 119 jours de croissance	264
G.14	Traitement 4, répétition 2, après 119 jours de croissance	264
G.15	Traitement 4, répétition 3, après 119 jours de croissance	264
G.16	Traitement 4, répétition 4, après 119 jours de croissance	264
G.17	Traitement 5, répétition 1, après 119 jours de croissance	265
G.18	Traitement 5, répétition 2, après 119 jours de croissance	265
G.19	Traitement 5, répétition 3, après 119 jours de croissance	265
G.20	Traitement 5, répétition 4, après 119 jours de croissance	265
G.21	Traitement 6, répétition 1, après 119 jours de croissance	266
G.22	Traitement 6, répétition 2, après 119 jours de croissance	266
G.23	Traitement 6, répétition 3, après 119 jours de croissance	266
G.24	Traitement 6, répétition 4, après 119 jours de croissance	266
G.25	Traitement 7, répétition 1, après 119 jours de croissance	267
G.26	Traitement 7, répétition 2, après 119 jours de croissance	267
G.27	Traitement 7, répétition 3, après 119 jours de croissance	267
G.28	Traitement 7, répétition 4, après 119 jours de croissance	267
G.29	Traitement 8, répétition 1, après 119 jours de croissance	268
G.30	Traitement 8, répétition 2, après 119 jours de croissance	268

LISTE DES PHOTOS

		Pages
G.31	Traitement 8, répétition 3, après 119 jours de croissance	268
G.32	Traitement 8, répétition 4, après 119 jours de croissance	268
G.33	Traitement 9, répétition 1, après 119 jours de croissance	269
G.34	Traitement 9, répétition 2, après 119 jours de croissance	269
G.35	Traitement 9, répétition 3, après 119 jours de croissance	269
G.36	Traitement 9, répétition 4, après 119 jours de croissance	269
G.37	Traitement 10, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	270
G.38	Traitement 10, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	270
G.39	Traitement 10, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	270
G.40	Traitement 10, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	270
G.41	Traitement 11, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	271
G.42	Traitement 11, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	271
G.43	Traitement 11, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	271
G.44	Traitement 11, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	271
G.45	Traitement 12, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	272
G.46	Traitement 12, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	272
G.47	Traitement 12, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	272
G.48	Traitement 12, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	272
G.49	Traitement 13, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	273
G.50	Traitement 13, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	273
G.51	Traitement 13, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	273

LISTE DES PHOTOS

		Pages
G.52	Traitement 13, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	273
G.53	Traitement 14, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	274
G.54	Traitement 14, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	274
G.55	Traitement 14, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	274
G.56	Traitement 14, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	274
G.57	Traitement 15, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	275
G.58	Traitement 15, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	275
G.59	Traitement 15, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	275
G.60	Traitement 15, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	275
G.61	Traitement 16, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	276
G.62	Traitement 16, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	276
G.63	Traitement 16, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	276
G.64	Traitement 16, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	276
G.65	Traitement 17, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	277
G.66	Traitement 17, répétition 2, après 105 jours de croissance ...	277
G.67	Traitement 17, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	277
G.68	Traitement 17, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	277
G.69	Traitement 18, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	278
G.70	Traitement 18, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	278
G.71	Traitement 18, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	278

LISTE DES PHOTOS

	Pages
G.72 Traitement 18, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	278
G.73 Traitement 19, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	279
G.74 Traitement 19, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	279
G.75 Traitement 19, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	279
G.76 Traitement 19, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	279
G.77 Traitement 20, répétition 1, après 119 jours de croissance ...	280
G.78 Traitement 20, répétition 2, après 119 jours de croissance ...	280
G.79 Traitement 20, répétition 3, après 119 jours de croissance ...	280
G.80 Traitement 20, répétition 4, après 119 jours de croissance ...	280

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Notre société produit de nombreux biens de consommation qui nous rendent la vie aisée. Cette amélioration de nos conditions de vie, par rapport à celles de nos ancêtres, a également sa contre-partie, à savoir la génération de nombreux déchets sous diverses formes, soit liquides, solides et gazeuses. Ces déchets ont la caractéristique commune de polluer l'environnement.

Depuis quelques décennies, on s'est rendu compte de cette situation et de là est né le désir de l'améliorer. Nous désirons conserver notre mode de vie (consommation), mais nous voulons aussi un environnement plus sain pour nous épanouir. La lutte à la pollution coûte cher et n'a pas toujours une justification économique. Cependant, si les "déchets" sont récupérés, il est possible d'affecter les coûts de cette lutte à une nouvelle forme de production: c'est le recyclage.

Plus particulièrement en ce qui concerne ce travail, l'eau est considérée comme un bien de consommation, mais une fois qu'elle a passé par nos maisons et usines, elle est souillée, donc impropre à une seconde consommation. Pour se débarrasser de cet encombrant déchet, la solution la plus simple est son rejet direct dans le milieu (lac ou rivière). Cette façon d'agir a considérablement détérioré l'environnement, rendant les plans d'eau d'abord impropres à la consommation, puis finalement même impropres à la récréation. La situation est devenue intolérable et certains gestionnaires ont décidé de prendre les choses en main afin de la corriger.

L'épuration des eaux s'accompagne d'un produit appelé boue résiduaire. Elle est considérée comme un déchet et est donc, elle aussi, susceptible de polluer l'environnement. Cependant, pour ne pas tomber dans ce cercle vicieux, la meilleure solution à la finalité des boues réside dans leur recyclage.

Puisque la production de biens de consommation a besoin de ressources, c'est près de nous qu'elles furent d'abord trouvées. Puis, peu à peu, leur épuisement local nous a amenés de plus en plus loin. Le bois est un bon exemple de cela. On n'a qu'à songer que des usines de pâtes et papiers et de sciage s'approvisionnent à des centaines de kilomètres de leurs lieux d'opération. Cette pression sur la ressource se voit augmentée quand on veut produire de la biomasse forestière en courtes rotations, et cela près des centres de production. Indéniablement, de telles pratiques nécessiteront des fertilisants car la nature ne pourra suffire seule à la tâche. Les fertilisants chimiques coûtent cher et il serait intéressant de pouvoir les remplacer. En agriculture, depuis des millénaires, l'utilisation des fumiers animaux a produit de bons résultats. Ainsi, l'idée d'utiliser les boues résiduaires a fait son chemin car une certaine comparaison a été établie entre elles et les fumiers, même si ces produits sont très différents.

Nous réalisons ainsi que, premièrement, nous serons confrontés à un problème de gestion des boues dans un avenir rapproché et que, deuxièmement, les besoins en matière ligneuse ne cessent d'augmenter. De plus, nous désirons que ce bois soit produit le plus près possible des lieux de transformation. Donc, étant animé par le désir de réaliser le maximum de

recyclage, il nous paraît naturel de vérifier si ces deux objectifs sont conciliables. À la suite de la réalisation de cette thèse, il s'avert que les boues d'usines d'épuration des eaux pourraient avantageusement être utilisées en fertilisation forestière. Il ne faut pas perdre de vue que les boues produites devront bien être mises quelque part. Ainsi, leur simple mise en décharge est un gaspillage: profitons donc de leur valeur fertilisante.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE DES BOUES D'ÉPURATION AU QUÉBEC

1. PROBLÉMATIQUE DES BOUES D'ÉPURATION AU QUÉBEC

Le gouvernement du Québec, par l'entremise du ministère de l'Environnement, a mis sur pied un programme d'assainissement des eaux usées. Initié en 1978 et échelonné sur une dizaine d'années, ce programme touche toutes les régions du Québec (Couillard et al., 1985; Gouvernement du Québec, 1984a). Avec des investissements de l'ordre de 6,7 milliards de dollars, soit 4,7 milliards pour le volet municipal, 1,5 milliard pour le volet industriel et 0,5 milliard pour le volet agricole (Gouvernement du Québec, 1985b; Crowley et al., 1984), le Gouvernement veut améliorer la sécurité d'approvisionnement en eau, protéger ou redonner les usages de loisirs et de récréation et assurer des conditions propices à un milieu de vie aquatique équilibré (Gouvernement du Québec, 1985a).

Les usines qui traitent les eaux usées permettent le rejet, dans le milieu, d'une eau de qualité acceptable, mais produisent un résidu appelé boue résiduaire, ou boue. À ce chapitre, le Québec est en retard avec seulement 10% de ses eaux municipales qui sont traitées, comparativement à 84% en Ontario et 58% pour l'ensemble du Canada en 1984 (Gouvernement du Québec, 1984a).

1.1 PRODUCTION ESTIMÉE DANS L'AVENIR IMMÉDIAT

La quantité de boue produite dépend des traitements qu'on fait subir aux eaux usées et de la population qui est desservie par l'usine d'épuration. En général, les auteurs s'accordent à dire que la production quotidienne est d'environ 1000 kg de boue sèche par 10 000 habitants (Environnement Canada, 1985; Webber, 1984; Hornbeck et al., 1979; Sabey et

Hart, 1975). Il faut cependant noter que ce n'est pas toute la population qui est reliée à un système de collecte des eaux usées.

Ainsi, la production de boues était estimée à 550 000 tonnes ($5,5 \times 10^8$ kg) par année en France en 1979 (Pommel, 1979a), à $5,4 \times 10^6$ tonnes ($5,4 \times 10^9$ kg) par année dans la Communauté Économique Européenne en 1982 (Lake et al., 1984), à $1,3 \times 10^6$ tonnes ($1,3 \times 10^9$ kg) par année en Italie et au Royaume-Uni en 1981 et à $1,7 \times 10^6$ tonnes ($1,7 \times 10^9$ kg) par année en Allemagne en 1981 (Lester et al., 1983). Aux États-Unis, la production de boue était estimée à $4,5 \times 10^6$ tonnes ($4,5 \times 10^9$ kg) en 1983; elle devrait être de 6×10^6 tonnes (6×10^9 kg) en 1985 et de 9×10^6 tonnes (9×10^9 kg) en 1990 (Lake et al., 1984; Lester et al., 1983; Theis et Padgett, 1983).

Concernant le Québec, 900 municipalités sont visées par le programme d'épuration des eaux (Gouvernement du Québec, 1985b), ce qui représente 5,2 millions de personnes (Gagnon, 1985). On peut donc s'attendre à produire près de 200 000 tonnes (2×10^8 kg) de boues sèches annuellement, ce qui représente une quantité assez considérable de boue à gérer.

1.2 SOLUTIONS ENVISAGÉES POUR LEUR ÉLIMINATION

L'élimination et le traitement des boues résiduelles accaparent jusqu'à 50% des coûts de fonctionnement d'une usine d'épuration des eaux (Lester et al., 1983) et représentent l'un des plus grands problèmes auquel les ingénieurs sanitaires doivent faire face aujourd'hui (Hecht et al., 1975).

Globalement, peu de solutions peuvent être qualifiées de finales pour l'élimination des boues d'épuration. Au Royaume-Uni, 67% des boues produites étaient déposées sur les terres (2/3 en valorisation agricole et 1/3 en revalorisation de sites et en remplissage), 29% étaient larguées en mer et 4% incinérées (Lester et al., 1983). Ces trois solutions sont à peu près les seules utilisées pour se débarrasser des boues (Couillard, 1984; Möller, 1983). Le largage en mer représente à la fois un déplacement des problèmes de pollution et une perte de matériel potentiellement réutilisable ou recyclable. La mise en décharge a les mêmes inconvénients, sauf qu'il serait toujours possible de récupérer les produits d'un dépotoir. Tant qu'à l'incinération, les coûts du combustible nécessaire pour éliminer les boues remettent ce mode de disposition en question.

Ainsi, puisqu'il en coûte si cher pour se débarrasser des boues, on a songé à les valoriser car l'épandage pour le recyclage est en général plus économique que l'élimination (Environnement Canada, 1985; Baldwin et al., 1983). Le recyclage des boues est encouragé aux États-Unis; en 1979, 31% des boues produites dans ce pays étaient épandues sur les sols (EPA, 1979). Cette quantité était de 44% au Royaume-Uni (Lake et al., 1984). La valorisation agricole des boues est également retenue au Québec comme avenue privilégiée pour leur gestion (Gouvernement du Québec, 1984a; 1983).

Les préoccupations pour la conservation de l'énergie ont changé la philosophie de la disposition des boues résiduelles en une d'utilisation (Schmidtke, 1978). L'application des boues sur les sols apparaît donc comme l'une des options les plus écologiques et économiquement rentables (Sabey et Hart, 1975). Les boues doivent être considérées comme une matière première

qui peut être utilisée. En s'en servant comme fertilisant forestier, deux objectifs sont atteints: soit l'utilisation d'un produit actuellement vu comme indésirable et la production de plus de matière ligneuse. De plus, le tout s'inscrit bien dans le nouveau courant de pensée qui dirige notre société vers le recyclage et la récupération (Grenier et al., 1985).

1.3 COMPOSITION MOYENNE DES BOUES

La quantité d'éléments nutritifs ou de métaux qui se retrouvent dans les boues varie d'une station d'épuration à l'autre et varie même à l'intérieur d'une même station dans le temps. Le tableau 1.1 présente, à titre d'exemple, trois analyses de la boue anaérobie de l'usine de Valcartier (les valeurs du 25 septembre 1984 étant celles de la boue utilisée pour notre expérience décrite au chapitre 5) et deux analyses de la boue anaérobie de l'usine de la C.R.O. (Communauté Régionale de l'Outaouais) (Gouvernement du Québec, 1984b).

On voit d'abord des différences entre les usines. Par exemple, on retrouve 9 000 mg/l de matière totale dans l'analyse du 25 septembre 1984 pour l'usine de Valcartier contre 39 400 mg/l pour l'analyse du 25 octobre 1983 à l'usine de la C.R.O. et 4,2% contre 7,7% respectivement pour l'azote total.

On retrouve également des variations importantes dans le temps pour des analyses à une même usine. Par exemple, pour l'usine de Valcartier, la valeur du cuivre passe de 203 mg/kg pour l'analyse du 18 octobre 1983 à 2 900 mg/kg pour celle du 25 septembre 1984. De telles variations se

Tableau 1.1: Cinq analyses de boues anaérobies de 2 usines à différents temps.

USINE		VALCARTIER			C.R.O.		
Paramètre	Date	83-08-17	83-10-18	85-09-25	83-10-25	83-11-15	Unités
Matière totale		29 952	18 800	9 000	39 040	10 550	mg/L
Matière totale volatile		20 519	14 702	3 100	19 967	4 592	mg/L
Matière dissoute		952	1 000	855	1 140	1 110	mg/L
Matière dissoute volatile		519	502	230	467	472	mg/L
pH		7,3	5,5	7,7	7,5	7,5	---
NTK (Azote total)		39 997	37 160	42 000	38 573	77 035	mg/kg N
N-NH ₄ (Azote ammoniacal)		24 142	8 087	770	17 585	68 535	mg/kg N
N-NO ₃ +NO ₂ (Nitrates+Nitrites)		32,7	27,1	< 0,5	43,1	22,6	mg/kg N
Phosphore total inorganique		---	---	---	3 662	---	mg/kg P
Phosphore total		6 191	5 515	10 500	13 837	3 136	mg/kg P
Aluminium		9 682	7 196	13 000	41 744	35 791	mg/kg Al
Arsenic		1,25	3,59	< 5	17,5	4,47	mg/kg As
Baryum		339	341	600	456	506	mg/kg Ba
Bore (1)		115,2	57,9	20	51,1	54,2	mg/kg B
Cadmium (2)		9,7	9,5	< 10	9,7	8,9	mg/kg Cd
Mercure		7,3	2,7	7,7	2,7	3,0	mg/kg Hg
Molybdène		13,6	9,5	< 20	27,2	22,4	mg/kg Mo
Nickel		22,3	10,4	20	19,4	22,4	mg/kg Ni
Plomb		465	312	680	243	242	mg/kg Pb
Potassium		1 771	1 624	880	2 788	7 648	mg/kg K
Sodium		1 740	2 307	1 500	1 865	6 407	mg/kg Na
Calcium		22 035	16 056	33 000	34 652	43 302	mg/kg Ca
Chrome		72,6	48,3	80	97,1	80,5	mg/kg Cr
Cuivre		2 327	203	2 900	427	409	mg/kg Cu
Fer		9 138	5 200	15 000	14 716	14 828	mg/kg Fe
Magnésium		1 950	1 363	2 500	4 319	7 318	mg/kg Mg
Manganèse		277	75,4	200	417	626	mg/kg Mn
Zinc		639	492	950	476	488	mg/kg Zn
Sélénium		0,58	1,8	< 5	2,3	1,8	mg/kg Se

- 1) Limite de détection de 45 mg/kg sur la fraction solide. Comme tous les résultats obtenus dans la fraction solide sont inférieurs à la limite de détection, les concentrations réelles sont donc comprises entre la valeur inscrite au tableau et cette valeur moins 45 mg/kg.
- 2) Tous les résultats inférieurs à 10 mg/kg de matière en suspension ou inférieure à environ 7,5 mg/kg de matière sèche totale

(Tiré de: Gouvernement du Québec, 1984b, sauf pour l'analyse du 25 septembre 1984 de Valcartier, exécutée spécialement pour notre étude par le laboratoire du MENVIQ).

retrouvent aussi pour l'usine de la C.R.O. Pour le potassium, il passe de 1 865 mg/kg pour l'analyse du 25 octobre 1983 à 6 407 pour celle du 15 novembre 1983. Devant cette grande variabilité, il pourrait être nécessaire de faire une analyse de chaque boue avant de l'utiliser comme amendement au sol ou fertilisant.

Le tableau 1.2 présente une analyse comparative des boues du Québec avec celles des États-Unis. Les données du Québec sont une moyenne de 23 à 25 usines. En général, on constate que les boues du Québec sont plus exemptes de métaux (incluant les toxiques) que celles des États-Unis, sauf pour le manganèse (Mn) où on retrouve 1 032 mg/kg pour le Québec contre 382 mg/kg pour les États-Unis. On constate aussi que les boues du Québec contiennent 3,6% d'azote, 1,1% de phosphore et 0,2% de potassium, ce qui leur donne leur valeur fertilisante exemptée d'une trop forte contamination par les métaux. Il serait donc possible et avantageux de les utiliser comme fertilisant forestier.

Tableau 1.2: Analyse comparative des boues d'épuration du Québec avec celles des États-Unis (EPA)

Lieu Élément	Québec	États-Unis	Unités
C org. total	31,5	31,0	%
N total	3,6	3,9	%
NH ₄ ⁺ - N	9 196	6 450	mg/kg
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ - N	2 717	490	mg/kg
P total	1,1	2,5	%
K	0,2	0,4	%
Na	0,8	0,57	%
Ca	2,1	4,9	%
Mg	0,43	0,54	%
Ba	0,03	0,06	%
Fe	1,3	1,3	%
Al	1,4	1,2	%
Pb	140	1 360	mg/kg
Zn	483	2 790	mg/kg
Cu	466	1 210	mg/kg
Ni	27,7	320	mg/kg
Cd	< 10	1 110	mg/kg
Cr	51,3	2 620	mg/kg
Mn	1 032	382	mg/kg
B	<125	77	mg/kg
As	6,5	43	mg/kg
Mo	12,9	28	mg/kg
Hg	2,6	733	mg/kg

St-Yves (1985) et Gouvernement du Québec (1984b)

CHAPITRE II

POTENTIEL FERTILISANT DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES

2. POTENTIEL FERTILISANT DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES

2.1 COMPARAISON DES BOUES RÉSIDUAIRES AVEC LES FERTILISANTS COMMERCIAUX

Parmi les fertilisants chimiques utilisés en foresterie, on retrouve le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), le superphosphate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$) et le chlorure de potassium (KCl) (Armson et Sadreika, 1974). Ces fertilisants contiennent 3 macro-éléments essentiels à la croissance des arbres, soit l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) (Weier et al., 1974). On retrouve aussi à l'état de traces plusieurs micro-éléments. Cependant, ceux-là sont déjà en quantité suffisante dans le sol de façon naturelle (Patrick et Smith, 1975). Les fertilisants chimiques, comme leur nom l'indique, ne contiennent pas de matière organique. Ils libèrent donc directement les ions nécessaires à la croissance des arbres (exception faite de l'urée qui a une action libératrice plus lente).

Les boues résiduares sont un fertilisant organique. Elles libèrent leurs éléments nutritifs (N, P et K) lentement (Berry et Marx, 1980; Gagnon, 1972), malgré qu'une certaine partie de leur composition consiste en produits chimiques (ions) rapidement assimilables par la végétation (NH_4^+ et PO_4^{3-} , par exemple) (Chaussod et al., 1981). Même si les éléments chimiques ne se retrouvent pas aussi concentrés dans les boues qu'ils le sont dans les fertilisants chimiques, les boues résiduares sont un engrais organique valable (St-Yves, 1984; Bledsoe et Zasoski, 1981).

Une revue de la littérature permet de constater que les boues sont riches en éléments nutritifs pour la végétation (Riekerk, 1982; Dunigan et

Dick, 1980; EPA, 1979), mais leurs concentrations varient selon l'origine de ces boues. Leur valeur comme amendement au sol est une combinaison de leur charge en éléments nutritifs et de leurs effets sur les propriétés du sol (Atalay et Blanchar, 1984).

2.1.1 TENEUR DES BOUES RÉSIDUAIRES EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS ASSIMILABLES

Les boues contiennent beaucoup d'azote, élément qui est, la plupart du temps, déficient et limitatif dans les sols de nos forêts (Vézina et Roberge, 1981; Patrick et Smith, 1975). Elles contiennent aussi beaucoup de phosphore (P) et un peu de potassium (K). Parfois, ces trois éléments représentent jusqu'à 10% du contenu solide des boues (Sabey et Hart, 1975).

Azote

Des valeurs aussi intéressantes que 6,0% d'azote total sur une base sèche sont rapportés par Brockway et Urie (1983), tandis que Higgins (1984a; 1984b) donne des valeurs de 6,65%. L'azote se présente sous les formes organique et minérales. Pour les formes minérales, on retrouve surtout l'ammonium (NH_4^+), dont les concentrations oscillent entre 0,02% (Higgins, 1984a; 1984b) et 1,66% (Brockway et Urie, 1983). On retrouve aussi un peu de nitrates (NO_3^-), allant de 0,00035% (Epstein et al., 1976) à 0,05% (Sommers, 1977). Concernant l'ion nitrite (NO_2^-), sa présence n'est à peu près jamais décelée ou est incluse avec les nitrates.

Pour les arbres, c'est la forme ammoniacale qui est la plus prisee (Breuer et al., 1979; Morrison, 1974) et c'est la forme minérale que l'on

retrouve le plus souvent dans les boues (EPA, 1977; Sommers, 1977). Pour se faire une idée, on n'a qu'à reprendre les chiffres précédents où les maxima cités sont de 1,66% pour l'ammonium contre seulement 0,05% pour les nitrates. L'avantage de la forme "ammoniacale" sur la forme "nitrate" est qu'elle reste adsorbée aux particules d'argile, qui sont chargées négativement (Alexander, 1967). L'ammonium est donc moins sujet au lessivage.

La perte d'azote sous forme "nitrate" peut être considérable et devient par surcroît un problème d'enrichissement des eaux de surface ou souterraines par un élément considéré comme polluant (EPA, 1977). Même si les nitrates ne se retrouvent pas en très fortes concentrations dans les boues, ils se synthétisent par le processus de nitrification représenté par la formule suivante: $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ (Breuer et al., 1979). La nitrification peut se faire dans le sol en conditions aérobies (Brown et al., 1984) ou encore lors du procédé d'épaississement des boues.

Ainsi, à moins que le NO_3^- ne soit très vite absorbé par les plantes, (arbres, arbustes, plantes herbacées ou mousses), il y a des possibilités de perte par lessivage. Cette perte de NO_3^- a le double désavantage de créer des problèmes de pollution à la nappe phréatique et aussi de ne pas servir à la fertilisation des forêts, tel que souhaité. Cet aspect sera revu dans le chapitre IV.

La littérature rapporte deux façons principales de citer les contenus en azote dans les boues. La première exprime la quantité d'azote en ppm. Parfois, cette notion réfère à une solution et d'autres fois à une base sèche. La deuxième méthode exprime la quantité d'azote en mg.kg^{-1} de boue

sèche. Avec les deux méthodes utilisant le poids sec comme base, on peut ramener les résultats en pourcentage; c'est de cette façon qu'est présenté le tableau 2.1 portant sur les concentrations en azote dans diverses boues.

Sommers (1977) rapporte des valeurs en pourcentage et en ppm d'azote ramenées sur une base sèche. Dans ce cas, il faut comprendre que les ppm citées ne sont pas pour une base liquide, mais correspondent plutôt à des pourcentages. Ainsi, 1 000 ppm seraient l'équivalent de 0,1%. Sabey et Hart (1975) rapportent leur contenu en azote en utilisant les deux façons. Pour l'azote organique, ils donnent une concentration de 2 900 mg.l⁻¹ sur une base humide et de 6,6% sur une base sèche. Ils fournissent aussi le contenu en matières solides, soit 4,4%. Avec leurs chiffres, il est possible de recalculer le 6,6% d'azote cité, soit:

$$(2\ 900\ \text{mg N.l}^{-1}) \div 4,4\% = 65\ 909\ \text{mg N.l}^{-1} \approx 6,6\% \quad (10\ 000\ \text{mg.l}^{-1} = 1\%)$$

La valeur fournie de 4,4% ne peut cependant pas être recalculée, car on n'a pas le poids d'un litre de solution, ni le poids de boue sèche.

Le tableau 2.1 montre les variabilités entre les différentes boues. Le minimum d'azote total tombe aussi bas que 0,16% tandis qu'il atteint un maximum de 6,65%. Puisque il est bien connu que l'azote stimule la croissance des végétaux, il devient évident que l'utilisation d'une boue la plus riche possible en N est souhaitable. Higgins (1984a; 1984b) montre aussi qu'une même usine de traitement des eaux peut afficher une grande variabilité dans la composition des boues à différentes époques. Il cite le

Tableau 2.1: Valeurs des concentrations d'azote exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées selon quelques auteurs.

Composés azotés	Auteurs					
	Sommers ¹ 1977	Sabey et Hart 1975	Brockway et Urie 1983	Le Tacon et al. 1979	Stednick et Wooldridge 1979	Chaussod et al. 1981
N-total	4,9 aē 5,0 an		6,0 an	4,77 np	0,16 np	2,62 an
N-org		6,6 aē 2,8 an				
N-NO ₃ ⁻	0,030 aē 0,052 an		0,0024 an		0,0131 np	
N-NH ₄ ⁺	0,095 aē 0,940 an		1,66 an		0,0895 np	

Composés azotés	Epstein et al. 1976	Parker et Sommers ² 1983	Higgins ³ 1984a 1984b	Higgins ⁴ 1984a 1984b	Higgins ⁵ 1984a 1984b	Notre étude 1985
N-total	2,29 an		6,65 aē	4,10 aē	1,80 aē	4.2 an
N-org		2,519 aē 1,647 an				
N-NO ₃ ⁻	0,00035an	0,0044 aē 0,0382 an ⁶				
N-NH ₄ ⁺	0,1200 an	0,1360 aē 0,1038 an	1,50 aē	0,050 aē	0,020 aē	0,077 an

Notes: aē = boue digérée aërobiqument
 an = boue digérée anaërobiqument
 np = mode de digestion non-précisé

1 = Moyenne de 250 analyses

2 = Pour les boues digérées anaërobiqument, ce sont les moyennes de 13 analyses. Voir le tableau 2.2 pour les détails.

3 = Boue de 1978

4 = Boue de 1979

5 = Boue de 1980

6 = Valeur incluant le N - NO₂⁻

cas où l'azote total passe de 6,65% en 1978 à 1,80% en 1980. Cette irrégularité dans le contenu en azote des boues semble être la règle plutôt que l'exception et a déjà été signalée dans le tableau 1.1 qui concerne 2 usines québécoises.

Bref, les tableaux 2.1 et 2.2 montrent de nombreuses valeurs de contenu en azote dont il importe de retenir la variabilité spatiale et temporelle. Il suggère aussi qu'il est indispensable d'analyser la boue qu'on projette d'utiliser.

Phosphore

Le phosphore est aussi un élément important pour la croissance des plantes. En plus d'être présent en quantité importante dans les boues résiduelles, il a l'avantage de ne pas se lessiver vers la nappe (Chang *et al.*, 1983; Riekerk et Zasoski, 1979) ou les eaux de surface car le phosphore reste fortement adsorbé aux particules de sol (EPA, 1977). On le rencontre en concentrations assez constantes (EPA, 1983) surtout sous forme minérale (St-Yves, 1984), quoique la partie organique n'est pas négligeable non plus (Pommel, 1979a).

Le tableau 2.3 rapporte quelques valeurs tirées de la littérature. Les variations pour les concentrations de phosphore sont moins importantes que pour l'azote. Par exemple, des concentrations oscillant autour de 3% sont rapportées. Brockway (1983) cite une valeur de 7%, ce qui semble être riche, donc intéressant pour la valorisation des boues. Stednick et

Tableau 2.2: Valeurs des concentrations d'azote sur une base sèche pour 14 boues, aux États-Unis

Type de boue	Provenance	N-org %	NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ μg . g ⁻¹	
Aérobie	Medina, OH	2,519	1 360	44
Anaérobie	Anderson, IN	0,728	590	28
Anaérobie	Baltimore, MD	2,346	930	16
Anaérobie	Chicago, IL	3,033	3 760	33
Anaérobie	Chicago, IL	1,654	340	1 010
Anaérobie	Columbus, OH	2,744	2 010	22
Anaérobie	Frankfort, IN	1,048	56	780
Anaérobie	Glenwood Spring, CO	1,290	1 490	120
Anaérobie	Grand Rapids, MI	1,279	130	18
Anaérobie	Marion, IN	0,501	26	90
Anaérobie	Tucson, AZ	1,082	610	2 100
Anaérobie	Waukesha, WI	2,006	490	550
Anaérobie	Wisconsin Rapids, WI	1,692	2 440	170
Anaérobie	Zanesville, OH	1,403	630	32

Tiré de Parker et Sommers (1983)

Tableau 2.3: Valeurs des concentrations de phosphore exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées, selon quelques auteurs.

Composés phosphatés	Auteurs										
	Sommers ¹ 1977	Sabey et Hart 1975	Pagliai et al. 1981	Stednick et Wooldridge 1979	Pommel 1981	Brockway 1983	Epstein et al. 1976	Higgins ² 1984a 1984b	Higgins ³ 1984a 1984b	Higgins ⁴ 1984a 1984b	Notre étude 1985
P-total	2,9 aé 3,8 an	3,1 aé 1,3 an	3,4 aé 1,1 an	0,09 np	2,14 an	7,82 an	2,18 an	0,42 aé	0,40 aé	0,70 aé	1,05 an
P-minéral				0,0850 np	1,75 an						

Notes: aé = boue digérée aérobiquement
 an = boue digérée anaérobiquement
 np = mode de digestion non-précisé

- 1 = Moyenne de 250 analyses
- 2 = Boue de 1978
- 3 = Boue de 1979
- 4 = Boue de 1980

Wooldridge (1979) publie des concentrations inférieures à 0,1%, ce qui est très pauvre pour une boue résiduaire.

Potassium

Le potassium est un autre macro-élément essentiel à la croissance des plantes (Weier et al., 1974) qui se retrouve dans les boues résiduaires. Puisque le K reste en solution dans les eaux quittant la station d'épuration, il se retrouve en faibles concentrations dans les boues. Cependant, cette concentration se compare à ce qu'il y a déjà dans le sol (Edmonds et Mayer, 1981). Cela n'empêche toutefois pas les boues de constituer un excellent fertilisant. Cette déficience en K pourrait être ajustée, au besoin, si tel est le cas. De plus, la petite quantité de K contenue dans les boues semble être rapidement assimilable (St-Yves, 1984; Pommel, 1979b; Sabey et Hart, 1975).

Le tableau 2.4 présente quelques valeurs tirées de la littérature pour des concentrations de potassium (K) dans les boues. Sabey et Hart (1975) rapportent des valeurs au-dessus de 1% ce qui est plutôt élevé à comparer aux valeurs moyennes oscillant autour de 0,5%. Certaines boues contiennent même des valeurs aussi faibles que 0,1%, ce qui demanderait peut-être un ajout de fertilisant chimique pour compenser cette très basse concentration.

Tableau 2.4: Valeurs des concentrations de potassium exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées, selon quelques auteurs.

Auteurs									
Sommers ¹ 1977	Sabey et Hart 1975	Stednick et Wooldridge 1979	Brockway 1983	Epstein et al. 1976	Pagliari et al. 1981	Higgins ² 1984a 1984b	Higgins ³ 1984a 1984b	Higgins ⁴ 1984a 1984b	Notre étude 1985
0,46 aé 0,52 an	1,3 aé 1,1 an	0,29 np	0,15 an	0,21 an	0,4 aé 0,1 an	0,53 aé	0,97 aé	0,71 aé	0,088 an

Notes: aé = boue digérée aérobiquement
 an = boue digérée anaérobiquement
 np = mode de digestion non-précisé

- 1 = Moyenne de 250 analyses
- 2 = Boue de 1978
- 3 = Boue de 1979
- 4 = Boue de 1980

Autres éléments

D'autres éléments majeurs sont nécessaires à la croissance des arbres. Ce sont le soufre (S), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). En plus, les plantes ont besoin d'éléments mineurs (oligo-éléments) pour afficher une bonne croissance. Ce sont le fer (Fe), le bore (B), le zinc (Zn), le manganèse (Mn), le cuivre (Cu), le molybdène (Mo) et le chlore (Cl) (Weier et al., 1974). Les boues contiennent tous ces éléments en concentrations variables (Clevenger et al., 1983). Le tableau 2.5, tiré de Sommers (1977), présente les moyennes de 250 analyses qui concernent ces éléments. On remarque donc qu'on retrouve, dans les boues résiduaire, à peu près tout ce qui est nécessaire aux plantes.

Matière organique

Les boues contiennent beaucoup de matière organique, de l'ordre de 50% (Riha et al., non daté; Dunigan et Dick, 1980; Epstein et al., 1976). La matière organique est essentielle pour donner au sol une bonne structure en augmentant le volume des pores. Il en résulte une meilleure aération de ce sol; il est moins compact et moins sujet à se fissurer, donc moins sujet à s'éroder. Les racines des plantes peuvent donc mieux le pénétrer et il y a augmentation des quantités d'eau disponible (Harris et Urie, 1983; Pagliai et al., 1981). La présence de boue retenant l'eau peut réduire le stress de sécheresse pendant la saison de croissance (Epstein et al., 1976). De plus, cette eau est chargée en éléments nutritifs provenant des boues, d'où une meilleure croissance. Il y a aussi une augmentation de la capacité

Tableau 2.5: Valeurs des concentrations de divers éléments exprimées en pourcentage de poids sec pour des boues digérées aérobiquement et anaérobiquement, selon Sommers (1977). (Valeurs moyennes pour 250 analyses).

Élément	Aérobique	Anaérobique
S	0,8	1,2
Ca	3,3	5,8
Mg	0,52	0,58
Fe	1,1	1,6
B	0,0040	0,0097
Zn	0,2170	0,3380
Mn	0,0420	0,0400
Cu	0,0940	0,1420
Mo	0,0030	0,0029
Cl	-----	-----

d'échange cationique du sol (Cooley, 1979), de l'alimentation minérale et de l'activité biologique (St-Yves, 1984; Cescas et Archambault, 1981).

Cette matière organique est également essentielle aux micro-organismes vivant dans le sol car elle leur sert de nourriture (source de carbone) (Gagnon, 1972; Alexander, 1967) pour leurs besoins énergétiques et pour la formation de nouvelles cellules. Ils peuvent ensuite libérer les éléments nutritifs emprisonnés sous forme organique, donc non-assimilables par les arbres directement. (Naylor et Loehr, 1982a).

Il convient de citer que les micro-organismes ont également besoin de N, S, K, P, Ca, Mg et Fe (Hartenstein, 1981; Alexander, 1967) pour se développer et ainsi agir comme agents libérateurs des éléments nécessaires à la fertilisation.

2.1.2 TRANSFORMATION DE N-ORGANIQUE EN N-ASSIMILABLE

L'azote est l'élément le plus limitatif à la croissance des plantes (Federer, 1983; Brady, 1974; Möller, 1974); c'est aussi un des plus importants constituants du protoplasme des cellules vivantes et le plus sensible aux transformations bactériennes (Alexander, 1967).

L'azote contenu dans les boues résiduaire est sous les formes organique et minérales. Les formes minérales, NH_4^+ et NO_3^- , sont disponibles immédiatement pour les plantes, pourvu qu'elles ne soient pas perdues par volatilisation, lessivage, immobilisation ou dénitrification (Aulakh et Rennie, 1984). (Ces aspects seront discutés en 2.1.3 et 2.2). Les formes

organiques doivent d'abord être minéralisées (Magdoff et Amadon, 1980). Ce processus de décomposition, connu sous le nom d'ammonification, est effectué par des bactéries présentes dans le sol. Il est favorisé par un bas rapport C:N (Parker et Sommers, 1983; Vogt et al., 1981), de l'ordre de 30:1 (Edmonds et Mayer, 1981), une bonne aération du sol et une haute température (Harris et Urie, 1983; Riekerk, 1981). Les bases azotées des acides nucléiques donnent de l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) comme produit intermédiaire et de l'ammoniac (NH_3) comme produit final. En ce qui concerne la décomposition des protéines, il y a de nombreux produits intermédiaires, mais l'ammoniac reste le produit final (Alexander, 1967).

Les boues étant un fertilisant organique, elles relarguent lentement les éléments nutritifs qu'elles contiennent (Gagnon, 1972). Tel que déjà mentionné, NH_4^+ et NO_3^- sont vite absorbés par les plantes et ces formes minérales représentent de 10% à 50% (Pommel, 1979b; Urie, 1979; Sommers, 1977) de l'azote contenu dans les boues. Aulakh et Rennie (1984) rapportent même que 40% de l'ammonium ajouté serait fixé en dedans de 2 heures.

Le tableau 2.6 montre, selon quelques auteurs, dans quelles proportions les différentes formes d'azote sont rencontrées. Ce tableau montre que c'est la forme organique qui prédomine. Cela n'est pas surprenant, puisque les boues sont le produit d'une dégradation biologique de la matière organique. Une fois l'absorption des formes minérales effectuée, il faut que la forme organique soit minéralisée pour que l'absorption se poursuive.

Tableau 2.6: Pourcentage des différentes formes d'azote rencontrées dans les boues résiduares

Minérales (NH_4^+ + NO_3^-)	Organique	Références
10 à 50	50 à 90	Urie, 1979
10 à 50	50 à 90	Pommel, 1979b
10 à 50	50 à 90	Sommers, 1977
10 à 50		Beauchamp <u>et al.</u> , 1978
50	50	Donovan et Logan, 1983
25		Chaussod <u>et al.</u> , 1981
30	70	Gouvernement du Québec, 1984b
20	80	EPA (cité par Gouvernement du Québec, 1984b)

2.1.3 ÉLÉMENTS DES BOUES D'ÉPURATION QUI PEUVENT DEVENIR DISPONIBLES AVEC LE TEMPS

Les boues fournissent lentement les éléments fertilisants et sur une longue période à mesure que se minéralisent les parties organiques (Riha et al., non daté). Puisque seulement les formes minérales sont assimilables par les plantes et les arbres, il faut étudier les quantités qui seront disponibles avec le temps.

La partie minérale des boues est assimilée, dès la première année, par les plantes. Cependant, cette quantité ne devrait pas être au-dessus des besoins de consommation. En effet, à partir d'une certaine concentration, non seulement les plantes ne puisent plus dans le milieu, mais même que trop de l'élément peut conduire à la toxicité. Cette relation est illustrée par la figure 2.1.

Si le surplus d'élément n'est pas capté par les plantes, il pourra être drainé vers la nappe ou lessivé vers les cours d'eau. Il est aussi possible que les éléments nutritifs soient immobilisés par les micro-organismes qui les assimilent pour leur propre métabolisme (Edmonds et Mayer, 1981; Alexander, 1967) et ils ne sont plus disponibles pour les plantes. Cette immobilisation pourrait être de l'ordre de 20% de l'azote inorganique (Parker et Sommers, 1983). Aulakh et Rennie (1984) rapportent que les micro-organismes du sol préfèrent NH_4^+ comme source d'azote. Une autre possibilité est la simple adsorption des éléments aux particules de sol jusqu'à leur utilisation par les plantes ou les micro-organismes ou leur délavage éventuel (Vogt et al., 1981).

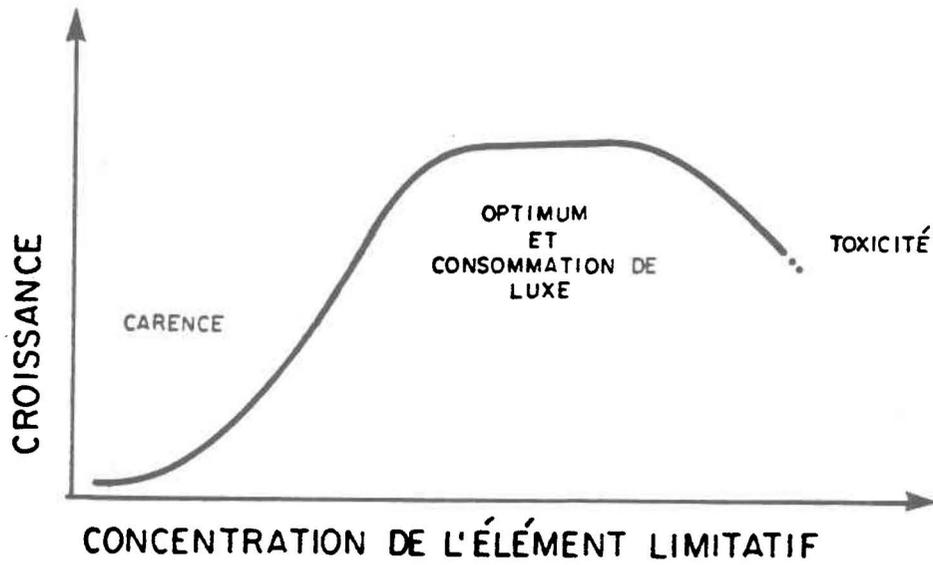


Figure 2.1: Relation entre le taux de croissance d'une plante et la concentration en élément nutritif limitatif (tiré de Morrison, 1974).

Pour les fractions organiques des boues, la plus grande partie se minéralise dès les premières années et ce processus se poursuit au cours des ans suivant une exponentielle décroissante. En général, on estime que le temps de libération varie de 5 à 10 ans. Ainsi, pour planifier une gestion d'épandage des boues on doit disposer de beaucoup de territoire afin de ne pas inonder complètement une surface réduite, avec les risques de colmatage et de création d'étangs (Riekerk, 1982) que cela entraîne. Environ 20% de l'azote organique serait minéralisé la première année (St-Yves, 1984; Haith, 1983; Sommers et Nelson, 1978). Cependant, la littérature rapporte des taux de minéralisation très différents et quelques-uns sont présentés dans le tableau 2.7. On peut constater la grande variabilité de la minéralisation selon les auteurs.

Dans la majorité des cas, la minéralisation la plus importante se fait dès la première année et même dans les premières semaines (Parker et Sommers, 1983). Aulakh et Rennie (1984) rapporte que 60% de l'azote appliqué sous forme d'urée est retrouvé sous formes minérales après 3 semaines. Puisque le reste de l'azote est décomposé lentement et que les besoins des plantes sont continus, il peut être nécessaire d'appliquer des boues résiduelles pendant plusieurs années et même plusieurs fois par an dans les premières années si une absorption très rapide est observée pendant les premières semaines.

2.2 APPLICATION DES BOUES D'ÉPURATION

2.2.1 APPLICATION EN SURFACE OU ENFOUISSEMENT

Il existe deux modes d'application des boues, soit l'épandage en surface ou l'incorporation dans le sol.

Tableau 2.7: Pourcentage de minéralisation de l'azote dans le temps, selon quelques auteurs

Première année	Deuxième année	Troisième année	Quatrième année	Références
20	2,4	2,3	2,2	Sommers et Nelson, 1978
30 à 60				Pommel, 1979b
50	25	15		Parker et Sommers, 1983
54				Magdoff et Amadon, 1980
20	6	4	2	Haith, 1983

Application en surface

Cette opération peut se faire de trois façons. Il y a d'abord la méthode des gicleurs (Brockway et al., 1979). Celle-ci est bien connue: c'est essentiellement la boue qui est véhiculée dans des conduites plutôt que l'eau d'irrigation. Il est bien certain que ce mode d'application est opérationnel que si la boue est assez liquide, donc contenant très peu de solides non-dissous et s'il n'y a pas d'obstacle à la dispersion des jets.

L'autre méthode consiste en l'emploi de camions citernes. Ceux-ci sont déjà commercialisés par l'industrie (Anonyme, 1983). Ils sont adaptés pour toutes les sortes de terrains et peuvent appliquer les boues à différents taux de liquidité. C'est le principe des épandeurs à lisier de porc.

La dernière méthode consiste à installer des boyaux d'arrosage ou des canons à eau sur une citerne mobile et à asperger le terrain (Riekerk, 1982). La technologie pour épandre des boues en forêt est opérationnelle depuis 1977 (Archie et Smith, 1981).

Enfouissement

L'enfouissement peut être fait directement par une machine spécialisée (Anonyme, 1983) ou être la deuxième partie d'un processus à deux étapes. La première partie de ce processus est l'application en surface et la deuxième partie est l'enfouissement qui est fait après un certain temps par une autre machine, par exemple une herseuse à disques.

Comparaison

Il a déjà été vu qu'une partie de l'azote contenu dans les boues résiduelles est sous forme ammoniacale (NH_4^+). Cette forme d'azote a le désavantage marqué d'être facilement volatilisée si l'application de la boue se fait en surface (EPA, 1983; Smith, 1983; Naylor et Loehr, 1982a; Cescas et Archambault, 1981). Ces pertes de NH_3 sont importantes et rapides (Beauchamp et al., 1978). Il y a d'abord la perte lors de l'aspersion (Haith, 1983) et celle entraînée par évaporation lors du séchage (Pommel, 1979b; Riekerk et Zasoski, 1979). Donovan et Logan (1983) rapportent des pertes variant de 0 à 32% de $\text{NH}_3\text{-N}$ appliqué sur une période de 24 heures seulement, avec le maximum de pertes se situant une heure après l'application. Ces pertes par volatilisation augmentent avec la température (Donovan et Logan, 1983; Beauchamp et al., 1978), l'augmentation du pH causée par le chaulage (Donovan et Logan, 1983; Pommel, 1979b) et de trop grandes quantités d'eau dans le sol qui rendent l'évaporation possible et favorisent la volatilisation de l'azote.

En plus des pertes par volatilisation, il y a aussi les pertes par érosion qui sont à considérer. Dunigan et Dick (1980) rapportent que les pertes d'éléments nutritifs sont plus importantes pour les applications en surface de fertilisants chimiques ou de boues que pour les traitements où les fertilisants ont été enfouis. Haith (1983), Smith (1983), Naylor et Loehr (1982a) et Beauchamp et al. (1978) rapportent qu'une incorporation immédiatement après l'application des boues réduit grandement les pertes de NH_3 par volatilisation. Sur une période d'une année, une perte de 100% de $\text{NH}_3\text{-N}$ est réaliste.

En supposant une perte de 100% de $\text{NH}_3\text{-N}$, cette perte sera négligeable si $\text{NH}_3\text{-N}$ contenu dans les boues est faible par rapport à l'azote organique. La section 2.1.2 de cette thèse montre que $\text{NH}_3\text{-N}$ représente parfois seulement 10% de l'azote total. Il reste donc à étudier si le 90% de l'azote organique qui reste est lui aussi sujet aux pertes après minéralisation. Si la boue est très liquide ou s'il pleut beaucoup, l'azote organique s'infiltrera dans le sol échappant ainsi au processus de volatilisation (après minéralisation) (Haith, 1983). Il s'enfuit de lui-même en quelque sorte. Cependant, l'enfouissement prend de l'importance si le taux de $\text{NH}_3\text{-N}$ est de l'ordre de 50%. De plus, avant d'investir dans des équipements d'enfouissement, il faudrait évaluer l'augmentation des rendements en bois et/ou l'amélioration de la qualité de l'eau. Cet aspect a été touché dans notre expérience, au chapitre 5.

2.2.2 FRÉQUENCE DES APPLICATIONS DES BOUES D'ÉPURATION

La littérature propose 4 façons principales pour appliquer les boues d'épuration. Il y a l'application massive unique au début de la vie du peuplement; les applications continues en forêt; les applications ponctuelles par rapport au stade de développement de la forêt; et finalement les applications à intervalles réguliers (Brockway, 1983; Archie et Smith, 1981; Miller, 1981). Il reste à noter, quelque soit la méthode utilisée, que ces applications seront valables en autant que l'ajout par les boues est bien supérieur au capital déjà en place dans le sol (Bledsoe et Zasoski, 1981; Miller, 1981).

Application massive unique

Partant d'un site classé pauvre en éléments nutritifs, cette méthode propose d'appliquer plusieurs centimètres de boue (sur une base sèche) en un seul coup. Puisque la boue contient les éléments nutritifs déficients dans le sol, il y a ajout instantané d'un réservoir de nutriments et puisqu'ils sont principalement sous forme organique, cet ajout devrait être bénéfique pour toute la vie du peuplement en améliorant définitivement le site (Archie et Smith, 1981). Ce site, nouvellement classé plus fertile, devrait le rester pour la durée de la rotation, amenant ainsi un enrichissement durable du sol en azote et en phosphore (Pommel, 1979b). Ce site serait resté pauvre sans intervention.

Cette méthode d'application des boues a l'avantage indéniable de minimiser les opérations sur le terrain, donc de diminuer les coûts. Il semble que ce soit là le seul avantage, car une application massive de boue libérerait beaucoup trop de NH_4^+ au départ, ce qui est rapporté toxique pour les semis (Le Tacon et al., 1979; Pommel, 1979b). Ce problème peut être contourné si on laisse s'écouler une certaine période avant de planter. Le Tacon et al. (1979) suggèrent une année d'attente. De plus, les pertes d'azote sont plus importantes pour une application massive que pour de nombreuses applications légères (Miller, 1983).

Par contre, cette méthode d'épandage pourrait être couplée avec une autre, car les applications massives favorisent la dégradation des débris végétaux sur les aires de coupe, probablement à cause d'une augmentation de l'activité microbologique (Archie et Smith, 1981). C'est donc un avantage dont il faut tirer parti. Enfin l'application massive unique peut également être utilisée pour revégétaliser les carrières ou les sites miniers (Berry et Marx, 1980).

Applications continues en forêt

Du point de vue de la gestion des boues, c'est l'option qui paraît la plus satisfaisante, car elle permet d'écouler le produit de façon régulière et automatique. Cependant, elle est peu réaliste, sauf si on applique de petites quantités de boue à la fois. Le taux de décomposition, tel que déjà étudié dans la section 2.1.3, n'est pas assez élevé et il y aura, à la longue, accumulation de matière.

Haith (1983) propose une nouvelle approche plus encourageante. Il présente un modèle où le taux d'application annuel diminue d'année en année pour se stabiliser vers les 10 ans. Puisque la décomposition est plus lente que le taux d'application, cela conduit à une augmentation du contenu en azote organique du sol. Ensuite, alors que les quantités appliquées ont diminué, l'azote organique dans ce sol se stabilise. Les figures 2.2 et 2.3 illustrent cette théorie. L'étape suivante sera la minéralisation de cette importante quantité de N-org qui sera absorbé par la végétation en place.

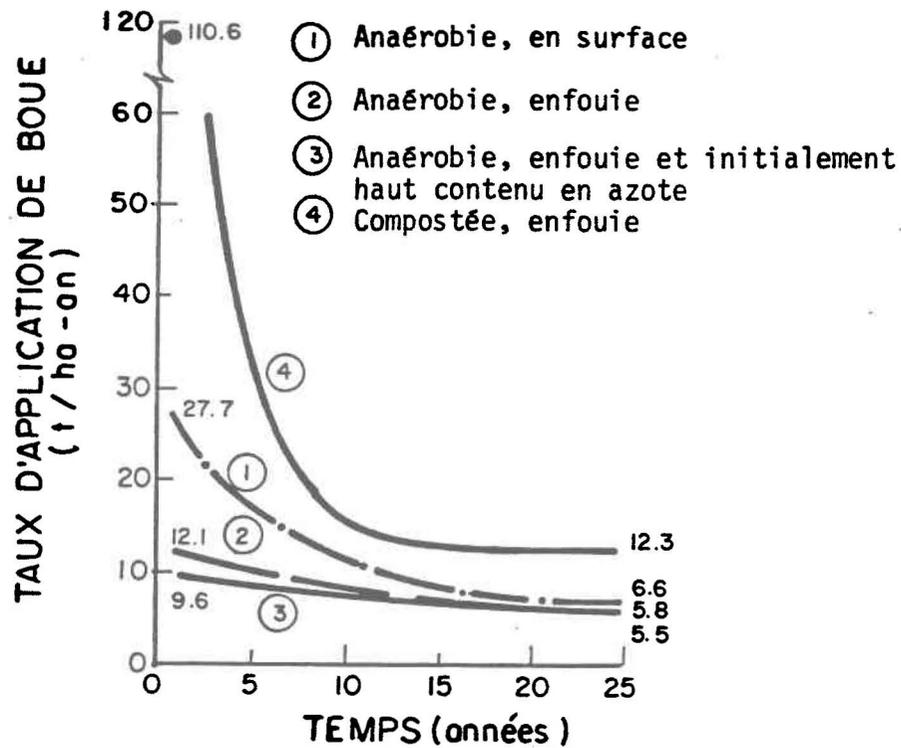


Figure 2.2: Évolution dans le temps des taux d'application de différentes boues qui ne dépasseront pas 10 mg NO₃/l dans les percolats. (Tiré de Haith, 1983)

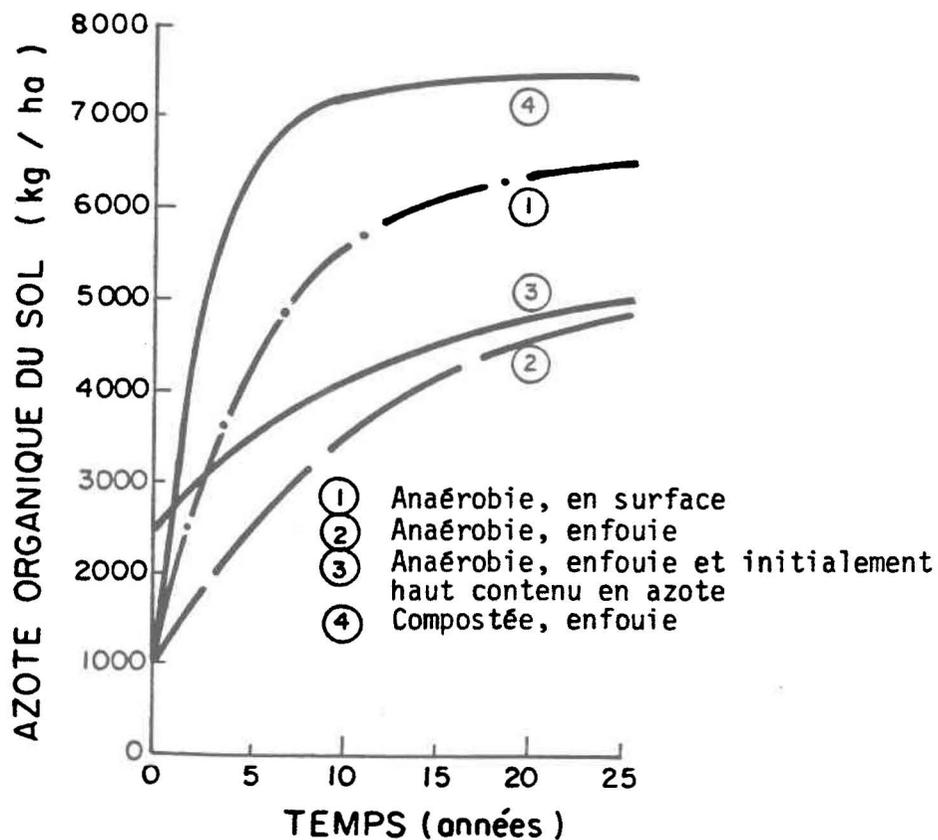


Figure 2.3: Niveau de l'azote organique dans le sol pour les taux d'application de boues donnés à la figure 2.2 (Tiré de Haith, 1983)

Cette façon d'opérer est prometteuse. Connaissant les besoins de la forêt qu'on veut produire et les durées des rotations impliquées, on pourrait déterminer les surfaces nécessaires pour l'aménagement de ces forêts, compte-tenu des quantités de boues à écouler.

Les applications ponctuelles par rapport au stade de développement de la forêt.

Cette méthode propose de fertiliser les forêts à des moments critiques, où l'effet des fertilisants, ou des boues, sera maximisé. Miller (1981) parle de trois périodes pendant lesquelles la fertilisation est souhaitable. Il y a d'abord le stage juvénile, soit avant la fermeture du couvert forestier. À ce stade, les arbres sont très exigeants en nutriments car ils remettent très peu d'éléments nutritifs en circulation. Ils exercent donc une forte pression sur le milieu, de même que les plantes herbacées qui ont un comportement semblable. De plus, selon Archie et Smith (1981), les meilleures réponses à la fertilisation seraient obtenues dans les forêts jeunes.

À partir de la fermeture du couvert forestier, les besoins de fertiliser sont réduits, car les éléments nutritifs sont épuisés lentement et recyclés dans la forêt elle-même, incluant la dégradation des plantes herbacées, arbres supprimés, etc. Il y a aussi les apports naturels par altération et précipitations qui s'ajoutent à la recirculation. Par contre, si on fait des éclaircies, il serait avantageux de fertiliser là où on a laissé des vides, car l'espace supplémentaire fourni aux arbres de bordure

amènera une croissance accélérée de ceux-ci et la fertilisation à ce stade sera bénéfique.

Le troisième stade correspond à la fin de la vie du peuplement. À ce stade, tout l'azote est fixé dans les arbres et ceux-ci répondent bien à une fertilisation (Miller, 1981). À ce sujet, les arbres dominants répondent mieux à la fertilisation que les arbres supprimés (Möller, 1974). David et Struchtemeyer (1980) rapportent que les forêts matures peuvent retirer la plupart des éléments ajoutés aux sols avant qu'ils atteignent la nappe. D'un autre côté, Cole (1981) rappelle que les forêts surannées puisent peu d'azote du milieu.

Applications à intervalles réguliers

Au lieu d'épandre des boues à tous les ans, ou même plusieurs fois par an, cette méthode préconise une application à des intervalles réguliers. Elle pourrait aussi être couplée avec une application massive au début. Brockway (1983) dit qu'un haut taux d'application de boue à tous les 5 ans conduirait à une amélioration à long terme dans la productivité du site. Fiskell et al. (1984) rapportent que les effets des boues peuvent s'étendre sur des décennies. Ces applications, suivies de périodes sans intervention, sont basées sur la décomposition de l'azote organique qui reste dans le sol. En se basant sur l'azote on atteint deux objectifs en même temps, soit la minimisation des risques de pollution par les nitrates et, par ce fait, les doses d'épandage obtenues sont assez basses pour prévenir la pollution par les métaux toxiques des boues (Haith, 1983).

Webber (1984) et EPA (1983) proposent que les applications soient basées sur les besoins en phosphore afin de favoriser une utilisation efficace des boues. La fréquence des applications serait de l'ordre d'une fois par cinq ans, sur les sols agricoles. Il y a trop de phosphore quand les applications sont basées sur l'azote (Sommers et Nelson, 1978) et le phosphore immobiliserait les autres nutriments essentiels aux plantes (Chang et al., 1983). Les charges en P ne devraient pas dépasser les maxima permis, car il peut devenir un élément limitatif à l'épandage, sur une longue période (EPA, 1977).

La bonne pratique

Chaque situation a ses caractéristiques propres et chacune des méthodes proposées pourrait avoir sa place dans la gestion des boues. Il importe donc de bien connaître tous les paramètres qui entrent en jeu.

Les applications de boues devraient être ajustées selon les types de sol, de boue et de culture, leur âge, la hauteur de la nappe phréatique, les précipitations (Brockway et Urie, 1983) le taux de minéralisation et les besoins des arbres (Riha et al., non daté). L'évolution du site devrait aussi être suivie étroitement afin d'optimiser la gestion des boues.

Il faut s'assurer que les arbres ne manquent pas d'éléments nutritifs et, d'un autre côté, qu'il n'y a pas trop de boue libérant ainsi des polluants (NO_3^- , métaux) dans le milieu. Finalement, il serait souhaitable de faire des éclaircies aux bons moments afin de maximiser la production de matière ligneuse de cet aménagement.

2.2.3 SAISON POUR L'APPLICATION DES BOUES D'ÉPURATION

Les épandages des boues résiduares posent moins de problèmes en sylviculture qu'en agriculture parce qu'ils peuvent être faits n'importe quand au cours de la saison de croissance et que les récoltes (exploitation) ne se font pas annuellement, mais seulement à intervalles de temps assez longs (plusieurs années).

Sous nos climats, la saison d'application reste quand même un facteur capital. L'épandage ne peut pas se faire sur des sols gelés (St-Yves, 1985; Bates et al., 1981) parce que l'enfouissement est impossible. Si cette dernière opération n'était pas possible, l'épandage en surface résulterait en un lessivage vers les cours d'eau lors de l'application ou à la fonte printanière; cela est aussi vrai pour les fertilisants chimiques (Miller, 1983). Ce problème est particulier aux régions nordiques dont fait partie le Québec.

Puisqu'il faut limiter les applications de boues aux saisons où il n'y a pas de neige et lorsque le sol n'est pas gelé, il se posera des problèmes de gestion et d'accumulation. Ces problèmes d'entreposage sont déjà bien connus en agriculture avec les fumiers.

2.2.4 TYPES DE BOUES RÉSIDUAIRES À UTILISER

Parmi les types de boues d'épuration produites, toutes ne sont pas utilisables en vue de leur valorisation forestière. Le point le plus important à considérer est que les boues doivent être stabilisées avant

d'être utilisées à quelque valorisation que ce soit (St-Yves, 1985; 1984; Webber, 1984; Lester et al., 1983; Hecht et al., 1975). L'objectif de cette stabilisation, qui est la décomposition des produits fermentescibles (Pommel, 1979b), vise principalement à diminuer le nombre d'organismes pathogènes présents dans les boues. On peut donc employer des traitements biologiques, thermiques ou physico-chimiques, mais la valeur fertilisante des boues résiduelles ne sera pas la même selon le type de traitement utilisé.

Traitements biologiques

Les traitements biologiques produisent des boues d'épuration dites primaires ou secondaires, dépendant d'où elles sont retirées dans la chaîne de traitement (Couillard, 1985c). Du point de vue fertilisant, les boues secondaires sont plus riches que les boues primaires (EPA, 1979; Pommel, 1979b) et les boues produites en aérobose sont plus riches que celles produites en anaérobose (Hecht et al., 1975). Les volumes de boues produits en anaérobose sont également moindres (Webber, 1984; Martin, 1982).

Cependant, si on apporte des traitement supplémentaires aux boues, tel qu'un épaissement par séchage, elles perdront une partie de leur azote par volatilisation (Bates et al., 1981) et l'azote résiduel est moins disponible (Pommel, 1979b). D'autres traitements tel l'aération prolongée, les étangs de stabilisation et les fosses d'oxydation entraînent aussi une stabilisation des boues, mais elles doivent séjourner au moins 20 jours dans ces milieux pour que les traitements soient considérés comme efficaces (St-Yves, 1985).

Traitements thermiques

Le conditionnement thermique fait aussi perdre de l'azote aux boues, mais n'a pas d'effet sur le phosphore (Pommel, 1979b). Les boues compostées peuvent être incluses dans ce type de traitement, car le compostage se fait en milieu chaud (50-65°C) (Golueke, 1982). Les boues compostées ont moins d'azote que les boues biologiques (EPA, 1979), mais conviennent bien sur les sites perturbés comme les rejets miniers en augmentant leur contenu en matière organique (Hecht et al., 1975) et en minimisant les risques de lessivage des nitrates (Crites, 1984). Pommel (1982) rapporte que le phosphore des boues compostées est rapidement et presque totalement assimilable.

Traitements physico-chimiques

Des précipitants sont employés dans ces types de traitements, ce qui augmente les quantités de boues produites (Couillard, 1985b; EPA, 1979; Schmidtke, 1978). Si le précipitant est la chaux, il y aura plus de Ca et de Mg. De même, l'emploi de chlorure ferrique (FeCl_2) peut entraîner une toxicité par le chlore (Le Tacon et al., 1979). En règle générale, les boues physico-chimiques sont pauvres en azote (Pommel, 1979b); leur valeur fertilisante est donc discutable.

La bonne pratique

La gestion des boues se fera avec le matériel qui sera à notre disposition. Chaque cas est ponctuel et devra être examiné individuel-

lement. Si elles ne sont pas contaminées ou toxiques, toutes les boues stabilisées pourraient être valorisées.

2.2.5 COLMATAGE DU SOL

Le colmatage du sol pourrait entraîner de sérieux problèmes à l'utilisation des boues comme fertilisant (Couillard, 1985a). Riekerk (1982) rapporte qu'une forêt de pins croissant sur un sol sec pourrait être transformée en marécage suite à une application excessive de boues. Avant de s'en servir, il faut voir si le milieu récepteur est apte pour les recevoir.

Le sol est considéré comme un milieu très efficace pour rénover les eaux usées en enlevant les particules solides (Stednick et Wooldridge, 1979). Les sols les plus susceptibles de colmater sont donc ceux dont le contenu en argile est important. Ainsi, les fines particules solides contenues dans les boues vont se loger dans les pores du sol en surface, d'où une réduction de l'infiltration de l'eau et des difficultés pour la diffusion de l'oxygène (Riekerk, 1982).

Les solides dans les boues sont retenus à la surface du sol lors de l'application (Stednick et Wooldridge, 1979), produisant une croûte qui durcira lors du séchage. Ce problème peut être éliminé si les boues sont enfouies (Fiskell et al., 1984), si elles sont appliquées dans un état assez liquide, si les applications ne se font pas tous les ans (Pommel, 1979b) ou si les doses ne sont pas trop élevées. La pluie ou les arrosages à l'eau

(Stednick et Wooldridge, 1979) aident aussi à réduire le colmatage. Les boues étant moins concentrées, on peut supposer que les fines particules sont entraînées plus loin dans le sol, réduisant et même empêchant le colmatage indésiré.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les effets les plus bénéfiques des boues seront atteints avec les sols les plus pauvres, soit les sols sableux et les sables. Le colmatage pourrait ainsi être évité, car les pores de ces sols sont plus gros. On peut également supposer que les micro-organismes du sol, la pluie, le gel et d'autres facteurs parviendraient à éliminer cette croûte. Cet aspect sera revu au chapitre V (partie expérimentale).

2.3 TOXICITÉ POTENTIELLE

Malgré que les boues résiduelles puissent avantageusement être utilisées comme fertilisant forestier, elles ne sont pas exemptes de contaminants. Ainsi, on s'est interrogé sur les effets négatifs de la présence dans les boues des métaux lourds, des composés organiques synthétiques et des pathogènes, car les substances toxiques peuvent avoir des effets tragiques sur les populations exposées (Benjamin et al., 1982).

2.3.1 MÉTAUX LOURDS

La présence des métaux lourds dans les boues est inquiétante et de nombreux chercheurs se sont penchés sur la question. Parmi les métaux

lourds, certains sont des micro-éléments essentiels à la croissance des plantes et leur présence dans les boues est bénéfique (Schneider et al., 1981; EPA, 1977). Ce sont le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le bore (B), le fer (Fe), le molybdène (Mo) et le manganèse (Mn) (Weier et al., 1974). Cependant, ils ne doivent pas dépasser certaines concentrations, car alors ils deviennent toxiques (St-Yves, 1984) et risquent de diminuer les rendements (Atalay et Blanchar, 1984; Sommers, 1977) en inhibant la croissance des arbres (McIntosh et al., 1984). Cette inhibition peut se produire si la concentration d'un métal empêche la plante de puiser un autre élément essentiel dans le milieu. Par exemple, le zinc (Zn), en trop grande quantité, empêche la plante de retirer le phosphore (P) du sol. Le cadmium (Cd), le fer (Fe) et le nickel (Ni) auraient les mêmes effets (Pommel, 1979a).

D'autres métaux lourds se retrouvent dans les boues, mais ils sont tout à fait inutiles dans le métabolisme des plantes, par exemple le plomb (Pb), le nickel (Ni), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le chrome (Cr). D'autre part, ce sont justement ces métaux qui commandent la prudence pour la valorisation des boues.

Le fait le plus inquiétant est le passage des métaux lourds dans la chaîne alimentaire. Du point de vue agricole, c'est très important car on consomme directement les plantes qui auraient été fertilisées avec les boues résiduelles ou on les consomme indirectement via les animaux qui ont pâturé sur les champs fertilisés.

L'utilisation des boues issues des usines de traitement des eaux usées en sylviculture a donc un avantage indéniable sur l'agriculture parce que les forêts ne font pas directement partie de la chaîne alimentaire humaine (McIntosh et al., 1984; EPA, 1983; Fiskell et al., 1982; Riekerk, 1982; Le Tacon et al., 1979; Pommel, 1979b; Sidle et Kardos, 1977). On peut toutefois s'inquiéter des produits de la chasse qui pourraient être contaminés par des métaux toxiques. Anderson (1983) rapporte que des chevreuils (Odocoileus hemionus columbianus) de l'état de Washington ayant brouté du fourrage qui avait été fertilisé avec des boues contenant du zinc (Zn) et du cadmium (Cd), n'ont pas montré plus d'accumulation de ces métaux dans le poil, le foie ou les reins que ceux (chevreuils-témoins) ayant brouté sur les parcelles non-fertilisées.

Du côté agricole cependant, Brockway (1983) rapporte que du bétail ayant pâturé directement sur des sols fertilisés avec de la boue contenant du cadmium (Cd) n'ont pas montré de signe de maladie ou d'infertilité, même si leurs foies et reins ont accumulé plus de cadmium (Cd) que ces organes chez les animaux-témoins.

La toxicité des métaux lourds dépend de leur quantité, mais surtout de leur spéciation (Chang et al., 1984b; Schalscha et al., 1982). La forme ionique libre est reconnue comme la plus dangereuse (Lester et al., 1983; Adams et Sanders, 1984) car, étant soluble, c'est elle qui est directement assimilée par les plantes. Heureusement, dans les boues municipales, les métaux lourds se présentent très peu sous cette forme.

Les métaux lourds des boues sont moins disponibles aux plantes que ceux ajoutés aux sols sous forme de sels lors d'expériences de contamination (Chang et al., 1984b). Dans les boues résiduares, on rencontre les métaux liés à la matière organique (Dissanayake, 1983; Riffaldi et al., 1982; Alexander, 1967) ou sous forme de précipités inorganiques tels les carbonates et les sulfures (Chang et al., 1984b; Lake et al., 1984; Lester et al., 1983; Wong et Henry, 1983). Singh et Narwal (1984) rapportent que 90% à 99% de tous les métaux seraient liés à la matière organique ou se retrouveraient sous forme de sulfures. Les sulfures sont formés dans les conditions réductrices lors de la digestion (sauf pour le chrome (Cr)) et sont très insolubles (Lester et al., 1983).

Dans les sols, les métaux sont adsorbés sur la matière organique (exemple, le Cu (Adams et Sanders, 1984)), sur les oxy-hydroxydes de fer et de manganèse (exemple, le Cu et le Ni (Brown et al., 1983)) et sur la matière colloïdale, les sesquioxydes et les acides humiques (exemple, le Cd (Brown et al., 1983)). Ils ne sont pas drainés vers la nappe, mais s'accumulent dans les 15 premiers centimètres de sol (Chang et al., 1984a) sans augmentation significative au-delà de 30 centimètres. (Higgins, 1984b; Chang et al., 1983). Ils peuvent aussi rester adsorbés à la matière organique de la boue elle-même (Lester et al., 1983; Adams et Sanders, 1984). Riekerk (1978) rapporte que l'application de 618 000 kg de boue à l'hectare (base sèche) n'a pas amené de contamination des eaux de percolation en métaux lourds, à 150 cm de la surface.

Ces expériences révèlent que les métaux sont peu mobiles; il ne semble donc pas y avoir de danger pour la nappe. Cependant, la végétation pourrait en capter une partie. Quelques chercheurs se sont arrêtés sur ce sujet et, en effet, les plantes captent des métaux toxiques. Chang et al. (1984a) rapportent que les cultures ne captent pas plus de 1% des métaux lourds appliqués avec les boues d'épuration, alors que Hemkes et al. (1983) rapportent des résultats similaires avec le cadmium (Cd). Cela reste toutefois une absorption totale négligeable par rapport aux faibles concentrations de métaux contenus dans les boues résiduelles épandues.

Le puisage des éléments toxiques par les plantes permet un certain "nettoyage du sol contaminé", si on peut s'exprimer ainsi. Les produits forestiers n'entrant pas dans la chaîne trophique humaine, le seul point d'inquiétude serait si les arbres voient leur croissance ralentie ou inhibée par les métaux. À ce chapitre, le cadmium est considéré comme l'élément le plus dangereux pour la santé des animaux et celle des plantes (Higgins, 1984b; Riffaldi et al., 1983; Tarquin, 1981). Fiskell et al. (1982) rapportent que des semis de pins "loblolly" (Pinus taeda L.) fertilisés avec des boues dans lesquelles on a rajouté un surplus de Cd n'ont pas montré de réduction de croissance. Brockway (1983) rapporte des résultats semblables. Fiskell et al. (1984) rapportent que des plantes fertilisées avec des boues résiduelles industrielles riches en Cr, Ni et Cd n'ont pas montré d'augmentation significative de ces métaux dans les feuilles un an après avoir reçu la boue.

EPA (1983) recommande de garder le pH au-dessus de 6,5 afin de minimiser les risques que les métaux soient solubilisés et captés par les

plantes agricoles. Par contre, en forêt, il suggère de ne pas tenir compte du pH, sauf si la nappe est très haute, puisque les métaux n'ont pas montré de signes de phytotoxicité pour la plupart des plantes forestières. Cette suggestion vaut aussi pour le cadmium. Higgins (1984b) rapporte qu'une application de boue de 44,8 t/ha (44 800 kg/ha) (base sèche) contenant des métaux lourds n'a pas amené de contamination des eaux souterraines au-delà de ce qui est normalement lessivé par le sol. Il y a donc peu ou pas de migration des métaux.

À la lumière de ces expériences et recommandations, il semble que les métaux lourds ne constituent pas un grand danger pour la valorisation sylvicole des boues, mais, par mesure de prudence, des normes ont été établies. Ainsi, les teneurs en métaux lourds des boues ne devraient pas excéder certaines valeurs afin que ces boues puissent être valorisées et, de plus, il est recommandé de ne pas dépasser une limite maximale d'application de métaux. Ces travaux ont été réalisés avec des sols agricoles. Une approche conservatrice suggère de prendre les mêmes critères en sylviculture qu'en agriculture (EPA, 1983).

Les tableaux 2.8 et 2.9 donnent les concentrations maximales des métaux des boues qui pourraient être épandues sur les sols et les quantités maximales à ne pas dépasser (Webber, 1984). Ces valeurs varient d'un pays à l'autre. Il est suggéré de cesser les épandages une fois que ces teneurs maximales en métaux lourds sont atteintes. Malheureusement, avec cette approche, ce sol sera considéré comme pollué par les métaux et il ne sera plus possible de le fertiliser davantage avec des boues, si celles-ci contiennent encore des métaux. Notre objectif de recyclage n'est plus

Tableau 2.8: Concentrations maximales permisesibles ($\mu\text{g/g}$, masse sèche) de métaux lourds dans les boues considérées comme acceptables pour utilisation sur des sols agricoles (Webber, 1984)

Pays	Cd	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Mn	Mo	Co	As	Se	Hg
Belgique	10	2 000	500	100	300	500	500	--	20	10	25	10
Canada	20	1 850	-----	180	500	-----	-----	20	150	75	14	5
Danemark	8	-----	-----	30	400	-----	-----	--	---	--	---	6
Finlande	30	5 000	3 000	500	1 200	1 000	3 000	--	100	--	---	25
France	20	3 000	1 000	200	800	1 000	-----	--	20	--	100	10
Allemagne	20	3 000	1 200	200	1 200	1 200	-----	--	---	--	---	25
Pays-Bas	10	2 000	600	100	500	500	-----	--	---	10	---	10
Norvège	10	3 000	1 500	100	300	200	500	--	20	--	---	7
Suède	15	10 000	3 000	500	300	1 000	-----	--	50	--	---	8
Suisse	30	1 000	1 000	200	1 000	1 000	-----	20	100	--	---	10
Gamme	8- 30	1 000- 10 000	500- 3 000	30- 500	300- 1 200	200- 1 200	500- 3 000	-- --	20- 150	10- 75	14- 100	5- 25
Médiane	7	3 000	1 100	200	500	1 000	-----	20	50	--	---	10

Tableau 2.9: Charges maximales permmissibles (kg/ha) de métaux lourds dans les terres agricoles (Webber 1984).

Endroit	Cd	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Mn	Mo	Co	As	Se	Hg	B
Alberta	0,8	150	100-200	12-25	50-100	50-100	--	--	-----	----	-----	0,2-0,5	5-10
Colombie Britannique	4,0	200	-----	36	100	-----	--	4	30	15	2,8	1,0	----
Ontario	1,6	300	150	32	90	210	--	4	30	14	2,4	0,8	----
Canada	4,0	370	-----	36	100	-----	--	4	30	15	2,8	1,0	----
Danemark	0,2	---	-----	-----	-----	-----	--	--	-----	-----	-----	-----	-----
Finlande	0,1	---	-----	-----	-----	-----	--	--	-----	-----	-----	-----	-----
Allemagne	8,4	750	210	60	210	210	--	--	-----	-----	-----	5,7	-----
Pays-Bas	2,0	400	120	20	100	100	--	--	-----	2	-----	2,0	-----
Norvège	0,2	60	30	2	6	4	10	--	0,4	---	5	0,14	----
Suède ¹	0,075	50	15	2,5	1,5	5	--	--	0,25	---	-----	0,04	----
Royaume-Uni ²	5	560	280	70	1 000	1 000	--	4	-----	10	-----	2,0	4,5
Etats-Unis	5-20	250-1 000	125-500	50-200	500-2 000	-----	--	--	-----	-----	-----	-----	-----
Gamme ³	0,1-20	60-1 000	30-500	2-200	6-2 000	4-1 000	--	--	0,4-30	2-15	2,8-5	0,14-5,7	-----
Médiane	3	500	210	60	210	210	--	4	-----	10	-----	2	-----

1: Charge en 5 ans, peut être répétée.

2: La charge en bore (B) peut être de 4,5 kg/ha la première année et de 3,5 kg/ha/année les années suivantes.

3: Les valeurs pour la Suède ne sont pas comprise dans les gammes de variation.

atteint car il faut cesser les épandages à cet endroit, donc le produit ne peut plus y être écoulé.

Afin de contrer ces inconvénients et en venir à un recyclage complet, les métaux lourds doivent être contrôlés à la source, ce qui rendra les boues "propres" (EPA, 1983; Benjamin et al., 1982; Pommel, 1979b). À ce sujet, Vimmerstedt et Glover (1984) rapportent qu'un traitement à la source d'une industrie rejetant du fibre de verre contenant du bore (B) a été réalisé rendant la boue moins toxique. Ces opérations sont donc possibles. D'autres travaux de recherches utilisant des bactéries (Thiobacillus ferrooxidans) pour purifier les boues sont également en cours (INRS-Eau, 1985; Wong et Henry, 1984; 1983).

2.3.2 COMPOSÉS SYNTHÉTIQUES TOXIQUES

Les boues biologiques municipales ne sont pas exemptes de contaminants organiques. Celles-ci contiennent des pesticides, des herbicides, des biphényles polychlorés (BPC), etc. Puisque ces composés sont peu solubles dans l'eau, ils adhèrent aux solides en suspension (Kalinske, 1981; EPA, 1979). C'est pourquoi les composés chimiques toxiques présents dans les eaux usées se concentrent dans les boues dans des proportions allant de 1 000 à 10 000 fois les concentrations initiales des eaux usées. Malgré cela, les concentrations des produits synthétiques toxiques dans les boues restent faibles (Webber, 1984). Dans une étude menée au Missouri, Clevenger et al. (1983) rapportent qu'aucune boue d'épuration, sur les 74 qui ont été étudiées, n'a montré de concentration significative en toxiques organiques.

Naylor et Loehr (1982a; 1982b) ont étudié les composés organiques toxiques présents dans les boues municipales. Leur étude est basée sur la dose létale cinquante (DL_{50}) pour certains animaux, y compris l'homme. Une partie de leurs résultats est reproduite aux tableaux 2.10, 2.11, 2.12a et 2.12b.

Le tableau 2.10 présente les caractéristiques de quelques produits dangereux rencontrés dans les boues résiduairees qui pourraient être épandus sur les sols. L'hexachlorobutadiène se retrouve dans les composés classés les plus toxiques (échelle de toxicité = 4). Celui-ci, en plus du bis-2-éthylhexyl phthalate et du 1,1,2-trichloroéthane, qui sont classés peu et moyennement toxiques respectivement, sont analysés plus en détail aux tableaux 2.11, 2.12a et 2.12b. On voit que les concentrations dans les boues ne sont pas élevées et que les taux d'application prévus sur les sols se traduisent, eux-aussi, par des valeurs basses. Ces taux d'application sont basés sur des quantités qui respectent les normes pour l'accumulation du cadmium (Cd).

De plus, les auteurs ont vérifié si les faibles concentrations de composés organiques toxiques pourraient avoir des effets négatifs sur les animaux. Leurs résultats sont rapportés au tableau 2.11 où on constate que dans des conditions exceptionnelles où des enfants de 20 kg mangeraient directement 15 grammes par jour de boue hautement contaminée, il leur faudrait 41 ans avant d'atteindre la DL_{50} pour l'hexachlorobutadiène. Cette durée monte à 600 ans pour le 1,1,2-trichloroéthane. D'autre part, si la boue a été mélangée avec le sol, ces valeurs peuvent être haussées jusqu'à 10 000 et 100 000 ans respectivement. Les auteurs présentent des résultats

Tableau 2.10: Caractéristiques de quelques polluants dangereux appliqués sur des sols lors d'épandage de boues municipales¹

Nom du produit chimique	DL ₅₀ orale ² (mg/kg)	Échelle de toxicité ³	Concentrations dans les boues (base sèche) (mg/kg)		Taux d'application prévu (base sèche) (kg/ha)		Concentration potentielle dans dans les 15 premiers cm de sol mg/kg	
			médiane	étendue	médiane	étendue	médiane	étendue
bis-2-éthylhexyl phthalate*	31 000	1	109	4,1-273	1,2	0,053-2,1	0,6	0,027-1,0
chloroéthane volatil	--	--	19	14,5-24	0,17	0,16-0,17	0,085	0,08-0,085
1,2-trans-dichloroéthylène volatil	--	--	21	0,72-865	0,24	0,009-8,4	0,12	0,0045-4,2
toluène	5 000	2	15	1,4-705	0,16	0,018-1,3	0,08	0,009-0,65
butylbenzyl phthalate	3 160	3	15	0,52-210	0,11	0,0063-1,4	0,055	0,0032-0,7
2-chloronaphthalène	2 078	3	5,7	4,7	0,03	0,03	0,015	0,015
hexachlorobutadiène*	90	4	4,3	0,52-8	0,03	0,0063-0,054	0,015	0,0032-0,027
phénanthrène	700	3	7,4	0,89-44	0,05	0,009-0,53	0,025	0,0045-0,27
tétrachlorure de carbone	2 800	3	4,2	4,2	0,041	0,041	0,020	0,020
chlorure de vinyle	500	3	5,7	3-110	0,064	0,02-1,3	0,032	0,01-0,65
dibenzo (a,h) anthracène	--	--	13	13	0,16	0,16	0,08	0,08
1,1,2-trichloroéthane*	1 140	3	3,5	0,036-6,9	0,034	0,0002-0,068	0,017	0,0001-0,034
anthracène	--	--	7,6	0,89-44	0,050	0,009-0,53	0,025	0,0045-0,27
naphthalène	1 780	3	7,5	9 -70	0,070	0,01-0,59	0,035	0,005-0,295
éthylbenzène	3 500	3	5,5	1,0-51	0,063	0,013-0,38	0,032	0,0065-0,19
di-n-butyl phthalate	1 200	3	3,5	0,32-17	0,047	0,003-0,21	0,024	0,0015-0,10
phénol	414	4	4,2	9-113	0,032	0,0011-1,5	0,016	0,0055-0,75
chlorure de méthylène	167	4	2,5	0,06-30	0,022	0,0004-0,97	0,011	0,0002-0,48
pyrène	--	--	2,5	0,33-18	0,024	0,004-0,22	0,012	0,002-0,11
chrysène	--	--	2,0	0,25-13	0,022	0,0024-0,16	0,011	0,0012-0,08
fluoranthène	2 000	3	1,8	035-7,1	0,016	0,0024-0,05	0,0075	0,002-0,025
benzène	1 400	3	0,32	0,053-11,3	0,0027	0,0007-0,13	0,0014	0,0004-0,065
tétrachloroéthylène	8 100	2	0,38	0,024-42	0,0035	0,0002-0,54	0,0018	0,0001-0,27
trichloroéthylène	4 920	3	0,98	0,048-44	0,0125	0,00036-0,52	0,006	0,00018-0,26

1: adapté de Naylor et Loehr, 1982a

2: DL₅₀ = (dose létale cinquante) = Quantité de produit nécessaire pour tuer 50% d'une population-cible après 24 heures. La DL₅₀ s'exprime en mg de produit/kg de poids chez la cible

3: Échelle relative allant de 1 (pratiquement non-toxique) à 6 (supertoxique)

* Renvoi aux tableaux 2.11, 2.12a et 2.12b

semblables pour des bovins. Les tableaux 2.12a et 2.12b présentent des résultats comparables. Il faudrait 7,7 ans pour atteindre la DL₅₀ pour l'hexachlorobutadiène chez le rat et cette période est de 113 ans pour le 1,1,2-trichloroéthane. Les bovins présentent des durées comparables avec 6,2 et 91 ans respectivement pour les mêmes produits.

Dans une saine gestion de la valorisation sylvicole (ou agricole) des boues, la consommation directe n'est pas envisagée et les périodes citées concernant les DL₅₀ pourraient être considérablement rallongées. Les animaux risqueraient de mourir naturellement plutôt que d'être tués par les produits chimiques. L'empoisonnement des animaux par ces produits ne semble donc pas poser de problème et il en est de même pour l'absorption par les plantes. Moza et al. (1979) ont fertilisé des épinettes de Norvège (Picea abies (L.) Karst.) de 3 ans avec des boues qui ont été artificiellement contaminées avec du BPC radioactif. Après 4 ans de croissance, la radioactivité dans les arbres n'était que de 0,8% de ce qui avait été appliqué au sol, se répartissant en 0,5% dans les aiguilles et 0,3% dans la tige. De plus, le lessivage était inférieur à 0,1% les 2 premières années et nul après ce temps.

Demirjian et al. (1984) ont enfoui 40 333 kg/ha de boue industrielle (base sèche) contenant plusieurs composés organiques dans 15 centimètres de sol. (Pour la plupart, ce sont les mêmes composés que ceux rapportés par Naylor et Loehr (1982a)). Cependant, la concentration de ces polluants dans la boue était faible parce qu'ils étaient initialement peu présents dans les eaux usées ou ont été décomposés dans la lagune d'aération. Une fois mélangés au sol et après une saison de croissance, ils n'étaient plus

Tableau 2.11: Temps requis pour atteindre une DL₅₀ de quelques produits dangereux pour un sol fertilisé avec une boue contaminée et cette boue seule

Nom du produit chimique	Animal-cible ²	DL ₅₀ (g) ¹	Consommation de sol (g/j)	Temps pour consommer une DL ₅₀ de produit chimique (années)	
				Sol avec boue	Boue seule
Hexachlorobutadiène DL ₅₀ = 90 mg/kg Concentration maximale du produit chimique - dans le sol=0,027 mg/kg ³ - dans la boue=8 mg/kg ³	Enfant	1,8	15	10 000	41
	Bovin	45	1 500	3 000	10
Bis-2-éthylhexyl phthalate DL ₅₀ = 31 000 mg/kg Concentration maximale du produit chimique - dans le sol=1,0 mg/kg ³ - dans la boue=273 mg/kg ³	Enfant	620	15	100 000	415
	Bovin	15 500	1 500	30 000	104
1,1,2-trichloroéthane DL ₅₀ = 1 140 mg/kg Concentration maximale du produit chimique - dans le sol=0,034 mg/kg ³ - dans la boue=6,9 mg/kg ³	Enfant	22,8	15	100 000	604
	Bovin	570	1 500	30 000	151

1: Adapté de Naylor et Loehr, 1982b

2: Considérant un enfant de 20 kg et un bovin de 500 kg

3: Les données proviennent du tableau 2.10

Tableau 2.12a: Temps requis par les rats² pour atteindre une DL₅₀ pour quelques polluants dangereux assumant que la boue contaminée représente 10% de la diète de l'animal¹

Nom du produit chimique	Concentration maximale dans les boues (mg/kg)	DL ₅₀ (mg/kg) ⁴	DL ₅₀ (mg)	Quantité de boue contenant la DL ₅₀ du produit chimique (kg)	Temps nécessaire pour consommer cette DL ₅₀ de produit chimique (années) ⁵
Hexachlorobuta-diène	8	90	45	5,6	7,7
Bis-2-éthylhexyl phthalate	273	31 000	15 500	57	78
1,1,2-trichloroéthane	6,9	1 140	570	83	113

Tableau 2.12b: Temps requis par les bovins³ pour atteindre une DL₅₀ pour quelques polluants dangereux assumant que la boue contaminée représente 10% de la diète de l'animal¹

Nom du produit chimique	Concentration maximale dans les boues (mg/kg)	DL ₅₀ (mg/kg) ⁴	DL ₅₀ (mg)	Quantité de boue contenant la DL ₅₀ du produit chimique (kg)	Temps nécessaire pour consommer cette DL ₅₀ de produit chimique (années) ⁵
Hexachlorobuta-diène	8	90	4,5 x 10 ⁴	5 600	6,2
Bis-2-éthylhexyl phthalate	273	31 000	1,55 x 10 ⁷	57 000	62
1, 1, 2-trichloroéthane	6,9	1 140	5,7 x 10 ²	83 000	91

1: adapté de Naylor et Loehr. 1982a

2: Le poids des rats est de 500 g.

3: Le poids des bovins est de 500 kg.

4: Données provenant du tableau 2.10.

5: Basé sur une consommation de 20 g/j pour les rats et 25 kg/j pour les bovins, la boue représentant 10% de la diète.

détectables. De plus, le percolat recueilli sous les parcelles fertilisées était exempt de traces de contaminant organique.

L'utilisation des boues contenant de faibles concentrations de produits synthétiques toxiques ne semble pas poser de problèmes en fertilisation, mais il faut demeurer prudent en les utilisant. Comme les données sont peu nombreuses à ce sujet, les études se poursuivent sur l'avenir de ces produits dans le sol (Webber, 1984).

2.3.3 ORGANISMES PATHOGÈNES

Les boues biologiques contiennent beaucoup de bactéries (mortes et vivantes) qui ont dégradé la matière organique initialement présente dans les eaux usées (Hartenstein, 1981). Cependant, ce ne sont pas ces organismes qui nous inquiètent.

Certains organismes pathogènes sont présents dans les eaux usées et se retrouveront éventuellement dans les boues. Ce sont des virus, des bactéries, des vers et leurs oeufs (EPA, 1977). Ces organismes proviennent principalement des déjections humaines et d'autres animaux à sang chaud (Martin, 1982). Il faut donc évaluer si ces organismes peuvent nuire à la santé de l'homme ou à celle des animaux qui pourraient être en contact avec les boues.

Les boues primaires et les boues non digérées sont très contaminées en organismes pathogènes, mais leur nombre est grandement diminué avec la stabilisation ou la digestion (St-Yves, 1985; Webber, 1984; Golueke, 1982;

Bledsoe et Zasoski, 1981). Une autre façon efficace de réduire le nombre de pathogènes est le compostage et le séchage des boues (Temple et al., 1982). Yeager et O'Brien (1983) rapportent que les radiations gamma détruisent les organismes pathogènes.

Hecht et al. (1975) rapportent qu'aucun cas de maladie n'a été décelé suite à l'utilisation des boues d'égout comme amendement. Cette affirmation est appuyée par Webber (1984) qui rapporte qu'il y a peu de risques à utiliser les boues si celles-ci sont traitées. De plus, elles devraient être ingérées en quantités suffisantes pour être dangereuses, vu le fort pourcentage de destruction des organismes pathogènes lors de la stabilisation.

Les organismes pathogènes restent dans les horizons de surface (Lane et al., 1980). Urie (1979) rapporte que les horizons "B" sont de bons filtres biologiques. Les eaux souterraines sont donc protégées d'une éventuelle contamination (Higgins, 1984a; 1984b). Sagik et al. (1979) rapportent que 92% à 97% des bactéries sont retenues dans le premier centimètre de sol, tandis que Lane et al. (1980) rapportent qu'à 45 centimètres de profondeur il n'y avait pas de coliformes fécaux suite à l'application d'eaux usées en surface. Cette affirmation est appuyée par Riekerk (1978) qui rapporte ne pas avoir trouvé de bactéries dans les eaux de percolation, à 150 cm de la surface, après avoir appliqué de fortes charges de boue.

Ces données sont rassurantes car il ne semble pas y avoir de problèmes reliés à l'utilisation des boues. Par contre, il est suggéré d'attendre

2 mois après fertilisation avec des boues avant de faire paître le bétail (Webber, 1984) et de tenir le public éloigné des forêts fertilisées avec des boues pendant 12 à 18 mois (EPA, 1983) pour minimiser les risques d'ingestion d'organismes pathogènes.

Ces recommandations et les faibles quantités d'organismes pathogènes présents dans les boues indiquent qu'il n'y a pas de risque pour la santé à utiliser les boues biologiques de stations d'épuration des eaux comme fertilisant. Finalement, EPA (1983) recommande de ne pas faire d'applications de boues dans les sites fréquentés par la population, de ne pas en faire près des eaux de surface et des prises d'eau et d'éviter les endroits où la nappe est près de la surface.

CHAPITRE III

JUSTIFICATION DE FERTILISER LES FORÊTS

3. JUSTIFICATION DE FERTILISER LES FORÊTS

À l'opposé des cultures agronomiques, la fertilisation des forêts naturelles ou artificielles n'est pas essentielle en soi pour leur croissance. Généralement les surfaces boisées ne sont pas fertilisées (Crites, 1984). Cependant, la production de matière ligneuse est augmentée quand cette activité est pratiquée (Cole, 1981; Morrison, 1974). Les fertilisants accélèrent la croissance surtout en diamètre (Brockway et al., 1979; Möller, 1974), chez la plupart des espèces forestières (Vézina et Roberge, 1981; Gagnon, 1974). Ainsi, la fertilisation pourrait être un outil adéquat lorsqu'on désire tirer plus de ressources du milieu sans devoir agrandir le territoire d'exploitation, ou encore pour la production de biomasse en courtes rotations (Jones et Grant, 1983), ce qui exige des fertilisants (Miller, 1983; Blake et Raitanen, 1981). De plus, l'intensité croissante des récoltes, en arbres entiers par exemple, signifie nécessairement un plus grand enlèvement des éléments nutritifs du site (Hornbeck et Kropelin, 1982; Patrick et Smith, 1975).

Les forêts croissant sur les sols les plus pauvres sont les plus susceptibles de réagir positivement à la fertilisation (Roberge et al., 1980). Le facteur important à considérer est l'écart qui existe entre le capital en éléments nutritifs présents et assimilables dans le sol et ce qui est ajouté artificiellement en fertilisants chimiques ou organiques.

3.1 AUGMENTATION DES RENDEMENTS AVEC DES FERTILISANTS CHIMIQUES

De nombreuses expériences de fertilisation forestière ont été tentées de par le monde, incluant le Québec, et les résultats sont positifs: on obtient une production (mètres cubes à l'hectare) plus élevée sur les parcelles fertilisées que sur celles qui ne le sont pas. Sur le territoire du Québec, l'azote a été identifié comme l'élément nutritif le plus souvent déficient (Vézina et Roberge, 1981). Donc, c'est surtout avec des fertilisants riches en azote que les expériences ont été menées: par exemple de l'urée (Groupe de recherches interdisciplinaires en fertilisation des forêts, 1977) ou du nitrate d'ammonium.

Gagnon (1973) rapporte que des sapinières ont été fertilisées à l'urée à des doses de 112, 224 et 336 kg N/ha et que la dose de 224 kg N/ha donne les meilleurs résultats dans ces peuplements. À cette dose, il observe des augmentations de l'accroissement annuel moyen en diamètre allant jusqu'à 3,7% après 4 ans; cette augmentation pourrait atteindre 10% après 10 ans si le rythme se maintenait. Cette augmentation de diamètre de 10% représente une augmentation de volume de bois de près de 30%. Il rapporte aussi que l'effet de l'urée se répercute sur plusieurs années et que l'optimum n'a pas nécessairement été atteint.

Roberge et al. (1980) donnent suite à cette étude et rapportent des résultats après 10 ans. Les parcelles fertilisées avec 112 kg N/ha ont donné un volume marchand supérieur de 21 m³/ha par rapport aux parcelles témoins, tandis que pour les doses de 224 kg N/ha et 336 kg N/ha, les volumes marchands sont respectivement supérieurs de 19 et 26 m³/ha. Le gain

de croissance attribuable à la fertilisation azotée représente 25% pour le traitement de 112 kg N/ha, 23% pour celui de 224 kg N/ha et 26% pour celui de 336 kg N/ha. Ce dernier pourcentage de croissance se rapproche assez bien de la valeur de 30% prédite par Gagnon (1973). Selon ces auteurs, la quantité optimale d'azote à ajouter à ces sapinières pour avoir une augmentation maximale en volume marchand serait inférieure à 224 kg N/ha.

Veilleux et Sheedy (1978) rapportent des résultats positifs sur la fertilisation de sapinières en Gaspésie. Ainsi, avec une dose de 112 kg N/ha sous forme d'urée ils obtiennent des augmentations moyennes de surface terrière de 0,8 m²/ha et de 5,8 m³/ha pour le volume total après 5 ans. Ces valeurs passent à 1,2 m²/ha et 8,7 m³/ha respectivement quand la dose d'azote est portée à 224 kg N/ha incluant un ajout de 112 kg K/ha sous forme de KCl. Des valeurs intermédiaires de 1,0 m²/ha et 7,4 m³/ha sont rapportées avec des doses de 224 kg N/ha sous forme d'urée. Sheedy (1982) rapporte des résultats semblables pour des stations de pins gris (Pinus divaricata (Ait.) Dumont) fertilisées avec 150 kg N/ha sous forme d'urée. Après 5 ans, la hauteur des arbres fertilisés était supérieure de 21% sur celle des témoins et le diamètre moyen était supérieur de 30%.

Ces quelques expériences permettent de constater l'effet positif des fertilisants chimiques sur les augmentations en hauteur et diamètre qui se traduisent par des augmentations en volume de matière ligneuse. La fertilisation est donc un traitement sylvicole qui permet de récupérer plus de bois par hectare par rapport à une forêt qui se développe naturellement.

3.2 AUGMENTATION DES RENDEMENTS AVEC DES BOUES

Il ne se fait rien à grande échelle aux États-Unis (EPA, 1983) et relativement peu de travaux de recherche ont été faits sur l'application de boues résiduelles dans les forêts (Crites, 1984). Cependant, les quelques expériences dont les résultats sont disponibles sont encourageantes.

Au Québec, Gagnon (1972; 1974) a appliqué 560 kg/ha de boue digérée anaérobiquement (base sèche) dans une plantation d'épinette blanche (Picea glauca (Moench) Voss.) de 10 ans établie sur un sol sablonneux de faible fertilité. Le contenu en azote de cette boue était d'environ 1,5%. La croissance en hauteur des arbres fertilisés a dépassé celle des témoins de 7% après 1 an, de 13% après 2 ans, de 20% après 3 ans, de 30% après 4 ans et de 38% après 6 ans.

En Caroline du Sud, Berry et Marx (1980) ont épandu des boues digérées anaérobiquement dans une ancienne carrière où les horizons de surface avaient été enlevés. La quantité de boue appliquée était de l'ordre de 34 000 kg/ha (base sèche). Son contenu en azote était d'environ 2%, de 1% pour le phosphore et de 0,5% pour le potassium. Des pins "loblolly" (Pinus taeda L. et P. elliotti Engelm.) avaient été plantés sur ce site. Après 3 ans, les arbres fertilisés avaient une hauteur supérieure de 250% sur les arbres-témoins et de 240% pour le diamètre au collet. Pour le volume des semis, les arbres fertilisés étaient 24 fois plus gros que les arbres-témoins.

En Floride, Fiskell et al. (1982) ont fertilisé des pins "loblolly" (Pinus taeda L.) croissant sur des sols sableux acides avec des boues digérées anaérobiquement provenant de Gainesville (Floride) et de Chicago (Illinois). Avec la boue de Chicago, qui contenait 5% d'azote et 2,2% de phosphore, la croissance en hauteur a été supérieure de 192% pour la dose de 4 t/ha (4 000 kg/ha), de 250% pour la dose de 8 t/ha (8 000 kg/ha) et de 186% pour la dose de 16 t/ha (16 000 kg/ha) par rapport aux arbres-témoins après 10 mois de croissance. Pour la boue de Gainesville, qui contenait 2,6% d'azote et 2,1% de phosphore, la croissance en hauteur a été supérieure de 130% pour la dose de 4 t/ha (4 000 kg/ha), de 141% pour la dose de 8 t/ha (8 000 kg/ha) et de 220% pour la dose de 16 t/ha (16 000 kg/ha) après 10 mois de croissance.

Au Michigan, Brockway (1983) a fertilisé une plantation de pins blancs (Pinus strobus L.) avec une boue digérée anaérobiquement. La boue contenait 6% d'azote, 7% de phosphore et 0,15% de potassium. Pour la dose de 4,8 t/ha (4 800 kg/ha), le diamètre à hauteur de poitrine était de 11% supérieur à celui du témoin après 2 mois de croissance et de 20% supérieur après 14 mois. Pour la dose de 19,3 t/ha (19 300 kg/ha), le diamètre était, après 2 mois, supérieur de 39% par rapport à celui du témoin et cette différence est portée à 47% après 14 mois de croissance.

Au Maryland, McIntosh et al. (1984) ont fertilisé des peupliers hybrides (Populus deltoides spp. et P. angulata x P. trichocarpa) avec des boues compostées contenant 1,36% d'azote, 2,6% de phosphore et 0,18% de potassium. Après 3 ans, la hauteur des arbres était supérieure de 207% par rapport aux témoins pour la dose de 300 t/ha (300 000 kg/ha) et de 190% pour la dose de 150 t/ha (150 000 kg/ha).

Le tableau 3.1 donne un résumé de quelques valeurs citées dans ce chapitre. Même dans l'expérience réalisée par Gagnon (1972; 1974), où la quantité de boue appliquée fut modeste, on constate quand même une amélioration non négligeable de la croissance. Cette augmentation est d'autant plus marquée que les quantités de boues (et leur contenu en azote) sont importants.

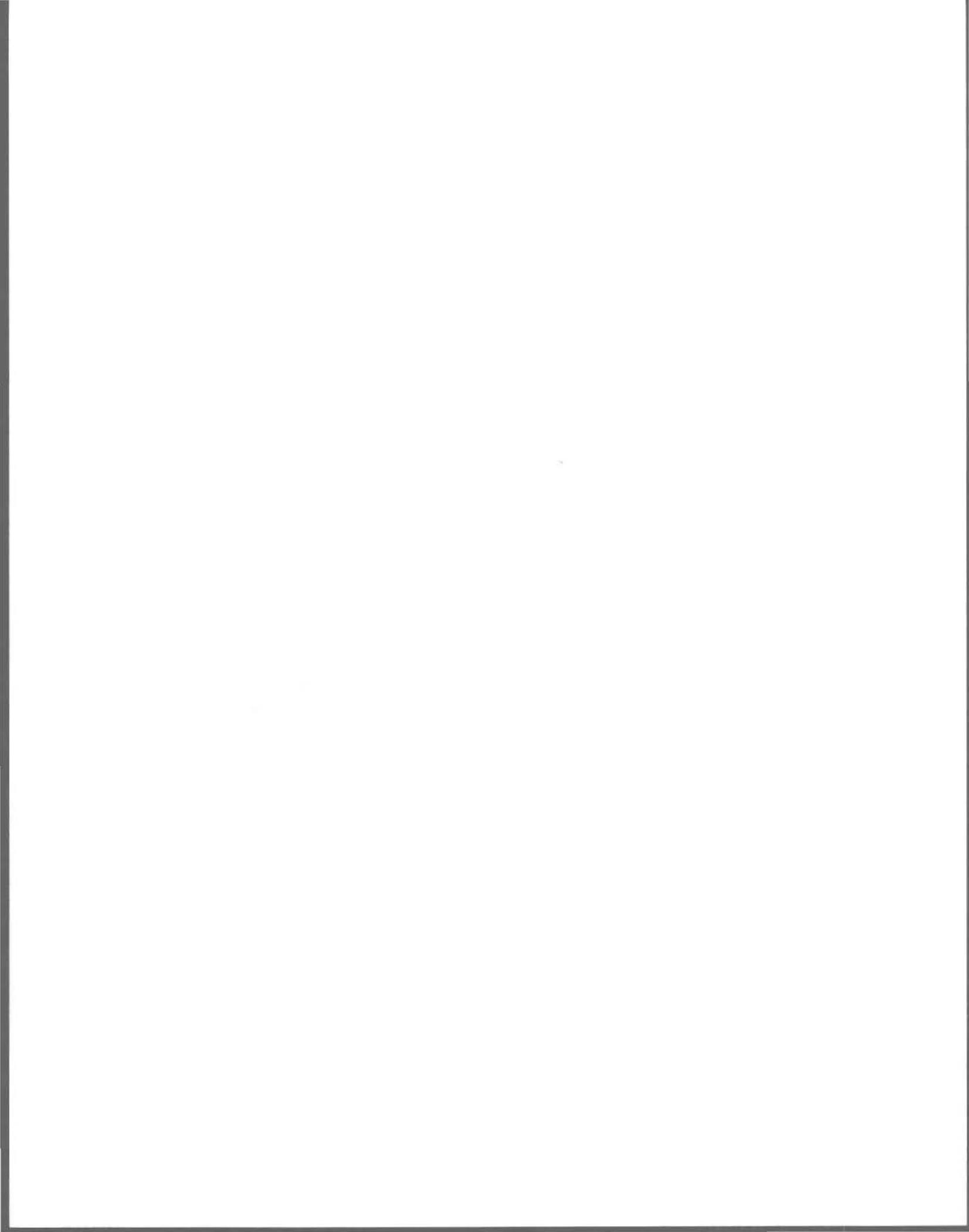
Ces quelques exemples démontrent le pouvoir fertilisant des boues. Tout comme pour les fertilisants chimiques, les augmentations de croissance ne sont pas toujours proportionnelles à la dose appliquée et il faut aussi considérer le type de sol où croissent les arbres. De plus, chaque espèce d'arbre a ses exigences et chacune réagit à sa façon à la fertilisation. Il faut quand même user de prudence en utilisant les boues résiduelles comme fertilisant forestier, car quelques expériences sont rapportées dans la littérature où sont apparus des problèmes de toxicité envers les semis, surtout lorsque les boues sont fraîches (Pommel, 1979b).

Cette toxicité serait due à une trop grande libération de NH_4^+ et de sels dans le sol lors de la minéralisation initiale, ce qui diminuerait le taux de survie des semis (Riekerk, 1982). Selon EPA (1983), le taux de survie serait meilleur pour certaines espèces que pour d'autres: par exemple, pour la sapin de Douglas (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) et l'épinette de Sitka (Picea sitchensis (Bong.) Carr.). Ainsi, pour contourner ce problème, il est suggéré d'attendre 6 mois ou plus après l'application de boues sur un site avant de planter. Quand les plantations sont établies, les jeunes arbres sont plus tolérants aux applications de boues fraîches et peuvent mieux capter les éléments nutritifs, leur système

Tableau 3.1: Résumé de quelques rendements en hauteur et en diamètre pour des arbres fertilisés avec des boues

Espèce	Quantité de boue appliquée (kg/ha)	Pourcentage d'azote	Quantité d'azote appliquée (kg/ha)	Croissance supplémentaire observée		Durée de l'expérience	Références
				Hauteur	Diamètre		
Épinette blanche	560	1,5	8,4	7 20	---	1 an 3 ans	Gagnon (1972; 1974)
Pin loblolly	34 000	2,0	680	250	240	3 ans	Berry et Marx (1980)
Pin loblolly	8 000 4 000	5,0 2,6	400 104	205 130	---	10 mois 10 mois	Fiskell et al., (1982)
Pin blanc	4 800 19 300	6,0 6,0	288 1 158	---	20 47	14 mois 14 mois	Brockway (1983)
Peupliers hybrides	150 000	1,36	2 040	190	---	3 ans	McIntosh et al., (1984)

racinaire étant mieux développé. Globalement, il ressort que les boues peuvent avantageusement être utilisées comme fertilisant forestier.



CHAPITRE IV

RISQUES À L'ENVIRONNEMENT: LES NITRATES

4. RISQUES À L'ENVIRONNEMENT: LES NITRATES

L'application de boues résiduares de stations d'épuration des eaux doit être faite avec précaution. En effet, toute action où on agit sur l'environnement risque d'avoir des effets néfastes. Ainsi, la pollution par les nitrates (NO_3^-) a été identifiée comme l'un des problèmes les plus importants associés à l'utilisation des boues résiduares comme fertilisant (Higgins, 1984b; Breuer et al., 1979). Malgré qu'il soit généralement absent des boues lors de l'épandage, l'ion nitrate se forme à mesure par la nitrification.

La nitrification n'est pas ubiquiste (Federer, 1983). C'est une oxydation biologique de l'ammonium (NH_4^+), cation fortement retenu par la matrice de sol, en nitrate (NO_3^-), anion envers lequel le sol a peu ou pas d'attraction (Breuer et al., 1979), d'où les risques d'entraînement vers la nappe.

Si les boues sont épandues à des intervalles de temps éloignés les uns des autres, les risques de contamination de la nappe sont réduits. On a observé des pointes de nitrates dans les percolats dans l'année même de l'épandage de boues (EPA, 1983; Riekerk, 1981); ces pointes disparaissent par la suite. Archie et Smith (1981) rapportent que plusieurs applications légères de boues pendant plusieurs années risqueront moins de contaminer la nappe qu'une seule application massive.

Les forêts sont reconnues pour produire de l'eau de bonne qualité. Donc, ce n'est pas parce que du percolat contenant du nitrate est observé

que ce composé atteindra nécessairement la nappe. Il pourra éventuellement être dénitrifié ou dilué, ce qui diminue les risques de contamination (Brockway et Urie, 1983). Cette perte d'azote peut aussi être réduite si les sols sur lesquels la boue est appliquée ne sont pas trop grossiers (Brockway, 1983). La dénitrification sera possible en présence de matière organique dans le sol (Brown et al., 1984), qui sert de source de carbone (C) pour les bactéries dénitrifiantes (Breuer et al., 1979).

Il y aurait moins de problèmes de lessivage de NO_3^- lors d'applications de boues au printemps. Cela pourrait être dû à un captage plus efficace par les plantes (Brockway, 1983) ou à une absence de nitrification. En effet, à cette saison les sols sont gorgés d'eau. Il n'y a donc pas beaucoup d'oxygène disponible, élément qui est essentiel pour la nitrification (Couillard, 1985a). À l'opposé, le maximum de lessivage se fait en été où la température et l'activité des bactéries sont élevées (Breuer et al., 1979). Le sol est plus aéré rendant l'oxygène disponible pour la nitrification. À l'automne, la dénitrification serait plus importante que le lessivage (Aulakh et Rennie, 1984). Les risques de contamination de la nappe sont réduits. Cela signifie aussi une perte d'azote pour le système forestier, mais la dénitrification est préférable au lessivage des nitrates (Haith, 1983).

La présence de végétation a un rôle prépondérant à jouer contre le lessivage du NO_3^- . Ainsi, les forêts sont plus efficaces à capter le NO_3^- que les surfaces coupées à blanc où les boues seraient épandues (Riekerk, 1982; Archie et Smith, 1981). Les plantes dites "mauvaises herbes" ont les mêmes capacités à capter les nitrates (Sopper et Kerr, 1979) et leur croissance

est favorisée par l'application de boues (de Vries, 1981). Bref, plus la végétation est abondante, moins grands sont les risques de pollution par le NO_3^- , car les plantes puisent cet élément du milieu pour leur métabolisme.

Higgins (1984b) rapporte que 880 kg N/ha par année serait la dose maximale qui pourrait être appliquée sur une culture de maïs (Zea mays) et de seigle (Secale cereale) poussant sur un loam sableux sans engendrer de problèmes de nitrates. Riekerk (1982) rapporte que les problèmes des nitrates débutent si la dose est supérieure à 400 kg N/ha par année. Chaque cas est donc particulier et Brockway et Urie (1983) présentent, pour solutionner ces problèmes, une méthode applicable à chaque site. Le lessivage est fonction des quantités et types de boues épandues et des types de sols et cultures qui les reçoivent. Ainsi, avec les cueillettes de percolats ils établissent par analyse de régression les quantités maximales de boues à épandre pour ne pas dépasser les normes fixées. La figure 4.1 illustre ce principe. La norme est fixée à 10 mg/l. On voit sur ces courbes les quantités de boues à épandre par type de boue et de forêt pour respecter cette norme. Cette méthode pourrait être retenue afin d'estimer les quantités de boues à épandre.

Le problème des nitrates doit recevoir l'attention du gestionnaire. Bien que l'effet positif des boues ait été démontré (section 3.2), il ne faut pas créer un problème de pollution d'un autre ordre. Une étude du percolat du site récepteur serait à faire avant de pratiquer l'épandage à grande échelle. Par contre, il faut voir si la norme de EPA fixée à 10 mg/l (applicable à l'eau potable) n'est pas trop sévère en ce qui nous concerne.

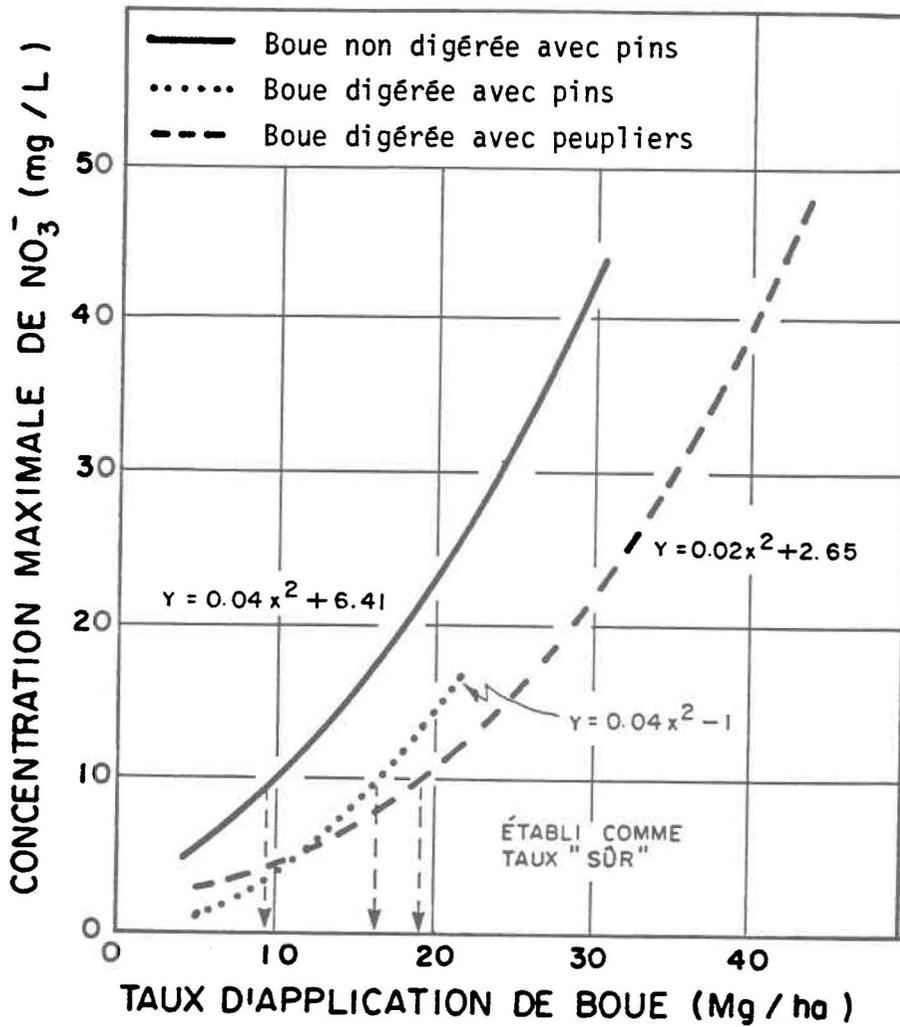
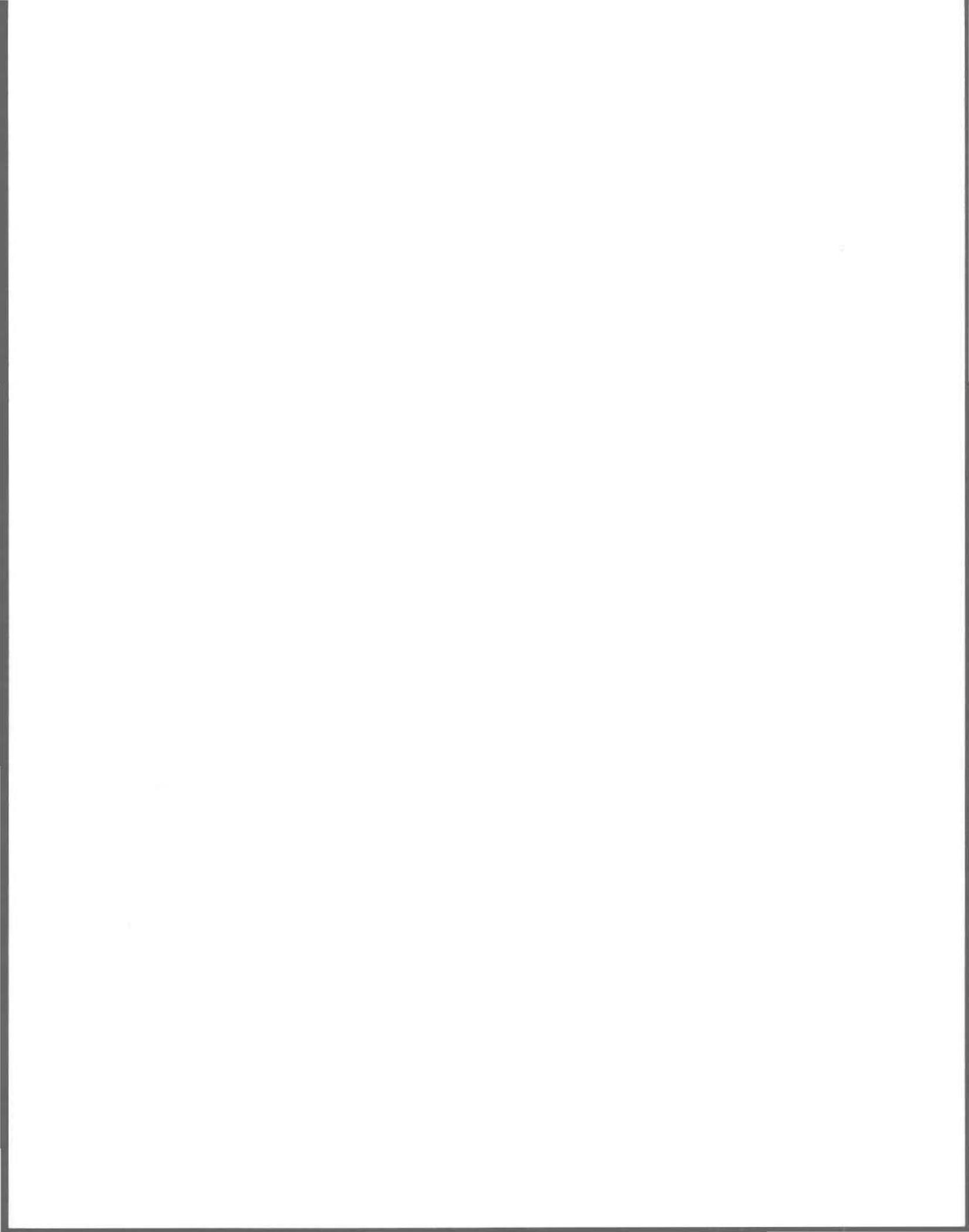


Figure 4.1: Courbes des concentrations résiduelles de NO_3^- dans les percolats selon les types de boues, les doses appliquées et la culture en place. (tiré de Brockway et Urie, 1983).



CHAPITRE V

CULTURE DE MÊLÈZE LARICIN SUR SABLE
AVEC DIFFÉRENTES DOSES DE BOUES SECONDAIRES ANAÉROBIES

5. CULTURE DE MÊLÈZE LARICIN SUR SABLE AVEC DIFFÉRENTES DOSES DE BOUES
SECONDAIRES ANAÉROBIES

Nous désirons étudier de quelle façon le mélèze laricin (Larix laricina (Du Roi K. Koch.) réagissait à la fertilisation par les boues d'usines d'épuration. À cet effet, un dispositif expérimental a été mis en place. Des graines ont été semées et les plantes ont crû pendant 119 jours.

5.1 CHOIX DU MATÉRIEL

5.1.1 CHOIX DU MÉDIUM DE CULTURE

Le sable a été utilisé comme médium de culture pour la majorité des essais à cause de sa pauvreté en éléments nutritifs. Ainsi, la croissance observée était uniquement fonction de la présence d'éléments nutritifs dans la boue et/ou l'eau d'irrigation utilisées. Le tableau 5.1 présente les moyennes des analyses chimiques du sable utilisé. Celui-là provient de la sablière Loma, à Beauport, et origine de l'ancien delta de la rivière Montmorency. Ce tableau présente aussi les moyennes des analyses du sol de pépinière de Duchesnay. On constate que le sol de Duchesnay est plus riche en éléments nutritifs que le sable de Beauport. Le contenu en azote, en phosphore, en potassium et en carbone organique indique la pauvreté du sable, si on compare ces valeurs avec celles du sol de pépinière. Ainsi, on retrouve des traces de N organique dans le sable contre 0,17% dans le sol de pépinière, 998 mg/kg contre 1 276 mg/kg pour le phosphore total (P), 0,05% contre 3,05% pour le carbone organique et 13 mg/kg contre 104 mg/kg pour le

Tableau 5.1: Moyenne des analyses chimiques des sables et du sol de pépinière utilisés dans les expériences (en mg/kg)¹

	Azote				Phosphore		Cations échangeables							
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	miné- ral	orga- nique	total	échan- geable	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
Sable Loma (ou de Beauport)	1,7	0,4	2,1	traces	998	411	13	6	449	traces	73	9,3	0,9	354
Sol de pépinière	5,1	23,7	28,8	1 700	1 276	761	104	78	1 229	0,7	189	28,1	4,1	3169
Sable Houde	---	----	----	traces	788	335	12	6	130	---	---	----	---	---

	Cations totaux								C.O. %	pH
	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Mn	Zn	Al		
Sable Loma	393	1 123	4 248	Traces	16 244	267	38	2 639	0,05	7,21
Sol de pépinière	559	825	2 732	Traces	28 513	433	47	8 595	3,05	5,49
Sable Houde	---	-----	-----	-----	-----	---	--	-----	0,03	6,09

1: sauf en % pour le C.O. et les unités de pH. Pour les méthodes d'analyse voir la section 5.2.3

potassium (K) échangeable. On peut donc s'attendre à ce que la croissance sur sable soit fonction presque uniquement de l'ajout de fertilisants.

L'utilisation du sol de pépinière dans deux traitements permet d'établir des comparaisons entre des doses semblables d'éléments nutritifs ajoutés (le traitement 4 est comparé au traitement 16 (1 fois 125 kg N/ha) et le traitement 8 est comparé au traitement 17 (5 fois 25 kg N/ha). Finalement, l'analyse du sable Houde est fournie à titre comparatif. Ce sable a été utilisé dans les essais de percolation en serres décrits à la section 5.2.4. Les analyses de chaque échantillon sont fournis à l'annexe A.

5.1.2 CHOIX DE L'ESPÈCE

Le mélèze laricin (L. laricina) a été retenu principalement parce qu'il réagit bien à la fertilisation et qu'il possède une croissance assez rapide. En effet, puisque notre expérience ne durait qu'une seule année (de croissance), il était préférable de choisir une espèce pouvant présenter des résultats mesurables après un si court laps de temps. De plus, le service de la recherche du MER (Ministère de l'Énergie et des Ressources) (Terres et Forêts) poursuit des recherches sur le mélèze depuis quelques années en vue de production de biomasse en courtes rotations. (Gouvernement du Québec, 1984c).

Les graines utilisées sont une descendance (ce qui permet de réduire la variabilité génétique) récoltée dans un peuplement de Saint-Louis de Blandford, près de la rivière Bécancour (approximativement 46° 15' Nord et

72° 00' Ouest). Elles ont été stratifiées pendant 3 semaines afin de favoriser leur germination.

5.1.3 CHOIX DE LA BOUE D'ÉPURATION

La boue anaérobie de l'usine d'épuration des eaux de la base militaire de Valcartier a été retenue parce qu'elle est facilement disponible et près de notre lieu d'expérimentation. De plus, il existait déjà des analyses de composition de cette boue qui nous ont permis de constater, à priori, sa valeur nutritive approximative. Le tableau 5.2 présente la composition chimique de cette boue résiduaire, effectuée par le MENVIQ (Ministère de l'Environnement du Québec). Les méthodes d'analyses sont celles couramment utilisées dans leurs laboratoires (Gouvernement du Québec, 1984b).

L'analyse de ce tableau montre la présence de 4,2 % d'azote et de 1,05% de phosphore, ce qui se situe dans les teneurs moyennes des boues au Québec (St-Yves, 1985). De plus, elle n'est pas trop contaminée par les métaux lourds. Par exemple, elle contient moins que 10 mg/kg de Cd, 80 mg/kg de Cr, 20 mg/kg de Ni et moins que 5 mg/kg de Se alors qu'il est recommandé de ne pas utiliser les boues pour valorisation agricole au Canada si leurs teneurs dépassent 20 mg/kg pour le Cd, 180 mg/kg pour le Ni et 14 mg/kg pour le Se; (il n'est pas fait mention du Cr). Par contre, la boue de Valcartier dépasse les valeurs permises pour le Hg (7,7 mg/kg vs 5 mg/kg) et le Pb (680 mg/kg vs 500 mg) (Webber, 1984). La boue a été gardée au frais (2°C) tout au long de l'expérience. On a ainsi minimisé les risques de transformation de l'azote d'une forme à l'autre (Brown et al., 1984).

Tableau 5.2: Analyse chimique de la boue anaérobie de Valcartier utilisée pour l'expérience

Paramètres	Concentration	Unité	Base
Solides totaux	9 000	mg/l	liquide
Solides totaux volatils	3 100	mg/l	liquide
Solides dissous	855	mg/l	liquide
Solides dissous volatils	230	mg/l	liquide
NTK	42 000	mg/kg	sèche
N - NH ₄ ⁺	770	mg/kg	sèche
N - NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻	<0,5	mg/kg	sèche
P total	10 500	mg/kg	sèche
Al	13 000	mg/kg	sèche
As	< 5	mg/kg	sèche
Ba	600	mg/kg	sèche
B	20	mg/kg	sèche
Cd	<10	mg/kg	sèche
Ca	33 000	mg/kg	sèche
Cr	80	mg/kg	sèche
Co	<10	mg/kg	sèche
Cu	2 900	mg/kg	sèche
Fe	15 000	mg/kg	sèche
Mg	2 500	mg/kg	sèche
Mn	200	mg/kg	sèche
Hg	7,7	mg/kg	sèche
Mo	<20	mg/kg	sèche
Ni	20	mg/kg	sèche
Pb	680	mg/kg	sèche
K	880	mg/kg	sèche
Na	1 500	mg/kg	sèche
Se	<5	mg/kg	sèche
Zn	950	mg/kg	sèche
pH	7,7		
Conductivité	2 400	µmhos	

5.1.4 LIEU DE CROISSANCE

L'expérience s'est déroulée du 12 octobre 1984 au 18 février 1985 dans la serre du Service de la Recherche du MER (Terres et Forêts) située au Complexe scientifique de Sainte-Foy. Un éclairage artificiel qui fonctionnait 16 heures par jour a été maintenu au long de l'expérience. Les périodes d'éclairage étaient entrecoupées par 8 heures de noirceur qui coïncidaient avec la nuit réelle. L'irrigation s'est faite par gicleurs automatiques raccordés sur l'aqueduc de la ville de Sainte-Foy. Ils fonctionnaient 2 ou 3 fois par jour selon les besoins; il s'agissait de s'assurer que les plants ne manquaient pas d'eau. La photo 5.1 montre les gicleurs de la serre en fonctionnement. De plus, des humidificateurs vaporisant 24 heures par jour ont été ajoutés pour éviter la dessiccation des semis qui aurait pu être causée par l'éclairage artificiel.

5.2 MISE EN PLACE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

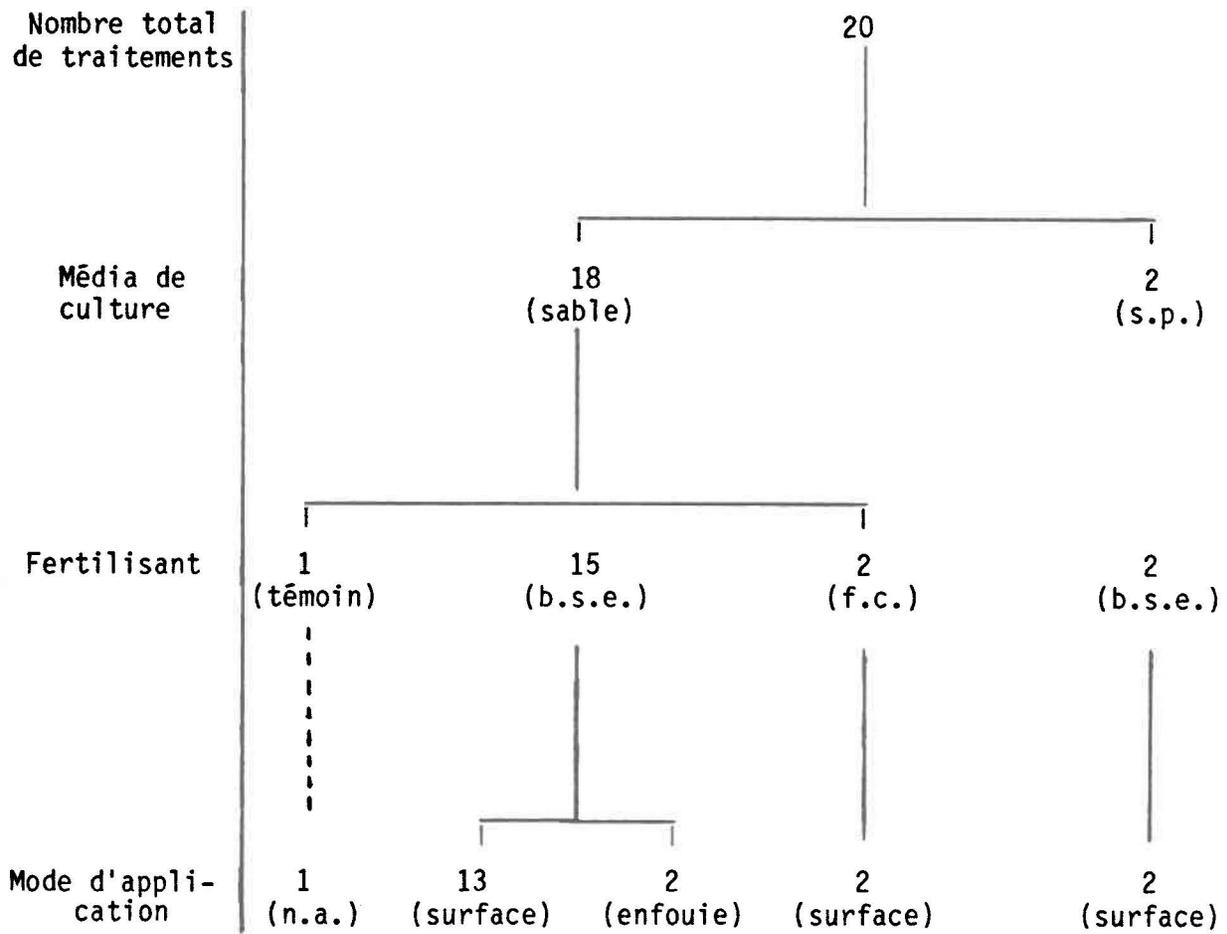
5.2.1 TRAITEMENTS RETENUS

Les différents ajouts de fertilisants ont été calculés par rapport à leur charge en azote (N). Le tableau 5.3 présente les charges totales de N en kg/ha appliquées pour chaque traitement. Ceux-là sont au nombre de 20 et se distribuent comme le montre le schéma de la figure 5.0.

Les cercles, rectangles et triangles du tableau 5.3 représentent les traitements retenus et les chiffres en petits caractères correspondent aux numéros d'identification qui leur ont été attribués. Les cercles



Photo 5.1: Gicleurs en fonctionnement dans la serre



- s.p. : sol de pépinière
- b.s.e. : boue de station d'épuration
- f.c. : fertilisant chimique
- n.a. : ne s'applique pas

Figure 5.0: Distribution des différents traitements

s'appliquent aux traitements sur sol de pépinière en surface, les rectangles aux traitements sur sable en surface et les triangles aux traitements sur sable avec enfouissement de la boue.

Initialement, il était prévu de faire seulement des applications de boue en surface, car il n'était pas réaliste de faire des incorporations une fois que les semis se seraient établis. Cependant, comme il y avait 5 traitements qui recevaient de la boue en surface une seule fois au début de l'expérience, 2 traitements ont été rajoutés (numéros 19 et 20) afin de comparer les effets de la boue enfouie et ceux de la boue en surface. Pour ce faire, la quantité requise de boue a été mélangée avec les 10 centimètres de sable du haut du pot. Le mélange a ensuite été remis dans le pot et les graines ont été semées dessus, comme pour les autres traitements.

Il avait été prévu 1, 2, 5, 10 et 20 applications de boue avec des doses de 0, 12,5, 25, 100 et 250 kg N/ha chaque fois. Cependant, des modifications ont été apportées au cours de l'expérience. Premièrement, le contenu en N et en matières solides de la boue avait été mal estimé par le laboratoire. Deuxièmement, l'expérience a été écourtée de 3 semaines, due à une compétition non-égale entre les semis pour divers traitements. Le nombre d'applications de boue fut donc de 1, 2, 5, 9 et 17 et les doses appliquées furent 0, 6,25, 12,5, 50 et 125 kg N/ha. Le tableau 5.3 présente donc les conditions réelles et finales de l'expérience.

Tableau 5.3: Charge totale d'azote en kg/ha.

Dose par application (kg N/ha)	Nombre total d'application de boue				
	1	2	5	9	17
0	0 ¹	0	0	0	0
6,25	6,25	12,5	31,25	56,25	106 ¹³
12,5	12,5	25	62,5	112,5	213 ¹⁴
25	25 ²	50 ⁵	125 ⁸⁻¹⁷	225 ¹¹	425 ¹⁵
50	50 ³⁻¹⁹	100 ⁶	250 ⁹	450 ¹²	850
125	125 ⁴⁻¹⁶⁻²⁰	250 ⁷	625	1 125	2 125

Numéros de traitements
correspondants

- △ = traitements avec incorporation sur sable 19 et 20
- = traitements retenus sur sol de pépinière avec boue 16 et 17
- = traitements retenus sur sable
 - avec boue 1 à 9 et 11 à 15
 - avec solution nutritive complète* 10 et 18

* traitement 10: 17 applications de 25 kg N/ha (total: 425 kg N/ha)
 traitement 18: 17 applications de 12,5 kg N/ha (total: 213 kg N/ha)

Les fertilisants chimiques utilisés dans les traitements 10 et 18 étaient du 10-52-10 pour les 5 premières semaines et du 20-20-20 pour les 12 dernières. En même temps que le fertilisant chimique, on ajoutait aussi 0,0234 g de sulfate de fer ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) par pot à ces traitements afin de fournir les éléments traces nécessaires.

L'expérience a été menée en 4 répétitions. Vingt pots de chaque répétition ont été distribués au hasard sur quatre tables de la serre, tel qu'illustré par la photo 5.2. Il est à noter qu'au moment où la photo fut prise, que les pots des traitements 19 et 20 n'avaient pas été disposés.

5.2.2 APPLICATION DE LA BOUE

Se fiant sur des concentrations initialement estimées à 4% d'azote et 1,86% de solides totaux, les quantités de boues à appliquer avaient été calculées à 42 ml par pot pour la dose de 12,5 kg N/ha, à 84 ml par pot pour la dose de 25 kg N/ha, à 168 ml par pot pour la dose de 50 kg N/ha, à 336 ml par pot pour la dose de 100 kg N/ha et à 840 ml par pot pour la dose de 250 kg N/ha. L'application en surface se faisait à l'aide d'un béccher gradué, tel qu'illustré par la photo 5.3, dont les valeurs avaient préalablement été vérifiées à l'aide d'un cylindre gradué. Chaque pot sur chaque table a reçu la quantité prévue de boue ou de fertilisant au moment prévu. La photo 5.4 est celle de la table 2, alors que tous les traitements avaient été effectués la première fois.

Le tableau 5.4 présente les caractéristiques de chaque traitement; il est important de rappeler au lecteur qu'il devra très souvent faire



Photo 5.2: Distribution des pots pour l'expérience dans la serre



Photo 5.3: Méthode d'application de la boue



Photo 5.4: La table 2 après une première fertilisation

Tableau 5.4: Identification et caractéristiques des traitements.

TRAITEMENTS	CARACTÉRISTIQUES	DOSE TOTALE (kg N/ha)
1	1 application de 0 kg N/ha sur sable	0
2	1 application de 25 kg N/ha sur sable	25
3	1 application de 50 kg N/ha sur sable	50
4	1 application de 125 kg N/ha sur sable	125
5	2 applications de 25 kg N/ha sur sable	50
6	2 applications de 50 kg N/ha sur sable	100
7	2 applications de 125 kg N/ha sur sable	250
8	5 applications de 25 kg N/ha sur sable	125
9	5 applications de 50 kg N/ha sur sable	250
10	17 applications de solution nutritive complète sur sable ¹	425
11	9 applications de 25 kg N/ha sur sable	225
12	9 applications de 50 kg N/ha sur sable	450
13	17 applications de 6,25 kg N/ha sur sable	106
14	17 applications de 12,5 kg N/ha sur sable	213
15	17 applications de 25 kg N/ha sur sable	425
16	1 application de 125 kg N/ha sur sol de pépinière	125
17	5 applications de 25 kg N/ha sur sol de pépinière	125
18	17 applications de solution nutritive complète sur sable ²	213
19	1 application de 50 kg N/ha sur sable et enfouissement	50
20	1 application de 125 kg N/ha sur sable et enfouissement	125

1: soit 17 fois 25 kg N/ha

2: soit 17 fois 12,5 kg N/ha

référence à ce tableau. Le tableau 5.5 reprend ces caractéristiques et les explique par rapport aux traitements hebdomadaires à effectuer.

5.2.3 MESURES EFFECTUÉES ET MÉTHODES D'ANALYSES

Dès que les divers traitements ont commencé à montrer des différences de croissance visibles à l'oeil, vers la 10^e semaine, les mesures de la hauteur, avec une règle graduée en millimètres, ont été effectuées. Par la suite, les mesures de la hauteur furent réalisées à la 15^e semaine et à la fin de l'expérience, soit à la 17^e semaine. De plus, à la fin, les diamètres au collet furent mesurés avec un microdendromètre. La lecture à affichage numérique se faisait au 0,01 mm. Ces mesures ont été effectuées sur chaque semis.

À la fin de l'expérience, tous les semis ont été lavés à l'eau déminéralisée, puis coupés et regroupés par traitement et répétition pour le séchage (60 heures à 55°C). Une fois sèches, les racines et parties aériennes (tiges et feuilles) furent pesées séparément au milligramme près. Les tissus furent ensuite broyés. Des échantillons de sol ont également été prélevés. Pour ceux-là, la couche séchée de boue et de silice du dessus était enlevée. Les 10 centimètres supérieurs étaient homogénéisés et un échantillon était prélevé. La même chose était faite pour les 10 centimètres inférieurs. Ces échantillons de sol furent mis à sécher pour 96 heures à 20°C. Ils furent ensuite tamisés jusqu'à 2 mm; une partie fut broyée et l'autre conservée intacte.

Les méthodes de digestion et d'analyse sont celles régulièrement employées par le laboratoire du service de la recherche du MER (Terres et

Tableau 5.5: Charge en N par pot et par semaine provenant des boues.

Semaine	Date ¹	Numéro de traitement																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1	15 oct.	0	25	50	125	25	50	125	25	50	Solution nutritive complète: 17 fois 25 kg N/ha	25	50	6,25	12,5	25	125	25	50	125			
2	22 oct.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	50	125
3	29 oct.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	25	50	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
4	5 nov.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
5	12 nov.	0	0	0	0	0	0	0	25	50		25	50	6,25	12,5	25	0	25	0	0	0	0	0
6	19 nov.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
7	26 nov.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	25	50	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
8	3 déc.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
9	10 déc.	0	0	0	0	0	0	0	25	50		25	50	6,25	12,5	25	0	25	0	0	0	0	0
10	17 déc.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
11	23 déc.	0	0	0	0	25	50	125	0	0		25	50	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0	0
12	1 jan.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
13	7 jan.	0	0	0	0	0	0	0	25	50		25	50	6,25	12,5	25	0	25	0	0	0	0	0
14	14 jan.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
15	21 jan.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		25	50	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0	0
16	28 jan.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	6,25	12,5	25	0	0	0	0	0	0
17	4 fév.	0	0	0	0	0	0	0	25	50		25	50	6,25	12,5	25	0	25	0	0	0	0	0
Total par pot		0	25	50	125	50	100	250	125	250	425	225	450	106	213	425	125	125	213	50	125		

¹ date de fertilisation

Note: Une charge de 6,25 kg/ha nécessite 42 ml de boue
 Une charge de 12,5 kg/ha nécessite 84 ml de boue
 Une charge de 25 kg/ha nécessite 168 ml de boue
 Une charge de 50 kg/ha nécessite 336 ml de boue
 Une charge de 125 kg/ha nécessite 840 ml de boue

Forêts) et sont décrites par le Comité canadien de pédologie (1978) pour les sols et par Walsh (1971) pour les tissus. Pour les sols, l'azote organique total (azote Kjeldahl), le phosphore total et les cations totaux sont libérés par une digestion qui s'effectue à 370°C pendant 1 heure dans une solution de H₂O₂ (30%) et H₂SO₄ (18 N) à laquelle est ajoutée un peu de sélénium (Se) métallique. Le dosage de l'azote est fait par colorimétrie automatisée (Technicon Auto Analyser II) et le dosage du phosphore et des cations est fait par spectrophotométrie d'émission au plasma (Jarell-Ash, modèle ICAP-9000).

L'azote minéral (NH₄⁺ et NO₃⁻ + NO₂⁻) est extrait par une solution de chlorure de potassium (KCl, 2 N). Le dosage est fait par colorimétrie automatisée.

Le phosphore assimilable est extrait selon la méthode Bray-2 modifiée (c'est-à-dire en temps de rétention de 30 minutes au lieu d'une minute), soit par une solution de fluorure d'ammonium (NH₄F, 0,03 N) et d'acide chlorhydrique (HCl, 0,1 N). Le dosage est fait par colorimétrie automatisée.

Les cations échangeables (K, Ca, Mg) sont extraits par une solution d'acétate d'ammonium (CH₃COONH₄) dont le pH est ajusté à 7,0 et les autres cations (Mn, Cu, Zn, Fe et Al) sont extraits par une solution de HCl (0,1 N). Le dosage est fait par spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme (modèle Perkin-Elmer 306) pour Mg, Mn, Cu, Zn, Fe et Al et par photométrie d'émission à la flamme (Technicon Auto Analyser IV) pour K et Ca.

L'hydrogène échangeable est extrait par une solution de chlorure de baryum (BaCl_2 , 0,5 N) et de triéthanolamine (0,5 N) dont le pH est ajusté à 8,0. Le dosage est fait par une titration au HCl (0,1 N) jusqu'à un pH de 5,1.

Le carbone organique est déterminé par la méthode de Walkley et Black, soit du bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 1 N) et de l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 , 18 N) auxquels est ajouté du H_3PO_4 et un indicateur. Le titrage est fait par une solution de sulfate ferreux (1 N) et d'acide sulfurique.

Le pH est mesuré dans une solution de chlorure de calcium (CaCl_2 , 0,01 M) par électrométrie manuelle au moyen d'un pH-mètre (Fisher Accumet modèle 420).

Les tissus (parties aériennes et racines) sont digérés pendant une heure dans une solution de H_2O_2 (30%) et de H_2SO_4 (18 N) à laquelle est ajouté du Se métallique. Le dosage de l'azote est fait par colorimétrie et celui des autres éléments par spectrophotométrie d'émission au plasma.

Des digestions et analyses supplémentaires ont été effectuées sur des échantillons de quelques traitements afin de déterminer leurs teneurs en Cd, Cr, Ni et Pb. Ces opérations ont été effectuées au laboratoire de l'INRS-Eau. Elles ont porté sur les traitements 1, 15, 21, 22, 23, 24 et 25 (description des traitements 21 à 25 à la section 5.2.4) pour les sols et sur les traitements 1, 2 et 15 pour les tissus. Il n'y a que pour le traitement 15, que les analyses ont été effectuées à la fois sur les parties

aériennes et sur les racines. Pour le traitement 1, il n'y a que des analyses de parties aériennes et pour le traitement 2, il n'y a que des analyses de racines (dû à un manque de matériel).

Les métaux des sols ont été extraits à l'acide chlorhydrique (0,5 N) sans attaquer la matrice de silice (Environnement Canada, 1981) et les métaux des tissus ont été libérés par une digestion au H₂O₂ (30%) selon la méthode décrite par Matusiewicz et Barnes (1985).

Le dosage a été fait par spectrophotométrie d'absorption atomique sans flamme (Modèle Varian AA-1275) couplé à une fournaise au graphite (modèle Varian GTA-95) pour les métaux libérés des tissus. Pour les métaux libérés des sols, le même appareil a été utilisé pour doser Cd et Pb, tandis que pour Cr et Ni, nous avons utilisé la spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme (modèle Varian AA-575). Les résultats de cette analyse complémentaire sont présentés à la section 5.4.

5.2.4 ESSAIS DE PERCOLATION EN SERRES

Lors du déroulement de l'expérience de croissance, nous avons souvent observé des pertes de solution par les trous de vidange des pots. Nous avons donc voulu savoir la composition chimique de cette eau. Comme l'expérience était déjà amorcée depuis 14 semaines, nous avons ajouté 5 pots supplémentaires où nous avons pu recueillir tout le percolat. Ces traitements ont été faits en une seule répétition et sont identifiés de 21 à 25. Le tableau 5.6 présente les caractéristiques de ces traitements (et le

Tableau 5.6: Identification et caractéristiques des traitements pour les essais de percolation en serres

Numéros des traitements	Caractéristiques				Remarques
	Nombre d'applications	Dose par application (kg N/ha)	Mode d'application	charge totale (kg N/ha)	
21	-	0	-	0	Témoin
22	1	125	enfouie ¹	125	Boue
23	1	125	en surface	125	Boue
24	5	25	en surface	125	Boue
25	5	50	en surface	250	Fertilisant chimique 20-20-20 + FeSO ₄

¹: dans les 10 premiers cm.

lecteur devra souvent y faire référence). La photo 5.5 illustre cette expérience avec le système pour capter le percolat. En plus de l'irrigation régulière par les gicleurs, nous avons ajouté à chaque pot 250 ml d'eau (du système d'aqueduc) 5 jours par semaine (du lundi au vendredi). Elle a duré 5 semaines et des échantillons ont été pris à chaque semaine. De plus, comme le sable utilisé n'était pas le même que celui utilisé pour l'expérience de croissance, une analyse chimique a été faite préalablement. Les pots de l'expérience de croissance desquels furent recueillis les percolats avaient le même dispositif. La composition chimique de cette solution fut déterminée par spectrophotométrie d'émission au plasma, sauf pour l'azote, qui fut dosé par colorimétrie automatisée.

5.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.3.1 ÉVOLUTION DU NOMBRE DE PLANTS AU COURS DE L'EXPÉRIENCE

La mise en terre des graines a été faite le 12 octobre 1984. Il avait été déposé au moins 40 graines par pot, distribuées le plus également possible. Les graines ont été recouvertes de silice pour les maintenir en place lors de l'arrosage ou de la fertilisation. La première plantule a émergé le 18 octobre (6 jours après la mise en terre) et se trouvait dans le pot 1-1. Le 19 octobre, il y avait plusieurs pots ayant une graine de germée. La germination s'est par la suite accélérée et n'a plus été suivie de près.

Le 29 octobre (17 jours après la mise en terre) une fonte de semis a été repérée, malgré des applications régulières de fongicide. L'agent



Photo 5.5: Dispositif de cueillette des percolats pour les traitements 21 à 25

responsable a été identifié comme étant Penicillium citreo-viride. La fonte a été contrôlée, mais certains pots ont été durement touchés. Un premier repiquage a été effectué le 6 novembre et un autre plus important le 26 novembre entre les tables pour les pots de même traitement afin de rendre plus égaux le nombre de plants restant par pot. Parfois, ce repiquage s'est fait à l'intérieur d'un même pot pour améliorer sa distribution spatiale. Paradoxalement le 26 novembre, certains pots avaient trop de plants. Quelques uns ont donc été coupés. Le 20 décembre, un repiquage léger a été fait pour quelques pots. Quelques éclaircies ont par la suite été faites afin de garder 17 ou 18 plants par pots, quand c'était possible. Tous les plants sacrifiés étaient découpés en morceaux et laissés sur le dessus des pots.

Malgré que tous les traitements avaient à peu près le même nombre de semis par pot, il n'en était pas de même pour les surfaces occupées par ceux-là. En effet, les couronnes des plants-témoins et de ceux ayant reçu de petites doses étaient plus petites que celles des plants ayant reçu de plus fortes doses de boue. Ainsi, pour ces derniers, alors qu'ils s'entremêlaient, la compétition n'était plus égale. L'expérience a donc été écourtée de 3 semaines, car on ne pouvait plus éclaircir, le nombre voulu de 17 ou 18 plants par pot étant atteint.

Les tableaux 5.7a à 5.7d présentent les résultats du nombre de plants par pot au cours de l'expérience avec les modifications qui furent apportées. La dernière colonne présente le nombre final de plants par pot. On constate que là où la fonte de semis ne fut pas trop sévère nous avons dû procéder à des éclaircies. Globalement, il y avait à la fin assez de plants

Tableau 5.7a: Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 1 au cours de l'expérience

Date	12 oct. (jour 0)	6 nov. (jour 25)	26 nov. (jour 45)			20 déc. (jour 65)			25 jan. (jour 105)	8 fév. (Jour 119)	Remarques
Nos. de traitement	Nombre de graines mises en terre	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants avant repiquage		coupés	après repiquage		Nombre de plants coupés repiqués	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants	
1	42	27	27	0	27	9	0	18	18	17	3 4
2	40	14	11	0	17	0	0	17	17	17	
3	40	9	6	0	11	0	0	12	12	12	
4	40	12	10	0	16	0	1	17	17	17	
5	40	20	17	0	17	0	0	17	17	17	
6	40	9	9	0	14	0	0	13	14	14	1 5
7	43	7	3	0	13	0	2	15	15	14	
8	40	17	17	0	17	0	0	17	17	17	
9	40	12	12	0	16	0	0	16	16	16	
10	41	17	16	0	16	0	0	16	16	16	
11	40	17	14	0	18	0	0	18	17	17	2
12	41	10	8	0	13	0	0	13	13	13	
13	40	25	23	0	23	4	0	19	20	19	
14	40	25	21	0	21	4	0	17	17	17	
15	40	16	10	0	10	1	0	9	9	9	
16	40	13	11	0	10	1	0	9	9	9	6
17	41	12	11	0	15	0	2	17	17	17	
18	40	30	29	0	29	12	0	17	17	17	
19	40	33	33	0	33	15	0	18	18	18	
20	40	22	23	0	23	6	0	17	17	17	
Notes	le 22 oct. pour les traitements 19 et 20	Jour 15 pour les traitements 19 et 20	Jour 35 pour les traitements 19 et 20			le 1 janvier (jour 71) pour les traitements 19 et 20			Jour 95 pour les traitements 19 et 20	le 18 fév. pour les traitements 19 et 20	

Remarques:

Les plants coupés peuvent être morts

- 1: possiblement une erreur de décompte le 20 décembre
- 2: possiblement une erreur de décompte le 25 janvier
- 3: un plant aurait germé entre le 26 nov. et le 20 déc.
- 4: le semis repiqué le 20 déc. provient du pot 4 de la table 2
- 5: les semis repiqués le 20 déc. proviennent du pot 7 de la table 2
- 6: les semis repiqués le 20 déc. proviennent du pot 17 de la table 4.

Tableau 5.7b: Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 2 au cours de l'expérience

Date	12 oct. (jour 0)	6 nov. (jour 25)	26 nov. (jour 45)			20 déc. (jour 65)			25 jan. (jour 105)	8 fév. (Jour 119)	Remarques
Nos. de traitement	Nombre de graines mises en terre	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants avant repiquage	coupés	après repiquage	Nombre de plants coupés	repiqués	vivants	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants	
1	40	32	33	7	26	9	0	17	17	15	3
2	40	22	20	0	17	0	0	17	17	17	
3	40	21	20	0	12	0	0	12	12	12	
4	40	23	22	0	20	1	(1)	18	18	18	
5	40	22	21	0	21	4	0	17	17	17	
6	40	20	17	0	14	1	0	13	13	13	4
7	40	21	22	0	17	1	(2)	14	14	14	
8	40	23	23	2	21	3	0	18	18	18	
9	40	24	24	0	22	5	0	17	17	17	
10	40	32	30	7	23	7	0	16	16	16	
11	40	29	29	1	28	13	0	15	15	15	1
12	40	16	14	0	14	0	0	14	13	14	
13	40	26	26	0	26	9	0	17	17	17	
14	40	17	15	0	15	0	0	15	15	15	
15	40	20	18	0	10	0	0	10	10	10	
16	40	12	10	0	10	0	0	10	10	10	2
17	40	23	22	0	18	0	0	18	18	18	
18	40	27	27	0	27	9	0	18	18	18	
19	40	28	28	0	28	10	0	18	19	20	
20	40	35	36	1	35	17	0	18	18	18	
Notes	le 22 oct. pour les traitements 19 et 20	Jour 15 pour les traitements 19 et 20	Jour 35 pour les traitements 19 et 20			le 1 janvier (jour 71) pour les traitements 19 et 20			Jour 95 pour les traitements 19 et 20	le 18 fév. pour les traitements 19 et 20	

Remarques:

Les plants coupés peuvent être morts

- 1: possiblement une erreur de décompte le 25 janvier
- 2: possiblement des erreurs de décompte le 1 janvier et le 25 janvier
- 3: un plant a été repiqué dans le pot 4 de la table 1
- 4: Deux plants ont été repiqués dans le pot 7 de la table 1

Tableau 5.7c: Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 3 au cours de l'expérience

Date	12 oct. (jour 0)	6 nov. (jour 25)	26 nov. (jour 45)			20 déc. (jour 65)			25 jan. (jour 105)	8 fév. (Jour 119)	Remarques
Nos. de traitement	Nombre de graines mises en terre	Nombre de plants vivants	Nombre de plants avant requipage	vivants coupés	après repiquage	Nombre de plants coupés	repiqués	vivants	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants	
1	40	31	32	2	30	12	0	18	18	15	2
2	40	24	25	0	23	5	0	18	18	18	
3	41	10	8	0	11	0	0	12	12	12	
4	43	24	24	0	22	4	0	18	18	18	
5	42	28	27	0	27	9	0	18	18	18	
6	42	14	14	0	14	0	0	14	13	14	1
7	43	21	22	0	17	1	0	16	16	16	
8	40	23	24	0	24	6	0	18	18	18	
9	40	21	21	0	19	1	0	18	18	18	
10	41	22	23	0	23	6	0	17	17	17	
11	41	25	24	0	24	6	0	18	18	18	
12	41	21	17	0	15	0	0	15	15	15	
13	42	31	31	0	31	13	0	18	18	18	
14	43	32	27	0	27	9	0	18	18	18	
15	40	4	3	0	10	1	0	9	9	9	
16	40	7	6	0	7	0	0	8	8	8	3 4
17	40	17	16	0	16	0	0	17	17	17	
18	43	34	33	2	31	14	0	17	17	17	
19	40	27	27	1	26	8	0	18	18	18	
20	40	30	32	1	31	13	0	18	18	18	
Notes	le 22 oct. pour les traitements 19 et 20	Jour 15 pour les traitements 19 et 20	Jour 35 pour les traitements 19 et 20			le 1 janvier (jour 71) pour les traitements 19 et 20			Jour 95 pour les traitements 19 et 20	le 18 fév. pour les traitements 19 et 20	

Remarques:

Les plants coupés peuvent être morts

- 1: possiblement une erreur de décompte le 25 janvier
- 2: un plant aurait germé entre le 26 nov. et le 20 déc.
- 3: un plant aurait germé entre le 26 nov. et le 20 déc.
- 4: un plant aurait germé entre le 26 nov. et le 20 déc.

Tableau 5.7d: Évolution du nombre de plants pour la table (répétition) 4 au cours de l'expérience

Date	12 oct. (jour 0)	6 nov. (jour 25)	26 nov. (jour 45)			20 déc. (jour 65)			25 jan. (jour 105)	8 fév. (Jour 119)	Remarques
Nos. de traitement	Nombre de graines mises en terre	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants avant repiquage	coupés	après repiquage	Nombre de plants coupés	repiqués	vivants	Nombre de plants vivants	Nombre de plants vivants	
1	40	33	33	4	29	11	0	18	15	16	1
2	40	28	23	0	22	4	0	18	18	17	
3	40	13	12	0	12	0	0	12	12	12	
4	40	29	24	2	20	4	0	16	16	16	
5	40	28	28	0	28	10	0	18	16	15	
6	40	17	16	0	14	5	0	9	9	9	2
7	40	12	15	0	15	0	0	15	15	15	
8	40	18	18	0	18	0	0	18	18	18	
9	40	21	20	0	20	2	0	18	18	18	
10	40	23	22	0	22	7	0	15	15	15	
11	40	35	34	0	30	12	0	18	18	18	
12	40	22	20	0	17	2	0	15	15	14	
13	40	27	25	0	25	7	0	18	18	18	
14	40	27	25	0	25	9	0	16	16	16	
15	40	10	9	0	10	0	0	11	11	11	
16	40	12	8	0	8	0	0	8	5	5	3
17	40	24	26	0	26	8	(2)	16	16	16	
18	40	28	26	0	26	10	0	16	15	15	
19	40	31	31	1	30	12	0	18	18	18	
20	40	22	25	0	25	9	0	16	15	15	
Notes	le 22 oct. pour les traitements 19 et 20	Jour 15 pour les traitements 19 et 20	Jour 35 pour les traitements 19 et 20			le 1 janvier (jour 71) pour les traitements 19 et 20			Jour 95 pour les traitements 19 et 20	le 18 fév. pour les traitements 19 et 20	

Remarques:

Les plants coupés peuvent être morts

- 1: possiblement une erreur de décompte le 25 janvier
- 2: un plant aurait germé entre le 26 nov. et le 20 déc.
- 3: Deux plants ont été repiqués dans le pot 17 de la table 1

pour faire les mesures et opérations statistiques. C'est à partir de ces quatre tableaux que fut dressé le tableau 5.8 qui indique le pourcentage de survie des semis pour les 45 premiers jours de l'expérience.

Même si la fonte des semis a causé une certaine perte, il est aussi possible qu'une trop grande libération d'azote (ammoniacal) soit responsable d'une partie de la mortalité, tel que discuté dans la section 3.2 (Augmentation des rendements avec des boues). Le traitement 16 (125 kg N/ha sur sol de Duchesnay) est celui qui a le plus bas taux de survie après 25 jours, soit 28% en moyenne. Il conserve ce piètre record après 45 jours avec un taux de survie moyen de 22%. Les traitements 4 et 7 avaient reçu à cette date la même quantité de boue que le traitement 16, mais présentent des taux de survie meilleurs en moyenne, avec 54% et 37% respectivement après 25 jours.

Ainsi, il est possible que l'activité biologique dans le sable soit inférieure à celle dans le sol de Duchesnay. Celui-là contiendrait peut-être déjà plus de bactéries qui minéralisent l'azote organique, d'où l'effet de toxicité remarqué. En effet, pour le traitement 17, après deux applications de 168 ml de boue (2 x 25 kg N/ha), il ne restait plus de boue visible en surface des pots de ce traitement le 10 décembre (après 59 jours), alors que les pots du traitement 8, qui avaient reçu la même quantité de boue, en montraient encore des traces. Ce même phénomène a pu être de nouveau observé le 4 février (après 115 jours) alors que ces traitements avaient reçu 4 applications de 25 kg N/ha de boue.

Tableau 5.8: Pourcentage de survie des semis selon le temps

Date	6 novembre (jour 25) ¹						26 novembre ² (jour 45) ³					
No de répétition No de traitement	1	2	3	4	\bar{M}	s	1	2	3	4	\bar{M}	s
	1	64	80	78	83	76	8	64	83	80	83	77
2	35	55	60	70	55	15	28	50	63	58	50	15
3	23	53	24	33	33	14	15	50	20	30	29	15
4	30	58	56	73	54	18	25	55	56	60	49	16
5	50	55	67	70	60	10	43	53	64	70	57	12
6	23	50	33	43	37	12	23	43	33	40	35	9
7	16	53	49	30	37	17	7	55	51	38	38	22
8	43	58	58	45	51	8	43	58	60	45	52	9
9	30	60	53	53	49	13	30	60	53	50	48	13
10	41	80	54	58	58	16	39	75	56	55	56	15
11	43	73	61	88	66	19	35	73	59	85	63	21
12	24	40	51	55	42	14	20	35	41	50	36	13
13	63	65	74	68	67	5	58	65	74	63	65	7
14	63	43	74	68	62	13	53	38	63	63	54	12
15	40	50	10	25	31	17	25	45	8	23	25	15
16	33	30	18	30	28	7	28	25	15	20	22	6
17	29	58	43	60	48	14	27	55	40	65	47	17
18	75	68	79	70	73	5	73	68	77	65	71	5
19	83	70	68	78	75	7	83	70	68	78	75	6
20	55	88	75	55	68	16	58	90	80	63	73	15
\bar{m}	43	59	54	58	--	--	39	57	53	55	--	--
s	19	14	20	19	--	--	20	16	21	18	--	--

- 1: Jour 15 pour les traitements 19 et 20
 2: Avant le repiquage
 3: Jour 35 pour les traitements 19 et 20

\bar{M} = moyenne du traitement
 \bar{m} = moyenne de la répétition
 s = écart-type

Le taux de survie du traitement 15 était de 31% le 6 novembre et celui du traitement 3 de 33% à cette même date. Le traitement 3 a reçu 50 kg N/ha. Les traitements 6 et 7 présentent les mêmes taux de survie le 6 novembre, soit 37% alors que le traitement 7 a reçu 2 fois et demie plus de boue que le traitement 6 (250 kg N/ha vs 100 kg N/ha).

Le témoin (traitement 1) et le traitement 19 présentent les meilleurs taux de survie, soit 77% et 75% après 45 jours pour le témoin et 35 jours pour le traitement 19. Il semble donc que la boue enfouie libérerait moins vite son azote d'où une toxicité moindre. Le taux de survie du témoin est le plus élevé de tous les traitements, avec 77% après 45 jours. Il semble donc que les boues et les fertilisants chimiques ont initialement libéré trop d'azote, entraînant un effet de toxicité. Pour les traitements avec fertilisants chimiques, le traitement 18 a un meilleur taux de survie que le traitement 10, ce dernier ayant reçu 2 fois plus de fertilisant que le traitement 18. Cependant, pour les traitements avec boue, le taux de mortalité ne peut pas être relié à la quantité de boue appliquée.

C'est la répétition 1 qui présente le plus bas taux de survie, avec 43% après 25 jours et 39% après 45 jours. Pendant ce temps, les 3 autres répétitions ont conservé à peu près les mêmes taux de survie (autour de 55%). La répétition 1 présente aussi des écarts-types relativement importants, avec 19% et 20%. Il est possible que la fonte des semis ait originé de cette table, ce qui pourrait expliquer son plus haut taux d'échec.

5.3.2 CONCENTRATIONS DES ÉLÉMENTS DANS LES TISSUS

Lors de leur croissance, les plantes absorbent des éléments nutritifs (N et P) et des métaux (K, Ca, Mg, etc.). L'analyse des tissus est un bon outil (Leaf, 1968), car elle mesure ce que l'arbre a puisé plutôt que ce qui est disponible (Morrison, 1974). Nous étudierons les concentrations de 10 éléments (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn, Al) dans les parties aériennes et dans les parties souterraines.

Les parties aériennes comprennent les tiges et les feuilles. Cependant, pour des raisons de commodité, le terme "tige" sera employé tout au long de cette section. Pour les parties souterraines, ce sont les racines. Le tableau 5.9 est un résumé des analyses effectuées sur ces tissus; ce sont les moyennes des 4 répétitions pour les éléments totaux. Les analyses pour chacun des traitements et pour chacune des répétitions sont présentées en annexe B. Le tableau 5.9 présente aussi les valeurs des coefficients de corrélation entre la concentration de l'élément étudié dans les tiges ou les racines et les quantités de boues appliquées. La matrice des corrélations est présentée en annexe C.

Pour établir s'il y a des différences significatives entre les traitements, le test de Duncan a été utilisé, tel que décrit dans Steel et Torie (1960). Pour les analyses de régression, nous avons utilisé les résultats des 16 traitements sur sable fertilisés avec de la boue, ce qui exclut donc les deux traitements sur sol de pépinière et les deux traitements avec fertilisants chimiques. Nous rappelons que ces quatre

Tableau 5.9: Concentrations moyennes des éléments totaux dans les tissus de mélèzes laricins par traitement en mg/kg¹ et coefficients de corrélation (r) entre ces concentrations et les quantités de boues appliquées

Numéro de traitement	Tiges et Feuilles										Racines									
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Al
1	0,72	610	4 027	13 332	2 674	78	153	95	traces	118	0,79	1 102	6 680	15 712	3 042	121	787	56	90	2 000
2	0,97	810	5 036	13 775	2 958	79	136	93	traces	128	1,03	1 492	6 312	14 252	3 207	101	1 313	292	91	2 041
3	1,04	916	5 720	15 805	3 416	98	210	132	traces	160	1,03	1 537	7 039	13 383	3 118	121	989	223	106	1 885
4	1,12	1 175	4 881	13 185	2 812	190	125	90	traces	121	1,15	1 883	5 902	12 325	2 930	205	1 070	293	165	1 704
5	1,13	987	4 859	13 128	2 652	138	166	107	traces	188	1,31	1 960	5 776	12 779	3 151	223	1 193	502	160	1 856
6	1,26	1 216	5 636	13 053	2 599	235	203	89	traces	166	1,35	1 978	5 707	11 200	2 635	357	1 044	554	225	1 413
7	1,52	1 628	4 958	14 097	2 310	310	283	88	traces	219	1,60	2 368	5 680	10 740	2 342	531	1 969	590	325	1 442
8	1,53	1 453	5 254	12 601	2 555	266	156	75	traces	152	1,63	2 344	5 595	10 119	2 141	305	1 280	527	247	1 335
9	1,66	1 953	5 663	11 722	2 165	362	182	77	traces	146	1,80	2 853	6 604	8 452	2 201	553	1 568	529	404	1 264
10	1,87	4 588	13 224	10 579	1 961	200	244	62	traces	54	1,64	7 718	17 729	10 674	1 669	234	1 429	34	88	437
11	1,61	1 939	5 691	11 945	2 192	329	174	75	traces	95	1,74	3 067	6 916	10 225	2 168	503	1 595	595	428	1 302
12	1,60	1 856	6 495	11 285	2 116	340	270	48	42	161	1,73	2 944	6 711	8 469	1 986	559	1 939	552	270	1 238
13	1,43	1 655	5 220	11 532	2 357	276	170	38	61	132	1,52	2 611	5 504	10 046	2 482	396	1 363	630	243	1 464
14	1,67	1 964	5 316	12 470	2 231	291	188	33	70	145	1,72	3 362	5 583	11 024	2 053	385	1 906	748	232	1 792
15	1,64	1 966	7 119	11 585	2 031	324	155	24	53	130	1,60	2 624	7 969	7 957	1 967	514	1 757	516	248	1 259
16	1,54	2 777	8 688	8 667	2 176	39	119	45	64	127	1,75	3 905	10 007	8 272	1 732	91	2 279	183	383	1 982
17	1,75	2 663	8 618	9 524	2 124	51	168	32	53	177	1,87	3 436	8 676	9 674	2 026	86	2 722	211	244	2 438
18	1,59	3 591	10 937	10 066	2 191	141	199	18	61	140	1,47	4 713	13 193	10 843	1 921	104	1 261	132	15	473
19	0,98	1 119	5 910	13 636	2 795	168	117	57	57	217	0,92	1 497	7 547	14 865	2 358	62	1 164	131	61	2 022
20	1,24	1 455	5 724	11 904	2 358	155	111	38	56	155	1,36	2 172	7 573	14 907	2 582	189	1 886	259	130	1 586
r	0,726	0,606	0,518	-0,430	-0,651	0,713	0,375	-0,460	0,278	-0,002	0,682	0,601	0,150	-0,688	-0,688	0,649	0,403	0,483	0,516	-0,460

¹ Sauf pour N qui est en pourcentage

derniers traitements avaient pour but d'établir des comparaisons et ne peuvent pas être inclus avec les 16 autres pour les analyses de régression.

Azote

Dans les tiges, les concentrations en N varient de 0,72% pour le traitement 1 à 1,87% pour le traitement 10. Pour les traitements qui ont reçu des boues, les concentrations en azote varient de 0,97% pour le traitement 2 à 1,67% pour le traitement 14. Le test de Duncan permet d'isoler le traitement 1 comme étant significativement différent des autres. Le coefficient de corrélation entre le contenu en N des tiges et les quantités de boues appliquées est de 0,726. Morrison (1974) rapporte que N dans les aiguilles représente entre 1,6% et 1,8% du poids sec. Les traitements ayant reçu les plus grandes quantités de boues oscillent autour de 1,6%. Ce pourcentage aurait pu être augmenté si on avait séparé les aiguilles des parties ligneuses.

Dans les racines, les concentrations en azote varient de 0,79% pour le traitement 1 à 1,87% pour le traitement 17. La plus grande concentration pour les traitements de boue sur sable est pour le traitement 9 avec 1,80%. Le test de Duncan permet d'isoler le traitement 1 qui est significativement différent des autres. Le coefficient de corrélation entre le contenu en N des racines et les quantités de boues appliquées est de 0,682.

Le coefficient de corrélation entre les concentrations d'azote des racines et des tiges est de 0,927. Cette valeur indique que l'azote puisé se partage également entre ces parties, qui sont toute deux en croissance vu l'état juvénile de cette culture.

Phosphore

Dans les tiges, les concentrations en phosphore varient de 610 mg/kg pour le traitement 1 à 4 588 mg/kg pour le traitement 10. Pour les traitements de boue sur sable, les concentrations varient de 810 mg/kg pour le traitement 2 à 1 966 mg/kg pour le traitement 15. Le test de Duncan permet d'isoler les traitements sur sol de pépinière (traitements 16 et 17) et les traitements avec fertilisants chimiques (traitements 10 et 18). Ils sont significativement différents des traitements avec boue sur sable. De plus, les traitements avec fertilisants chimiques sont même significativement différents entre eux, celui ayant reçu la plus forte dose de boues résiduelles possède la plus forte concentration de phosphore dans les tiges. Le coefficient de corrélation entre le contenu en P des tiges et les quantités de boues appliquées est de 0,606.

Les concentrations en phosphore sont plus élevées dans les racines que dans les tiges. Elles varient de 1 102 mg/kg pour le traitement 1 à 7 718 mg/kg pour le traitement 10. Pour les traitements de boue sur sable, les concentrations varient de 1 492 mg/kg pour le traitement 2 à 3 362 mg/kg pour le traitement 14. Le test de Duncan isole les traitements sur sol de pépinière et les traitements avec fertilisants chimiques qui sont significativement différents des traitements de boue sur sable. Les traitements avec fertilisants chimiques sont même significativement différents entre eux. Cependant, le test de Duncan n'établit pas de différences significatives entre les traitements 14 et 17. Le coefficient de corrélation entre le contenu en P des racines et les quantités de boues appliquées est de 0,601.

Le coefficient de corrélation entre les concentrations de phosphore des racines et celles des tiges est de 0,795. L'azote et le phosphore vont de pair dans la croissance des plantes. Ainsi, le coefficient de corrélation entre le P et le N des racines est de 0,898, tandis que pour le P et le N des tiges, il est de 0,835. Le phosphore des racines et l'azote des tiges ont un coefficient de corrélation de 0,845, tandis que le phosphore des tiges et l'azote des racines ont un coefficient de corrélation de 0,749.

Potassium

Dans les tiges, les concentrations de potassium varient de 4 027 mg/kg pour le traitement 1 à 13 224 mg/kg pour le traitement 10. Pour les traitements de boue sur sable, les concentrations varient de 4 859 mg/kg pour le traitement 5 à 7 119 mg/kg pour le traitement 15. Le test de Duncan permet d'isoler quelques traitements. Les traitements avec fertilisants chimiques sont significativement différents entre eux. De plus, ils sont significativement différents des traitements sur sol de pépinière. Pour les traitements avec boue sur sable, les traitements 12 et 15 sont significativement différents des autres et affichent les plus grandes concentrations de K dans leur catégorie, soit 6 495 mg/kg et 7 119 mg/kg respectivement. Les plus fortes charges de boues jumelées aux plus grands nombres d'applications se traduisent par des concentrations en K plus élevées dans les tiges. Il y a une relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en potassium dans les tiges dont le coefficient de corrélation est de 0,518. Tous les traitements sont cependant supérieurs au témoin, tel que rapporté par McIntosh et al. (1984).

Les concentrations en K sont plus élevées dans les racines que dans les tiges et varient de 5 504 mg/kg pour le traitement 13 à 17 729 mg/kg pour le traitement 10. Le traitement avec boue sur sable qui affiche la plus forte concentration est le traitement 15 avec 7 969 mg/kg. Le test de Duncan permet d'établir des différences significatives entre les traitements avec fertilisants chimiques et ceux avec boue sur sol de pépinière des autres traitements. Les traitements avec fertilisants chimiques sont même significativement différents entre eux. Dans le cas des tiges comme dans celui des racines, les concentrations en K sont plus élevées pour le traitement 10 que pour le traitement 18; il est bon de rappeler que le traitement 10 était deux fois plus concentré que le traitement 18. Il n'y a pas de corrélation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de K dans les racines (coefficient de corrélation de 0,150).

Le peu de relation entre les quantités de boues ajoutées, donc de K ajouté, et les concentrations de potassium dans les tissus pourraient indiquer que cet élément n'était pas limitatif pour la croissance. Morrison (1974) arrive aux mêmes conclusions. Le potassium est surtout un élément constituant des tissus en croissance (Leaf, 1968). Le coefficient de corrélation entre les concentrations de K dans les tiges et les racines n'est que de 0,556.

Calcium

Dans les tiges, les concentrations de calcium varient de 8 667 mg/kg pour le traitement 16 à 15 805 mg/kg pour le traitement 3. Le traitement avec boue sur sable qui présente la plus basse concentration est le

traitement 12 avec 11 285 mg/kg. Le test de Duncan n'établit pas de différences significatives entre les traitements. De plus, la relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de Ca dans les tiges a un coefficient de corrélation de -0,430.

Dans les racines, les concentrations de calcium varient de 7 957 mg/kg pour le traitement 15 à 15 712 mg/kg pour le traitement 1. Le test de Duncan n'établit pas de différences significatives entre les traitements. Ici encore, la relation entre les quantités de boues ajoutées et les concentrations en Ca des racines est inversement proportionnelle avec un coefficient de corrélation de -0,688.

Une explication possible à cette relation inverse serait un puisage à peu près égal du Ca par les semis. Ainsi, puisque certains traitements affichent une croissance supérieure, il en résulterait une "dilution" du contenu total en calcium dans les plantes. Les traitements ayant la meilleure croissance, soit les traitements 10 et 18, ont les plus petites concentrations de calcium dans les tiges, sauf les traitements sur sol de pépinière qui sont encore moins concentrés. À cet effet, on peut établir d'autres relations inversement proportionnelles entre les concentrations en Ca des racines et d'autres éléments. Par exemple, les coefficients de corrélation entre le Ca des racines et l'azote des racines est de -0,681 et de -0,719 pour l'azote des tiges. Le coefficient de corrélation entre les concentrations de Ca des tiges et des racines est de 0,480.

Magnésium

Dans les tiges, les concentrations de Mg varient de 1 961 mg/kg pour le traitement 10 à 3 416 mg/kg pour le traitement 3. Le traitement avec boue sur sable qui affiche la plus basse concentration est le traitement 15 avec 2 031 mg/kg. Le traitement 3 est significativement différent des autres par le test de Duncan. Ici encore, la relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en Mg des tiges est inversement proportionnelle avec un coefficient de corrélation de -0,651.

Dans les racines, les concentrations de Mg varient de 1 669 mg/kg pour le traitement 10 à 3 207 mg/kg pour le traitement 2. Le traitement avec boue sur sable qui affiche la plus basse concentration est le traitement 15 avec 1 967 mg/kg. Le test de Duncan n'établit pas de différences significatives entre les traitements. Le coefficient de corrélation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de Mg dans les racines est de -0,688. Il y a cependant une relation entre les concentrations de Mg dans les tiges et celles des racines dont le coefficient de corrélation est de 0,682.

Puisque le Ca et le Mg sont des éléments reliés, la même explication sur l'effet de dilution, tel que discuté précédemment pour le Ca, s'applique ici aussi.

Manganèse

Dans les tiges, les concentrations de Mn varient de 39 mg/kg pour le traitement 16 à 362 mg/kg pour le traitement 9. La plus basse concentration pour les traitements de boue sur sable est de 79 mg/kg pour le traitement 2, tandis que le témoin affiche 78 mg/kg. Le test de Duncan ne permet pas d'isoler un traitement des autres. Il y a une relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de Mn dans les tiges dont le coefficient de corrélation est de 0,713.

Dans les racines, les concentrations de Mn sont supérieures à celles dans les tiges et varient de 62 mg/kg pour le traitement 19 à 559 mg/kg pour le traitement 12. Le test de Duncan ne permet pas d'isoler un traitement des autres. Il y a une relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en Mn dans les racines dont le coefficient de corrélation est de 0,649.

Le manganèse est un élément mineur essentiel à la croissance. Sa concentration dans les tiges est corrélée à celle de l'azote dans les tiges avec un coefficient de corrélation de 0,855 et avec celle du phosphore dans les tiges avec un coefficient de corrélation de 0,803. Les concentrations de manganèse dans les racines et dans les tiges ont un coefficient de corrélation de 0,878.

Fer

Dans les tiges, les concentrations de fer varient de 111 mg/kg pour le traitement 20 à 283 mg/kg pour le traitement 7. Le test de Duncan n'établit aucune différence significative entre les traitements et il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en fer des tiges (coefficient de corrélation de 0,375).

Les concentrations de fer dans les racines sont beaucoup plus élevées que dans les tiges. Elles varient de 787 mg/kg pour le traitement 1 à 2 722 mg/kg pour le traitement 17. Pour les traitements avec boue sur sable, la plus basse concentration est de 989 mg/kg pour le traitement 3 et la plus haute est de 1 969 mg/kg pour le traitement 7. Le test de Duncan ne permet pas d'isoler des traitements de façon significative et il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de fer dans les racines (coefficient de corrélation de 0,403).

Il n'y a pas de relation entre les concentrations de fer des tiges et des racines. Vu la grande quantité ajoutée avec les boues, il ne devrait pas y avoir de carence avec cet élément.

Cuivre

Dans les tiges, les concentrations de cuivre varient de 18 mg/kg pour le traitement 18 à 132 mg/kg pour le traitement 3. La plus basse concentration de cuivre dans les traitements de boue sur sable est de 24 mg/kg pour le traitement 15. Le test de Duncan permet d'isoler les

traitements 1, 3 et 5 qui ont des concentrations en cuivre dans les tiges significativement supérieures à celles des autres traitements. On trouve cependant, une relation inversement proportionnelle entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de cuivre dans les tiges dont le coefficient de corrélation est de $-0,460$.

Les concentrations de Cu dans les racines sont beaucoup plus élevées que dans les tiges, variant de 34 mg/kg pour le traitement 10 à 748 mg/kg pour le traitement 14. Le test de Duncan permet d'isoler les traitements 13 et 14 qui sont significativement plus élevés que les autres. On peut établir une relation directe entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de cuivre dans les racines dont le coefficient de corrélation est de $0,483$.

Le cuivre est un oligo-élément, mais les concentrations mesurées ne sont peut-être pas représentatives et pourraient être le résultat de contamination au laboratoire. Rien ne peut expliquer la relation directement proportionnelle entre les quantités de boues appliquées et les concentrations dans les racines et inversement proportionnelle pour les concentrations de Cu dans les tiges, sauf peut-être un effet de dilution dans ce dernier cas. Cependant, il y a une relation entre le cuivre des racines et l'azote et le phosphore des racines dont les coefficients de corrélation sont de $0,79$ et $0,77$ respectivement.

Zinc

Pour les tiges, les concentrations de Zn ne sont probablement pas représentatives pour les traitements qui affichent des traces commé résultats, vu qu'il y a apparition soudaine de résultats différents de "traces" dans la chaîne des dosages.

Pour les racines, les concentrations de Zn varient de 15 mg/kg pour le traitement 18 à 428 mg/kg pour le traitement 11. La plus basse concentration pour les traitements de boue sur sable est de 61 mg/kg pour le traitement 19.

Morin (1981) rapporte qu'une grande quantité de phosphore, tel que nous en retrouvons dans plusieurs traitements, nuit au puisage et au transport du zinc dans la plante. Pommel (1979a) rapporte que c'est le fer qui a cet effet. Cependant, vu l'incertitude concernant les concentrations pour les tiges, aucune discussion supplémentaire n'est faite sur cet élément.

Aluminium

Dans les tiges, les concentrations d'aluminium varient de 54 mg/kg pour le traitement 10 à 219 mg/kg pour le traitement 7. La plus basse concentration pour les traitements de boue sur sable est de 95 mg/kg pour le traitement 11. Le test de Duncan ne permet pas d'isoler des traitements de façon significative des autres et il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de Al dans les tiges (coefficient de corrélation de -0,002).

Les concentrations dans les racines sont très supérieures à celles des tiges, de l'ordre de dix fois plus. Elles varient de 437 mg/kg pour le traitement 10 à 2 438 mg/kg pour le traitement 17. La plus basse concentration pour les traitements de boue sur sable est de 1 238 mg/kg pour le traitement 12 et la plus élevée est de 2 041 mg/kg pour le traitement 2. Les traitements 10 et 18 sont significativement différents des autres par un test de Duncan. Cependant, ce test ne permet pas d'isoler d'autres traitements de façon significative. Il y a une relation inverse entre les quantités de boues appliquées et les concentrations d'aluminium mesurées dans les racines dont le coefficient de corrélation est de $-0,460$. Le même effet de dilution que dans le cas de Mg et Ca s'applique peut-être, mais l'aluminium ne passerait pas dans les parties aériennes, se concentrant dans les racines.

Conclusions

On constate que les semis ont dans leur tissus des concentrations d'azote, de phosphore et de manganèse corrélées avec les quantités de boues appliquées. En ce qui concerne le potassium, les corrélations sont plus faibles (et même absentes pour les racines). On peut donc supposer que N, P et Mn, à l'opposé de K, étaient en quantité limitatives dans le fertilisant biologique utilisé qu'est la boue de Valcartier.

D'un autre côté, on retrouve peu de relations entre les concentrations des autres éléments dans les tissus (Fe et Al, par exemple) et parfois même des relations inverses (Mg et Ca, par exemple) et les

quantités de boues appliquées, suggérant que ces éléments étaient en excès des besoins des semis ou ayant été "dilués" lors de la croissance.

5.3.3 CONCENTRATIONS DES ÉLÉMENTS DANS LES SOLS ET DANS LES PERCOLATS

Il est intéressant d'évaluer si l'ajout de boues a enrichi le sol de façon significative en éléments nutritifs (N et P) et en métaux et si les pertes par lessivage sont importantes. Nous étudierons ici les résultats des analyses des échantillons des substrats ayant servi à la croissance des mélèzes laricins (L. laricina) et des percolats recueillis.

Les tableaux 5.10 et 5.11 présentent les moyennes des analyses du contenu en éléments nutritifs et métaux des sols utilisés par traitement, regroupés en profils supérieur et inférieur respectivement. Les résultats des analyses pour chaque traitement et chaque répétition sont présentés en annexe D. On retrouve aussi les coefficients de corrélation entre ces concentrations et les quantités de boues ajoutées (provenant de l'annexe C). Les moyennes des concentrations initiales (avant l'expérience) de ces éléments y figurent aussi. Le tableau 5.12 présente les résultats des cueillettes de percolats. Les traitements de boues choisis pour les essais de lessivage furent ceux qui avaient reçu les plus fortes doses. Les résultats des analyses de percolats sont les moyennes de deux répétitions par traitement et de trois cueillettes par répétition pour les traitements 8 à 20 et de 5 cueillettes pour les traitements 21 à 25. Ces analyses sont présentées en annexe E. Les résultats des analyses de sols sont les moyennes de 4 répétitions par traitement.

Tableau 5.10: Concentrations moyennes des éléments par traitement dans les 10 cm supérieurs (en mg/kg)¹ et coefficients de corrélation (r) entre ces concentrations et les quantités de boues ajoutées

Éléments	Azote			C.O.	P	Cations										P	T	H	CEC	S.B.	pH						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N-mth			Echangeables																					
						NTK	%	%	m.e./100g																		
Numéros de traitement	Total		K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	Bray-2								
	Sable avant traitement	1,7																		0,4	2,1	Tr	998	393	4 248	1 123	267
1	1,6	0,5	2,1	Tr	912	436	3 737	1 001	187	12 072	6,6	32	2 466	13	454	17	10,3	82	1,2	1,2	390	296	2,44	--	--	--	7,42
2	1,6	0,9	2,5	Tr	1 173	499	4 624	1 170	249	16 167	10,2	36	2 849	10	407	16	12,0	81	2,0	1,4	382	353	2,19	--	--	--	7,51
3	1,8	0,9	2,7	Tr	1 000	534	3 991	1 118	213	13 763	7,5	31	2 751	10	433	17	10,6	82	1,5	1,3	353	322	2,33	--	--	--	7,24
4	1,1	1,1	2,2	Tr	1 177	537	4 333	1 210	251	17 078	7,7	Tr	2 899	8	376	15	10,6	81	1,1	1,2	374	411	2,11	--	--	--	7,37
5	0,8	3,7	4,5	Tr	1 177	492	4 457	1 143	256	16 127	8,6	Tr	2 799	8	393	17	10,7	84	1,6	1,4	362	401	2,21	--	--	--	7,35
6	1,0	5,3	6,3	Tr	1 198	485	4 513	1 124	253	16 577	8,5	Tr	2 839	14	394	16	11,1	81	1,3	1,4	385	346	2,14	--	--	--	7,36
7	2,0	20,1	22,1	Tr	891	493	3 674	1 131	190	12 733	7,8	2	2 800	10	356	15	10,6	83	2,8	1,9	385	324	1,93	--	--	--	7,22
8	0,6	11,2	11,8	Tr	1 075	451	4 172	1 113	244	15 085	7,4	2	2 761	11	467	17	11,2	87	1,6	1,5	451	364	2,50	--	--	--	7,35
9	0,6	20,8	21,4	Tr	945	470	4 767	1 169	241	14 195	7,7	Tr	2 586	11	393	15	10,6	79	2,5	1,9	465	345	2,11	--	--	--	7,40
10	1,5	29,0	30,5	Tr	1 143	547	3 994	1 095	242	13 802	6,7	Tr	2 477	89	314	14	12,7	98	1,1	2,1	458	515	1,92	20,68	22,60	8,46	6,68
11	0,5	15,9	16,4	Tr	929	467	4 476	1 106	222	12 291	12,4	Tr	2 472	9	379	14	11,0	80	2,0	1,7	436	309	2,04	--	--	--	7,36
12	0,8	23,0	23,8	Tr	1 079	457	4 162	1 115	266	13 136	11,8	Tr	2 448	11	338	13	12,5	88	4,1	2,7	483	363	1,82	--	--	--	7,29
13	0,5	7,1	7,6	Tr	1 015	462	4 103	1 097	225	13 988	8,7	Tr	2 383	11	466	17	12,2	97	2,0	1,5	546	356	2,50	--	--	--	7,45
14	0,5	14,5	15,0	Tr	1 026	486	4 258	1 093	225	13 841	10,3	Tr	2 492	10	376	14	12,3	97	3,2	2,2	450	336	2,03	--	--	--	7,43
15	0,3	22,8	23,1	Tr	919	483	3 791	1 026	214	13 473	11,1	Tr	2 286	13	424	12	12,4	94	3,3	2,3	419	374	2,25	--	--	--	7,34
16	2,4	7,2	9,6	0,15	3,26	1 389	2 663	877	349	24 276	26,7	Tr	8 091	31	1 226	66	28,5	211	6,4	6,9	3 977	700	6,75	37,77	44,53	15,18	5,67
17	2,7	18,1	20,8	0,15	3,50	1 391	2 655	864	359	23 887	14,4	Tr	8 221	35	1 280	78	32,8	227	8,4	8,2	4 221	701	7,14	37,55	44,69	15,98	5,79
18	0,6	12,7	13,3	Tr	1 192	502	4 445	1 083	216	13 273	4,9	Tr	2 385	56	381	16	12,0	115	0,7	2,0	401	493	2,17	19,81	21,99	9,89	6,69
19	0,2	0,8	1,0	Tr	1 068	497	4 480	1 053	211	12 487	8,7	Tr	2 380	9	460	17	14,8	125	3,7	3,2	413	441	2,46	--	--	--	7,27
20	0,3	4,0	4,3	Tr	1 109	491	4 639	1 075	239	13 324	13,6	Tr	2 437	9	478	16	15,1	129	8,7	4,2	416	447	2,55	--	--	--	7,22
Soil de Duchesnay avant traitement	5,1	23,7	28,8	0,17	3,05	1 276	2 732	825	433	28 513	Tr	47	8 595	104	1 229	78	28	189	0,7	4,1	3 169	761	7,12	17,10	24,22	29,40	5,49
r	-0,231	0,754	0,743	--	--	-0,199	-0,165	-0,124	0,082	-0,038	0,298	-0,510	-0,365	0,114	-0,386	-0,559	-0,015	-0,078	0,196	0,215	0,353	-0,016	--	--	--	--	--

1 : sauf indication contraire
 Tr : traces
 C.O.: carbone organique
 T : Somme de K, Ca, Mg(échangeable).
 H : Hydrogène échangeable
 CEC : Capacité d'échange cationique
 S.B.: saturation en base

Tableau 5.11: Concentrations moyennes des éléments par traitement dans les 10 cm inférieurs (en mg/kg)¹ et coefficients de corrélation (r) entre ces concentrations et les quantités de boues ajoutées

Éléments	Azote			C.O.	P	Cations														P	I	H	CEC	S.B.	pH			
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N-min			NTK	Totaux							Échangeables														
							Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu							Zn	Al	
Sable avant traitement	1,7	0,4	2,1	Tr	998	393	4 248	1 123	267	16 244	Tr	38	2 639	13	449	6	9,3	73	Tr	0,9	354	411	2,338	--	--	--	7,21	
1	0,1	0,1	0,2	Tr	1 037	490	4 499	1 083	202	12 021	6,1	Tr	2 459	9	460	7	11,2	107	0,7	1,5	408	350	2,38	--	--	--	6,97	
2	0,4	2,7	3,1	Tr	937	466	3 959	1 006	197	13 750	6,1	Tr	2 459	9	478	7	11,1	109	0,4	1,5	470	396	2,47	--	--	--	7,38	
3	0,4	3,1	3,5	Tr	922	494	4 217	1 036	200	13 427	6,7	Tr	2 510	10	511	8	11,0	102	0,4	1,4	440	381	2,64	--	--	--	7,49	
4	0,5	2,6	3,1	Tr	938	498	4 336	1 046	207	14 129	6,3	Tr	2 446	10	482	8	11,4	108	0,5	1,4	466	394	2,50	--	--	--	7,36	
5	0,5	6,5	7,0	Tr	1 045	476	4 555	1 044	206	13 819	6,6	Tr	2 526	11	435	7	10,5	92	0,5	1,2	429	393	2,26	--	--	--	7,46	
6	0,4	11,8	12,2	Tr	1 068	505	4 552	1 113	231	14 851	7,2	9	2 589	11	448	11	11,3	100	0,4	1,3	451	362	2,36	--	--	--	7,50	
7	0,5	19,0	19,5	Tr	780	470	3 831	1 103	211	12 722	6,8	32	2 387	13	434	11	10,2	92	0,6	1,2	444	317	2,29	--	--	--	7,52	
8	0,7	13,4	14,1	Tr	1 044	469	4 075	1 041	256	14 916	8,5	32	2 362	11	558	9	10,6	92	0,5	1,2	454	355	2,89	--	--	--	7,53	
9	0,4	22,5	22,9	Tr	961	514	4 642	1 158	245	14 255	8,5	32	2 580	12	480	12	11,7	98	0,6	1,2	477	365	2,53	--	--	--	7,44	
10	0,5	18,3	18,8	Tr	910	532	4 096	1 089	225	12 872	8,1	28	2 411	38	434	12	11,5	103	0,7	1,6	468	362	2,36	--	--	--	7,13	
11	0,4	14,5	14,9	Tr	925	456	3 724	1 058	234	13 291	8,3	33	2 354	11	444	11	11,1	89	0,5	1,2	481	343	2,34	--	--	--	7,44	
12	0,4	23,9	24,3	Tr	1 111	486	4 276	1 146	294	16 463	10,6	37	2 496	10	410	11	10,6	88	0,5	1,3	484	400	2,17	--	--	--	7,42	
13	0,1	9,2	9,3	Tr	974	508	4 636	1 142	256	14 340	9,2	32	2 502	10	468	9	10,7	88	0,6	1,2	475	349	2,44	--	--	--	7,44	
14	0,1	11,5	11,6	Tr	780	536	4 103	1 093	198	11 374	8,3	29	2 436	9	437	10	11,1	92	0,6	1,2	494	331	2,29	--	--	--	7,46	
15	0,1	34,3	34,4	Tr	949	500	4 162	1 022	243	13 491	9,4	30	2 264	15	510	11	11,2	92	0,6	1,2	483	374	2,68	--	--	--	7,32	
16	2,9	10,3	13,2	0,13	3,50	1 416	600	746	334	25 216	7,2	28	8 447	57	1 342	76	34,5	225	1,6	4,9	3 913	754	7,48	35,93	43,41	17,28	5,88	
17	5,0	9,3	14,3	0,12	3,10	1 373	599	872	360	25 823	7,2	29	8 531	58	1 299	78	42,5	266	1,4	5,1	3 779	665	7,29	35,04	42,32	17,24	5,89	
18	0,9	5,8	6,7	Tr	1 000	438	4 134	1 040	237	14 322	7,8	25	2 497	23	442	8	10,2	86	0,6	1,2	495	367	2,34	--	--	--	7,32	
19	3,3	3,2	6,5	Tr	1 033	444	4 305	1 030	223	14 000	7,6	29	2 497	10	476	13	11,9	99	0,7	1,9	509	394	2,51	--	--	--	7,59	
20	1,1	5,7	6,8	Tr	1 039	464	4 587	1 027	251	15 064	7,7	32	2 434	11	514	12	11,4	101	0,3	1,9	522	362	2,69	--	--	--	7,57	
Sol de Duchesnay avant traitement	5,1	23,7	28,8	0,17	3,05	1 276	559	2 732	825	433	28 513	Tr	47	8 595	104	1 229	78	28	189	0,7	4,1	3 169	761	7,12	17,10	24,22	29,40	5,49
r	-0,228	0,703	0,693	--	-0,057	0,147	-0,127	0,215	0,342	0,120	0,478	0,618	-0,219	0,362	-0,165	0,399	-0,100	-0,463	0,130	-0,371	0,271	-0,046	--	--	--	--	--	

1 : sauf indication contraire
 Tr : traces
 C.O.: carbone organique
 T : Somme de K, Ca, Mg(échangeable)
 H : Hydrogène échangeable
 CEC : Capacité d'échange cationique
 S.B.: saturation en base

Tableau 5.12: Concentrations de quelques éléments dans les percolats de 15 traitements et moyennes de 5 analyses de l'eau d'irrigation¹ en mg/l

Élément No de traitement										
	- NO ₃	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Al	Zn
8	27	0,19	4,6	144	3,9	0,02	0,04	traces	0,18	--
9	18	0,07	5,8	115	8,5	0,01	0,03	0,02	0,21	--
11	34	0,11	7,3	206	17,2	0,02	0,05	0,02	0,21	--
12	--	traces	8,9	212	18,0	0,02	0,04	0,06	0,24	--
13	44	0,11	6,6	181	7,4	0,02	0,05	0,02	0,20	--
14	25	0,10	6,2	112	11,9	0,02	0,03	0,02	0,14	--
15	93	0,14	10,3	307	20,6	0,02	0,07	0,02	0,30	--
17	23	0,15	22,8	120	26,4	0,08	0,31	0,07	0,30	--
18	33	0,30	14,3	140	5,3	0,03	0,12	0,10	0,19	--
20	13	0,08	5,3	99	8,3	0,06	0,04	0,03	0,16	--
21	traces	0,11	3,7	27	3,8	0,07	0,08	traces	0,14	0,04
22	46	0,18	10,1	128	11,9	0,04	0,05	traces	0,17	0,06
23	12	0,14	5,9	56	8,0	0,03	0,03	traces	0,12	0,12
24	12	0,15	4,3	67	7,6	0,03	0,03	traces	0,13	0,06
25	29	0,20	18,3	90	7,8	0,06	0,25	0,16	0,20	0,10
Eau d'irrigation ¹	0,3	0,01	1,3	22	4,5	0,03	0,01	0,01	--	--

¹: tiré de Gouvernement du Québec (1985c)

Azote

On remarque un appauvrissement du contenu en azote ammoniacal pour la plupart des traitements pour le profil supérieur. Les concentrations en NH_4^+ descendent aussi bas que 0,2 mg/kg pour le traitement 19. Par contre, quelques traitements affichent de légers enrichissements; ce sont les traitements 3 et 7 pour le profil supérieur et 19 pour le profil inférieur.

Cet appauvrissement général en NH_4^+ , malgré l'ajout de boue, pourrait être dû à la nitrification, à un captage par les semis ou à un lessivage. Le lessivage est peu probable car le NH_4^+ est plutôt immobile dans le sol (Dunigan et Dick, 1980). Le captage par les semis est possible. En effet, nous avons vu à la section 5.3.2 que les tissus des semis contenaient de l'azote, dont les coefficients de corrélation avec les quantités de boues appliquées étaient de l'ordre de 0,70. De plus, il n'y a pas de relation entre les concentrations d'azote dans les tissus et les concentrations résiduelles de NH_4^+ dans le sol. La nitrification est fort possible car les alternances entre les périodes humides (ou d'arrosage) et sèches favorisent l'aération du sol qui elle-même favorise la nitrification (Brown et al., 1984; Alexander, 1967). Effectivement, on assiste à un enrichissement général (sauf pour la partie inférieure du traitement 1) du sable en NO_3^- . Brockway (1983) arrive au même résultat 13 mois après avoir appliqué 32 000 kg/ha (base sèche) de boue non digérée d'usine de pâtes et papiers (7,06% N). On peut aussi remarquer la mobilité du nitrate qui est souvent plus abondant dans les profils inférieurs que supérieurs pour un même traitement. À ce sujet, il y a une relation entre les quantités d'azote appliquées avec

les boues et les concentrations de NO_3^- retrouvées dans les sables dont les coefficients de corrélation sont de 0,754 pour le profil supérieur et de 0,703 pour le profil inférieur. Le lessivage du nitrate se remarque aussi dans les eaux de percolation où les concentrations en NO_3^- varient de 13 mg/l (traitement 20) à 93 mg/l (traitement 15). Les lessivats des essais de percolation en serres ont aussi été enrichis en NO_3^- de façon significative. Le lessivage de NO_3^- est plus important pour la majorité des traitements sur sable que pour le sol de pépinière, ce qui est appuyé par Brown et al. (1984).

Les concentrations d'azote minéral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) sont généralement plus élevées dans les traitements ayant reçu les plus grandes quantités d'azote des boues, dû à la présence de NO_3^- . À cet effet, la relation entre les concentrations de NO_3^- et N-min a un coefficient de corrélation de 0,998. Ainsi, les traitements 12 et 15 ont des concentrations de N-min supérieures à 23 mg/kg dans le profil supérieur et pour le profil inférieur, ces concentrations sont supérieures à 23 mg/kg pour le traitement 12 et à 34 mg/kg pour le traitement 15. La relation entre les quantités d'azote appliquées avec les boues et les concentrations de N-min dans les sables ont des coefficients de corrélation de 0,743 dans le profil supérieur et de 0,693 dans le profil inférieur.

Pour l'azote organique, il n'y a pas eu de variations décelables au cours de l'expérience. Il est probable qu'il ait été minéralisé, ce qui est favorisé par un pH neutre ou alcalin (Alexander, 1967), tel était le cas dans notre expérience. En effet, pour les sables fertilisés avec des boues, le pH des profils supérieurs est toujours supérieur à 7,2.

Carbone organique

Les analyses de sol ne permettent pas de vérifier si le sable a été enrichi en matière organique car tous les résultats donnent des concentrations de carbone organique à l'état de traces, même pour les traitements ayant reçu les plus fortes quantités de boues ou ayant eu leur boue enfouie. À ce sujet, Alexander (1967) rapporte que la minéralisation du C est plus rapide dans les sols neutres ou alcalins, ce qui est notre cas. Toujours selon cet auteur, la décomposition du C est meilleure si le milieu est chaud et humide, deux conditions qui étaient réunies dans notre expérience.

Phosphore total

Les concentrations de P total ont peu varié au cours de l'expérience. À la fin, elles variaient de 891 mg/kg à 1 198 mg/kg pour le profil supérieur des traitements 7 et 6 respectivement (sur sable). Certains traitements montrent de légers enrichissements alors que d'autres montrent de légers appauvrissements sans relation avec les doses appliquées ($r = -0,199$). Le test de Duncan ne permet pas de différencier quelque traitement que ce soit (sauf pour les traitements 16 et 17 sur sol de pépinière qui était initialement plus riche en P que le sable).

Pour le profil inférieur, les concentrations varient de 780 mg/kg à 1 111 mg/kg pour les traitements 7 et 12 respectivement. Les mêmes conclusions que pour la partie supérieure s'appliquent ($r = -0,057$) et le test de Duncan ne permet pas d'établir de différence significative entre les traitements.

Phosphore échangeable

On constate un appauvrissement en P échangeable pour les traitements avec boue dans le profil supérieur, sauf pour les traitements 19 et 20 (boue enfouie). Les traitements 10 et 18 (fertilisants chimiques) présentent aussi des enrichissements significatifs. Il est possible que le phosphore échangeable ajouté avec les traitements et celui initialement présent dans les sols ait été utilisé par les semis pour leur croissance.

Les appauvrissements sont moins prononcés dans les profils inférieurs et le test de Duncan ne révèle pas de différence significative entre les traitements sur sable. Ces appauvrissements ne sont peut-être que le résultat d'erreurs expérimentales, car les concentrations de phosphore recueillies dans les eaux de percolation sont inférieures à 1 mg/l, ce qui indique la faible mobilité du P dans le sol (Dunigan et Dick, 1980; Alban, 1972; Alexander, 1967). On peut supposer que le P appliqué avec les boues est resté dans la couche de boue séchée en surface ou a été absorbé par les plantes. À ce sujet, les coefficients de corrélation entre les concentrations de phosphore dans les tissus et les quantités de boues appliquées sont de l'ordre de 0,60.

Potassium total

On constate un enrichissement en K total pour tous les traitements, tant dans le profil supérieur que dans le profil inférieur. Cependant, il est possible que cet enrichissement ne soit dû qu'à des erreurs expérimentales car même le témoin (traitement 1), qui n'a pas été fertilisé,

présente aussi un enrichissement. De plus, il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en K total des sols ($r=0,165$ pour le profil supérieur et $r=0,147$ pour le profil inférieur).

Le test de Duncan ne permet pas de trouver de différences significatives entre les traitements de boue sur sable, mais révèle des différences significatives entre ces traitements et ceux sur sol de pépinière (traitements 16 et 17). Il est à noter que le sol de pépinière était déjà plus riche en potassium total que le sable au début de l'expérience.

Le potassium affiche une certaine mobilité (Alexander, 1967), mais les analyses de percolats ne révèlent pas de pertes importantes par lessivage. Les percolats avaient des concentrations de K total de l'ordre de 5 mg/l à 10 mg/l pour les traitements avec boue sur sable. Les pertes sont plus importantes pour le traitement sur sol de pépinière (23 mg/l) et pour le traitement sur sable avec fertilisant chimique (14 mg/l). L'essai de percolation en serre avec fertilisant chimique présente aussi une forte concentration en K avec 18,3 mg/l.

Potassium échangeable

Dans le profil supérieur, on constate une diminution de la concentration de K échangeable, sauf pour les traitements 1 et 15 qui ne montrent pas de différence et pour le traitement 6 qui présente un léger enrichissement. Les traitements sur sol de pépinière présentent aussi des

appauvrissements en K échangeable, ce qui pourrait expliquer les concentrations de cet élément dans le percolat de l'ordre de 23 mg/l. Par contre, les traitements avec fertilisants chimiques présentent un fort enrichissement, ce qui est normal compte tenu de la nature des fertilisants. Le test de Duncan ne révèle pas de différence significative entre les traitements de boue sur sable et il n'y a pas de relation entre les quantités de boues ajoutées et les concentrations en K échangeable ($r=0,114$). Cependant, il y a des différences significatives entre les traitements de boue sur sable et entre les traitements de boue sur sol de pépinière et sur sable avec fertilisant chimique. Concernant ces derniers, le traitement 10 est même significativement différent du traitement 18.

Dans le profil inférieur, presque tous les traitements avec de la boue affichent des concentrations finales de K échangeable inférieures à celles du début, sauf le traitement 7 qui a la même concentration et le traitement 15 qui est légèrement plus riche, avec 15 mg/kg. Devant cet appauvrissement général en K échangeable, le test de Duncan isole trois traitements de boue sur sable qui sont différents des 13 autres, soit les traitements 7, 9 et 15 avec 13 mg/kg, 12 mg/kg et 15 mg/kg de K échangeable respectivement. Ils sont parmi les traitements ayant reçu les plus fortes charges de K avec la boue. Cependant, rien n'explique pourquoi le traitement 12 (10 mg/kg de K échangeable), qui a reçu la plus forte charge (9,43 kg K/ha), n'est pas regroupé avec ces trois traitements. Il semble donc que le potassium n'était pas en quantités limitatives, puisqu'il n'y a pas de relation entre les quantités appliquées, les concentrations dans les tissus et les concentrations résiduelles dans les sols.

Calcium total et magnésium total

Les concentrations de Ca total et de Mg total ont peu varié au cours de l'expérience. Pour le calcium, à la fin, elles variaient de 3 674 mg/kg (traitement 7) à 4 767 mg/kg (traitement 9) pour le profil supérieur et de 3 724 mg/kg (traitement 11) à 4 642 mg/kg (traitement 9) pour le profil inférieur des traitements sur sable. Pour le magnésium, les concentrations variaient de 1 001 mg/kg (traitement 1) à 1 210 mg/kg (traitement 4) pour le profil supérieur et de 1 006 mg/kg (traitement 2) à 1 158 mg/kg (traitement 9) pour le profil inférieur des traitements sur sable.

Le test de Duncan ne révèle pas de différence significative entre les traitements sur sable, mais révèle des différences significatives entre les traitements sur sable et ceux sur sol de pépinière. Ces derniers étaient déjà plus riches à l'origine et le sont restés à la fin de l'expérience.

Les eaux de percolation sont assez chargées avec des concentrations variant de l'ordre de 110 mg/l à 300 mg/l de Ca et de l'ordre de 4 mg/l à 20 mg/l de Mg. Cependant, la boue utilisée contenait beaucoup de ces éléments, soit 3,3% de Ca et 0,25% de Mg. Ces cations sont normalement perdus par lessivage (Alexander, 1967) et ne sont pas considérés comme nuisibles. Par exemple, certaines eaux minérales vendues dans le commerce ont 94 mg/l de Ca (Eau de Vichy) et 18 mg/l de Mg (Eau Labrador). Il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de ces cations dans les sols ($r=0,124$ pour Ca total et $r=0,052$ pour Mg total pour le profil supérieur).

La concentration en Ca pour le traitement 21 est de 27 mg/l, alors qu'il n'a reçu que de l'eau d'irrigation. Une telle valeur peut être considérée comme un bruit de fond venant de l'eau d'irrigation ou du lessivage du substrat lui-même. La même conclusion vaut pour le Mg avec 3,8 mg/l pour le traitement 21.

Calcium échangeable

On constate des enrichissements et des appauvrissements en calcium échangeable dans les profils supérieurs et inférieurs, sans relation avec les quantités de calcium appliquées avec les boues ($r=0,386$ pour le profil supérieur et $r=-0,165$ pour le profil inférieur). Il semble cependant y avoir un peu moins d'appauvrissement et un peu plus d'enrichissement dans le profil inférieur que dans le profil supérieur. Par exemple, pour les traitements avec boue, la plus faible concentration de Ca échangeable dans le profil supérieur est de 338 mg/kg pour le traitement 12 alors qu'elle est de 410 mg/kg pour le traitement 12 dans le profil inférieur. Pour la plus forte concentration, on retrouve 478 mg/kg dans le profil supérieur pour le traitement 20 contre 558 mg/kg dans le profil inférieur pour le traitement 8. Le calcium échangeable semble donc mobile, ce qui expliquerait les fortes concentrations recueillies dans les percolats (jusqu'à 307 mg/l pour le traitement 15) et 128 mg/l pour le traitement 22.

Magnésium échangeable

Pour le profil supérieur, on constate un enrichissement en magnésium échangeable pour les traitements sur sable. Cependant, le test de Duncan ne

fait pas ressortir de différence significative entre les traitements de boue sur sable. On retrouve même une relation inversement proportionnelle entre les quantités de boues appliquées et les concentrations de Mg échangeable dont le coefficient de corrélation est de -0,559.

Pour le profil inférieur, cet enrichissement est moins important et le test de Duncan ne fait pas ressortir de différence significative entre les traitements sur sable. On peut supposer que la boue, qui contenait 2 500 mg/kg de Mg total, a enrichi les substrats de façon significative en surface, mais que le magnésium échangeable n'a pas migré vers le bas. Taylor et al. (1981) présentent un résultat semblable.

Manganèse total

On constate un léger appauvrissement en Mn pour tous les traitements, tant dans les profils supérieurs que dans les profils inférieurs, sauf pour le traitement 12 (profil inférieur) qui présente un léger enrichissement avec 294 mg/kg. Les traitements 16 et 17 se distinguent des traitements sur sable par un test de Duncan, mais ils étaient initialement plus riches en manganèse. Il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en Mn total dans les sols ($r=0,082$ pour le profil supérieur et $r=0,342$ pour le profil inférieur).

Les eaux de percolation ne contiennent que des traces de Mn total, bien que la boue utilisée en contenait 200 mg/kg. Il est possible que le manganèse ait été capté par les semis, qu'il soit resté dans la couche de boue durcie en surface ou encore que cet appauvrissement ne soit par réel, mais résulte d'erreurs expérimentales.

Manganèse échangeable

On constate un enrichissement en Mn échangeable pour tous les traitements et pour les deux profils.

Pour le profil supérieur, le test de Duncan indique des concentrations significativement différentes pour les 2 traitements où la boue a été enfouie (traitements 19 et 20). Il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en manganèse échangeable dans les sols ($r=0,015$ pour le profil supérieur et $r=-0,100$ pour le profil inférieur).

Pour le profil inférieur, le test de Duncan ne révèle aucune différence significative. Cela étant établi et les concentrations de Mn recueilli à l'état de traces dans les percolats suggèrent que le manganèse échangeable est quasi immobile dans le sol.

Fer total

On constate généralement une diminution de la concentration du fer total, sauf pour le profil supérieur des traitements 4 et 6 et pour le profil inférieur du traitement 12 qui montrent de légères augmentations. Il n'y a pas de relation entre les concentrations de fer dans les substrats de croissance et les quantités de Fe appliquées avec les boues ($r=-0,038$ pour le profil supérieur et $r=0,120$ pour le profil inférieur). Les traitements sur sable ne présentent pas de différence significative par un test de

Duncan. Cependant, les traitements sur sol de pépinière se distinguent des traitements sur sable, mais ils étaient initialement plus riches en fer.

Fer échangeable

On constate un enrichissement en fer échangeable pour tous les traitements, profils supérieurs et inférieurs, mais sans relation avec les quantités de boues appliquées ($r=-0,078$ pour le profil supérieur et $r=-0,463$ pour le profil inférieur).

Pour le profil inférieur, le test de Duncan ne permet pas d'établir de différence significative, sauf pour les traitements sur sol de pépinière (traitements 16 et 17) qui se distinguent même entre eux. Ceux-là étaient initialement plus riches.

Pour le profil supérieur, le test de Duncan établit des différences significatives en regroupant certains traitements de boue, mais sans relation avec les doses de fer appliquées. Par contre, les traitements 19 et 20 (ceux avec enfouissement de boue) se distinguent des autres (boues appliquées en surface), car ils présentent les concentrations de fer échangeable les plus élevées pour les traitements de boue, soit 125 mg/kg et 129 mg/kg respectivement. De plus, les traitements avec fertilisants chimiques ont des concentrations en Fe échangeable de 98 mg/kg pour le traitement 10 et de 115 mg/kg pour le traitement 18. Ces traitements ont reçu du fer sous forme de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ à des doses totales de $4,0 \times 10^{-4}$ g de Fe par pot, ce qui est 1 000 fois moins que la plus grande quantité de

fer appliquée avec les boues, soit $4,025 \times 10^{-1}$ g de Fe par pot pour le traitement 12. Les traitements chimiques se classent parmi les plus élevés, ce qui suggère que ce fer est beaucoup plus mobile que celui contenu dans les boues.

On peut donc constater la faible mobilité du fer échangeable des boues, car les eaux de percolation ne contenaient que des traces de fer, alors que la boue utilisée en avait une concentration de 1,5%. La végétation peut en avoir absorbé une partie, mais il peut aussi être resté lié à la couche de boue séchée en surface. Les appauvrissements et les enrichissements observés pourraient être dus à des erreurs expérimentales, car même le témoin a été enrichi.

Cuivre total

Tous les traitements présentent des enrichissements en cuivre total, tant pour les profils inférieurs que supérieurs. Cependant, le test de Duncan ne montre pas de différence significative entre les moyennes pour tous les traitements dans le profil supérieur, mais isole un petit groupe dans le profil inférieur: ce sont ceux qui ont reçu les plus fortes charges de boues. Il n'y a pas de relation entre les concentrations de cuivre total et les quantités de cuivre appliquées avec les boues ($r=0,298$ pour le profil supérieur et $r=0,478$ pour le profil inférieur).

Le percolat recueilli ne contenait que des traces de cuivre, sauf pour le traitement 25 qui avait une concentration moyenne de 0,16 mg/l. Puisque la boue était très riche en cuivre, soit 2 900 mg/kg, on peut

supposer qu'une partie a migré pour enrichir les substrats de croissance. On peut aussi s'interroger sur la validité de ces résultats, parce que le traitement 1 (témoin) a lui aussi été enrichi, ce qui semble, à prime abord, impossible.

Cuivre échangeable

On constate un enrichissement en cuivre échangeable dans les profils supérieurs et inférieurs pour tous les traitements. L'enrichissement est plus important dans le profil supérieur, mais sans relation avec les quantités de boues appliquées ($r=0,196$). Dans le profil supérieur, le test de Duncan permet de distinguer le traitement 20 (enfouissement de boue) des autres; c'est celui qui affiche le plus fort enrichissement en cuivre avec 8,72 mg Cu/kg. Ce test regroupe aussi les traitements ayant reçu les plus fortes doses de boues en surface (exception faite du traitement 2 qui a reçu la plus petite charge de boue et qui affiche quand même 2 mg Cu/kg).

Les traitements avec fertilisants chimiques ont reçu 2×10^{-5} g de Cu par pot, ce qui est près de 4 000 fois moins la plus grande quantité de Cu appliquée avec les boues, soit $7,78 \times 10^{-2}$ g Cu par pot pour le traitement 12. Cependant, les traitements avec fertilisants chimiques se classent parmi les plus riches dans le profil inférieur, alors qu'ils sont les plus pauvres dans le profil supérieur. De plus, le traitement 20, partant du rang le plus élevé dans le profil supérieur (avec 8,7 mg/kg de Cu échangeable) se classe le moins élevé dans le profil inférieur (avec 0,3 mg/kg de Cu échangeable). On constate donc la mobilité du cuivre des

fertilisants chimiques et le peu de mobilité du cuivre des boues qui semble rester lié à la matière organique. (Brockway, 1983; Lambert et Weidensaul, 1982).

Zinc total

Les analyses du zinc présentent des résultats qui ne sont probablement pas représentatifs. Par exemple, dans le profil supérieur, les traitements 2,1 et 3 affichent respectivement 36 mg/kg, 32 mg/kg et 31 mg/kg de Zn total. Cela les rend significativement différents de tous les autres par un test de Duncan. De plus, ils restent près de la valeur de la concentration initiale de zinc total dans le sable qui était de 38 mg/kg. Cependant, on ne peut pas expliquer pourquoi le Zn total est à l'état de traces dans la majorité des traitements, sauf par des erreurs expérimentales. Par contre, pour les analyses des profils inférieurs, on constate un léger appauvrissement pour la plupart des traitements. Il est probable que les traitements affichant des traces comme résultats ne sont pas représentatifs.

Puisque la boue contenait quand même 950 mg/kg de zinc et n'ayant pas de résultats de percolat, on ne peut rien avancer sur la dynamique du zinc total dans cette expérience. Cependant les essais de percolation en serres laissent entrevoir le peu de mobilité de cet élément, puisqu'il se retrouve en faibles concentrations dans ces percolats.

Zinc échangeable

On constate un léger enrichissement en zinc échangeable pour tous les traitements, pour les profils supérieurs et inférieurs. Le test de Duncan permet d'établir des différences significatives pour les traitements 19 et 20 pour les 2 profils, qui présentent les plus forts enrichissements des traitements avec boue sur sable. On constate une légère mobilité du Zn échangeable, car les profils inférieurs ont moins de zinc échangeable que les profils supérieurs. Ils sont cependant légèrement plus riches que les substrat d'origine. Cet enrichissement pourrait aussi être attribuable à des erreurs expérimentales. Cependant, Brockway (1983) et Sidle et Kardos (1977) rapportent que le Zn serait plus mobile que le Cu.

Aluminium total

On constate des enrichissements ou des appauvrissements en Al total dans le profil supérieur, mais sans relation avec les quantités de boue appliquées ($r=-0,365$). Le test de Duncan ne fait pas ressortir de traitement sur sable fertilisé avec des boues.

On constate un appauvrissement en Al total pour tous les traitements dans le profil inférieur et le test de Duncan n'établit aucune différence significative entre les traitements sur sable. Cependant, les traitements sur sol de pépinière sont significativement plus riches (8 447 mg/kg pour le traitement 16 et 8 531 mg/kg pour le traitement 17) que les autres, mais ils étaient déjà trois fois plus riches initialement.

Aluminium échangeable

On constate un enrichissement en aluminium échangeable pour presque tous les traitements des profils inférieurs et supérieurs, sauf pour le profil supérieur du traitement 3 qui affiche une concentration (353 mg/kg) proche de la valeur initiale (354 mg/kg). Il n'y a pas de relation entre les quantités de boues appliquées et les concentrations en Al échangeable dans les sols ($r=0,353$ pour le profil supérieur).

Pour le profil supérieur, le test de Duncan permet de distinguer les traitements 12 et 13 qui sont significativement différents des autres traitements avec boue ayant les plus grandes concentrations d'aluminium échangeable, soit 483 mg/kg et 546 mg/kg respectivement. Pour les autres traitements avec boue, ce test de Duncan n'établit pas de différence significative. On peut aussi constater un enrichissement des traitements sur sol de pépinière.

Le profil inférieur est, en général, plus enrichi que le profil supérieur, mais le test de Duncan n'établit pas de différence significative entre les traitements de boue. On constate donc une certaine mobilité de l'aluminium échangeable, mais sans relation avec les quantités de boues appliquées ($r=0,353$ pour le profil supérieur et $r=0,271$ pour le profil inférieur).

Les quantités d'aluminium appliquées avec les boues étaient importantes (1,3%) et sa présence à l'état de traces dans les percolats suggère qu'il doit être resté dans la couche de boue séchée en surface. Il est

aussi possible que les appauvrissements remarquables soient le résultat d'erreurs expérimentales.

pH

Il n'y a pas de variation sensible du pH des traitements sur sable. Ce résultat va à l'encontre de King et Morris (1972) qui ont trouvé des résultats contraires aux nôtres, tandis que McIntosh et al. (1984) ont obtenu des augmentations de pH en utilisant une boue compostée. Taylor et al. (1981) ne rapportent pas de variation de pH dans leurs expériences utilisant des boues anaérobies.

Conclusions

Les quantités de boues appliquées furent relativement modestes, avec un maximum de 10 890 kg/ha (base sèche; traitement 12), si on compare à McIntosh et al. (1984) et Behel et al. (1983) qui ont appliqué 150 000 kg/ha et 800 000 kg/ha de boue respectivement. Dans notre expérience, il se trouve donc que peu de ces éléments (N, P et métaux) ont été appliqués, mais ces faibles quantités étaient suffisantes pour favoriser la croissance des semis.

Les analyses des échantillons des substrats utilisés pour la croissance des semis de mélèze laricin (L. laricina) fertilisés avec des boues et les analyses des percolats ne semblent pas indiquer de pertes ni d'enrichissements importants des éléments étudiés, comparativement à Behel et al. (1983) qui rapportent des enrichissements significatifs. Il y a peut-être deux exceptions, soit le calcium et l'azote nitrique. Cependant,

vu les concentrations importantes de Ca (3,3 %) dans la boue et la nitrification impossible à empêcher dans les conditions de notre expérience, il semble normal de retrouver de telles valeurs dans nos résultats.

Ayant analysé les profils supérieurs, inférieurs et les percolats des traitements, on peut reconnaître la capacité de la matière organique à retenir les métaux dans les horizons de surface et dans la couche de boue séchée.

5.3.4 RÉSULTATS DE CROISSANCE

5.3.4.1 Croissance en hauteur

Au début de l'expérience, les différents traitements n'ont montré aucune différence. La photo 5.6 présente la table 2 après 15 jours de croissance. Nous remarquons que quelque soit le traitement reçu, tous les semis ont la même hauteur. Par la suite, les traitements se sont différenciés. Donc, des mesures de hauteur ont été prises à l'âge de 69, 105 et 119 jours (71, 95 et 119 jours pour les traitement 19 et 20). La photo 5.7 présente les quatre tables à la fin de l'expérience pour les traitements 1 à 18 et à 109 jours pour les traitements 19 et 20. On remarque que certains traitements présentent des résultats meilleurs que d'autres.



Photo 5.6: La table 2 après 15 jours de croissance



Photo 5.7: Les quatres tables à la fin de l'expérience

Hauteur après 69 jours

Le tableau 5.13 présente les résultats des hauteurs moyennes, après 69 jours, classés selon un ordre croissant. Les résultats des mesures sur chaque semis sont présentés à l'annexe F.

Pour l'analyse de variance, le test de F est très significatif entre les traitements et non significatif entre les répétitions; cependant, aucun traitement avec boue ne se distingue des autres puisque le test de Duncan ne relève pas de différence significative entre eux. Les traitements chimiques présentent quand même déjà la meilleure performance. Pour les traitements avec boue, ce sont ceux avec des applications répétées qui affichent les meilleurs résultats, sans égard à la dose.

Hauteur après 105 jours

Le tableau 5.14 présente les résultats des hauteurs moyennes, après 105 jours, selon un ordre croissant. Les résultats des mesures sur chaque semis sont présentés à l'annexe F. Pour l'analyse de variance, le test de F est très significatif entre les traitements et non significatif entre les répétitions. Malgré l'augmentation de croissance depuis les dernières mesures, le test de Duncan ne révèle pas de différence significative entre les traitements de boue. On peut cependant constater que les traitements avec applications répétées de boue et ceux avec des doses d'azote plus importantes ont des hauteurs plus grandes. Par exemple, les traitements 13, 14 et 15 ont reçu des boues 15 fois chacun, mais le traitement 15 se classe un peu mieux que le traitement 14, alors que le traitement 14 se classe

Tableau 5.13: Hauteurs moyennes après 69 jours de croissance¹

Numéro de traitement	Quantité d'azote reçue (kg N/ha)	Hauteur moyenne (mm)
1	0	30,8 a ²
3	1 x 50 = 50	33,1 ab
2	1 x 25 = 25	34,5 abc
19	1 x 50 = 50	34,9 abc
5	1 x 25 = 25	35,3 abc
6	1 x 50 = 50	35,4 abc
8	3 x 25 = 75	36,9 abc
4	1 x 125 = 125	38,9 abc
7	1 x 125 = 125	39,6 abc
20	1 x 125 = 125	40,2 abc
16	1 x 125 = 125	41,7 abc
17	3 x 25 = 75	42,6 abc
9	3 x 50 = 150	42,8 abc
12	5 x 50 = 250	44,3 abc
13	10 x 6,25 = 63	45,8 abc
15	10 x 25 = 250	46,2 abc
14	10 x 12,5 = 125	46,8 abc
11	5 x 25 = 125	47,2 abc
10 (F.C.)	10 x 25 = 250	58,2 bc
18 (F.C.)	10 x 12,5 = 125	59,4 c

F.C.: Fertilisant chimique

¹ : 71 jours pour les traitements 19 et 20

² : Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P=0,05 (Test de Duncan)

Tableau 5.14: Hauteurs moyennes après 105 jours de croissance¹

Numéro de traitement	Quantité d'azote reçue (kg N/ha)	Hauteur moyenne (mm)
1	0	33,6 a ²
19	1 x 50 = 50	41,0 ab
3	1 x 50 = 50	44,5 abc
2	1 x 25 = 25	46,1 abc
20	1 x 125 = 125	52,7 abc
5	2 x 25 = 50	53,7 abc
4	1 x 125 = 125	55,1 abc
6	2 x 50 = 100	55,4 abc
8	4 x 25 = 100	65,5 abc
7	2 x 125 = 250	67,5 abc
16	1 x 125 = 125	79,5 abc
13	15 x 6,25 = 94	83,4 abc
9	4 x 50 = 200	86,0 abc
12	8 x 50 = 400	90,1 abc
11	8 x 25 = 200	92,2 abc
14	15 x 12,5 = 188	96,5 abc
17	4 x 25 = 100	97,3 abc
15	15 x 25 = 375	98,3 abc
18 (F.C.)	15 x 12,5 = 188	121,7 bc
10 (F.C.)	15 x 25 = 375	125,5 c

F.C.: Fertilisant chimique

¹ : 95 jours pour les traitements 19 et 20

² : Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P=0,05 (Test de Duncan)

mieux que le traitement 13. On peut donc s'attendre à d'autres modifications dans l'évolution des hauteurs à mesure que l'expérience avance dans le temps.

Hauteur après 119 jours

Le tableau 5.15 présente les résultats des hauteurs moyennes après 119 jours, soit la fin de l'expérience, classés selon un ordre croissant. Les résultats des mesures sur chaque semis sont présentés à l'annexe F. Pour l'analyse de variance, le test de F est très significatif entre les traitements et non significatif entre les répétitions. Malgré qu'on peut remarquer une croissance dans les pots, le test de Duncan ne révèle pas de différence significative entre les traitements de boue.

Certains traitements présentent quand même des performances dont on peut discuter. Ainsi, les traitements qui ont reçu des applications répétées de boue se classent les meilleurs. Par contre, la quantité de boue ne semble pas faire de différence, du moins pour les fortes doses. Les traitements 14 et 15 ont reçu chacun 17 applications de boue, le traitement 15 recevant 2 fois plus de boue que le traitement 14. Malgré cela, ils affichent des résultats égaux, soit 125 mm. Par contre, le traitement 13 a reçu 2 fois moins de boue que le traitement 14 et 4 fois moins que le traitement 15; cependant, il n'a que 15 mm de moins en hauteur que les traitements 14 et 15. Une si légère différence ne justifie peut-être pas d'appliquer le double ou le quadruple de boue.

Tableau 5.15: Hauteurs moyennes après 119 jours de croissance

Numéro de traitement	Quantité d'azote reçue (kg N/ha)	Hauteur moyenne (mm)
1	0	27,9 a ¹
19	1 x 50 = 50	42,2 a
3	1 x 50 = 50	43,6 a
2	1 x 25 = 25	46,1 a
4	1 x 125 = 125	58,9 ab
5	2 x 25 = 50	59,4 ab
20	1 x 125 = 125	63,1 ab
6	2 x 50 = 100	63,2 ab
8	5 x 25 = 100	80,9 abc
7	2 x 125 = 250	82,5 abc
16	1 x 125 = 125	104,7 abc
13	17 x 6,25 = 106	110,1 abc
9	5 x 50 = 250	112,0 abc
12	9 x 50 = 450	114,7 abc
11	9 x 25 = 225	122,5 abc
17	5 x 25 = 125	124,2 abc
15	17 x 25 = 425	124,9 abc
14	17 x 12,5 = 213	125,3 abc
18 (F.C.)	17 x 12,5 = 213	153,7 bc
10 (F.C.)	15 x 25 = 425	162,7 c

F.C.: Fertilisant chimique

¹ : Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P=0,05 (Test de Duncan)

Pris deux à deux, les traitements 15 et 10 puis les traitements 14 et 18 ne montrent pas de différence significative par le test de Duncan. Les traitements chimiques ont cependant une hauteur supérieure à ceux avec boue malgré qu'ils aient reçu respectivement les mêmes quantités d'azote. On pourrait peut-être attribuer la plus grande croissance des semis fertilisés chimiquement aux plus grandes quantités de phosphore qu'ils ont reçues, comparativement aux quantités moindres de P qu'il y avait dans la boue. À ce sujet, Alban (1972) rapporte qu'il y a une relation entre le P du sol et la croissance des pins rouges (Pinus resinosa Ait.).

Les quantités totales de P appliquées dans les traitements avec fertilisant chimique sont de 1,57 g par pot et de 0,78 g pour les traitements 10 et 18 respectivement. Si on prend maintenant les quantités de cet élément ajoutées avec les boues, on retrouve 0,135 g de P et 0,270 g de P par pot pour les traitements 14 et 15 respectivement. C'est donc dire qu'il y a près de 6 fois plus de phosphore assimilable dans les fertilisants chimiques que de phosphore total dans la boue. De telles proportions ont probablement une influence sur les rendements et se traduisent par des concentrations différentes de cet élément dans le feuillage, tel que nous l'avons vu à la section 5.3.2. Le tableau 5.16 résume les chiffres précédents et donne des valeurs pour N et K à titre comparatif.

Les traitements 3 et 19 peuvent être comparés entre eux. Ils ont reçu chacun une dose de 50 kg N/ha et présentent les mêmes hauteurs (voir le tableau 5.15). Puisque le traitement 3 a reçu de la boue en surface, tandis

Tableau 5.16: Quantités totales d'éléments majeurs fertilisants ajoutés par traitement et par répétition (en gramme)

Élément	Numéro de traitement			
	15	10	14	18
N	1,080	1,06	0,540	0,53
P	0,270	1,57	0,135	0,78
K	0,023	0,57	0,011	0,29

que celle du traitement 19 fut incorporée, on peut conclure que cette dernière opération est superflue. La même conclusion s'applique pour les traitements 4 et 20 qui ont reçu chacun 125 kg N/ha dans les mêmes conditions que les traitements 3 et 19. Par contre, le traitement 20 est meilleur que le traitement 19 et le 4 est meilleur que le 3.

Pour les traitements qui ont eu une seule application, les résultats sont en général proportionnels à la dose de boue, sauf pour le traitement 2 qui affiche un meilleur résultat que les traitements 3 et 19. Pour les traitements qui ont eu 2 ou 5 applications, les résultats sont proportionnels à la dose totale. Pour les deux traitements qui ont eu 9 applications, la plus petite dose a mieux réussi que la grande. Pour les traitements qui ont eu 17 applications, la dose ne semble pas avoir d'importance.

Ainsi, pour la croissance en hauteur, les meilleurs résultats ont été obtenus avec le plus grand nombre d'applications de boue, sans égard à la dose. D'un autre côté, pour les applications moins fréquentes, les meilleures croissances sont proportionnelles à la dose totale. Cette croissance en hauteur est particulièrement importante, parce que plus les arbres grandiront vite et plus ils pourront compétitionner avec les mauvaises herbes (Archie et Smith, 1981).

Une dernière comparaison peut être établie entre les traitements sur sable (traitements 4 et 8) et ceux sur sol de pépinière (traitements 16 et 17). Le traitement 16 est couplé au traitement 4 et le traitement 17 au traitement 8. Les traitements sur sol de pépinière ont mieux réussi que

ceux sur sable, avec 45 mm de croissance supplémentaire. L'effet des boues est quand même décelable, car le traitement 17 qui a eu 5 applications de boue est légèrement plus haut que le traitement 16 qui n'a eu qu'une application, les doses totales étant égales. Toutefois, ici encore, le gain supplémentaire ne vaut peut-être pas toutes les manipulations additionnelles que nécessitent l'épandage des boues 5 fois au lieu d'une.

Les valeurs moyennes par répétition des hauteurs ont été portées en graphique; ce sont les figures 5.1 à 5.20. En ordonnée, on retrouve les hauteurs en millimètres et en abscisse le temps, soit 0, 69, 105 et 119 jours (0, 71, 95 et 119 jours pour les traitements 19 et 20). Il est à noter que les échelles des ordonnées varient d'un graphique à l'autre. On remarque d'abord le fléchissement des courbes pour les traitements 1, 2, 3 et 4 (on observe aussi parfois des fléchissements pour quelques répétitions chez d'autres traitements). Il est certain que les semis ne se sont pas contractés à la fin de l'expérience. On doit plutôt attribuer cette anomalie à la méthode de mesure. Pour les premières séries, les plants ont été mesurés en place, dans leur milieu de culture, à partir de la surface du sol. Pour la dernière série, ils ont été mesurés hors terre, le collet servant de point de référence. Ainsi, il est possible que toutes les mesures de la dernière série soient un peu sous-évaluées, ce qui n'empêche pas les comparaisons à l'intérieur de cette séquence.

Les figures 5.1 à 5.20 illustrent différents rythmes de croissance. On constate que les traitements 1, 2, 3, 4 et 19 se dirigent vers un plateau, que les traitements 5, 6 et 20 conservent une croissance régulière et que les traitements 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 ont une

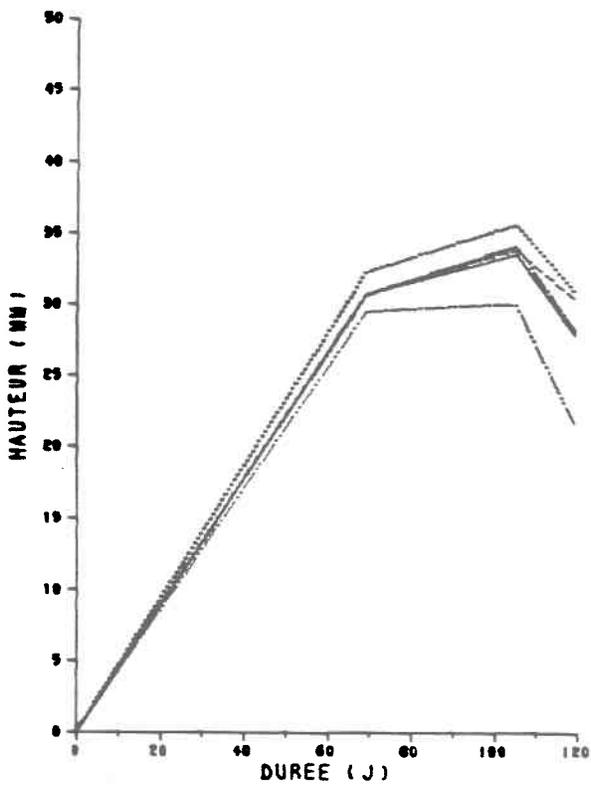


FIGURE 5.1

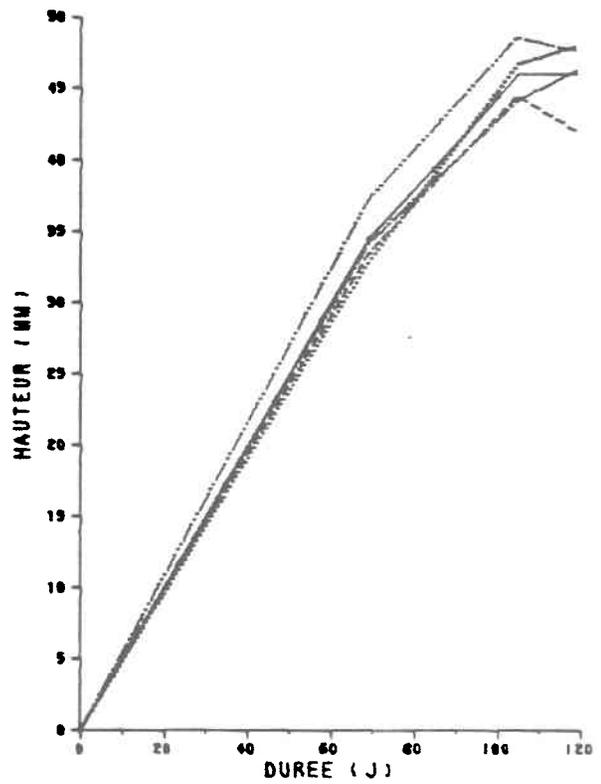


FIGURE 5.2

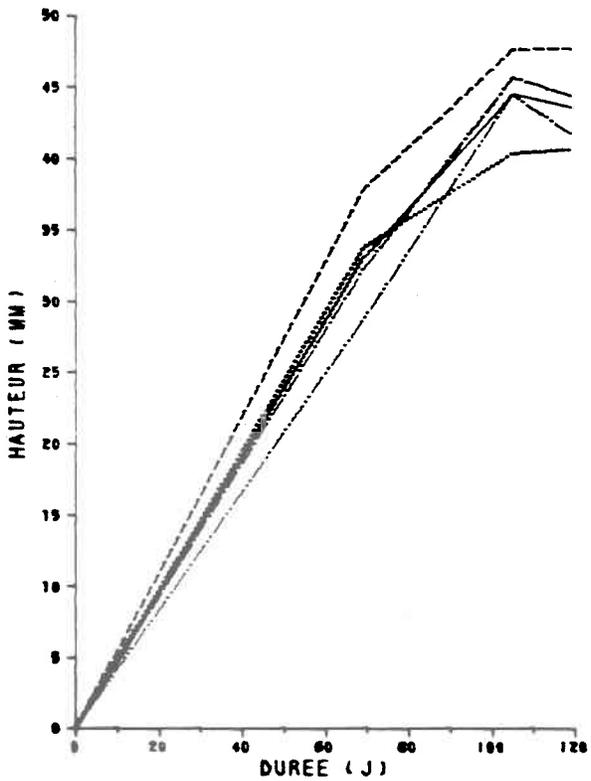


FIGURE 5.3

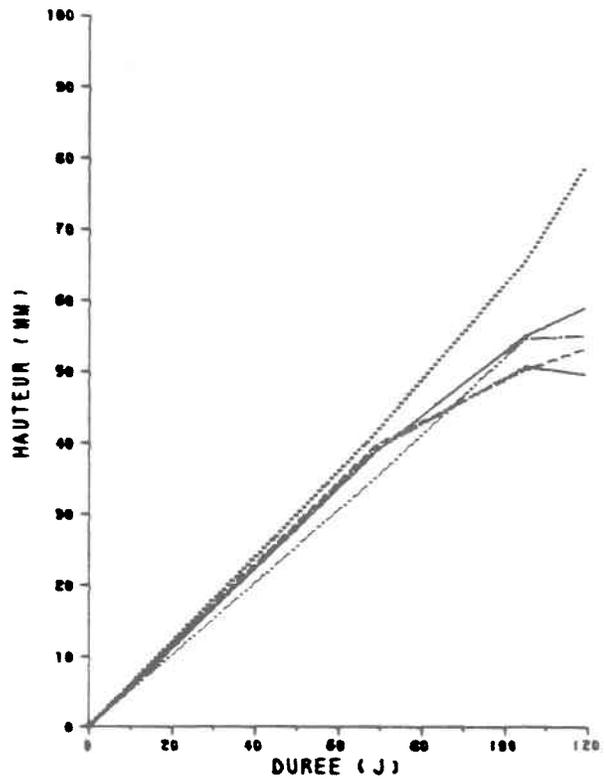


FIGURE 5.4

Figures 5.1 à 5.4: Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour les traitements 1 à 4 respectivement.

Légende: R1 R2 - - - - R3 - - - - R4 - - - - \bar{M} _____

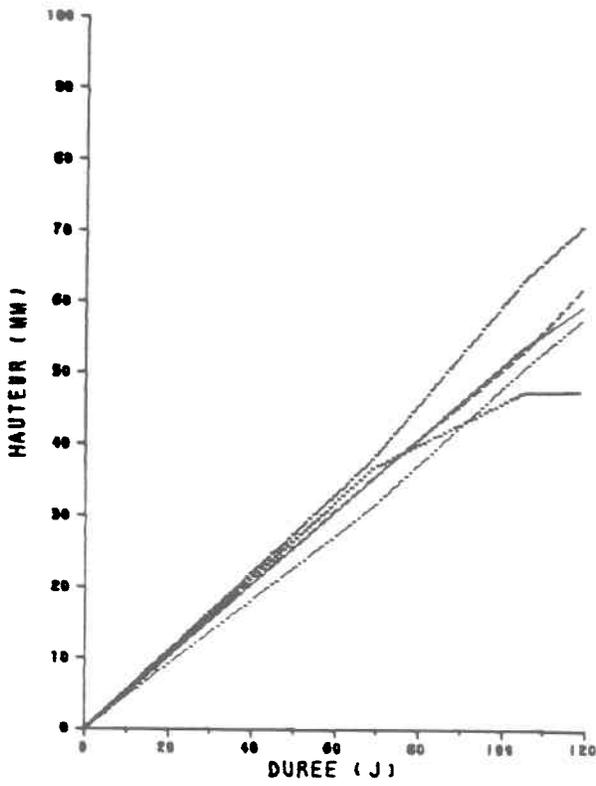


FIGURE 5.5

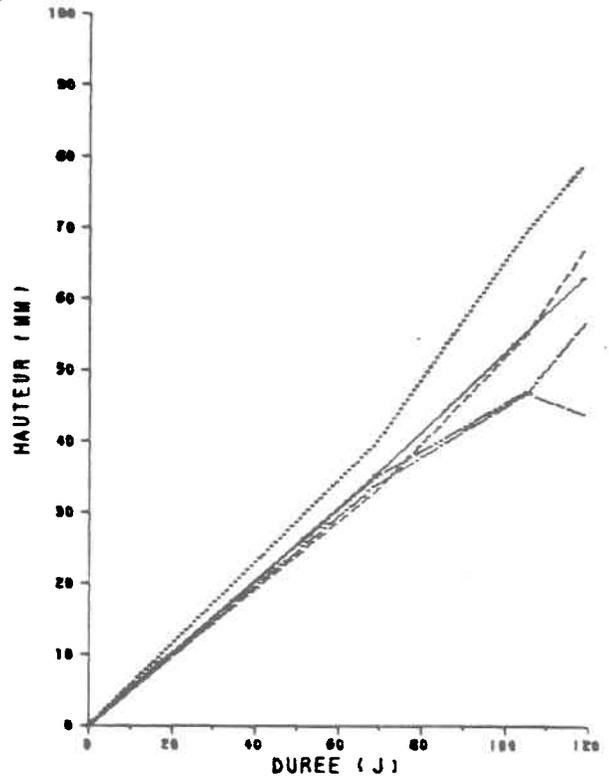


FIGURE 5.6

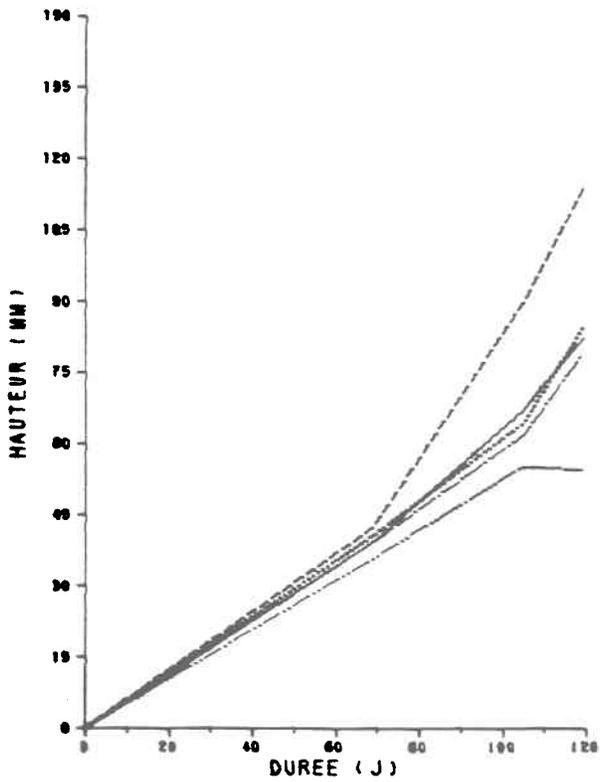


FIGURE 5.7

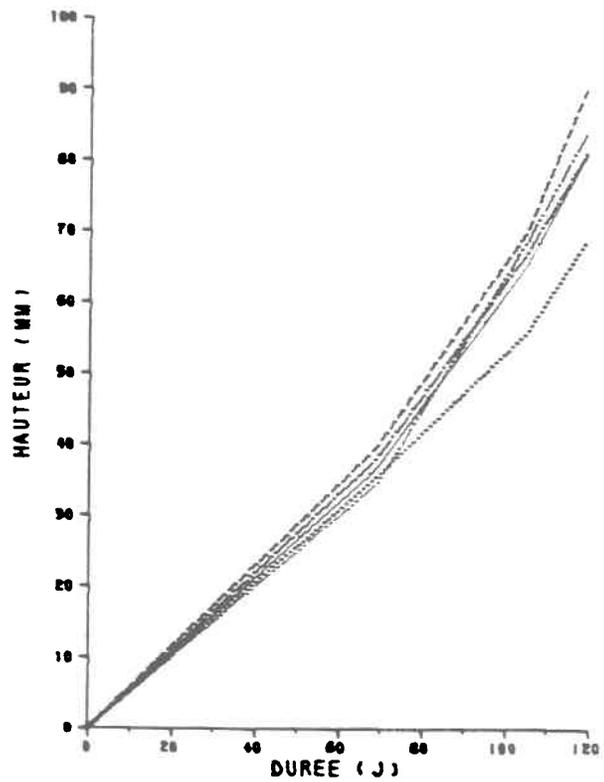


FIGURE 5.8

Figures 5.5 à 5.8: Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour les traitements 5 à 8 respectivement.

Légende: R1 R2 - - - - - R3 - . - . - . R4 - - - - - \bar{M} _____

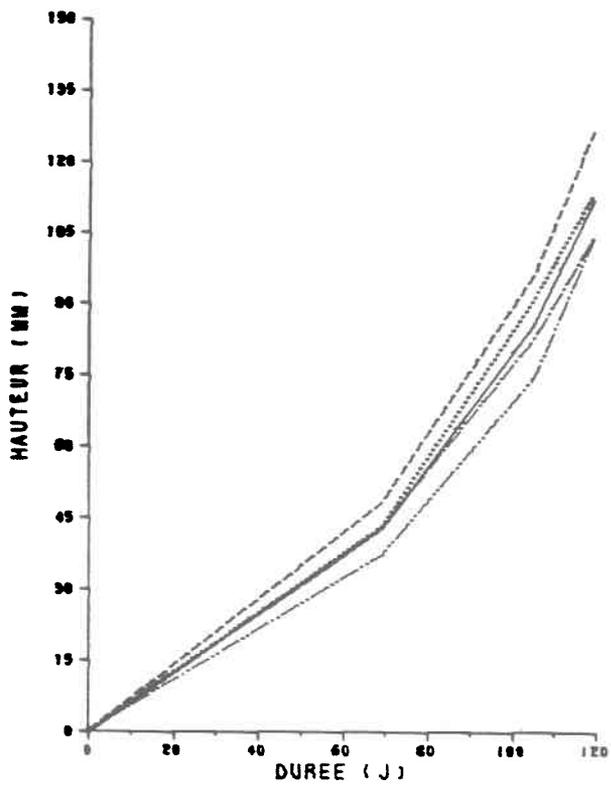


FIGURE 5.9

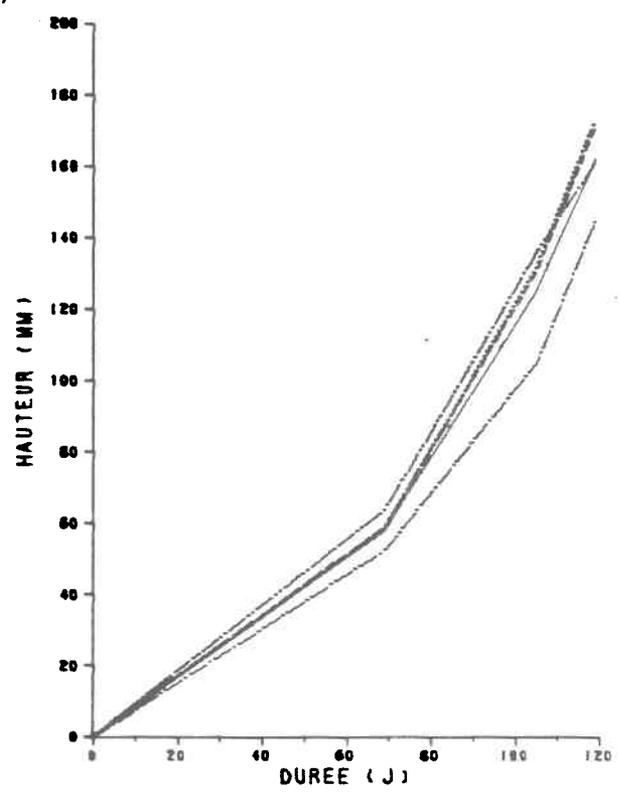


FIGURE 5.10

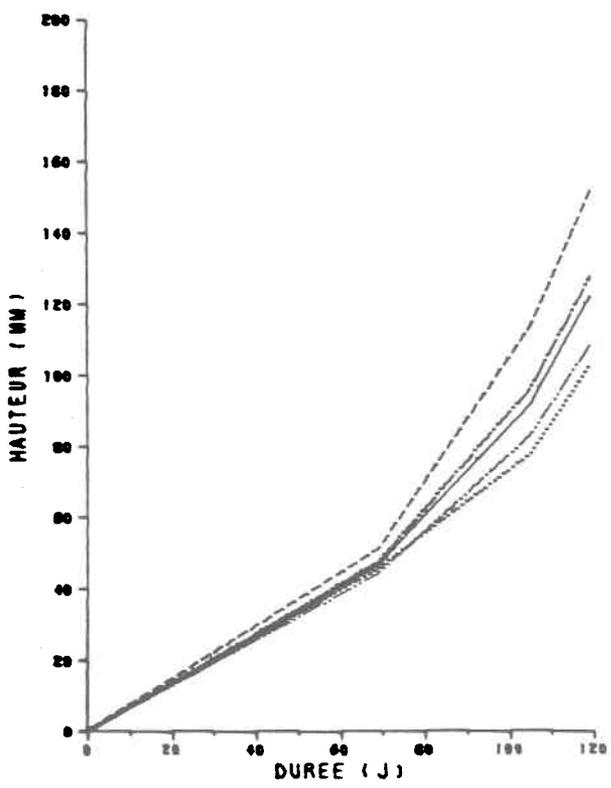


FIGURE 5.11

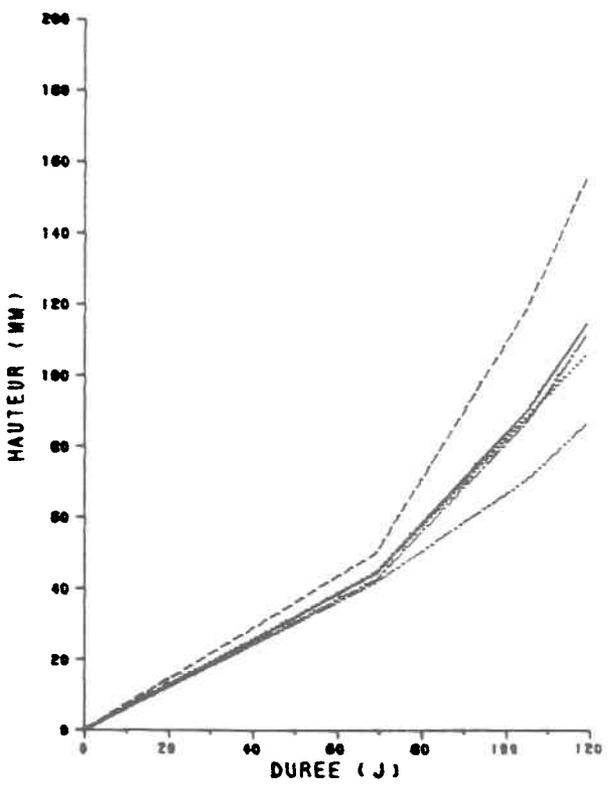


FIGURE 5.12

Figures 5.9 à 5.12: Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour les traitements 9 à 12 respectivement.

Légende: R1 R2 - - - - R3 - - - - R4 - - - - \bar{M} _____

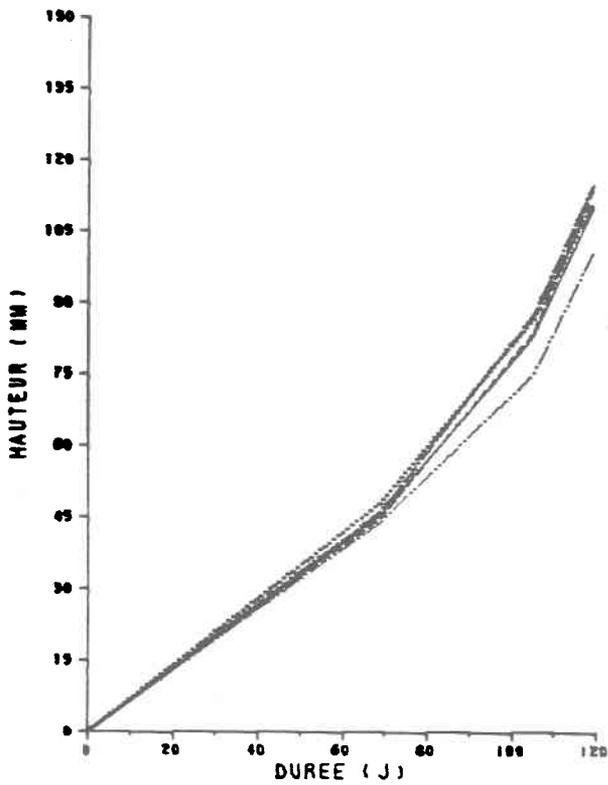


FIGURE 5.13

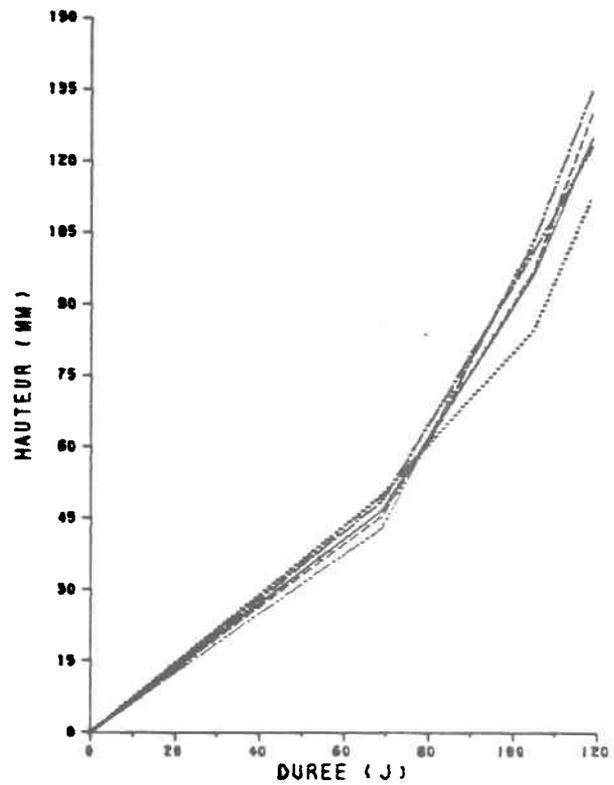


FIGURE 5.14

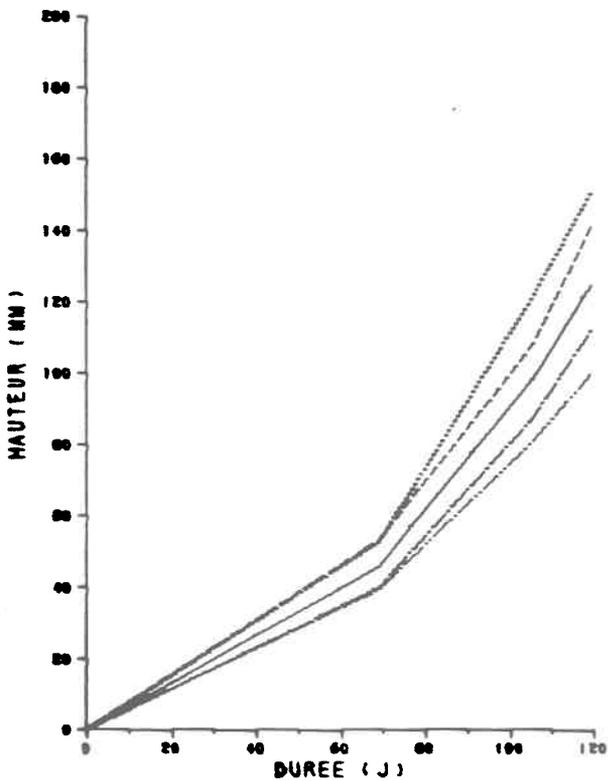


FIGURE 5.15

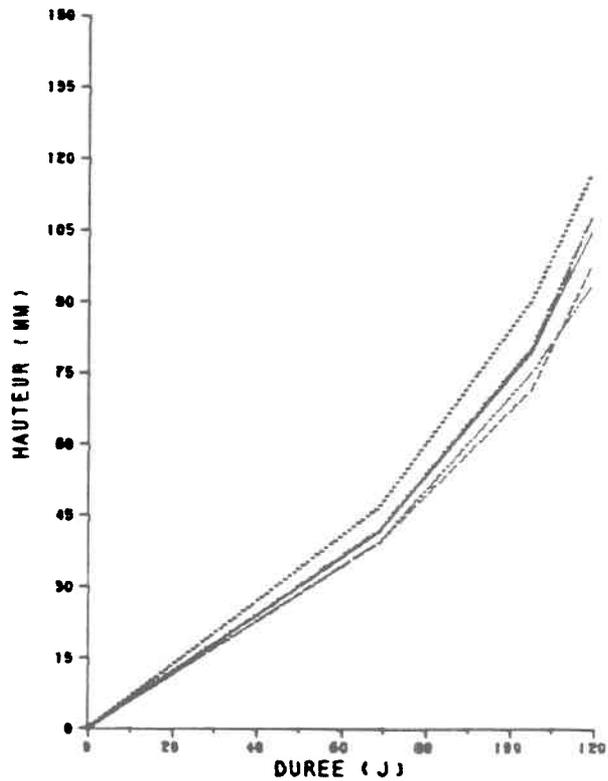


FIGURE 5.16

Figures 5.13 à 5.16: Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour les traitements 13 à 16 respectivement.

Légende: R1 R2 - - - - R3 - - - - R4 - - - - M _____

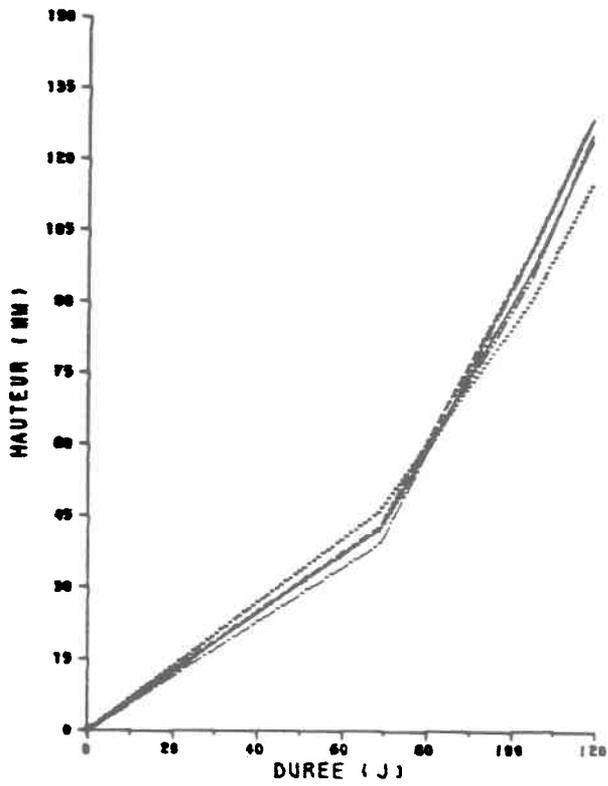


FIGURE 5.17

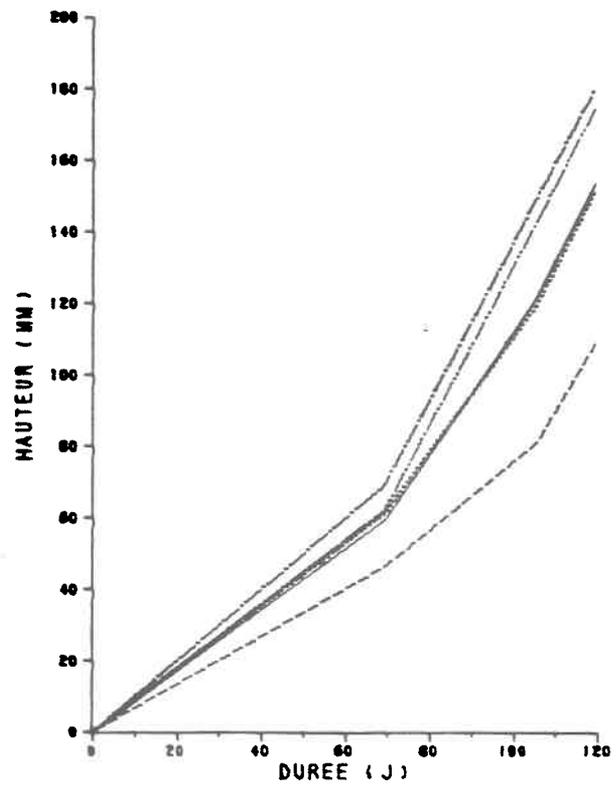


FIGURE 5.18

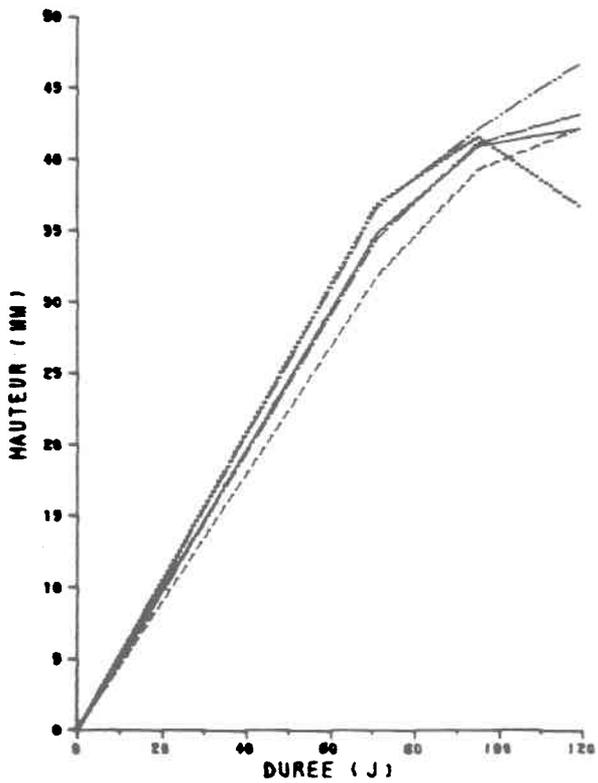


FIGURE 5.19

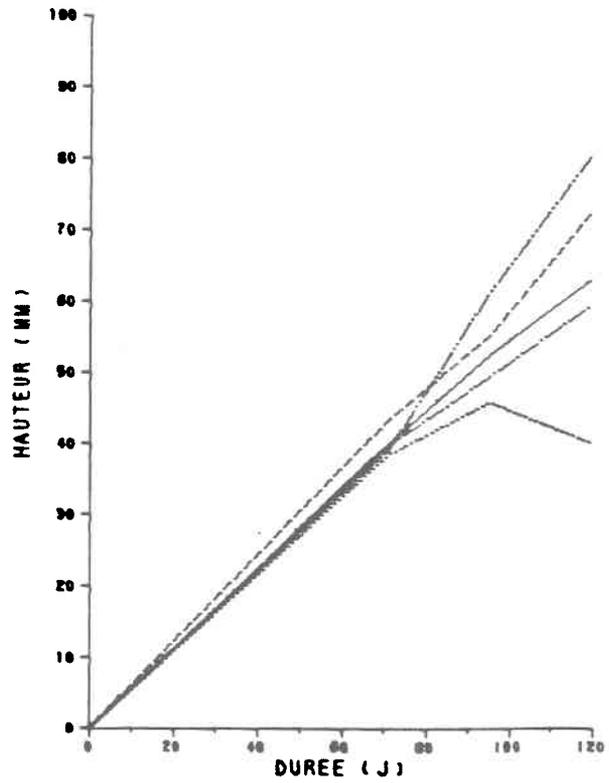


FIGURE 5.20

Figures 5.17 à 5.20: Évolution de la croissance en hauteur dans le temps par répétition pour les traitements 17 à 20 respectivement.

Légende: R1 R2 - - - - - R3 - - - - - R4 - - - - - \bar{M} ———

croissance exponentielle. Peut-être que les semis des traitements 1, 2, 3, 4, 5, 6, 19 et 20 ont utilisé tous les éléments nutritifs qu'ils avaient à leur disposition, alors que les semis des autres traitements ne l'ont pas fait. Si l'expérience s'était poursuivie sur plus d'une année, les différences entre les traitements auraient pu être plus marquées, tel que rapporté par Brockway (1983) qui dit qu'une période de 2 à 5 ans est nécessaire pour obtenir les meilleurs résultats de croissance suite à la fertilisation. Bledsoe et Zasoski (1981) affirment que la croissance est plus marquée à la 2^e année de croissance après fertilisation.

Deux séquences de photos sont présentées pour démontrer l'évolution des plants au cours de l'expérience. La première série, (photos 5.8 à 5.11) illustre le traitement 1. On voit que du début jusqu'à la fin les semis gagnent peu en hauteur. La deuxième série (photos 5.12 à 5.15) présente le traitement 12. On peut constater une évolution en hauteur pour les semis de ce traitement. Les photos G-1 à G-80 sont en annexe G et présentent les 4 répétitions de chaque traitement à la fin de l'expérience.

5.3.4.2 Croissance en diamètre

Des mesures de diamètres au collet ont été prises à la fin de l'expérience. Le tableau 5.17 présente les résultats par ordre croissant. Les résultats des mesures sur chaque semis sont présentées à l'annexe F. Pour l'analyse de variance, le test de F est très significatif entre les traitements et n'est pas significatif entre les répétitions.



Photo 5.8: Traitement 1, répétition 1, après 25 jours de croissance



Photo 5.9: Traitement 1, répétition 1, après 69 jours de croissance

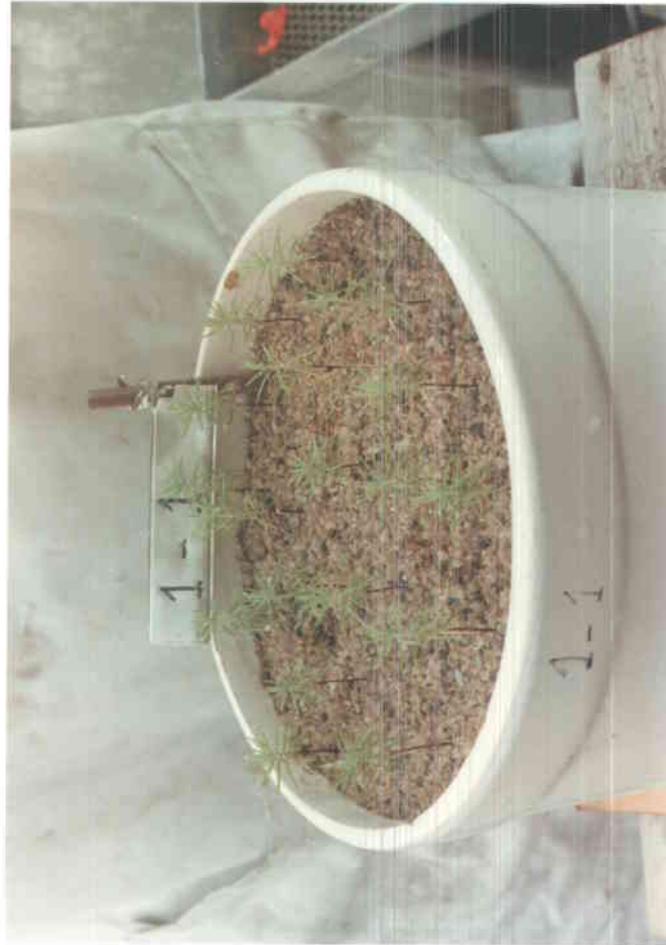


Photo 5.10: Traitement 1, répétition 1 après 105 jours de croissance

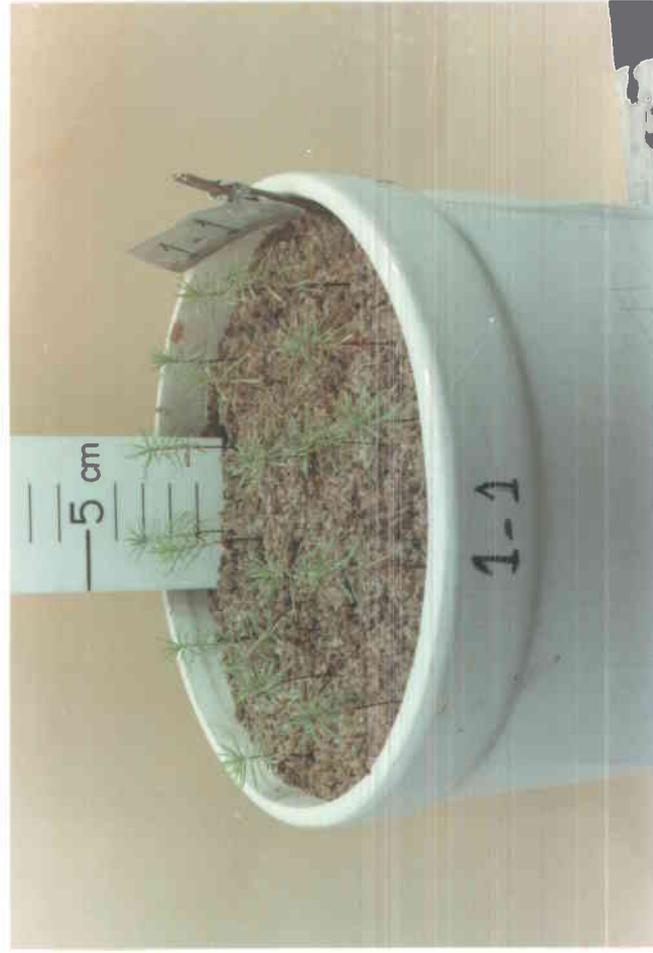


Photo 5.11: Traitement 1, répétition 1, après 119 jours de croissance



Photo 5.12: Traitement 12, répétition 2, après 25 jours de croissance

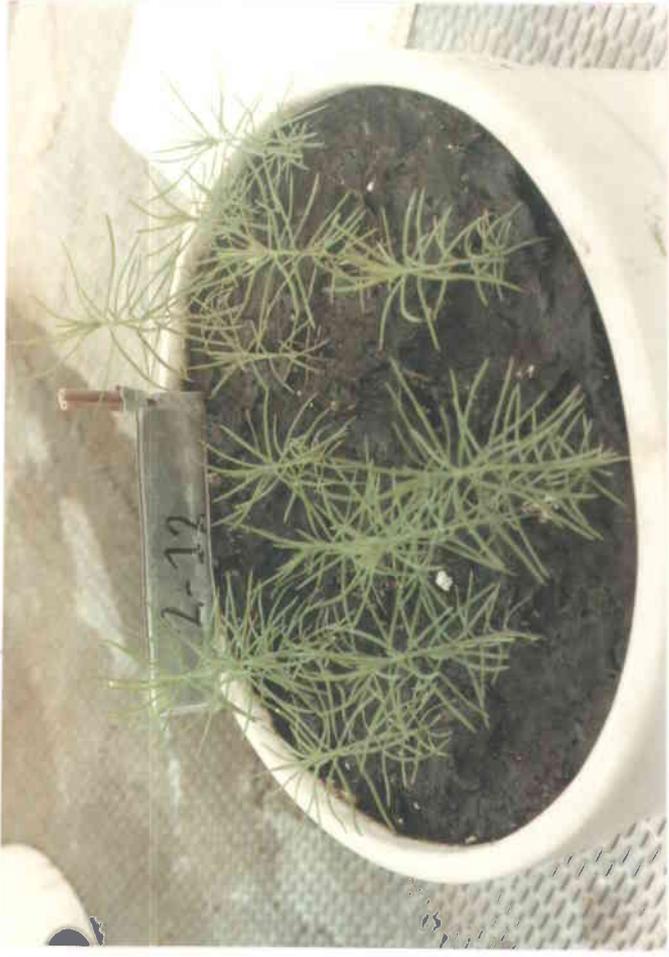


Photo 5.13: Traitement 12, répétition 2, après 69 jours de croissance



Photo 5.14: Traitement 12, répétition 2, après 105 jours de croissance



Photo 5.15: Traitement 12, répétition 2, après 119 jours de croissance

Tableau 5.17: Diamètres moyens au collet à la fin de l'expérience

Numéro de traitement	Quantité d'azote reçue (kg N/ha)	Diamètre moyen (mm)
1	0	0,583 a ¹
3	1 x 50 = 50	0,734 ab
2	1 x 25 = 25	0,766 abc
19	1 x 50 = 50	0,767 abc
5	2 x 25 = 50	0,845 abc
4	1 x 125 = 125	0,907 abc
6	2 x 50 = 100	0,948 abc
20	1 x 125 = 125	1,070 abc
8	5 x 25 = 125	1,100 abcd
7	2 x 125 = 250	1,146 abcd
13	17 x 6,25 = 106	1,425 abcde
16	1 x 125 = 125	1,459 abcde
9	5 x 50 = 250	1,477 abcde
12	9 x 50 = 450	1,596 abcde
11	9 x 25 = 225	1,621 abcde
17	5 x 25 = 125	1,643 abcde
14	17 x 12,5 = 213	1,656 bcde
15	17 x 25 = 425	1,803 cde
18	17 x 12,5 = 213	2,135 de
10	17 x 25 = 425	2,261 e

¹ : Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P=0,05 (Test de Duncan)

Le test de Duncan montre plus de différences significatives pour les diamètres que pour les hauteurs finales. Les moyennes sont classées dans 5 groupes. Les traitements qui ont reçu 17 fois des boues sont ceux qui présentent les meilleurs résultats, (sauf pour le traitement 13). Les traitements qui ont reçu 9 fois des boues ont des diamètres moyens plus gros que ceux qui ont reçu 5 applications. Les traitements qui ont reçu 1 ou 2 applications montrent peu de différences entre eux et sont plus petits que les traitements avec plusieurs applications.

Les traitements avec boue enfouie présentent des résultats légèrement meilleurs, à dose égale, que leurs équivalents fertilisés en surface. Les traitements sur sol de pépinière (traitements 16 et 17) comparés à ceux ayant reçu les mêmes doses sur sable (traitements 4 et 8) présentent de meilleurs résultats. Quant aux 2 traitements avec des fertilisants chimiques (traitements 10 et 18), ils dépassent leurs équivalents fertilisés avec des boues.

5.3.4.3 Mesure de la biomasse

La biomasse est divisée en deux parties: il y a la biomasse souterraine, qui comprend les racines et la biomasse aérienne, qui comprend les tiges et les feuilles, regroupées sous le vocable "tige".

Biomasse des racines

Le tableau 5.18 présente les résultats des mesures de la biomasse moyenne des racines par ordre croissant. (Analyses individuelles à l'annexe F). Pour l'analyse de variance, le test de F est très significatif entre

Tableau 5.18: Biomasse moyenne des racines à la fin de l'expérience

Numéro de traitement	Quantité d'azote reçue (kg N/ha)	Biomasse moyenne des racines (mg)
1	0	6,5 a ¹
3	1 x 50 = 50	9,8 ab
19	1 x 50 = 50	10,5 ab
6	2 x 50 = 100	12,2 ab
2	2 x 25 = 25	13,4 abc
4	1 x 125 = 125	13,8 abc
5	2 x 25 = 50	13,9 abc
7	2 x 125 = 250	15,7 abcd
8	5 x 25 = 125	17,5 bcde
20	1 x 125 = 125	18,5 bcde
9	5 x 50 = 250	23,9 cdef
16	1 x 125 = 125	24,8 def
12	9 x 50 = 450	24,8 def
13	17 x 6,25 = 106	26,1 def
11	9 x 25 = 225	27,6 ef
15	17 x 25 = 425	30,8 f
14	17 x 12,5 = 213	31,4 f
17	5 x 25 = 125	31,8 f
18	17 x 12,5 = 213	54,6 g
10	17 x 25 = 425	58,2 g

¹ : Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P=0,05 (Test de Duncan)

les traitements et significatif entre les répétitions. (Les moyennes des répétitions 2 et 3 sont plus élevées que celles des répétitions 1 et 4).

On remarque qu'il y a plusieurs groupes dans le tableau 5.18. Ce sont les applications répétées qui affichent les meilleurs résultats, mais la dose appliquée à chaque fois pour des traitements ayant reçu le même nombre d'applications ne semble pas avoir d'importance. La même observation s'applique pour les traitements ayant reçu 1, 2 ou 5 applications.

Pour les traitements sur sol de pépinière (traitements 16 et 17), les résultats sont meilleurs avec 5 applications qu'avec une seule. Les traitements chimiques (traitements 10 et 18) se distinguent complètement des traitements avec boue (traitements 2 à 9 et 11 à 17, 19, 20) en formant un groupe distinct, identifié par la lettre "g". Les traitements 14 et 15 se classent dans le même groupe que le traitement 17. On peut donc penser que, pour la durée de l'expérience au moins, le milieu de culture (sable) a été assez amélioré pour permettre d'atteindre des rendements comparables avec ceux du sol de pépinière.

Biomasse des tiges

La biomasse des tiges est une mesure qui est particulièrement intéressante car elle permet de constater plus complètement les résultats d'une expérience. Non seulement intègre-t-elle la hauteur et le diamètre des tiges, mais c'est de plus la valeur qui est finalement recherchée lors de la production de fibres, puisqu'elle donne la matière totale produite. Le tableau 5.19 présente les résultats des biomasses moyennes des tiges par

Tableau 5.19: Biomasse moyenne des tiges à la fin de l'expérience

Numéro de traitement	Quantité d'azote reçue (kg N/ha)	Biomasse moyenne des tiges (mg)
1	0	17,6 a ¹
3	1 x 50 = 50	33,8 ab
19	1 x 50 = 50	37,3 ab
2	1 x 25 = 25	38,3 ab
5	2 x 25 = 50	53,5 ab
4	1 x 125 = 125	56,1 ab
6	2 x 50 = 100	62,3 ab
20	2 x 125 = 125	87,6 bc
8	5 x 25 = 125	90,6 bcd
7	2 x 125 = 250	92,2 bcd
13	17 x 6,25 = 106	149,3 cdef
9	5 x 50 = 250	155,0 def
16	1 x 125 = 125	165,4 ef
12	9 x 50 = 450	176,2 f
11	9 x 25 = 225	190,6 f
14	17 x 12,5 = 213	200,4 f
17	5 x 25 = 125	213,6 f
15	17 x 25 = 425	218,5 f
18	17 x 12,5 = 213	338,1 g
10	17 x 25 = 425	365,0 g

¹ : Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P=0,05 (Test de Duncan)

ordre croissant. (Analyses individuelles à l'annexe F). Pour l'analyse de variance, le test de F est très significatif entre les traitements et non significatif entre les répétitions.

On constate la présence de 7 groupes. Les traitements ayant les plus petites masses sont ceux qui ont reçu une seule application de boue. Par contre, la dose totale d'azote combinée au nombre d'applications semble avoir un effet. C'est ainsi que la dose de 125 kg N/ha est meilleure que les doses de 50 kg N/ha et 25 kg N/ha. De plus, à l'intérieur de la dose de 125 kg N/ha, 5 applications de 25 kg N/ha ont produit plus de biomasse qu'une seule application de 125 kg N/ha.

Si on passe aux traitements ayant reçu plus d'applications (groupe f), ce sont ceux qui ont reçu plus de boue en tout qui présentent les meilleurs résultats, sauf pour les traitements 11 et 12 où c'est l'inverse. Ici encore, les traitements sur sol de pépinière (traitements 16 et 17) se classent dans les groupes les plus productifs et ceux avec des fertilisants chimiques (traitements 10 et 18, groupe g) affichent des résultats qui les distinguent de tous les autres groupes (a à f). Il convient de rappeler que cela peut être attribué aux plus grandes quantités de phosphore contenues dans les fertilisants chimiques comparativement à celles contenues dans les boues, tel que discuté précédemment à la section 5.3.2.1 (croissance en hauteur).

5.3.4.4 Conclusions

Globalement, les boues sont un bon fertilisant forestier quand il s'agit d'améliorer un substrat pour la croissance du mélèze laricin (L. laricina). Même si cette expérience a été menée en serres, rien n'indique que des résultats différents seraient obtenus sur le terrain. Le tableau 5.20 est un sommaire de toutes les mesures de croissance effectuées et présentées aux tableaux 5.13 à 5.19 (excepté le tableau 5.16).

Il est difficile d'identifier la dose et le nombre d'applications exactes qu'il serait idéal de faire. D'une part, les résultats expérimentaux indiquent que, pour une même dose totale, la production de biomasse est plus grande avec des applications répétées comparativement à une application massive (le traitement 9 est meilleur que le traitement 7 et le 8 est meilleur que le 4). D'autre part, les coûts associés à plusieurs applications sont plus élevés. De plus, pour un même nombre d'applications, des doses plus grandes produisent de meilleurs résultats (le traitement 15 est meilleur que le 14, lui-même meilleur que le 13). Les résultats indiquent aussi qu'un plus grand nombre d'applications avec des petites doses à chaque fois est meilleur qu'un plus petit nombre d'applications avec des doses plus grandes (le traitement 14 est meilleur que le traitement 12). Le traitement 13 est une exception car cette dose de 6,25 kg N/ha par semaine ne produit jamais les meilleurs résultats.

Il aurait été intéressant d'étudier le comportement d'un traitement ayant reçu une application (massive) de 425 ou 450 kg N/ha pour comparer avec les traitements qui ont reçu cette dose de façon cumulative.

Tableau 5.20: Résultats des moyennes de croissance en hauteur à divers temps et des diamètres, masses foliaires et racinaires à la fin de l'expérience

Numéro de traitement	Caractéristiques finales	H après 69 jours ² (mm)	H après 105 jours ³ (mm)	H après 119 jours ³ (mm)	Ø après 119 jours (mm)	Masse foliaire moyenne après 119 jours (mg)	Masse racinaire moyenne après 119 jours (mg)
1	Témoin, Sa	0					
2	B, Sa, Su, 1x 25 = 25.1	30,8 a ⁴	33,6 a	27,9 a	0,58 a	17,6 a	6,5 a
3	B, Sa, Su, 1x 50 = 50	34,5 abc	46,1 abc	46,1 a	0,77 abc	38,3 ab	13,4 abc
4	B, Sa, Su, 1x125 = 125	33,1 ab	44,5 ab	43,6 a	0,73 ab	33,8 ab	9,8 ab
5	B, Sa, Su, 2x 25 = 50	38,9 abc	55,1 abc	58,9 ab	0,91 abc	56,1 ab	13,8 abc
	B, Sa, Su, 2x 25 = 50	35,3 abc	53,7 abc	59,4 ab	0,85 abc	53,5 ab	13,9 abc
6	B, Sa, Su, 2x 50 = 100	35,4 abc	55,4 abc	63,2 ab	0,95 abc	62,3 ab	12,2 ab
7	B, Sa, Su, 2x125 = 250	39,6 abc	67,5 abc	82,5 abc	1,15 abcde	92,2 bcd	15,7 abcde
8	B, Sa, Su, 5x 25 = 125	36,9 abc	65,5 abc	80,9 abc	1,10 abcde	90,6 bcd	17,5 bcde
9	B, Sa, Su, 5x 50 = 250	42,8 abc	86,0 abc	112,0 abc	1,48 abcde	155,0 def	23,9 cdef
10	Fc, Sa, Su, 17x 25 = 425	58,2 bc	125,5 c	162,7 c	2,26 e	365,0 g	58,2 g
11	B, Sa, Su, 9x 25 = 225	47,2 abc	92,2 abc	122,5 abc	1,62 abcde	190,6 f	27,6 ef
12	B, Sa, Su, 9x 50 = 450	44,3 abc	90,1 abc	114,7 abc	1,60 abcde	176,2 f	24,8 def
13	B, Sa, Su, 17x 6,25 = 106	45,8 abc	83,4 abc	110,1 abc	1,43 abcde	149,3 cdef	26,1 def
14	B, Sa, Su, 17x 12,5 = 213	46,8 abc	96,5 abc	125,3 abc	1,66 bcde	200,4 f	31,4 f
15	B, Sa, Su, 17x 25 = 425	46,2 abc	98,3 abc	124,9 abc	1,80 cde	218,5 f	30,8 f
16	B, Sp, Su, 1x125 = 125	41,7 abc	79,5 abc	104,7 abc	1,46 abcde	165,4 ef	24,8 def
17	B, Sp, Su, 5x 25 = 125	42,6 abc	97,3 abc	124,2 abc	1,64 abcde	213,6 f	31,8 f
18	Fc, Sa, Su, 17x 12,5 = 213	59,4 c	121,7 bc	153,7 bc	2,14 de	338,1 g	54,6 g
19	B, Sa, En, 1x 50 = 50	34,9 abc	41,0 ab	42,2 a	0,77 abc	37,3 ab	10,5 ab
20	B, Sa, En, 1x125 = 125	40,2 abc	52,7 abc	63,1 ab	1,07 abc	87,6 bc	18,5 bcde
	1 = kg N/ha	2 = après 71 jours pour les traitements 19 et 20	3 = après 95 jours pour les traitements 19 et 20				

⁴ : Dans une même colonne, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05 (Test de Duncan)

- H = hauteur moyenne
- Ø = diamètre moyen
- B = traitement avec boue
- Fc = traitement avec fertilisant chimique
- Sa = traitement sur sable
- Sp = traitement sur sol de pépinière
- Su = boue appliquée en surface
- En = boue enfouie dans 10 cm de sable

Finalement, nous ne pouvons pas déterminer si l'enfouissement est préférable à la fertilisation en surface, les différences entre ces traitements n'étant pas assez importantes.

5.3.5 RELATIONS DE CROISSANCE

Le but ultime de la fertilisation est d'augmenter la croissance. Ainsi, que les plantes présentent de hautes concentrations en éléments nutritifs et/ou en métaux n'est pas important en soi si ces concentrations ne se traduisent pas par plus de matière ligneuse (Brockway et al., 1979).

Dans cette section, nous étudierons par régression multiple les quatre variables discutées dans la section 5.3.4, soit la hauteur finale, le diamètre final, la masse racinaire et la masse des tiges, en fonction des quantités de boues ajoutées, des concentrations des éléments dans les tiges et les racines et des éléments échangeables et totaux dans les profils supérieurs des substrats de croissance. Nous chercherons quelles sont les variables qui ont le plus d'influence sur la production. Les résultats des régressions multiples retenues sont présentés à l'annexe H.

5.3.5.1 Croissance en hauteur

Pour la croissance en hauteur finale, la variable la plus significative est la concentration en azote des tiges, ce qui est aussi rapporté par Brazeau et Bernier (1973). Avec un coefficient de corrélation de 0,882 cette variable permet d'expliquer 78% de la variation.

La deuxième variable la plus significative est la concentration en phosphore des racines. Il y a une relation entre cette variable et la croissance en hauteur et le coefficient de corrélation est de 0,869. Ajoutée à la première variable, elle permet d'expliquer un supplément de 5,4% de la variation. Nous avons donc maintenant un modèle à 2 variables indépendantes qui explique 83% de la variation, avec un coefficient de corrélation de 0,912.

La troisième variable la plus significative est la concentration en azote des racines. Avec la croissance en hauteur, elle a un coefficient de corrélation de 0,865. Cependant, avec la méthode de régression multiple, ce n'est pas cette variable qui obtient le troisième rang, mais la quantité de boue appliquée. Avec un coefficient de corrélation de 0,736 et ajoutée aux 2 premières variables indépendantes, nous avons un modèle à 3 variables qui explique 86% de la variation avec un coefficient de corrélation de 0,925.

Nous pouvons continuer ainsi jusqu'à l'épuisement de toutes les variables indépendantes. Le modèle se rallonge et se complique à chaque fois pour n'obtenir qu'une légère augmentation du pourcentage de la variation expliquée. Nous avons voulu nous en tenir aux modèles les plus simples possibles. Ainsi, on peut représenter la fonction de croissance en hauteur des mélèzes laricins croissant sur sable et fertilisés avec des boues dans notre expérience par:

$$Y_1 = -39,7 + 57,8 ([N]_{\text{tiges}}) + 0,02 ([P]_{\text{racines}})$$

avec 83% de la variation expliquée et un coefficient de corrélation de 0,912.

5.3.5.2 Croissance en diamètre

Pour la croissance en diamètre final, la variable la plus significative est encore la concentration en azote des tiges. Cette fois-ci, elle a un coefficient de corrélation de 0,869 et permet d'expliquer 75% de la variation.

La deuxième variable la plus significative est de nouveau la concentration en phosphore dans les racines. Ajoutée à la première, elle permet d'expliquer 5,9% de la variation supplémentaire et un coefficient de corrélation de 0,864.

La troisième variable est la quantité de boue ajoutée en kg/ha (base sèche). Ajoutée aux 2 premières, elle permet d'expliquer 6,0% de la variation supplémentaire et a un coefficient de corrélation de 0,793.

La fonction de croissance en diamètre des mélèzes laricins croissant sur sable et fertilisés avec des boues dans notre expérience peut être représentée par:

$$Y_2 = 8,56 + 27,10 ([N]_{\text{tiges}}) + 0,02 ([P]_{\text{racines}}) + 0,0045 (\text{Quantité de boue appliquée, en kg/ha, base sèche}).$$

avec 87% de la variation expliquée et un coefficient de corrélation de 0,935.

5.3.5.3 Masse racinaire

Pour la masse racinaire, la variable la plus significative est la concentration de phosphore dans les racines. Cette variable permet d'expliquer 62% de la variation et a un coefficient de corrélation de 0,787.

La deuxième variable la plus significative est la concentration en azote des racines. Elle a un coefficient de corrélation de 0,682. Cependant, avec la méthode de régression multiple, ce n'est pas elle qui obtient le second rang, mais la concentration de fer dans les tiges. Cette variable, ajoutée à la première, permet d'expliquer 7,0% de variation supplémentaire malgré son coefficient de corrélation avec la masse racinaire de -0,065. Ce modèle à 2 variables indépendantes explique 69% de la variation et a un coefficient de corrélation de 0,830.

La variable qui obtient le troisième rang est la concentration d'aluminium échangeable dans le profil supérieur des sols. Le pourcentage de variation supplémentaire expliquée est de 3,8% et le coefficient de corrélation de ce modèle est de 0,853.

La variable qui obtient le quatrième rang est la concentration de fer dans les racines. Le pourcentage de variation supplémentaire expliquée est de 4,2% et le coefficient de corrélation de ce modèle est de 0,877.

Il semble inutile d'aller plus loin et la fonction de la masse racinaire des mélèzes laricins croissant sur sable et fertilisés avec des boues dans notre expérience peut-être représentée par:

$$Y_3 = -207 + 0,09 ([P]_{\text{racines}}) + 0,67 (|Al\text{-}\acute{e}ch|_{\text{sol-haut}}) + 0,05 (|Fe|_{\text{racines}}) - 0,50 (|Fe|_{\text{tiges}})$$

avec 77% de la variation expliquée et un coefficient de corrélation de 0,877.

Malgré que cette fonction soit plus complexe que les deux précédentes, elle n'explique pas plus de variation et son coefficient de corrélation est même plus bas que ceux des deux autres fonctions.

5.3.5.4 Masse des tiges

Pour la masse des tiges, la variable la plus significative est la concentration en phosphore des racines. Cette variable permet d'expliquer 77% de la variation et a un coefficient de corrélation de 0,877.

La deuxième variable choisie est la concentration d'aluminium échangeable dans les profils supérieurs des sols. Cette variable permet d'expliquer 2,9% de variation supplémentaire et son coefficient de corrélation est de 0,640.

Le troisième variable choisie est la concentration de NO_3^- dans les profils supérieurs des sols. Cette variable permet d'expliquer 2,8% de la variation supplémentaire et a un coefficient de corrélation de 0,689.

La fonction de la masse des tiges des mélèzes laricins croissant sur sable et fertilisés avec des boues dans notre expérience peut être représentée par:

$$Y_4 = -2\,047 + 0,79 ([P]_{\text{racines}}) + 3,69 ([Al\text{-}\acute{e}ch]_{\text{sol-haut}}) + 21,01 [NO_3]_{\text{sol-haut}}$$

avec 83% de la variation expliquée et un coefficient de corrélation de 0,909.

5.3.5.5 Conclusions

Cet exercice nous permet de constater que la quantité de boue appliquée a peu d'effets directs sur la production de biomasse dans cette expérience. Les variables qui ont le plus d'effet sur cette production sont les concentrations en azote et en phosphore dans les tissus végétaux. Les concentrations en K n'entrent pas en jeu, ce qui suggère qu'il n'était pas limitatif. Morrison (1974) arrive aux mêmes conclusions.

Il est important de rappeler que ces éléments nutritifs proviennent des boues. Miller (1983) rapporte que la minéralisation de l'azote dans les sols est bien corrélée à la croissance des arbres. Ainsi, les concentrations d'azote et de phosphore dans les tiges ont des coefficients de corrélation avec les quantités de boues appliquées de 0,726 et 0,606 respectivement, alors que ces mêmes éléments dans les racines ont des coefficients de corrélation de 0,682 et 0,601 respectivement. Il semble donc probable que c'est l'ajout des boues qui a favorisé la croissance grâce à l'azote (Cole, 1981) et au phosphore qu'elles contiennent et que la présence des autres éléments n'a pas eu d'effet significatif.

5.4 ANALYSE COMPLÉMENTAIRE SUR LES MÉTAUX LOURDS

Tel que présenté à la section 5.2.3, une analyse complémentaire a été faite pour 4 métaux lourds, soit le cadmium, le chrome, le nickel et le plomb. Le tableau 5.21 présente les résultats des concentrations moyennes et des écarts-types de ces métaux lourds dans les tissus végétaux pour les traitements 1, 2 et 15. Le traitement 2 est le résultat de la répétition 4, alors que pour les traitements 1 et 15, ce sont les moyennes des 4 répétitions. Les analyses individuelles sont fournies à l'annexe I.

On constate que les métaux lourds ne se concentrent pas dans les tiges. On observe même des concentrations supérieures dans le traitement 1 que dans le traitement 15. Il est possible que l'effet de dilution, qui a été discuté à la section 5.3.2, soit responsable de ces résultats. Sopper et Kerr (1980) arrivent à la même conclusion. Cependant, une concentration de 4,3 µg/g de nickel dans les tiges du traitement 1 pourrait résulter d'une contamination, car rien ne peut expliquer la présence de ce métal dans ces tissus. De plus, les analyses de percolat du traitement 21 (tableau 5.22) indiquaient toujours des concentrations de Ni sous le seuil de détection (<0,01 mg/l). Les analyses individuelles de percolat sont présentées à l'annexe E. On peut donc supposer que l'eau d'irrigation en était exempte.

En ce qui concerne les racines, les concentrations sont plus élevées dans les tissus du traitement 15 que dans ceux du traitement 2. Il semble toutefois que les métaux lourds restent dans cette partie des plantes et ne sont pas transférés aux tiges, tel que rapporté par Morin (1981). On assiste donc à une certaine forme d'immobilisation ou de décontamination du

Tableau 5.21: Concentrations moyennes des métaux lourds dans quelques tissus végétaux

Tissus	Numéro de traitement	Concentrations des métaux en $\mu\text{g/g}$			
		Cd	Cr	Ni	Pb
Tiges	1	0,110 \pm 0,022	1,070 \pm 0,143	4,288 \pm 1,356	< S.D.
	15	0,095 \pm 0,018	1,022 \pm 0,169	1,597 \pm 0,383	< S.D.
Racines	2	0,120	2,510	2,998	< S.D.
	15	0,356 \pm 0,060	3,172 \pm 1,605	5,385 \pm 0,830	0,175 \pm 0,236
Seuil de détection de l'appareil ($\mu\text{g/l}$)		0,2	1,0	3,0	2,0

sol, si on peut s'exprimer ainsi. On ne peut pas établir que les métaux lourds ont ralenti la croissance, comme en témoignent les résultats où le traitement 15 présente les meilleures performances pour toutes les mesures effectuées.

Le tableau 5.22 présente aussi les résultats des concentrations moyennes et écarts-types pour les profils supérieurs et inférieurs du sable utilisé dans 2 traitements pour la croissance des semis; ce sont les moyennes de 4 répétitions. (Les analyses individuelles sont fournies à l'annexe I). Ce tableau présente aussi les résultats des essais de percolation en serres. Pour les sols, les valeurs sont le résultat d'un seul échantillon, tandis que pour les percolats, ce sont les moyennes de 5 cueillettes (une répétition par traitement).

Il n'y a pas de différence significative entre les traitements 1 et 15 pour les deux profils. Même si le traitement 1 n'a pas reçu de boue, il présente quand même des concentrations qui peuvent être qualifiées de bruit de fond. Le traitement 15, qu'a reçu plus de 10 000 kg/ha de boue (base sèche) ne présente pas d'enrichissement en métaux lourds. On peut supposer que les métaux ont été retenus dans la couche de boue séchée en surface et/ou qu'une partie est passée dans les semis (surtout dans les racines).

Pour les essais de percolation (traitements 21 à 25), les concentrations en Cr et Ni sont supérieures à celles du sable utilisé pour l'expérience de croissance. Pour le Cd, les concentrations entre les deux expériences ne sont pas significativement différentes et pour le Pb, l'expérience de croissance affiche une plus forte concentration dans ses sols que l'essai de percolation.

Tableau 5.22: Concentrations moyennes des métaux lourds dans quelques sols utilisés pour les expériences et dans les percolats.

Profil	Numéro de traitement	Concentrations des métaux en µg/g			
		Cd	Cr	Ni	Pb
Supérieur	1	0,010 ± 0,001	20,0 ± 14,6	1,1 ± 0,7	0,34 ± 0,07
	15	0,012 ± 0,002	22,5 ± 4,9	1,9 ± 0,3	0,30 ± 0,04
	21	0,010	42,0	2,2	0,10
	22	0,010	36,0	1,9	0,16
	23	0,009	35,0	2,8	0,10
	24	0,009	34,0	2,0	0,09
	25	0,009	24,0	1,8	0,09
Inférieur	1	0,009 ± 0,001	21,8 ± 6,7	0,7 ± 0,8	0,34 ± 0,01
	15	0,008 ± 0,001	23,0 ± 6,7	0,9 ± 0,7	0,38 ± 0,06
	21	0,008	28,0	2,1	0,09
	22	0,008	28,0	2,4	0,09
	23	0,008	19,0	1,4	0,09
	24	0,009	23,0	2,2	0,10
	25	0,009	17,0	<S.D.	0,10
Seuil de détection (mg/l)		0,0002	0,060	0,070	0,002
		Concentration des métaux en mg/l			
Percolats	21	<0,002	0,006	<0,01	0,018
	22	<0,002	<0,003	<0,01	<0,015
	23	<0,002	<0,003	<0,01	<0,015
	24	<0,002	<0,003	<0,01	<0,015
	25	<0,002	0,005	<0,01	<0,015
Seuil de détection (mg/l)		0,002	0,003	0,01	0,015

On peut expliquer les faibles concentrations de Cd, Cr et Ni résiduelles dans les sols par leur faibles concentrations dans les boues et à une adsorption possible dans la couche de boue séchée en surface. On doit cependant noter que les traitements 21 et 25, qui n'ont pas reçu de boue, ont les plus fortes concentrations en Cr dans leurs percolats, soit 0,006 mg/l et 0,005 mg/l en moyenne pour les 5 cueillettes. Pour le plomb, malgré sa concentration de 680 mg/kg (base sèche) dans la boue, rien ne peut expliquer la différence entre les expériences, sauf une concentration initiale plus élevée dans le sable Loma (expérience de croissance) que dans le sable Houde (essai de percolation). De plus, il n'y a pas de différence entre les traitements d'une même expérience. Cependant, dans les percolats, le traitement 21 est le seul à avoir des concentrations de Pb supérieure à la limite de détection, soit 0,018 mg/l. On peut donc se demander si l'eau d'irrigation utilisée contiendrait des traces de Cr et de Pb, ou si ces résultats sont le produit d'erreurs expérimentales. Le traitement 21 (témoin) est celui qui présente les plus fortes concentrations en Cr pour les deux profils et pour le percolat.

Tel que discuté dans la section 2.3.1 (toxicité potentielle des métaux lourds), les métaux lourds ne jouent pas un rôle négatif important dans la fertilisation par les boues, si celles-là ne sont pas trop contaminées. Nous ne pouvons pas conclure que les sols utilisés pour la croissance ont été enrichi de façon significative ni que la croissance des semis fut ralentie. Il semble raisonnable d'avancer qu'une grande partie des métaux lourds soit restée dans la couche de boue séchée en surface, tel que rapporté par Pommei (1979b). La boue anaérobie de l'usine d'épuration des eaux de la base militaire de Valcartier pourrait avantageusement être utilisée comme fertilisant forestier.

CONCLUSION

CONCLUSION

Des conclusions ont déjà été présentées dans les différentes sections de cette thèse; celle-ci se veut donc générale.

La mise en place des usines d'épuration des eaux usées au Québec génèrera un nouveau produit, les boues résiduares. La gestion de ce produit est anticipée ici et son recyclage apparaît comme la solution la plus rationnelle. D'une part, la ressource est optimisée et, d'autre part, un débouché définitif lui est trouvé.

L'étude a démontré que les risques potentiels, soit les organismes pathogènes, les métaux lourds et les composés synthétiques toxiques ne constituent pas d'obstacle majeurs à l'utilisation des boues résiduares pour la production de matière ligneuse. Il faut cependant que les boues soient stabilisées et que les concentrations de substances indésirables ne soient pas trop élevées.

La présence des nitrates dans les eaux souterraines semble être la seule opposition valable à l'utilisation des boues. Ce phénomène est naturel, mais peut être contrôlé en calculant les quantités d'azote appliquées dans les boues résiduares. Nous faisons cependant remarquer au lecteur qu'avec la fertilisation chimique, la nitrification est aussi importante et, pourtant, on ne s'en soucie guère. On peut donc se demander si cet aspect négatif ne pourrait pas être aussi écarté, surtout quand les boues d'épuration sont employées dans des lieux où la nappe phréatique est profonde.

Notre expérience est allée dans le même sens que la revue de littérature; plus de biomasse forestière a été produite en utilisant les boues résiduairees comme fertilisant et aucune contamination en métaux lourds des eaux de percolation n'a été observée.

Cependant, il aurait été intéressant de dresser des bilans par élément comprenant ce qui était initialement présent dans les substrats de croissance, ce qu'on a ajouté avec la fertilisation et l'irrigation, ce qu'on a retiré par la biomasse, ce qui est resté dans les sols et ce qui a été perdu par lessivage. Cependant, il n'était pas possible d'évaluer la quantité d'eau d'irrigation distribuée par le système d'arrosage automatique (donc les quantités d'éléments amenées avec l'irrigation, même si leurs concentrations étaient modestes) à cause de sa trop grande variation temporelle au niveau du débit (fonction de la pression variable de l'aqueduc). De plus, les pertes par évaporation ne pouvaient pas être mesurées. Aussi, la récolte des percolats n'a été entreprise que lorsque nous nous sommes aperçus de leur existence, ce qui n'avait pas été soupçonné au début de l'expérience. Finalement, le séchage de tout le substrat utilisé (environ 0,4 m³) pour déterminer les quantités d'éléments présents et l'évaluation des éléments restant dans la couche de boue séchée en surface n'étaient pas réalisables. Pour ces considérations, les bilans désirés n'ont pas pu être réalisés.

Nous aurions pu aussi avoir un traitement témoin supplémentaire qui aurait été un sol de pépinière non fertilisé avec des boues. Cependant, l'utilisation de sol de pépinière n'avait pour but que d'établir des comparaisons (et il fallait bien limiter le nombre de traitements).

Malgré cela, notre expérience et notre revue de littérature confirment l'hypothèse que les boues d'usines d'épuration des eaux peuvent constituer un excellent fertilisant forestier. La fertilisation avec les boues résiduelles augmente les rendements dans les plantations ou les forêts naturelles. La fertilisation est essentielle pour tirer plus de ressources du milieu ou produire de la biomasse forestière.

Les études ne touchent cependant pas l'écosystème forestier dans son ensemble. On ne peut rien avancer sur les changements qui peuvent être apportés aux populations de champignons, bactéries, insectes, oiseaux, etc.

Puisque les boues résiduelles produites devront être déposées quelque part, il est logique d'en tirer le meilleur parti possible en les recyclant dans certains parcs qui seraient strictement réservés à la production de matière ligneuse situés près de leurs centres de production.

Nous suggérons en même temps de continuer l'étude de la présence à long terme des métaux lourds et organismes pathogènes dans le sol. L'idéal serait le contrôle à la source, mais faute de cette solution, les recherches sur leur enlèvement permettront d'obtenir un produit purifié, ce qui réduira les craintes de la population.

Donc, puisque les boues résiduelles peuvent être utilisées en fertilisation forestière, la boucle du recyclage se referme, ce qui nous permet d'atteindre les deux objectifs qui nous ont guidés lors de la réalisation de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS, T.McM. et J.R. SANDERS (1984). The effects of pH on the release to solution of zinc, copper and nickel from metal-loaded sewage sludges. *Environmental Pollution (Series B)*. 8: 85-99.
- ALBAN, D.H. (1972). The relationship of red pine site index to soil phosphorus extracted by several methods. *Soil Sc. Soc. of Am. Proceedings*. 36(4): 664-666.
- ALEXANDER, M. (1967). *Introduction to soil microbiology*. John Wiley and Sons, Inc., 4^e édition, 472 pages.
- ANDERSON, D.A. (1983). Response of the Columbian black-tailed deer to fertilization of douglas-fir forests with municipal sewage sludge. University of Washington, College of forest resources. (Résumé in *Forestry Abstracts*. 44(11): 691.
- ANONYME. (1983). Fertilizing forests with wastewater sludge. *Forest Industries*. 110(3): 44-45.
- ARCHIE, S.G. et M. SMITH. (1981). Survival and growth of plantations in sludge-treated soils and older forest growth study. In *Municipal sludge application to Pacific Northwest forest lands*. Édité par C.S. Bledsoe, University of Washington, College of forest resources, pp. 105-113.

- ARMSON, K.A. et V. SADREIKA. (1974). Forest tree nursery soil management and related practices. Ontario ministry of natural resources, forest management branch, 177 pages.
- ATALAY, A. et R.W. BLANCHAR. (1984). Evaluation of methane generator sludge as a soil amendment. J. Environ. Qual. 13: 341-344.
- AULAKH, M.S. et D.A. RENNIE. (1984). Transformations of fall-applied nitrogen-15-labelled fertilizers. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 1184-1189.
- BALDWIN, A., T.A. BROWN, P.H.T. BECKETT et G.E.P. ELLIOTT. (1983). The forms of combination of Cu and Zn in digested sewage sludge. Water Res. (G.B.) 17(12): 1935-1944.
- BATES, T., J.W. KETCHESON, R.A. JOHNSTON ET Y.K. SOON. (1981). Evaluation of winter application of liquid sludge to farmland. Water Engineering and Management. 128: R155-R156.
- BEAUCHAMP, E.G., G.E. KIDD et G. THURTELL (1978). Ammonia volatilization from sewage sludge applied in the field. J. Environ. Qual. 7: 141-147.
- BEHEL, D., Jr., D.W. NELSON et L.E. SOMMERS. (1983). Assessment of heavy metal equilibria in sewage sludge-treated soil. J. Environ. Qual. 12: 181-186.

- BENJAMIN, M.M., K.F. HAYES et J.O. LECKIE. (1982). Removal of toxic metals from power-generation waste streams by adsorption and coprecipitation. J. Water Pollution Control Fed. 54: 1472-1481.
- BERRY, C.R. et D.H. MARX. (1980). Significance of various soil amendments to borrow pit reclamation with loblolly pine and fescue. Reclamation Review. 3: 87-94.
- BLAKE, T.J. et W.E. RAITENEN. (1981). A summary of factors influencing coppicing. International Energy Agency, Programme of research, development and demonstration on forestry energy. National Swedish Board for Energy Source Development, Stockholm. NE 1981:22, 24 pages.
- BLEDSON, C.S. et R.J. ZASOSKI. (1981). Seedling physiology of 8 tree species grown in sludge-amended soil. In Municipal sludge application to Pacific Northwest forest lands. Édité par C.S. Bledson, University of Washington, College of forest resources, pp. 93-100.
- BRADY, N.C. (1974). The nature and properties of soils. MacMillan, New-York, 8^e édition, 639 pages.
- BRAZEAU, M. et B. BERNIER. (1973). Composition minérale du feuillage du sapin baumier selon les modalités d'échantillonnage et relations avec quelques indices de croissance. Naturaliste canadien. 100: 265-275.

BREUER, D.W., D.W. COLE et P. SCHIESS. (1979). Nitrogen transformation and leaching associated with wastewater irrigation in douglas fir, poplar, grass, and unvegetated systems. In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr. Pennsylvania State University Press, pp. 19-33.

BROCKWAY, D.G. (1983). Forest floor, soil and vegetation responses to sludge fertilization in red and white pine plantations. Soil. Sci. Soc. Am. J. 47: 776-784.

BROCKWAY, D.G. et D.H. Urie. (1983). Determining sludge fertilization rates for forests from nitrate-N in leachate and groundwater. J. Environ. Qual. 12: 487-492.

BROCKWAY, D.G., G. SCHNEIDER et D.P. WHITE. (1979). Dynamics of municipal wastewater renovation in a young conifer-hardwood plantation in Michigan. In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr. Pennsylvania State University Press, pp. 87-102.

BROWN, K.W., K.C. DONNELLY, J.C. THOMAS et J.F. SLOWEY. (1984). The movement of nitrogen species through three soils below septic fields. J. Environ. Qual. 13: 460-465.

- BROWN, K.W., J.C. THOMAS et J.F. SLOWEY. (1983). The movement of metals applied to soils in sewage effluent. *Water, Air and Soil Pollution*. 19: 43-54.
- CECASC, M.P. et D. ARCHAMBAULT. (1981). Corrections à apporter aux besoins en éléments nutritifs (N, P₂O₅, K₂O) par suite de l'application de fumiers d'origines diverses. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 130 pages.
- CHANG, A.C., J.E. WARNEKE, A.L. PAGE et L.J. LUND. (1984a). Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* 13: 87-91.
- CHANG, A.C., A.L. PAGE, J.E. WARNEKE et E. GRGUREVIC. (1984b). Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application. *J. Environ. Qual.* 13: 33-38.
- CHANG, A.C., A.L. PAGE, F.H. SUTHERLAND et E. GRGUREVIC. (1983). Fractionation of phosphorus in sludge-affected soils. *J. Environ. Qual.* 12: 286-290.
- CHAUSSOD, R., J.C. GERMOR et G. CATROUX. (1981). Essai de détermination au laboratoire de l'aptitude à la minéralisation d'azote des boues résiduelles urbaines. Académie d'agriculture de France; extrait du procès-verbal de la séance du 13 mai 1981, pp. 762-771.

CLEVENGER, T.E., D.D. HEMPHILL, K. ROBERTS et W.A. MULLINS. (1983).
Chemical composition and possible mutagenicity of municipal sludges.
J. Water Pollution Control Fed. 55: 1470-1475.

COLE, D.W. (1981). Minéral cycling in forest ecosystems of the Pacific
Northwest. In Proc. Forest fertilization conference. Édité par S.P.
Gessel, R.M. Kenady et W.A. Atkinson. Univ. of Washington, pp.
29-36.

COMITÉ CANADIEN DE PÉDOLOGIE. (1978). Manuel de méthodes d'échantillonnage
et d'analyses de sols. 2^e édition, préparée par le sous-comité
des méthodes d'analyses sous la direction de J.A. McKeague, éditeur,
250 pages.

COOLEY, J.H. (1979). Effects of irrigation with oxidation pond effluent on
tree establishment and growth on sand soils. In Utilization of
municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land.
Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr, Pennsylvania State University
Press, pp. 145-153.

COUILLARD, D. (1985a). Traitements par le sol des eaux usées. Notes de
cours de l'unité Eau-7243.1, INRS-Eau, Université du Québec, Québec,
216 pages.

COUILLARD, D. (1985b). Traitement chimiques des eaux usées. Notes de cours
de l'unité Eau-7243.3, INRS-Eau, Université du Québec, Québec, 188
pages.

COUILLARD, D. (1985c). Traitements secondaires biologiques des eaux usées. Notes de cours de l'unité Eau-7243.4, INRS-Eau, Université du Québec, Québec, 130 pages.

COUILLARD, D., M. CROWLEY et J.L. SASSEVILLE. (1985). Technological public choice in practice: the case of wastewater treatment facilities. J. Env. Management. 19: 300-325.

COUILLARD, D. (1984). Processus de traitement et assainissement des eaux. INRS-Eau, notes du cours EAU-7243. Université du Québec, Québec.

COUILLARD, D. (1983). Quality of life: the importance of man-environment relations and a tentative conceptual model. Journal Environmental Systems. 12(2): 163-185.

COUILLARD, D. (1982). The man-habitat system and multi-use projects: description and representation. Journal Environmental Systems. 11(2): 175-186.

CRITES, R.W. (1984). Land use of wastewater and sludge. Environ. Sci. Technol. 18(5): 140A à 147A.

CROWLEY, M., D. COUILLARD et J.L. SASSEVILLE. (1984). Le processus de choix des technologies du programme d'assainissement des eaux du Québec. Proceedings: assises annuelles de l'AQTE, pp. 173-198.

DAVID, M.B. et R.A. STRUCHTEMEYER. (1980). The effects of spraying sewage effluent on forested land at Sugarloaf mountain, Maine. Bulletin of life science and agricultural experiment, University of Maine, no. 773, 16 pages.

DEMIRJIAN, Y.A., T.R. WESTMAN, A.M. JOSHI, D.J. ROP, R.V. BUHL et W.R. CLARK. (1984). Land treatment of contaminated sludge with wastewater irrigation. J. Water Pollution Control Fed. 56: 370-377.

de VRIES, M.P.C. (1981). Fertilizer value of a dried sewage sludge for Pinus radiata plantations. Aust. For. 44: 190-193.

DISSANAYAKE, C.B. (1983). Metal-organic interactions in environmental pollution. Intern. J. Environmental Studies. 22: 25-42.

DONOVAN, W.C. et T.J. LOGAN. (1983). Factors affecting ammonia volatilization from sewage sludge applied to soil in a laboratory study. J. Environ. Qual. 12: 584-590.

DUNIGAN, E.P. et R.P. DICK. (1980). Nutrient and coliform losses in runoff from fertilized and sewage sludge-treated soil. J. Environ. Qual. 9: 243-250.

EDMONDS, R.L. et K.P. Mayer. (1981). Biological changes in soil properties associated with dewatered sludge application. In Municipal sludge application to Pacific Northwest forest lands. Édité par C.S.

Bledsoe, College of forest resources, University of Washington, pp. 49-57.

ENVIRONNEMENT CANADA. (1985). L'épandage des eaux usées traitées et des boues d'épuration d'origine urbaine. Service de la protection de l'environnement, guide SPE 6-EP-84-1, 190 pages.

ENVIRONNEMENT CANADA. (1981). Non-residual metals in sediments (0,5 N Hydrochloric acid extraction). In Analytical methods manual, Inland Water Directorate, Water quality branch.

EPA. (1983). Land application of municipal sludge. Process design manual. EPA-625/1-83-016, 466 pages.

EPA. (1979). Sludge treatment and disposal. Process design manual. EPA-625/1-79-011, 952 pages.

EPA. (1977). Land treatment of municipal wastewater. Process design manual. EPA 625/1-77-008, 577 pages.

EPSTEIN, E., J.M. TAYLOR et R.L. CHANEY, 1976. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. J. Environ. Qual. 5: 422-426.

FEDERER, C.A. (1983). Nitrogen mineralization and nitrification: depth variation in four New-England forest soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 1008-1014.

FISKELL, J.G.A., R. REBERTUS, N.B. COMERFORD ET W.L. PRITCHETT. (1984).
Comparing soil tests for a forested acid sandy soil top dressed with
sewage effluent. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 1170-1174.

FISKELL, J.G.A., F.G. MARTIN, W.L. PRITCHETT et M. MAFTOUN. (1982). Effects
of cadmium levels and sludges on loblolly pine seedlings. Soils and
Crop Science Society of Florida Proc. Vol. 41, Soil. Sci. Dept.
Univ. of Florida, Gainesville, pp. 163-168.

GAGNON, J.D. (1974). Results of fertilizer experiments in Quebec. Proc. of
a workshop on forest fertilization in Canada. Sault-Ste-Marie,
Ontario. Édité par Environnement Canada, Service des forêts, pp.
83-91.

GAGNON, J.D. (1973). Effets de la fertilisation azotée sur la croissance en
rayon du sapin baumier. Édité par Environnement Canada, Centre de
recherches forestières des Laurentides, Québec. Rapport Q-F-X-38, 24
pages.

GAGNON, J.D. (1972). Les égouts domestiques: un engrais valable en
foresterie. Édité par Environnement Canada, Centre de recherches
forestières des Laurentides, Québec. Rapport Q-F-X-30, 13 pages.

GAGNON, P. (1985). Communication personnelle (fonctionnaire au MENVIQ).

GOLUEKE, C.G. (1982). When is compost "safe"? BioCycle, 23(2): 28-38.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1985a). L'assainissement des eaux au Québec. Ministère de l'Environnement, 16 pages.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1985b). Allocution de M. Michel P. Lamontagne, sous-ministre adjoint, gestion et assainissement de l'eau, ministère de l'Environnement, lors de la journée perspective sur la construction, 41^e congrès annuel de l'A.C.R.G.T.Q. Le 21 février 1985, 8 pages.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1985c). Résultats des analyses physico-chimiques pour la période du 82/01/01 au 84/12/31. Ministère de l'Environnement, Direction du contrôle. No. de dossier 115850640701.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1984a). Bilan du programme de l'assainissement des eaux. Allocution du ministre de l'Environnement, M. Adrien Ouellette lors du colloque de l'Union des municipalités du Québec sur l'assainissement des eaux. Montréal, le 7 septembre 1984, 14 pages.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1984b). Rapport sur la qualité des boues des stations d'épuration et autres boues. Ministère de l'Environnement, 74 pages.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1984c). Rapport annuel 1983-1984 du ministère de l'Énergie et des Ressources, 73 pages.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC (1983). Document de politique sur la gestion des boues provenant de l'épuration des eaux usées. Ministère de l'Environnement, 22 pages.

GRENIER, Y., D. COUILLARD et J.M. VEILLEUX. (1985). Valorisation des boues d'usine d'épuration des eaux en fertilisation forestière. Communication présentée au 53^e congrès de l'Association Canadienne-Française pour l'Avancement des Sciences (ACFAS). Volume 52-53, page 128.

GROUPE DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES EN FERTILISATION DES FORÊTS (1977). Essai opérationnel de fertilisation aérienne de peuplements de pin gris dans la Mauricie. Rapport d'étape 1974-1976, mémoire no. 41, Service de la Recherche, Direction générale des forêts, Ministère des Terres et Forêts, 137 pages.

HAITH, D.A. (1983). Planning model for land application of sewage sludge. A.S.C.E. J. Env. Eng. Div. 109: 66-81.

HARRIS, A.R. et D.H. URIE, 1983. Changes in a sandy forest soil under northern hardwoods after 5 years of sewage effluent irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 800-805.

HARTENSTEIN, R. (1981). Sludge decomposition and stabilization. Science. 212(4496): 743-749.

HECHT, N.L., D.S. DUVALL et A.S. RASHIDI. (1975). Characterization and utilization of municipal and utility sludges and ashes. Volume II: municipal sludges. EPA-670/2-75-033b, 231 pages.

HEMKES, O.J., A. KEMP et L.W. van BROEKHOVEN. (1983). Effects of applications of sewage sludge and fertilizer nitrogen on cadmium and lead contents of grass. Neth. J. agric. Sci. 31: 227-232.

HIGGINS, A.J. (1984a). Impacts on groundwater due to land application of sewage sludge. Water Resources Bulletin. 20(3): 425-434.

HIGGINS, A.J. (1984b). Land application of sewage sludge with regard to cropping systems and pollution potential. J. Environ. Qual. 13: 441-448.

HORNBECK, J.W. et W. KROPELIN. (1982). Nutrient removal and leaching from a whole-tree harvest of northern hardwoods. J. Environ. Qual. 11: 309-316.

HORNBECK, J.W., M.T. KOTERBA et R.S. PIERCE. (1979). Sludge application to a northern hardwood forest in New-Hampshire: potential for dual benefits? In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr. Pennsylvania State University Press, pp. 137 à 143.

INRS-EAU. (1985). Demande de subvention 1985-86 (catégorie équipe) au programme de formation de chercheurs et d'action concertée, fonds

FCAC, ministère de la Science, de la Technologie et de l'Enseignement supérieur, Gouvernement du Québec, Québec.

JONES, A.R.C. et J. GRANT. (1983). Hybrid poplars or hardwood coppice? An agroforestry option to economically increasing wood production in Eastern Canada. *The Forestry Chronicle*. 59: 143-145.

KALINSKE, A.A. (1981). Extracting heavy metals and toxic organics from sludge. *Water Engineering and Management*. 123: R148-R151.

KING, L.D. et H.D. MORRIS. (1972). Land disposal of liquid sewage sludge: II. The effect on soil pH, manganese, zinc and growth and chemical composition of Rye (Secale cereale L.). *J. Environ. Qual.* 4: 425-429.

LAKE, D.L., P.W.W. KIRK et J.N. LESTER. (1984). Fractionation, characterization, and speciation of heavy metals in sewage sludge and sludge-amended soils: a review. *J. Environ. Qual.* 13: 175-183.

LAMBERT, D.H. et T.C. WEIDENSAUL. (1982). Cooper requirement of container-grown conifer seedlings. *Can. J. For. Res.* 12: 848-852.

LANE, C.L., N.R. PAGE, B.R. SMITH, A.T. SHEARING et R.O. HEGG. (1980). Municipal sewage effluent application to soils bearing hardwood coppice and loblolly pine stands. *Water Resources Research Institute, Clemson University, Clemson, South Carolina*, 17 pages.

- LEAF, A.L. (1968). K, Mg and S deficiencies in forest trees. In Forest fertilization; theory and practice. Tenn. Val. Auth. Muscle Shoals, Ala., 88-121.
- LESTER, J.N., R.M. STERRITT et P.W.W. KIRK. (1983). Significance and behaviour of heavy metals in waste water treatment processes: II. Sludge treatment and disposal. The Science of the Total Environment. 30: 45-83.
- Le TACON, F., J. GARBAYE et A. CLEMENT. (1979). Possibilité d'utilisation des boues résiduelles de stations d'épuration urbaines en sylviculture: effet sur les sols et les eaux de drainage. Proceedings of the first european symposium on the treatment and use of sewage sludge, Cadarache 13-15 february 1979. Édité par D. Alexandre et H. Ott, pp. 291-308.
- MAGDOFF, F.R. et J.F. AMADON. (1980). Nitrogen availability from sewage sludge. J. Environ. Qual. 9: 451-455.
- MARTIN, G. (1982). Point sur l'épuration et le traitement des effluents, eau, air. Volume 1. Lavoisier, 214 pages.
- MATUSIEWICZ, H. et R.M. BARNES. (1985). Tree ring wood analysis after hydrogen peroxyde pressure decomposition with inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and electrothermal vaporization. Analytical Chemistry. 57: 406-411.

- McINTOSH, M.S., J.E. FOSS, D.C. WOLF, K.R. BRANDT et R. DARMODY. (1984).
Effect of composted municipal sewage sludge on growth and elemental
composition of white pine and hybrid polar. J. Environ. Qual. 13:
60-62.
- MILLER, H.G. (1983). Wood energy plantations: diagnosis of nutrient
deficiencies and the prescription of fertilizer applications in
biomass production. Édité par International Energy Agreement -
Forestry Energy Agency. Rapport no.3, Programme Group "B", 20
pages.
- MILLER, H.G. (1981). Forest fertilization: some guiding concepts.
Forestry. 54(2): 157-167.
- MÖLLER, G. (1974). Aspects pratiques et économiques de la fertilisation des
forêts. Phosphore et Agriculture. 62: 35-51.
- MÖLLER, U. (1983). German practice in land disposal of sludge including
legislation and health aspects. Wat. Sci. Tech. 15: 115-183.
- MORIN, M.D. (1981). Heavy metal concentrations in three-year old trees
grown on sludge-amended surface mine spoil. Symposium on Surface
mining hydrology, sedimentology and reclamation, University of
Kentucky, pp. 297-306.
- MORRISON, I.K. (1974). Mineral nutrition of conifers with special reference
to nutrient status interpretation: a review of literature. Service

Canadien des forêts, Centre de recherches forestières des Grands-Lacs. Publication no. 1343, 74 pages.

MOZA, P.N., I. SCHEUNERT, W. KLEIN et F. KORTE. (1979). Long-term uptake of lower chlorinated biphenyls and their conversion products by spruce trees (Picea abies) from soil treated with sewage sludge. Chemosphere. 8: 373-375.

NAYLOR, L.M. et R.C. LOEHR. (1982a). Priority pollutants in municipal sewage sludge. BioCycle, 23(4): 18-22.

NAYLOR, L.M. et R.C. LOEHR. (1982b). Priority pollutants in municipal sewage sludge. BioCycle, 23(6): 37-42.

PAGLIAI, M., G. GUIDI, M. La MARCA, M. GIACHETTI et G. LUCAMENTE. (1981). Effects of sewage sludges and composts on soil porosity and aggregation. J. Environ. Qual. 10: 556-561.

PARKER, C.F. et L.E. SOMMERS. (1983). Mineralization of nitrogen in sewage sludges. J. Environ. Qual. 12: 150-156.

PATRICK, J.H. et D.W. SMITH. (1975). Forest management and nutrient cycling in eastern hardwoods. N.E. Forest Exp. Stn., Upper Darby, PA. (USDA Forest Serv. Res. Paper NE-324), 12 pages.

POMMEL, B. (1982). Aptitude de plusieurs déchets urbains à fournir du phosphore aux cultures. Agronomie. 2: 851-857.

- POMMEL, B. (1981). Détermination au moyen d'un test biologique de la cinétique de libération du phosphore à partir d'une boue résiduaire. *Agronomie*. 1: 467-472.
- POMMEL, B. (1979a). Comparaison de l'utilisation par le maïs du phosphore des boues résiduaires ou du phosphate monocalcique pour différents niveaux de zinc et de fer dans le substrat. *Ann. Agron.* 30: 443-453.
- POMMEL, B. (1979b). La valorisation agricole des déchets: 2) Les boues résiduaires urbaines. Ministère de l'Agriculture. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Station d'agronomie de Bordeaux, 70 pages.
- RIEKERK, H. (1982). How much sewage nitrogen on forest soils? A case history. *BioCycle*. 23(1): 53-56.
- RIEKERK, H. (1981). Effects of sludge disposal on drainage solution of two forest soils. *Forest Sci.* 27(4): 792-800.
- RIEKERK, H. (1978). The behavior of nutrient elements added to a forest soil with sewage sludge. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 42: 810-816.
- RIEKERK, H. et R.J. ZASOSKI. (1979). Effects of dewatered sludge applications to a douglas fir forest soil on the soil, leachate, and groundwater composition. In Utilization of municipal sewage effluent

and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr. Pennsylvania State University Press, pp. 35-45.

RIFFALDI, R., F. SARTORI et R. LEVY-MINZI. (1982). Humic substances in sewage sludges. Environmental Pollution (series B) 3: 139-146.

RIFFALDI, R., R. LEVI-MINZI, A. SAVIOZZI et M. TROPEA. (1983). Sorption and release of cadmium by some sewage sludges. J. Environ. Qual. 12: 253-256.

RIHA, S.J., L. NAYLOR et G.P. SENESAC. (non daté). Hybrid poplar production using municipal sewage sludge as a fertilizer resource. New-York State energy research and development authority, 11 pages.

ROBERGE, M.R., J.D. GAGNON et C.H. UNG. (1980). Essai d'un dosage d'azote dans trois sapinières de 60 ans au Québec: résultats de 10 ans. Can. J. For. Res. 10: 470-475.

SABEY, B.R. et W.E. HART. (1975). Land application of sewage sludge: 1. Effect on growth and chemical composition of plants. J. Environ. Qual. 4: 252-256.

SAGIK, B.P., B.E. MOORE et C.A. SORBER. (1979). Public health aspects related to the land application of municipal sewage effluents and sludges. In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr, Pennsylvania State University Press, pp. 241-253.

- SCHALSCHA, E.B., M. MORALES, I. VERGARA et A.C. CHANG. (1982). Chemical fractionation of heavy metals in wastewater affected soils. *J. Water Pollution Control Fed.* 54: 175-180.
- SCHMIDTKE, N.W. (1978). Trends in organic sludge utilization. In Waste treatment and utilization. Édité par M. Moo Young et G.J. Farquhar. Proc. Univ. of Waterloo, Ontario. Pergamon Press, pp. 53-78.
- SCHNEIDER, K.R., R.F. WITTWER et S.B. CARPENTER. (1981). Trees respond to sewage sludges in reforestation of acid spoil. Symposium on Surface mining hydrology, sedimentology and reclamation, University of Kentucky, pp. 291-296.
- SHEEDY, G. (1982). Essai de fertilisation dans une jeune plantation de pin gris; résultats de cinq ans. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche (Terres et Forêts). Mémoire no. 83, 32 pages.
- SIDLE, R.C. et L.T. KARDOS. (1977). Transport of heavy metals in a sludge-treated forested area. *J. Environ. Qual.* 6: 431-437.
- SINGH, B.R. et R.P. NARWAL. (1984). Plant availability of heavy metals in a sludge-treated soil: II. Metal extractability compared with plant metal uptake. *J. Environ. Qual.* 13: 344-349.
- SMITH, S.B. (1983). Calculating sludge loading rates on crop nitrogen needs. *BioCycle.* 24(3): 40-46.

SOMMERS, L.E. (1977). Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. J. Environ. Qual. 6: 225-232.

SOMMERS, L.E. et D.W. NELSON (1978). Analyses and their interpretation for sludge application to agricultural land. In Application of sludge and wastewater to agricultural land; a planning and educational guide. EPA, publication no. 235, pp. 3.2-3.12.

SOPPER, W.E. et S.N. KERR. (1980). Effects of spray irrigation of municipal wastewater on trace metals in several crop and forest ecosystems. Technical report for the Institute for research on land and water resources, Pennsylvania State University, 25 pages.

SOPPER, W.E. et S.N. KERR. (1979). Renovation of municipal wastewater in eastern forest ecosystems. In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr. Pennsylvania State University Press, pp. 61-76.

STEDNICK, J.D. et D.D. WOOLDRIDGE. (1979). Effects of liquid digested sludge irrigation on the soil of a douglas fir forest. In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr, Pennsylvania State University Press, pp. 47-60.

STEEL, R.G.D. et J.H. TORIE. (1960). Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill Book Company, 481 pages.

ST-YVES, A. (1985). La bonne pratique de la valorisation agricole des boues. Assises annuelles 1985 de l'Association Québécoise des Techniques de l'Eau, Montréal, le 7 mars 1985, 14 pages.

ST-YVES, A. (1984). La valorisation agricole des boues de stations d'épuration. Assises annuelles 1984 de l'Association Québécoise des Techniques de l'Eau, Québec le 8 mars 1984, 15 pages.

TARQUIN, A.J. (1981). Land disposal of high cadmium sludge. Water Engineering and Management. 128: R142-R144.

TAYLOR, R.W., P.R. THANGUDU et D.R. DUSEJA. (1981). The effect of sewage sludge and manure on soil available calcium, magnesium, and potassium. J. Environ. Sci. Health, A16: 589-604.

TEMPLE, K.L., A.K. CAMPER et R.C. LUCAS. (1982). Potential health hazard from human wastes in wilderness. J. of Soil and Water Conservation, Nov.-Dec.: 357-359.

THEIS, T.L. et L.E. PADGETT. (1983). Factors affecting the release of trace metals from municipal sludge ashes. J. Water Pollution Control Fed. 55: 1271-1279.

- URIE, D.H. (1979). Nutrient recycling under forests treated with sewage effluents and sludge in Michigan. In Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. Édité par W.E. Sopper et S.N. Kerr, Pennsylvania State University Press, pp. 7-17.
- VEILLEUX, J.M. et G. SHEEDY. (1978). Projet interprovincial de fertilisation des forêts naturelles: 1. Effets de la fertilisation sur quelques caractéristiques de sept sapinières en Gaspésie. Gouvernement du Québec, ministère des Terres et Forêts, Direction générale des forêts, Service de la recherche. Mémoire no. 45, 63 pages.
- VÉZINA, P.E. et M.R. ROBERGE. (1981). Comment aménager nos forêts. Les Presses de l'Université Laval, 273 pages.
- VIMMERSTEDT, J.P. et T.N. GLOVER. (1984). Boron toxicity to sycamore of minesoil mixed with sewage sludge containing glass fibers. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 389-393.
- VOGT, K., R.L. EDMONDS et D.J. VOGT. (1981). Nitrate leaching in soils after sludge application. In Municipal sludge application to Pacific Northwest forest lands. Édité par C.S. Bledsoe. University of Washington, College of forest resources, pp. 59-66.
- WALSH, L.M. (1971). Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. Soil. Sci. Soc. of Am. Inc. Madison, Wisconsin, 491 pages.

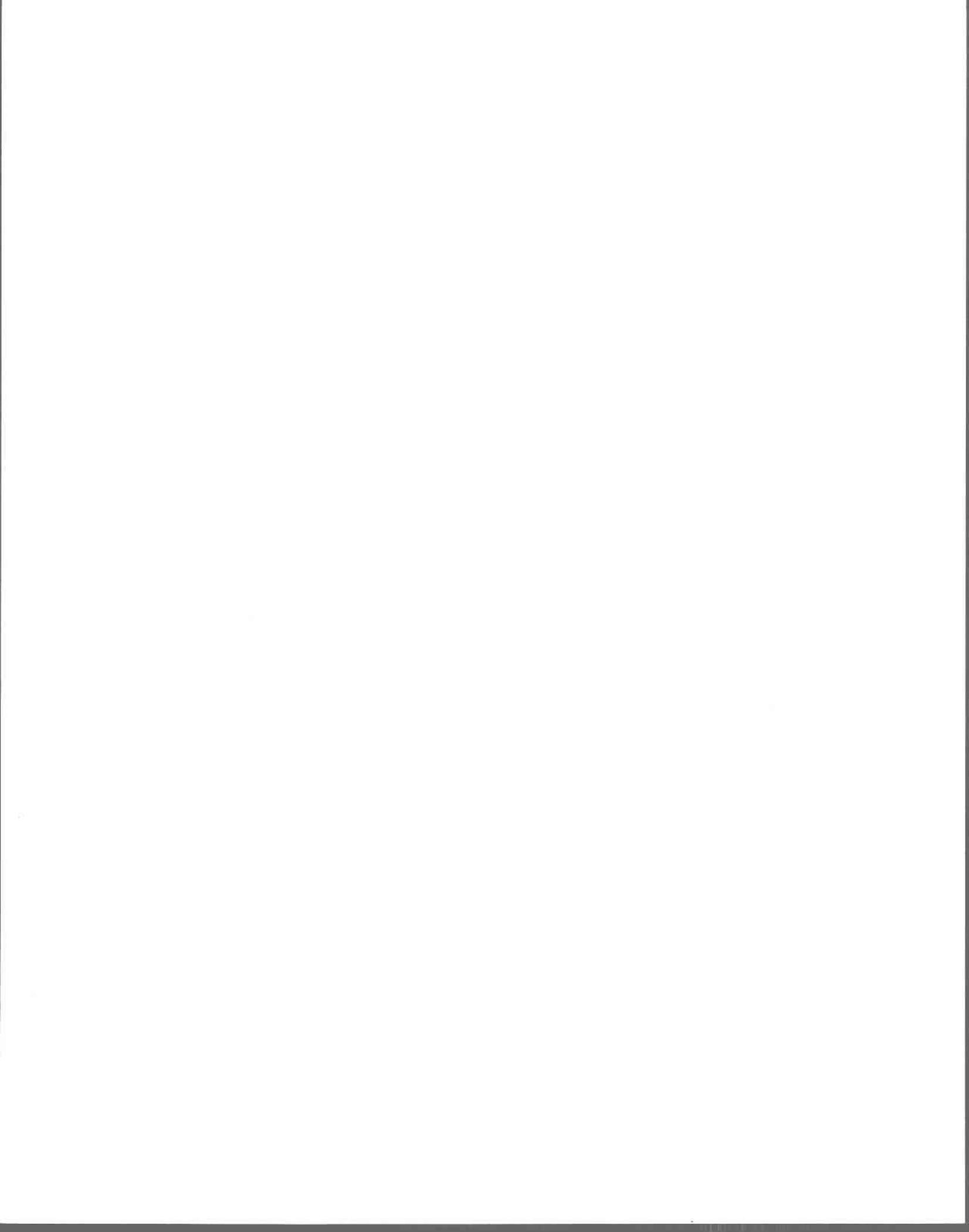
WEBBER, M.D. (1984). Épandage des boues résiduelles sur les sols: une évaluation. Agriculture Canada, direction générale de la recherche, 45 pages.

WEIER, T.E., C.R. STOCKING et M.G. BARBOUR. (1974). Botany, an introduction to plant biology. John Wiley and Sons, New-York, 5^e édition, 693 pages.

WONG, L. et L.G. HENRY. (1984). Biological removal and chemical recovery of metals from sludges. Proc. of the 39th Purdue Industrial Waste Conference, West Lafayette, Indiana, pp. 515-520.

WONG, L. et J.G. HENRY. (1983). Bacterial leaching of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge. Water Pollution Research. J. of Canada. 18: 151-162.

YEAGER, J.G. et R.T. O'BRIEN. (1983). Irridiation as a means to minimize public health risks from sludge-borne pathogens. J. Water Pollution Control Fed. 55: 977-983.



ANNEXE A

ANALYSES DES ÉCHANTILLONS
DES SUBSTRATS DE CROISSANCE
AVANT LA FERTILISATION

A.1 ANALYSES DU SABLE LOMA (OU DE BEAUPORT) UTILISÉ DANS L'EXPÉRIENCE DE CROISSANCE (en mg/kg)

Éch no	AZOTE		PHOSPHORE		CATIONS ÉCHANGIABLES										CATIONS TOTAUX										C.O. %	pH
	NH ₄	NO ₃	total	sch	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Mn	Zn	Al						
1	2.5	0.6	3.1	LF	985	577	8	500	LF	76	9.5	0.9	436	427	1121	4727	LF	14605	235	35	2735	0.06	7.35			
2	7.0	0.4	2.4	LF	982	487	12	5	474	LF	71	9.0	1.0	361	394	1059	3731	LF	15925	268	36	2517	0.05	7.15		
3	1.0	0.3	1.3	LF	1045	416	12	5	473	LF	66	8.9	1.0	327	363	1118	4136	LF	17419	296	41	2546	0.04	7.20		
4	1.0	0.4	1.4	LF	864	416	10	5	450	LF	80	10.3	0.7	337	386	1195	4399	LF	17007	270	41	2748	0.05	7.25		
5	2.0	0.3	2.3	LF	1094	380	10	5	399	LF	72	8.9	0.8	310	-	-	-	-	-	-	-	0.04	7.10			
M	1.7	0.4	2.1	LF	998	411	13	6	449	LF	74	9.3	0.9	354	393	1123	4748	LF	16244	267	38	2639	0.05	7.21		

A.2 ANALYSES DU SOL DE PÉPINIÈRE UTILISÉ POUR L'EXPÉRIENCE DE CROISSANCE (en mg/kg)

Éch no	AZOTE		PHOSPHORE		CATIONS ÉCHANGIABLES										CATIONS TOTAUX										C.O. %	pH
	NH ₄	NO ₃	total	sch	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Mn	Zn	Al						
1	1.0	30.8	35.8	2000	1500	959	106	77	1210	0.6	183	28.1	4.2	3700	570	942	2887	LF	31230	444	49	9722	3.48	5.20		
2	5.0	25.5	30.4	1800	1761	753	132	79	1241	0.7	191	27.5	4.0	2788	589	852	2493	LF	30327	468	52	9085	3.55	5.50		
3	5.0	24.1	29.1	1500	1164	612	100	78	1225	0.7	192	28.1	4.1	2788	533	710	2779	LF	23909	372	33	7245	2.37	5.60		
4	5.0	24.7	29.6	1800	1361	785	102	80	1247	0.9	189	27.9	4.1	4134	542	796	2569	LF	28497	448	53	8329	3.19	5.60		
5	5.5	23.5	28.9	1400	1096	497	100	77	1222	0.7	193	29.0	4.2	3435	-	-	-	-	-	-	-	-	2.66	5.55		
M	5.1	23.7	28.8	1700	1776	761	104	78	1229	0.7	189	28.1	4.1	3169	559	825	2732	LF	28513	433	47	8195	3.05	5.49		

A.3 ANALYSES DU SABLE MOUDE UTILISÉ DANS L'EXPÉRIENCE DE FFFCOLATION (en mg/kg)

Éch no	AZOTE		PHOSPHORE		CAT. ECH.		C.O. %	pH
	NH ₄	NO ₃	total	sch	K	Mg		
1	traces	677	313	12	7	102	0.03	5.65
2	traces	987	277	12	5	124	0.03	6.05
3	traces	708	385	12	5	147	0.03	6.30
4	traces	777	364	13	5	128	0.03	6.35
M	traces	789	335	12	6	130	0.03	6.09

1: sauf en 2 pour le carbone organique et pour les unités de pH

ANNEXE C

MATRICES DES CORRÉLATIONS
UTILISÉES POUR LES ANALYSES DE RÉGRESSION

ANNEXE B

ANALYSES DES ÉCHANTILLONS
DES TISSUS VÉGÉTAUX

P.1 ANALYSES DES TIGES ET DES FEUILLES (en mg.kg⁻¹)*

Nos de traitement	Nos de répétition	N	P	Fe	Mg	Mn	K	Ca	Zn	Cu	Al
1	1	0.62	446	182	1845	68	3250	13007	-1	96	88
1	2	0.82	651	145	3329	84	4401	15122	-1	108	161
1	3	0.76	792	132	2722	83	4458	11868	-1	80	104
1	4	0.69	550	-	2800	-	4000	-	-	-	-
2	1	1.03	678	176	2896	78	5550	13220	-1	67	85
2	2	0.87	820	131	2899	77	4284	14590	-1	110	139
2	3	0.95	779	123	2971	87	5012	13861	-1	99	130
2	4	1.02	962	113	3066	73	5296	13427	-1	97	159
3	1	0.90	734	211	3430	78	5320	18516	-1	189	125
3	2	0.98	780	149	3364	74	5525	14213	-1	121	111
3	3	1.08	1114	215	3483	119	5926	15861	-1	116	141
3	4	1.19	1036	264	3386	121	6107	14629	-1	103	264
4	1	1.27	1713	116	2335	201	5927	9951	-1	61	98
4	2	0.99	770	146	3106	106	4367	14277	-1	102	119
4	3	0.99	703	114	2926	114	4741	14987	-1	106	147
4	4	1.22	1513	-	2880	340	4487	13525	-	-	-
5	1	1.02	798	-	2202	188	4264	14492	-1	173	308
5	2	1.31	1426	140	2853	125	5963	13272	-1	97	132
5	3	1.06	834	112	2811	98	4507	12918	-1	84	112
5	4	1.14	891	245	2740	141	4701	11829	-1	73	200
6	1	1.48	1500	250	2434	360	5809	12809	-1	64	118
6	2	1.24	1303	129	2864	227	5265	13152	-1	105	114
6	3	1.20	1070	125	2703	180	5633	12992	-1	89	125
6	4	1.13	993	307	2393	171	5836	13257	-1	99	307
7	1	1.65	2352	443	2148	423	5632	13023	-1	93	205
7	2	1.72	1671	243	2375	309	4750	15941	-1	78	178
7	3	1.45	1212	231	2409	216	4464	14719	-1	97	202
7	4	1.24	1279	214	2307	290	4985	12706	-1	84	290
8	1	1.58	1679	164	2200	229	5100	12071	-1	68	114
8	2	1.42	1153	125	2681	215	4931	13215	-1	73	76
8	3	1.43	1129	171	2644	252	4656	12899	-1	75	282
8	4	1.68	1853	165	2693	368	6330	12218	-1	83	135
9	1	1.80	1959	124	1711	384	6223	11882	-1	52	56
9	2	1.62	2461	138	2289	382	5441	11230	-1	70	92
9	3	1.62	1993	294	2404	382	5993	11934	-1	98	257
9	4	1.59	1400	171	2257	300	4993	11843	-1	87	179
10	1	1.88	4079	171	1677	238	12884	9055	-1	39	12
10	2	1.90	5510	282	2035	200	12676	11176	-1	94	37
10	3	1.73	4412	223	2014	135	12723	10514	-1	69	61
10	4	1.96	4353	301	2116	228	14612	11571	-1	45	107
11	1	1.65	2329	195	2214	252	5921	11430	-1	84	94
11	2	1.68	2438	210	2033	435	6150	11888	-1	71	75
11	3	1.57	1253	150	2123	285	5228	11333	-1	67	90
11	4	1.53	1736	142	2399	345	5466	13128	-1	77	122
12	1	1.64	1537	297	2458	356	6245	11636	-1	89	208
12	2	1.84	2704	248	1927	378	6447	11174	56	35	165
12	3	1.51	1691	250	2176	324	6346	12302	60	51	154
12	4	1.43	1493	287	1904	301	6941	10029	53	18	118
13	1	1.67	2295	212	2364	409	6152	11992	62	59	136
13	2	1.46	1628	143	2258	270	5528	12023	87	37	105
13	3	1.20	1212	144	2402	235	4152	11667	47	32	114
13	4	1.39	1486	181	2403	188	5049	10444	47	25	174

ANALYSES DES TIGES ET DES FEUILLES (suite)

14	1	1.67	2258	255	2397	348	5513	12936	63	55	240
14	2	1.60	1603	140	2250	221	5309	11287	55	25	74
14	3	1.62	1797	196	2297	243	4426	13480	106	44	155
14	4	1.78	2199	162	1978	353	6015	12177	57	6	110
15	1	1.63	2622	139	2423	358	7420	12385	54	20	119
15	2	1.84	1555	178	1955	301	5730	12775	50	26	129
15	3	1.55	2273	153	1898	367	7401	11273	55	24	115
15	4	1.54	1415	149	1847	269	7925	9906	54	25	156
16	1	1.55	2273	76	1977	38	8712	7727	89	44	152
16	2	1.35	2643	92	2084	37	7439	7869	50	28	92
16	3	1.66	3625	219	2250	38	9750	9813	61	80	156
16	4	1.59	2568	88	2392	41	8851	9257	55	28	108
17	1	1.91	2786	171	1686	79	9857	9071	57	34	150
17	2	1.67	2703	182	2095	41	8581	10000	55	33	149
17	3	1.82	2522	155	2625	45	8534	10539	52	36	181
17	4	1.60	2643	166	2090	37	7500	8484	47	24	227
18	1	1.37	4119	172	1746	98	10820	7439	33	14	61
18	2	1.58	3364	182	2797	105	11075	12407	76	43	133
18	3	1.62	3131	189	2163	138	10413	10631	97	10	73
18	4	1.81	3750	254	2059	222	11441	9788	36	3	292
19	1	0.88	655	146	3182	73	4806	15728	56	59	269
19	2	1.09	2005	149	2257	171	7649	10173	59	26	178
19	3	1.09	1143	100	2907	193	5786	13643	58	58	186
19	4	0.86	675	75	2835	233	5400	15000	53	83	233
20	1	0.90	600	188	2363	165	5025	14475	59	53	165
20	2	1.47	1500	75	2700	143	6075	12750	61	44	143
20	3	1.28	1471	37	2118	154	6397	11691	46	36	154
20	4	1.32	2250	143	2250	158	5400	8700	59	18	158

Note: -1=traces

* : sauf pour N, en %

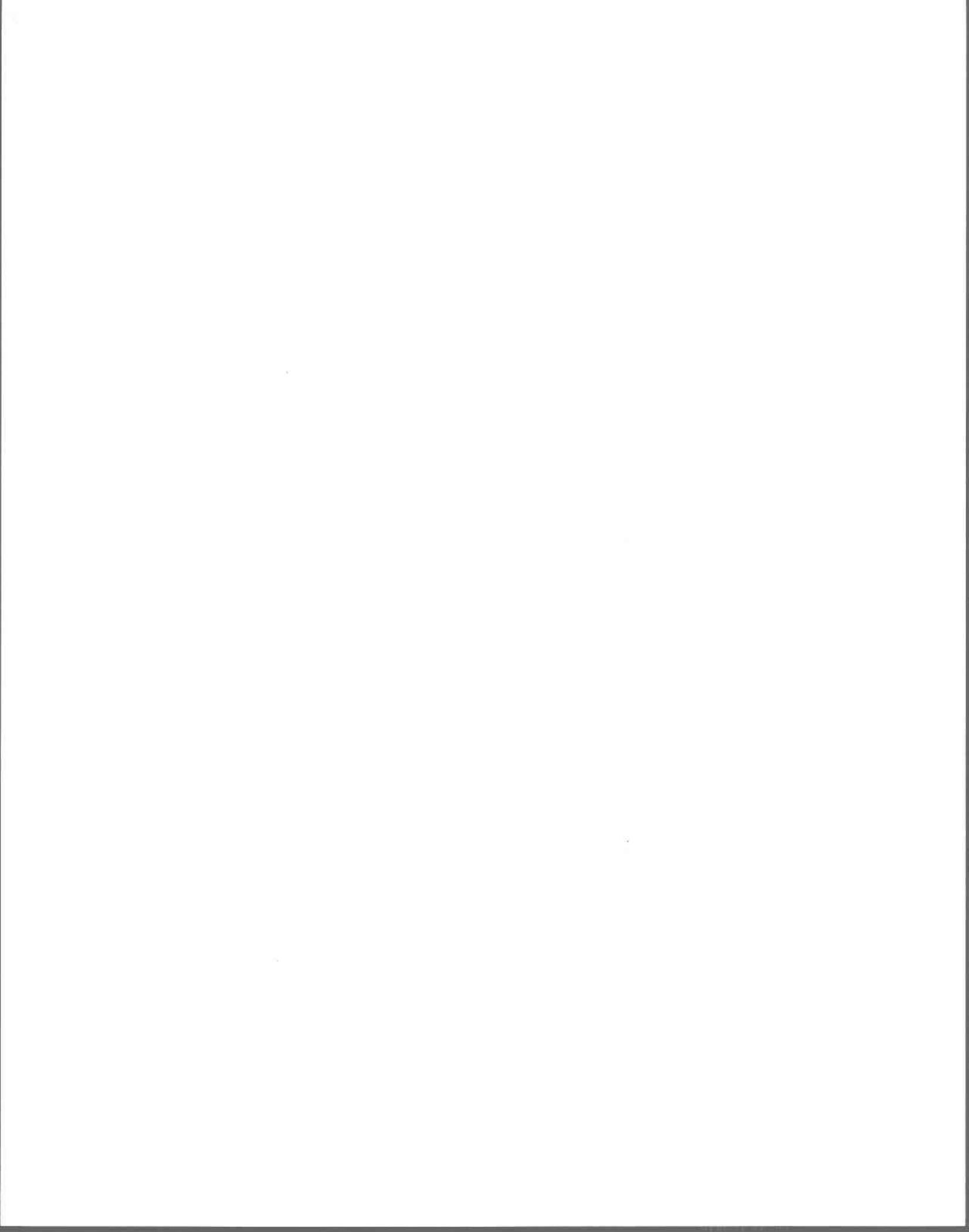
Nos de traitement	Nos de répétition	N	P	Fe	Mg	Mn	K	Ca	Zn	Cu	Al
1	1	0.83	938	759	2642	119	6222	15511	70	108	1756
1	2	0.75	971	812	3529	97	7235	18706	72	65	2497
1	3	0.70	1023	489	3409	114	6023	16477	93	49	1989
1	4	0.88	1474	1086	2586	155	7241	12155	126	-1	1759
2	1	1.18	1748	1129	3495	109	6189	14782	112	427	1769
2	2	0.95	1469	3015	2938	139	4639	14304	109	236	2459
2	3	0.89	1176	434	2868	74	6618	13971	60	178	1721
2	4	1.10	1575	675	3525	83	7800	13950	82	327	2213
3	1	0.96	1184	776	3289	105	7632	13816	54	104	1711
3	2	1.04	1737	1145	3158	126	7421	16105	115	256	2353
3	3	1.06	1875	1223	3075	143	7200	12300	154	284	1988
3	4	1.05	1352	811	2951	111	5902	11312	100	247	1488
4	1	1.30	2523	568	3294	371	5818	10023	237	393	1451
4	2	0.98	1376	2044	2546	131	5505	13486	87	180	1803
4	3	1.00	1337	743	2970	119	6238	15000	108	224	1723
4	4	1.34	2296	926	2908	199	6046	10791	229	373	1837
5	1	1.23	1634	1329	2599	297	5866	11881	143	415	1597
5	2	1.42	2302	980	3787	178	6683	13441	162	651	2228
5	3	1.32	2097	1475	3369	210	5275	14682	153	528	2085
5	4	1.26	1806	986	2847	208	5278	11111	180	413	1514
6	1	1.51	2182	1036	2864	552	5523	10909	261	593	1111
6	2	1.41	2243	1150	2734	371	5397	11495	218	609	1654
6	3	1.29	1942	1232	2545	281	5491	11183	235	570	1540
6	4	1.18	1546	758	2397	224	6418	11211	185	444	1345
7	1	1.80	2500	1158	2417	842	6917	8833	398	557	1025
7	2	1.74	3108	4155	2230	419	5743	12905	282	733	2527
7	3	1.54	2231	1605	2417	329	4711	11715	341	603	1450
7	4	1.32	1634	958	2302	535	5347	9505	279	468	765
8	1	1.58	2325	743	1950	195	6300	10425	175	386	968
8	2	1.69	2452	1464	2091	252	4904	10962	285	607	1558
8	3	1.54	2143	1693	2000	193	4357	10143	269	575	1607
8	4	1.69	2455	1220	2523	580	6818	8945	260	540	1207
9	1	1.99	2400	1260	2025	653	8250	6900	308	383	698
9	2	1.69	3422	1762	2112	510	5461	8811	373	511	1602
9	3	1.76	2944	1682	2523	589	7220	8201	543	607	1318
9	4	1.78	2647	1569	2143	460	5483	9895	393	614	1437
10	1	1.70	7991	946	1402	301	18785	10023	99	18	273
10	2	1.62	7794	1463	1765	235	18309	8824	135	32	559
10	3	1.58	7871	1634	2079	193	19678	9134	61	62	564
10	4	1.68	7214	1671	1429	207	14143	14714	55	25	350
11	1	1.60	2959	1287	2271	289	5642	9358	526	522	1245
11	2	1.80	3636	2000	2045	902	8333	9167	423	567	1295
11	3	1.85	3000	1816	2053	339	6711	12868	320	733	1642
11	4	1.70	2673	1277	2302	483	6980	9505	441	559	1025
12	1	1.89	2885	1990	2019	411	6707	10385	290	636	1464
12	2	1.84	3485	1894	2045	864	7045	6894	411	508	1265
12	3	1.63	2830	1896	1910	340	6651	8491	305	636	1443
12	4	1.57	2576	1977	1970	621	6439	8106	74	427	780
13	1	1.57	2803	1326	2500	674	5758	8409	263	455	1212
13	2	1.51	2618	1408	2476	333	5377	10118	293	722	1528
13	3	1.56	2748	1975	2451	379	5124	11658	281	832	1834
13	4	1.42	2273	742	2500	197	5758	10000	136	511	1280

ANALYSES DES RACINES (suite)

14	1	1.61	3075	1365	2475	458	5625	8700	325	615	1410
14	2	1.70	2986	1667	1944	188	5069	12222	185	823	1674
14	3	1.92	4660	2767	1748	211	4442	13325	196	1025	2782
14	4	1.66	2727	1826	2045	682	7197	9848	220	528	1303
15	1	1.55	2803	1348	2197	765	9167	6212	389	360	818
15	2	1.93	3300	3510	1425	240	6000	10425	100	720	2543
15	3	1.60	2500	1343	2429	643	9286	6857	316	539	986
15	4	1.34	1894	826	1818	409	7424	8333	185	445	689
16	1	1.68	3309	1316	1691	74	10294	10147	263	150	1485
16	2	1.68	3897	3831	1765	103	7500	9485	577	217	2522
16	3	1.86	4773	2788	1818	76	12197	6288	459	163	2553
16	4	1.78	3640	1180	1654	110	10037	7169	232	200	1368
17	1	2.05	3649	1446	1959	101	11689	7027	235	214	1628
17	2	1.82	3421	3355	1974	86	7632	10658	272	211	3013
17	3	1.78	3061	3038	1990	69	7883	10102	200	172	2541
17	4	1.84	3614	3048	2182	89	7500	10909	268	246	2570
18	1	1.31	5606	659	1894	91	14849	6818	-1	95	265
18	2	1.39	4200	1748	2550	90	12300	13050	-1	220	780
18	3	1.59	4639	1392	1856	116	11675	14227	61	143	557
18	4	1.61	4408	1243	1382	118	13947	9276	-1	70	289
19	1	0.88	1000	1083	2167	0	6667	14167	-1	81	1483
19	2	1.05	2228	1812	2228	74	8465	14035	242	238	2540
19	3	0.92	1688	1031	2250	38	7125	15188	-1	110	2006
19	4	0.84	1071	729	2786	0	7929	16071	-1	96	2057
20	1	0.98	1144	2225	2415	76	7500	14110	-1	365	1398
20	2	1.46	2549	1842	2549	58	5607	21044	349	295	1893
20	3	1.16	1708	1441	2896	59	7426	14406	109	189	1975
20	4	1.83	3288	2034	2466	21	9760	10069	61	187	1079

Note: -1=traces

* : sauf pour N, en %

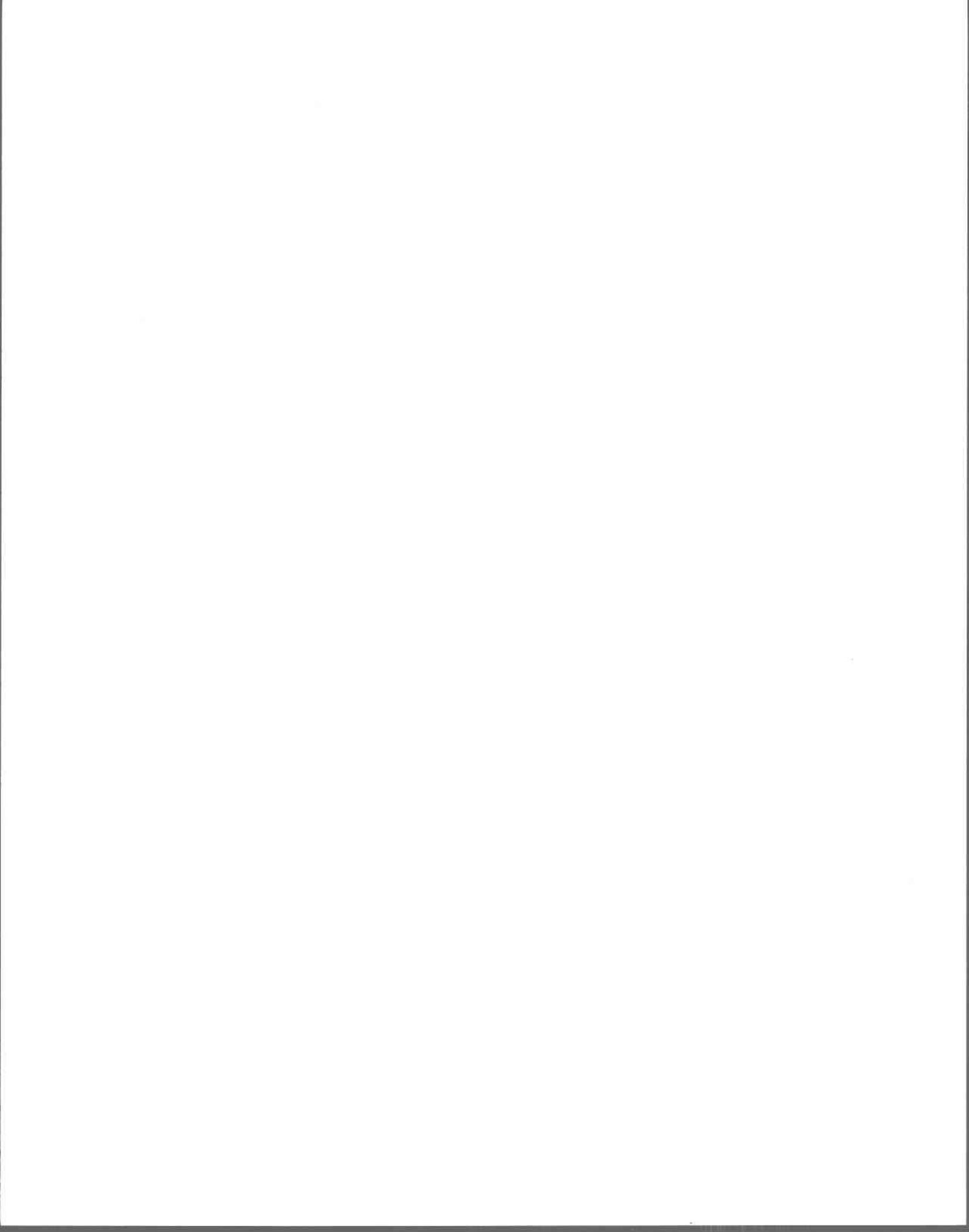


C.1 MATRICE DE CORRELATION X1, Y2, ... , X53, Y1, Y2, Y3, Y4

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
QUANTITES D'ELEMENTS TOTAUX DANS LES ROUES	1	1.000																						
	2	1.000	1.000																					
	3	1.000	1.000	1.000																				
	4	1.000	1.000	1.000	1.000																			
	5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000																		
	6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000																	
	7	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000																
	8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000															
	9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000														
	10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000													
	11	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726	0.727	0.726	0.727	0.726	1.000												
	12	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606	0.835	1.000											
	13	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.374	0.375	0.372	0.374	0.370	0.287	1.000											
	14	0.451	0.451	0.451	0.452	0.451	0.451	0.451	0.452	0.451	0.435	0.409	0.197	1.000										
	15	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.855	0.803	0.422	0.663	1.000									
	16	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.517	0.518	0.454	0.563	0.123	0.311	0.457	1.000								
	17	0.626	0.626	0.626	0.626	0.626	0.626	0.626	0.627	0.626	0.781	0.760	0.140	0.833	0.748	0.405	1.000							
	18	0.430	0.430	0.429	0.430	0.429	0.430	0.429	0.430	0.430	0.480	0.480	0.575	0.009	0.706	0.441	0.432	0.639	1.000					
	19	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.277	0.278	0.277	0.278	0.214	0.319	0.126	0.344	0.175	0.312	0.372	0.210	0.310	1.000				
	20	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.459	0.460	0.461	0.460	0.475	0.512	0.139	0.670	0.400	0.413	0.629	0.712	0.737	1.000				
	21	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.005	0.003	0.098	0.115	0.389	0.178	0.011	0.009	0.143	0.203	0.045	0.144	1.000	
	22	0.682	0.682	0.682	0.682	0.682	0.682	0.682	0.682	0.682	0.927	0.749	0.326	0.643	0.790	0.274	0.749	0.509	0.149	0.427	0.154	1.000		
23	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601	0.845	0.795	0.245	0.559	0.693	0.245	0.728	0.499	0.341	0.479	0.200	0.898	1.000		
24	0.403	0.403	0.403	0.403	0.403	0.403	0.403	0.403	0.403	0.403	0.404	0.275	0.126	0.311	0.204	0.443	0.360	0.058	0.253	0.391	0.074	0.074	1.000	
25	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	1.000	
26	0.649	0.649	0.648	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.648	0.648	0.721	0.724	0.478	0.567	0.878	0.411	0.597	0.363	0.004	0.261	0.119	0.662
27	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.151	0.150	0.074	0.258	0.067	0.109	0.101	0.356	0.023	0.158	0.147	0.164	0.064	0.058	1.000	
28	0.071	0.178	0.049	0.125	1.000																			
29	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.225	0.167	0.113	0.230	0.032	0.101	0.103	0.252	0.176	0.164	0.277	1.000	
30	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	0.688	1.000	
31	0.445	0.191	0.383	0.708	0.089	0.424	0.577	1.000																
32	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	0.483	1.000	
33	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	1.000	
34	0.118	0.315	0.361	0.589	0.222	0.251	0.717	0.388	0.084	1.000														
35	0.173	0.183	0.327	0.127	0.215	0.025	0.264	0.140	0.107	0.379	1.000													
36	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	1.000	
37	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	1.000	
38	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	1.000	
39	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	1.000	
40	0.030	0.143	0.191	0.390	0.253	0.441	0.242	0.305	0.225	0.133	0.385	0.226	0.432	1.000										
41	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	1.000	
42	0.044	0.105	0.119	0.194	0.241	0.420	0.181	0.245	0.192	0.113	0.358	0.002	0.801	0.732	1.000									
43	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	1.000	
44	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	1.000	
45	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	1.000	
46	0.542	0.181	0.206	0.378	0.113	0.128	0.408	0.333	0.423	0.283	0.369	0.333	0.162	0.209	0.204	0.198	1.000							
47	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743	1.000	
48	0.634	0.512	0.593	0.745	0.068	0.004	0.585	0.542	0.537	0.258	0.044	0.998	0.201	0.253	0.073	0.170	0.309	1.000						
49	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	1.000	
50	0.040	0.016	0.016	0.211	0.302	0.278	0.127	0.209	0.246	0.008	0.385	0.142	0.419	0.600	0.508	0.488	0.919	1.000						
51	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	1.000	
52	0.222	0.168	0.096	0.242	0.192	0.181	0.219	0.304	0.329	0.061	0.110	0.254	0.120	0.384	0.314	0.139	0.107	0.263	0.089	1.000				
53	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	1.000	
54	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	1.000	
55	0.083	0.116	0.088	0.249	0.039	0.029	0.186	0.033	0.031	0.196	0.059	0.130	0.190	0.226	0.103	0.003	0.175	0.256	0.145	0.060	1.000			
56	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	1.000	
57	0.063	0.200	0.211	0.015	0.103	0.144	0.030	0.016	0.071	0.101	0.025	0.117	0.075	0.098	0.160	0.086	0.036	0.119	0.391	0.235	0.074	0.004	1.000	
58	0.343	0.168	0.406	0.176	0.368	0.130	0.225	0.058	0.058	0.096	0.442	0.239	0.314	0.422	0.424	0.393	0.450	0.210	0.124	0.148	0.244	0.		

C.2 MATRICE DE CORRELATION Y54 à X74, Y5

	X	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	Y5			
CONCENTRATIONS DES ELEMENTS TOUX DANS LES SOLS (PROFIL INTERIEUR)	MS NUS	54	1.000																							
		55	-0.153	1.000																						
		56	0.136	0.117	1.000																					
		57	0.088	0.353	0.105	1.000																				
		58	0.154	-0.069	-0.034	0.498	1.000																			
		59	0.523	-0.355	-0.168	0.577	0.355	1.000																		
		60	0.336	0.216	-0.057	0.189	0.357	0.408	1.000																	
		61	-0.084	0.998	0.127	-0.351	-0.059	-0.321	0.741	1.000																
		62	0.172	0.058	-0.128	0.233	0.165	0.248	0.215	0.071	1.000															
		63	0.095	0.172	0.020	0.093	0.049	0.087	0.046	0.181	0.007	1.000														
	64	0.335	0.409	0.001	-0.192	0.217	0.147	0.388	0.436	-0.017	0.145	1.000														
	65	0.040	0.383	0.146	-0.072	0.079	-0.159	0.278	0.389	-0.102	0.148	0.131	1.000													
	66	0.114	0.131	-0.126	0.091	0.112	0.156	0.283	0.141	0.698	-0.010	0.110	-0.141	1.000												
	67	0.041	-0.148	-0.185	0.168	0.263	0.083	0.032	-0.146	0.475	-0.201	-0.011	-0.358	0.601	1.000											
	68	0.042	0.300	0.033	-0.084	0.074	0.035	0.372	0.307	0.546	-0.065	0.222	-0.046	0.904	0.445	1.000										
	69	0.090	0.037	0.017	-0.173	0.084	0.150	0.054	-0.031	0.419	0.003	0.096	-0.161	0.688	0.625	0.589	1.000									
	70	0.192	0.139	0.041	-0.159	0.036	-0.197	-0.017	0.137	0.211	-0.329	0.172	-0.268	0.532	0.757	0.580	0.604	1.000								
	71	-0.357	0.059	0.096	-0.038	-0.040	-0.276	-0.099	0.034	-0.035	-0.171	-0.174	-0.196	0.152	0.411	0.185	0.452	0.606	1.000							
	72	0.162	0.041	-0.002	0.130	0.083	0.184	0.119	0.053	0.690	0.021	0.040	-0.155	0.875	0.577	0.816	0.776	0.471	0.090	1.000						
	73	0.143	0.457	0.164	-0.456	0.015	-0.067	0.542	0.471	-0.021	-0.057	0.501	0.708	0.296	-0.046	0.577	0.052	0.333	0.065	0.135	1.000					
	74	0.052	0.177	0.140	-0.180	0.008	-0.049	0.194	0.376	0.439	-0.118	0.227	-0.078	0.741	0.311	0.909	0.483	0.551	0.335	0.655	0.670	1.000				
QUANTITE DES APPLIQUES	Y5	54	0.278	0.703	0.130	-0.463	-0.100	-0.371	0.771	0.893	0.046	0.118	0.199	0.362	0.110	0.219	0.342	0.127	0.215	0.147	0.057	0.618	0.478	1.000		



ANNEXE I

ANALYSES DES ÉCHANTILLONS
DES SUBSTRATS DE CROISSANCE
À LA FIN DE L'EXPÉRIENCE

ANALYSES DU PHOSPHORE TOTAL, DE L'AZOTE TOTAL ET DES CATIONS TOTAUX
DES PROFITS SUPPLEMENTAIRES (en mg.kg-1)

Nos de traitement	Nus de réé- titton	P	N	Fe	Al	Mn	Ca	Ms	K	Zn	Cu
1	1	765.46	-1.00	9027.06	2590.21	129.51	3112.11	1024.48	386.60	40.59	9.66
1	1	1012.59	-1.00	12571.90	2553.96	188.85	4280.58	1025.18	485.61	30.58	3.60
1	1	973.72	-1.00	13973.10	2457.21	225.55	3777.51	1008.56	458.43	31.17	7.33
1	2	897.64	-1.00	12716.50	2263.78	202.76	3779.53	944.88	413.39	25.59	5.91
1	2	1383.86	-1.00	19153.50	2834.65	311.02	5157.48	1122.05	492.13	39.37	9.84
2	1	1149.88	-1.00	16805.90	3077.40	250.61	4588.45	1271.50	534.40	40.54	9.21
2	2	975.77	-1.00	12780.60	2678.57	191.33	4687.50	1128.83	478.32	30.61	9.57
2	3	1182.83	-1.00	15928.70	2803.74	241.82	4065.42	1156.54	490.65	35.05	12.27
3	1	832.79	-1.00	12353.90	2824.68	178.57	3944.81	1136.36	616.88	27.60	6.42
3	2	1073.90	-1.00	15658.20	2684.76	249.42	4139.72	1143.19	484.99	38.11	8.66
3	3	1081.05	-1.00	13803.00	2824.19	218.83	4264.34	1084.79	542.39	31.80	9.35
3	4	1013.32	-1.00	13238.50	2669.49	205.21	3613.80	1107.75	490.32	27.24	5.43
4	1	785.97	-1.00	11960.40	2679.86	167.27	3884.89	1169.06	503.60	-1.00	5.40
4	2	1276.41	-1.00	16954.20	2904.93	244.72	4066.90	1197.18	545.78	-1.00	8.80
4	3	1241.32	-1.00	18517.40	2772.95	284.74	4392.06	1153.85	483.87	-1.00	7.44
4	4	1405.09	-1.00	20880.90	3238.21	308.93	4987.59	1321.34	614.14	-1.00	9.31
5	1	1362.05	-1.00	17537.00	2933.40	279.07	5739.96	1236.79	523.26	-1.00	9.51
5	2	1296.27	-1.00	17055.30	2812.50	306.49	4759.62	1135.82	504.81	-1.00	10.82
5	3	910.33	-1.00	13004.80	2743.47	194.18	3384.80	1104.51	481.00	-1.00	7.13
5	4	1139.15	-1.00	16910.40	2706.37	244.10	3944.58	1096.70	459.91	-1.00	7.08
6	1	1177.83	-1.00	18897.20	2840.65	277.14	5040.42	1143.19	554.27	-1.00	12.12
6	2	1242.35	-1.00	16164.70	2717.65	248.82	4288.24	1076.47	458.82	-1.00	7.06
6	3	753.70	-1.00	11176.10	2826.35	169.95	3897.78	1126.85	480.30	-1.00	5.54
6	4	1616.96	-1.00	20068.10	2970.30	317.45	4826.73	1150.99	445.54	-1.00	9.28
7	1	850.99	-1.00	12400.70	2814.57	185.43	3725.17	1125.83	447.02	-1.00	4.97
7	2	689.13	-1.00	11710.80	2909.64	168.07	3813.25	1174.70	596.39	-1.00	10.84
7	3	864.41	-1.00	11583.70	2637.71	174.79	3289.19	1048.73	476.70	-1.00	7.94
7	4	1165.66	-1.00	15234.90	2837.35	233.13	3867.47	1174.70	451.81	9.04	7.23
8	1	1319.58	-1.00	16892.70	2971.70	263.56	4086.08	1149.76	459.91	8.84	7.08
8	2	1031.47	-1.00	13986.00	2902.10	230.77	4790.21	1136.36	472.03	-1.00	6.99
8	3	943.66	-1.00	13838.00	2728.87	213.03	3392.25	1003.52	457.75	-1.00	7.04
8	4	1006.35	-1.00	15623.60	2442.26	268.48	4520.79	1160.51	415.70	-1.00	8.66
9	1	803.38	-1.00	13932.40	2575.62	248.22	4377.22	1121.00	440.39	-1.00	8.01
9	2	905.97	-1.00	14585.20	2505.53	238.94	5558.63	1161.50	481.20	-1.00	8.30
9	3	1143.06	-1.00	13472.20	2708.33	234.72	5152.78	1263.89	513.89	-1.00	6.94
9	4	926.73	-1.00	14792.10	2554.46	242.08	3980.20	1128.71	445.54	-1.00	7.43
10	1	1441.11	-1.00	15571.60	2598.15	287.53	4416.86	1143.19	536.95	-1.00	8.66
10	2	1016.36	-1.00	11863.30	2575.93	205.02	3890.19	1121.50	613.32	-1.00	5.26
10	3	978.34	-1.00	13273.50	2450.50	228.34	4158.42	1095.30	556.93	-1.00	5.57
10	4	1136.14	-1.00	14498.80	2283.42	246.91	3508.66	1021.04	482.67	-1.00	7.43
11	1	813.68	-1.00	11196.90	2511.79	196.34	4103.77	1114.39	459.91	-1.00	10.61
11	2	943.02	-1.00	11875.00	2408.09	226.10	4816.18	1084.56	459.56	-1.00	14.71
11	3	988.23	-1.00	12158.80	2558.82	224.12	4676.47	1147.06	476.47	-1.00	10.59
11	4	972.17	-1.00	13936.30	2410.23	242.37	4308.80	1077.20	471.28	-1.00	13.47
12	1	958.65	-1.00	14116.50	2443.61	229.32	3947.37	1127.82	451.13	-1.00	9.40
12	2	1271.21	-1.00	18575.80	2666.67	345.46	4666.67	1227.27	469.70	-1.00	18.18
12	3	1043.80	-1.00	14114.20	2362.20	243.60	4000.98	1048.23	472.44	-1.00	10.33
12	4	1042.09	-1.00	13737.40	2317.84	246.86	4032.66	1055.28	433.42	-1.00	9.42
13	1	715.60	-1.00	10568.80	2174.31	172.02	3261.47	990.83	440.37	-1.00	8.26
13	2	1037.23	-1.00	15567.40	2464.54	257.09	4734.04	1117.02	496.45	-1.00	8.87
13	3	1030.59	-1.00	13994.10	2470.59	218.82	3847.06	1129.41	458.82	-1.00	8.82
13	4	1276.74	-1.00	15819.80	2424.42	252.91	4569.77	1151.16	453.49	-1.00	8.72

ANALYSES DU PHOSPHORE TOTAL, DE L'AZOTE TOTAL ET DES CATIONS TOTAUX
DES PROFILS SUPERIEURS (suite)

14	1	864.85	-1.00	12181.00	2505.80	198.38	3758.70	1078.89	522.04	-1.00	6.96
14	2	1408.93	-1.00	19589.30	2714.29	335.71	4428.57	1196.43	428.57	-1.00	14.29
14	3	977.22	-1.00	12413.80	2364.53	195.81	5024.63	1016.01	498.77	-1.00	11.08
14	4	854.36	-1.00	11179.20	2387.97	171.58	3820.75	1079.01	495.28	-1.00	8.84
15	1	1059.11	-1.00	15081.30	2228.85	242.41	4116.05	1024.95	488.07	-1.00	13.02
15	2	712.68	-1.00	10450.20	2097.16	165.28	3305.69	924.17	479.86	-1.00	8.89
15	3	1033.83	-1.00	14483.90	2408.26	227.06	3990.83	1083.72	481.65	-1.00	15.48
15	4	871.43	-1.00	13875.00	2410.71	223.21	3750.00	1071.43	482.14	-1.00	7.14
16	1	1461.78	0.14	26512.70	8789.81	398.89	2746.82	859.87	644.90	-1.00	64.49
16	2	1420.00	0.15	25625.00	8075.00	380.00	2825.00	925.00	600.00	-1.00	15.00
16	3	1376.55	0.15	23664.60	8128.88	330.74	2585.40	861.80	628.88	-1.00	13.98
16	4	1299.37	0.14	21300.00	7368.75	286.88	2493.75	862.50	618.75	-1.00	13.13
17	1	1310.00	0.15	21950.00	7850.00	310.00	2450.00	800.00	675.00	-1.00	12.50
17	2	1543.66	0.17	25196.90	8681.51	380.14	2876.71	873.29	616.44	-1.00	17.98
17	3	1452.96	0.16	26446.00	8832.75	410.28	3005.23	940.77	653.31	-1.00	15.68
17	4	1256.25	0.13	21956.30	7518.75	333.75	2287.50	843.75	543.75	-1.00	11.25
18	1	1185.00	-1.00	13425.00	2370.00	225.00	4110.00	1080.00	495.00	-1.00	6.00
18	2	1006.71	-1.00	12398.70	2483.22	184.56	5318.79	1140.94	570.47	-1.00	5.03
18	3	1314.25	-1.00	13177.60	2330.61	220.79	4398.36	1033.88	438.08	-1.00	3.50
18	4	1261.21	-1.00	14192.80	2354.26	232.06	3951.79	1076.23	504.48	-1.00	3.04
19	1	1063.57	-1.00	11699.30	2530.56	192.54	4400.98	1100.24	476.77	-1.00	7.33
19	2	1185.19	-1.00	12759.30	2092.59	224.07	4444.44	944.44	481.48	-1.00	9.26
19	3	998.83	-1.00	12686.90	2365.65	213.79	4047.90	1051.40	473.13	-1.00	8.76
19	4	1023.57	-1.00	12804.00	2531.02	214.02	5024.81	1116.63	558.31	-1.00	9.31
20	1	1043.35	-1.00	12066.50	2328.63	211.69	4581.65	1028.23	483.87	-1.00	13.61
20	2	1208.05	-1.00	14245.00	2600.67	263.42	4362.42	1073.83	486.58	-1.00	16.78
20	3	1025.16	-1.00	13471.20	2500.00	242.81	4496.40	1169.06	485.61	-1.00	10.79
20	4	1160.13	-1.00	13513.10	2320.26	238.56	5114.38	1029.41	506.54	-1.00	13.07

Note: -1.00=traces

ANALYSES DU PHOSPHORE TOTAL, DE L'AZOTE TOTAL ET DES CATIONS TOTAUX
DES PROFILS INFÉRIEURS (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Nus de répartition	P	N	Fe	Al	Mn	Ca	Mg	K	Zn	Cu
1	1	1050.33	-1.00	10043.80	2314.00	177.24	4283.37	1001.09	459.52	-1.00	4.92
1	2	1206.68	-1.00	12772.30	2376.24	226.49	4715.35	1058.17	519.80	-1.00	7.43
1	3	827.46	-1.00	10704.20	2535.21	183.10	3926.06	1091.55	475.35	-1.00	5.28
1	4	1061.80	-1.00	14561.80	2612.36	222.47	5073.03	1179.78	405.62	-1.00	6.74
2	1	1088.44	-1.00	16394.60	2551.02	229.59	3758.50	1003.40	425.17	-1.00	6.80
2	2	1090.59	-1.00	14752.90	2505.88	218.82	4217.65	1041.18	458.82	-1.00	7.06
2	3	846.15	-1.00	12814.70	2377.62	176.57	4020.98	996.50	489.51	-1.00	5.24
2	4	721.96	-1.00	11039.70	2400.70	162.97	3837.62	981.31	490.65	-1.00	5.26
3	1	964.99	-1.00	14245.10	2609.41	203.50	4775.71	1083.15	525.16	-1.00	6.56
3	2	953.39	-1.00	14300.80	2462.92	217.69	4179.03	1016.95	460.80	-1.00	6.36
3	3	677.71	-1.00	10376.50	2304.22	144.58	3448.80	948.80	466.87	-1.00	6.02
3	4	1093.43	-1.00	14784.40	2664.27	232.55	4466.12	1093.43	523.61	-1.00	7.70
4	1	809.35	-1.00	11079.10	2284.17	167.27	4118.71	989.21	503.60	-1.00	5.40
4	2	879.19	-1.00	14551.40	2332.54	206.34	3893.54	986.84	502.39	-1.00	7.18
4	3	1079.14	-1.00	16510.80	2715.83	253.60	4928.06	1151.08	521.58	-1.00	7.19
4	4	984.49	-1.00	14373.50	2452.27	198.69	4403.34	1056.09	465.39	-1.00	5.37
5	1	1165.05	-1.00	15000.00	2475.73	223.91	4842.23	1055.83	491.51	-1.00	7.28
5	2	896.91	-1.00	12649.50	2505.15	196.39	4231.65	1005.15	448.45	-1.00	6.19
5	3	899.28	-1.00	12571.90	2535.97	172.66	4298.56	1043.17	503.60	-1.00	5.40
5	4	1219.21	-1.00	15055.40	2586.21	230.91	4858.37	1071.43	461.82	-1.00	7.39
6	1	1408.54	-1.00	18841.50	2725.61	294.51	5469.51	1152.44	493.90	-1.00	9.15
6	2	904.26	-1.00	12553.20	2535.46	173.76	3953.90	1081.56	478.72	-1.00	5.32
6	3	725.24	-1.00	10984.70	2494.10	150.35	3785.38	1079.01	495.28	-1.00	3.54
6	4	1234.34	0.00	17024.10	2602.41	303.61	5000.60	1138.55	553.01	-1.00	10.84
7	1	786.32	0.00	12699.50	2406.32	205.26	3156.32	1024.74	431.05	33.16	6.32
7	2	725.53	0.00	13191.90	2409.79	204.42	3738.48	1075.34	482.25	30.23	7.20
7	3	611.11	0.00	11145.50	2374.34	191.80	3707.67	1101.85	465.61	29.10	5.29
7	4	995.90	0.00	13852.50	2357.92	243.17	4721.31	1209.02	500.00	34.15	8.20
8	1	1086.59	0.00	15007.30	2345.12	250.61	4384.76	1048.17	506.71	34.76	9.15
8	2	923.95	0.00	15360.90	2436.25	252.77	3725.06	1097.56	470.62	29.93	8.31
8	3	840.25	0.00	12068.50	2310.68	206.95	3532.16	992.74	440.35	29.56	6.22
8	4	1325.06	0.00	17225.80	2355.66	315.24	4659.35	1027.14	457.38	34.64	10.39
9	1	949.68	0.00	14318.20	2620.13	248.38	4220.78	1144.48	516.23	34.09	8.12
9	2	1127.40	0.00	16599.10	2747.33	267.06	5437.10	1276.12	524.52	36.78	9.59
9	3	854.52	0.00	12504.30	2444.38	214.55	4676.04	1096.58	487.78	25.67	7.33
9	4	914.23	0.00	13600.40	2507.30	248.18	4233.58	1116.79	529.20	32.85	9.12
10	1	938.15	0.00	13275.30	2371.52	236.50	4364.11	1062.28	527.88	30.05	7.84
10	2	882.94	0.00	11771.80	2509.92	204.36	3789.68	1077.38	563.49	21.83	7.94
10	3	863.39	0.00	12858.50	2514.04	218.68	4308.86	1176.03	542.66	29.16	8.10
10	4	955.32	0.00	13581.40	2250.00	240.95	3919.68	1041.86	495.48	32.24	8.48
11	1	830.25	0.00	11404.70	2356.52	202.82	3589.49	1044.75	445.04	26.26	7.30
11	2	1034.67	0.00	15971.70	2408.76	275.09	3886.86	1085.31	433.85	39.69	9.58
11	3	810.21	0.00	11661.10	2213.88	206.42	3302.75	987.39	467.89	27.52	6.88
11	4	1024.09	0.00	14127.30	2438.18	252.27	4118.18	1115.45	478.64	36.82	9.55
12	1	1020.98	0.00	16215.00	2501.75	286.71	4055.94	1159.09	472.03	38.46	10.49
12	2	1188.93	0.00	16463.10	2443.03	307.38	4586.07	1110.25	484.43	38.11	11.07
12	3	1252.33	0.00	18418.60	2670.35	324.42	4796.51	1257.56	535.46	38.37	12.21
12	4	980.51	0.00	14754.00	2370.41	258.03	3663.99	1056.19	450.69	34.40	8.60
13	1	826.27	0.00	11981.80	2382.57	219.73	3631.96	1089.59	483.05	25.42	7.26
13	2	1005.15	0.00	15587.60	2675.26	296.91	5273.20	1236.29	508.76	38.66	10.82
13	3	748.22	0.00	11189.40	2403.21	187.05	4471.50	1100.95	545.13	24.94	7.13
13	4	1318.33	0.00	18600.00	2548.33	321.67	5166.67	1150.00	495.00	38.33	11.67

ANALYSES DU PHOSPHORE TOTAL, DE L'AZOTE TOTAL ET DES CATIONS TOTAUX
DES PROFILS INFÉRIEURS (suite)

14	763.13	0.00	11735.60	2705.62	196.88	4500.00	1218.75	611.25	28.13	7.50
14	863.47	0.00	11477.00	2382.98	203.90	3794.33	1046.10	496.45	28.37	8.87
14	597.29	0.00	9833.14	2404.41	164.59	3936.65	1108.03	554.86	28.85	6.79
14	897.68	0.00	12451.30	2251.66	235.66	4181.42	998.89	482.85	31.53	9.96
15	1051.49	0.00	15268.00	2397.02	281.02	4540.94	1079.40	526.67	33.50	11.17
15	1321.60	0.00	17601.30	2595.87	327.67	4842.23	1214.20	542.48	41.87	12.74
15	822.15	0.00	12434.60	2062.08	231.54	3959.73	951.34	506.71	26.85	10.07
15	602.46	0.00	8659.25	2000.59	131.73	3303.86	843.09	425.06	19.32	3.51
16	1392.17	0.14	24225.20	8146.96	328.28	2551.92	706.87	599.04	23.96	7.19
16	1460.29	0.13	25808.80	8669.12	330.88	2843.38	827.21	622.06	28.68	6.62
16	1645.16	0.15	29032.30	9314.52	375.00	3009.68	774.19	609.68	29.03	9.68
16	1167.82	0.11	21799.30	7655.71	301.04	2231.83	674.74	570.93	28.55	5.19
17	1100.54	0.09	20788.00	6725.54	277.17	2323.37	835.60	593.07	22.42	6.11
17	1470.10	0.12	24916.90	8696.01	289.04	2865.45	873.09	640.36	22.43	4.98
17	1134.02	0.09	24742.30	7061.86	409.79	2319.59	824.74	546.39	36.08	7.73
17	1789.22	0.17	32843.10	11642.20	465.69	3161.76	955.88	615.20	36.76	9.80
18	1010.03	0.00	15043.00	2449.86	244.99	4426.93	1010.03	419.05	23.64	8.60
18	886.70	0.00	12746.30	2475.37	205.05	3546.80	997.54	448.89	22.17	5.54
18	888.89	0.00	14074.10	2574.07	235.18	4166.67	1092.59	442.59	25.93	5.56
18	1214.65	0.00	15424.20	2487.15	264.14	4395.89	1060.41	441.52	26.99	11.57
19	1224.87	0.00	16206.00	2657.04	260.05	4654.52	1055.28	454.15	35.80	9.42
19	1016.26	0.00	14430.90	2581.30	227.64	4024.39	1077.24	463.42	30.49	8.13
19	839.04	0.00	11301.40	2311.64	179.80	4417.81	976.03	410.96	22.26	5.14
19	1050.00	0.00	14062.50	2437.50	225.00	4125.00	1012.50	446.25	28.13	7.50
20	1216.51	0.00	17407.90	2522.73	306.82	4844.50	1055.02	453.95	37.68	8.97
20	1185.54	0.00	17230.10	2537.35	283.73	5421.69	1086.14	496.99	34.34	9.04
20	845.82	0.00	11651.70	2297.91	182.43	4348.89	963.76	455.16	23.96	5.53
20	909.20	0.00	13967.00	2377.36	229.95	3732.31	1001.18	449.29	33.61	7.08

Notes: -1.00=traces

0.00=traces

D.3 ANALYSES DU PHOSPHORE TOTAL, DE L'AZOTE TOTAL ET DES CATIONS TOTAUX
DE L'ESSAI DE PERCOLATION EN SERRES (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Profil	P	N	Fe	Al	Mn	Ca	Mg	K	Zn	Cu
21	S	900.68	0.00	15230.20	2446.39	243.79	2251.69	968.40	482.51	30.47	10.16
22	S	873.24	0.00	13427.80	2207.75	223.59	2024.65	838.03	404.93	35.21	15.85
23	S	863.69	0.00	13481.70	2268.34	227.38	2108.80	849.02	425.43	27.51	7.33
24	S	1107.05	0.00	17864.00	2471.03	296.60	2644.84	923.80	442.07	32.12	9.45
25	S	813.38	0.00	12350.10	2293.76	212.78	1841.05	861.67	430.08	27.16	6.04
21	I	846.71	0.00	13102.20	2213.50	217.15	2043.80	854.02	463.50	32.85	23.72
22	I	859.49	0.00	13301.10	2286.50	211.68	2299.27	832.12	401.46	25.55	18.25
23	I	692.94	0.00	11571.20	2000.54	195.65	1711.96	797.28	414.13	27.72	8.15
24	I	894.93	0.00	13148.60	2003.62	234.64	2228.26	773.55	434.78	27.17	10.87
25	I	700.11	0.00	10776.90	1931.77	185.78	1875.00	741.40	438.65	20.64	8.60

Notes:

S=supérieur

I=inférieur

0.00=traces

D.4 ANALYSES DE L'AZOTE INORGANIQUE ET DES CATIONS ÉCHANGÉABLES DES PROFILS SUPÉRIEURS (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Nos de répartition	N-NH ₄	N-NO ₃	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	N-min
1	1	1.37	0.46	1.42	81.22	11.78	1.42	395.94	1.82
1	2	1.93	0.48	0.99	80.99	9.88	1.19	414.82	2.41
1	3	1.53	0.51	0.59	75.31	9.29	1.08	342.30	2.04
1	4	1.53	0.51	1.62	89.34	10.36	1.22	406.09	2.04
2	1	1.57	2.10	1.65	90.29	10.29	1.36	407.77	3.67
2	2	1.58	0.53	2.61	79.20	10.23	1.50	380.95	2.11
2	3	1.54	0.51	2.16	78.62	17.69	1.38	373.46	2.05
2	4	1.49	0.50	1.43	76.53	9.69	1.22	367.35	1.99
3	1	1.41	0.47	1.23	87.98	11.87	1.23	347.83	1.87
3	2	2.56	0.51	1.52	80.81	10.71	1.31	373.74	3.07
3	3	2.00	0.50	1.97	76.66	9.34	1.38	324.32	2.50
3	4	1.50	2.00	1.39	83.17	10.50	1.19	366.34	3.49
4	1	1.46	0.49	1.22	76.96	9.62	1.22	374.68	1.95
4	2	1.55	1.55	1.43	83.67	10.31	1.33	357.14	3.10
4	3	1.00	-1.00	0.71	83.04	11.04	1.11	394.94	-1.00
4	4	1.43	2.39	0.98	81.95	11.22	1.27	370.73	3.82
5	1	1.01	2.53	0.91	91.14	11.54	1.11	384.81	3.54
5	2	0.51	6.14	2.24	82.73	10.51	1.75	340.63	6.65
5	3	0.51	3.03	2.54	84.48	11.40	1.73	356.23	3.54
5	4	1.03	3.08	0.81	75.95	9.32	1.01	364.56	4.10
6	1	0.50	12.54	2.02	77.78	12.63	1.72	383.84	13.04
6	2	1.53	3.56	1.01	82.03	10.63	1.22	374.68	5.09
6	3	1.04	4.18	1.50	80.00	10.30	1.50	380.00	5.22
6	4	0.99	0.99	0.49	83.33	10.69	1.08	401.96	1.98
7	1	1.49	34.26	1.19	72.46	10.72	1.29	377.17	35.75
7	2	3.84	27.33	5.59	88.24	11.18	2.94	372.55	31.16
7	3	1.53	9.67	3.05	83.46	10.48	1.93	386.77	11.20
7	4	1.02	9.17	1.21	87.88	10.10	1.31	404.04	10.19
8	1	0.51	10.62	1.37	92.91	12.03	1.56	479.22	11.12
8	2	0.50	10.97	1.52	81.01	10.43	1.42	435.44	11.47
8	3	0.99	7.91	1.22	87.09	10.73	1.22	394.94	8.89
8	4	0.48	15.27	2.38	85.15	11.49	1.78	495.05	15.74
9	1	0.50	26.97	1.90	69.83	9.98	1.50	428.93	27.47
9	2	1.02	15.85	4.13	90.68	11.69	2.92	503.78	16.87
9	3	0.50	15.38	1.33	78.97	9.95	1.33	430.77	15.87
9	4	0.51	25.10	2.43	77.97	10.73	2.03	496.20	25.61
10	1	0.50	39.12	1.00	97.24	11.63	2.21	501.25	39.62
10	2	0.51	24.92	1.01	88.10	13.57	2.03	435.44	25.43
10	3	0.51	20.96	1.21	93.94	12.63	2.02	444.44	21.47
10	4	4.30	31.07	1.12	112.24	12.76	2.04	448.98	35.37
11	1	0.51	9.22	1.22	74.30	9.67	1.53	407.13	9.73
11	2	0.50	25.23	3.66	82.44	12.01	2.44	498.73	25.73
11	3	0.50	17.34	1.53	81.63	11.73	1.43	459.18	17.84
11	4	0.49	11.76	1.73	81.63	10.61	1.43	377.55	12.25
12	1	0.51	25.03	1.89	86.35	11.41	1.59	466.50	25.54
12	2	0.54	38.54	10.20	88.78	14.39	5.10	479.59	39.08
12	3	0.49	13.71	2.50	95.00	12.50	2.20	500.00	14.20
12	4	1.53	14.78	1.89	82.59	11.54	1.69	487.56	16.31
13	1	0.53	10.04	2.95	87.53	12.72	1.73	549.62	10.57
13	2	0.52	8.90	1.99	105.47	11.74	1.39	567.16	9.42
13	3	0.46	6.02	1.60	96.24	12.13	1.40	531.33	6.48
13	4	0.48	3.37	1.62	97.22	12.15	1.42	536.71	3.85

ANALYSES DE L'AZOTE INORGANIQUE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES DES PROFILS SUPÉRIEURS (suite)

14	1	0.50	5.49	1.52	91.14	10.94	1.62	435.44	5.99
14	2	0.51	11.73	3.30	105.00	12.50	2.30	480.00	12.24
14	3	0.99	13.92	5.44	102.77	13.30	3.02	473.55	14.91
14	4	-1.00	27.00	2.37	90.49	12.34	1.75	411.31	27.00
15	1	0.52	22.68	5.67	101.27	12.86	3.54	455.70	23.20
15	2	0.52	41.88	3.38	92.07	13.81	2.05	419.44	42.40
15	3	-1.00	17.03	2.12	84.85	10.71	1.72	404.04	17.03
15	4	-1.00	9.92	2.13	97.46	12.18	1.83	395.94	9.92
16	1	1.98	12.39	3.74	212.12	28.79	6.06	4040.40	14.37
16	2	2.97	4.95	5.58	215.23	26.60	6.70	3959.39	7.92
16	3	2.65	4.78	8.20	205.00	29.00	7.30	4100.00	7.43
16	4	2.05	6.67	8.02	213.53	29.57	7.52	3809.52	8.73
17	1	3.09	19.55	5.51	220.55	30.68	8.62	4210.53	22.63
17	2	2.65	18.56	9.31	225.06	36.83	8.18	4296.68	21.21
17	3	2.54	20.28	9.77	231.04	31.35	7.43	4376.59	22.82
17	4	2.57	13.90	8.80	231.00	32.50	8.50	4000.00	16.48
18	1	0.53	5.29	0.69	119.80	12.67	1.98	445.54	5.82
18	2	0.50	6.56	0.81	106.87	10.48	1.53	396.95	7.06
18	3	0.95	12.87	0.71	113.26	12.55	2.35	367.35	13.82
18	4	0.52	25.88	0.51	118.48	12.25	2.23	394.94	26.40
19	1	0.51	2.57	3.45	131.03	15.27	3.25	443.35	3.09
19	2	0.51	-1.00	4.06	126.90	15.63	3.25	416.24	0.51
19	3	-1.00	-1.00	3.61	129.32	14.64	3.51	401.00	-1.00
19	4	-1.00	0.52	3.63	110.83	13.60	2.62	392.95	0.52
20	1	-1.00	8.13	10.05	111.56	13.57	4.02	402.01	8.13
20	2	0.52	4.15	9.77	128.24	14.25	4.07	437.66	4.67
20	3	-1.00	3.05	6.98	136.66	18.45	3.59	399.00	3.05
20	4	0.51	0.51	8.08	139.90	14.09	5.02	423.65	1.01

Note: -1.00=traces

D.5 ANALYSES DE L'AZOTE INORGANIQUE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES DES PROFILS INFÉRIEURS (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Nos de répétition	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	N-min
1	1	-1.00	0.49	0.80	100.50	9.45	1.29	368.16	0.49
1	2	-1.00	-1.00	0.92	104.84	10.48	1.32	407.13	-1.00
1	3	0.49	-1.00	0.51	109.09	12.02	1.41	424.24	0.49
1	4	-1.00	-1.00	0.40	115.15	12.83	2.02	434.34	-1.00
2	1	0.51	2.54	0.41	107.61	12.18	1.32	487.31	3.05
2	2	0.51	0.51	0.30	107.07	10.30	1.52	464.65	1.02
2	3	0.50	6.45	0.40	104.00	10.40	1.70	440.00	6.95
2	4	-1.00	1.49	0.41	117.77	11.68	1.42	487.31	1.49
3	1	0.51	2.03	0.40	90.45	10.55	1.01	402.01	2.54
3	2	0.52	1.04	0.50	105.47	10.55	1.49	427.86	1.57
3	3	1.00	5.13	0.30	99.50	10.55	1.39	437.81	5.13
3	4	0.52	4.18	0.51	112.53	12.28	1.64	491.05	4.70
4	1	0.52	2.07	0.40	118.59	11.66	1.71	482.41	2.59
4	2	0.49	1.97	0.80	118.41	12.44	1.39	487.56	2.46
4	3	0.49	0.98	0.30	104.57	11.78	1.42	487.31	1.47
4	4	0.52	5.16	0.41	91.37	9.85	1.12	406.09	5.68
5	1	0.50	6.93	0.40	91.77	10.47	1.30	428.93	7.43
5	2	0.51	9.22	0.40	105.05	11.62	1.41	484.85	9.73
5	3	0.50	3.48	0.50	80.20	10.03	1.00	380.95	3.98
5	4	0.49	6.42	0.50	90.00	10.00	1.20	420.00	6.92
6	1	0.49	16.67	0.30	105.74	11.17	1.30	458.85	17.16
6	2	-1.00	16.47	0.49	93.60	11.33	1.18	413.79	16.47
6	3	0.51	11.62	0.30	95.72	10.38	1.21	423.17	12.12
6	4	0.51	2.54	0.31	106.12	12.24	1.33	510.20	3.04
7	1	0.52	31.48	0.30	91.14	10.73	1.22	475.95	32.00
7	2	0.49	11.26	0.71	92.93	10.61	1.41	434.34	11.75
7	3	0.49	7.79	0.50	95.05	10.40	0.99	445.54	8.28
7	4	0.51	25.38	0.70	87.78	8.98	1.20	418.95	25.89
8	1	0.51	24.15	0.49	93.37	10.52	1.28	471.74	24.67
8	2	0.48	5.29	0.51	90.91	10.10	1.21	424.24	5.77
8	3	-1.00	7.29	0.40	88.00	11.20	1.00	450.00	7.29
8	4	1.98	16.81	0.59	96.31	10.52	1.18	471.74	18.79
9	1	0.51	46.06	0.70	97.49	11.76	1.11	502.51	46.57
9	2	-1.00	13.70	0.59	99.76	12.32	1.27	489.00	13.70
9	3	0.49	23.95	0.51	99.49	12.18	1.12	477.16	24.44
9	4	0.50	6.47	0.41	93.64	10.38	1.12	437.66	6.97
10	1	0.51	33.87	0.60	103.78	12.59	1.61	483.63	34.38
10	2	0.51	18.82	0.60	103.78	12.09	1.51	473.55	19.33
10	3	0.51	12.79	0.71	98.73	10.18	1.42	458.02	13.31
10	4	0.51	7.70	0.91	104.30	11.14	1.72	455.70	8.21
11	1	0.49	10.23	0.41	87.09	11.34	1.11	475.95	10.72
11	2	-1.00	22.61	0.61	94.18	11.44	1.22	496.20	22.61
11	3	0.49	10.79	0.50	83.42	11.06	1.21	472.36	11.29
11	4	0.50	14.56	0.40	91.23	10.73	1.40	481.20	15.06
12	1	-1.00	28.96	0.40	92.46	10.55	1.31	482.41	28.96
12	2	0.51	33.50	0.50	87.78	10.97	1.20	488.78	34.01
12	3	0.51	21.00	0.49	89.54	10.32	1.36	486.62	21.52
12	4	0.51	12.23	0.50	82.38	10.42	1.19	476.43	12.74
13	1	-1.00	13.03	0.51	75.51	11.22	1.12	469.39	13.03
13	2	-1.00	9.44	0.72	96.16	10.74	1.33	491.05	9.44
13	3	0.51	9.25	0.50	82.41	9.55	1.01	432.16	9.76
13	4	-1.00	5.14	0.61	96.45	11.17	1.22	507.61	5.14

ANALYSES DE L'AZOTE INORGANIQUE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES DES PROFILS INFÉRIEURS (suite)

14	1	0.52	12.38	0.59	90.10	11.39	0.99	475.25	12.90
14	2	-1.00	4.62	0.71	94.42	11.17	1.22	507.61	4.62
14	3	-1.00	2.62	0.60	86.65	10.58	1.21	493.70	2.62
14	4	-1.00	26.32	0.51	97.19	11.25	1.23	501.28	26.32
15	1	-1.00	62.80	0.50	92.54	10.65	1.19	487.56	62.80
15	2	-1.00	21.74	0.60	88.34	12.41	0.99	476.43	21.74
15	3	-1.00	19.45	0.71	91.92	9.60	1.31	454.54	19.45
15	4	0.50	33.10	0.71	94.95	12.12	1.21	515.15	33.60
16	1	2.94	10.29	1.39	218.36	34.74	4.96	3821.34	13.24
16	2	3.05	5.09	1.40	222.44	37.41	4.49	3990.02	8.15
16	3	3.18	4.25	2.27	236.45	35.47	5.62	3940.89	7.43
16	4	2.45	21.57	1.20	222.00	30.50	4.70	3900.00	24.02
17	1	11.39	1.98	1.31	383.84	70.71	5.56	4040.40	13.37
17	2	3.09	9.79	1.73	256.85	43.65	5.28	3857.87	12.89
17	3	2.52	17.14	1.42	213.67	27.34	4.76	3645.57	19.66
17	4	2.98	8.43	1.29	210.42	28.29	4.67	3573.20	11.41
18	1	0.50	7.97	0.68	84.88	11.22	1.17	536.58	8.47
18	2	0.53	1.59	0.69	85.71	10.05	1.28	492.61	2.12
18	3	1.03	2.57	0.60	87.22	9.52	1.10	481.20	3.60
18	4	1.49	10.93	0.60	86.57	9.95	1.09	467.66	12.43
19	1	2.90	2.90	0.61	101.52	11.68	2.03	507.61	5.80
19	2	1.97	1.48	0.60	103.52	13.07	1.91	512.56	3.45
19	3	4.19	4.72	0.71	95.72	12.59	1.81	503.78	8.91
19	4	4.11	3.60	0.71	96.94	10.20	1.84	510.20	7.71
20	1	2.48	15.84	0.41	98.73	11.70	1.93	559.80	18.32
20	2	1.04	1.55	0.30	103.23	11.41	1.99	516.13	2.59
20	3	0.51	4.58	0.20	97.46	10.66	1.73	507.61	5.09
20	4	0.51	1.01	0.20	105.32	11.65	2.03	506.33	1.52

Note: -1.00=traces

D.6 ANALYSES DE L'AZOTE INORGANIQUE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES DE L'ESSAI
DE PERCOLATION EN SERRES (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Profil	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	N-min
21	S	0.50	0.50	0.69	74.26	6.44	1.49	475.25	1.01
22	S	1.91	1.91	7.94	75.43	7.94	3.47	476.43	3.82
23	S	0.50	0.99	0.60	76.19	6.52	1.30	451.13	1.49
24	S	1.04	-1.00	0.71	74.56	7.56	1.01	483.63	1.04
25	S	0.50	0.50	0.61	86.29	6.60	1.73	467.01	1.01
21	I	0.50	1.01	0.20	84.73	5.91	0.59	433.50	1.51
22	I	1.47	6.37	0.20	63.16	6.22	0.70	461.15	7.84
23	I	0.52	3.66	0.40	72.28	6.34	0.99	445.54	4.19
24	I	0.52	3.63	0.30	71.46	5.46	0.50	426.80	4.15
25	I	4.09	14.84	0.20	66.33	5.53	1.21	482.41	18.94

Notes:
S=supérieur
I=inférieur
-1.00=traces

D.7 ANALYSES DU PHOSPHORE, DE L'HYDROGÈNE ET DES CATIONS ÉCHANGÉABLES;
DU pH, DE LA SOMME DES CATIONS ÉCHANGÉABLES, DE LA CAPACITÉ
D'ÉCHANGE CATIONIQUE ET DE LA SATURATION EN BASES DES PROFILS SUPÉ-
RIEURS (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Nos de répétition	P	H	Ca	Mg	K	pH	T	CEC	%S
1	1	174.95	-9.00	519.08	16.54	17.81	7.18	2.78	-9.00	-9.00
1	2	317.43	-9.00	463.48	18.89	12.59	7.43	2.51	-9.00	-9.00
1	3	312.00	-9.00	417.72	12.66	7.59	7.52	2.21	-9.00	-9.00
1	4	380.43	-9.00	414.57	18.84	12.56	7.55	2.26	-9.00	-9.00
2	1	310.11	-9.00	424.24	12.12	10.10	7.51	2.25	-9.00	-9.00
2	2	383.79	-9.00	365.43	20.00	9.88	7.45	2.02	-9.00	-9.00
2	3	390.98	-9.00	391.41	12.63	10.10	7.53	2.09	-9.00	-9.00
2	4	325.83	-9.00	445.54	17.33	9.90	7.56	2.40	-9.00	-9.00
3	1	319.58	-9.00	366.58	21.20	9.98	7.15	2.03	-9.00	-9.00
3	2	329.98	-9.00	453.63	17.54	10.02	7.21	2.44	-9.00	-9.00
3	3	331.09	-9.00	442.75	15.27	10.18	7.28	2.37	-9.00	-9.00
3	4	309.26	-9.00	470.30	14.11	9.90	7.33	2.49	-9.00	-9.00
4	1	348.61	-9.00	432.50	17.00	-9.00	7.30	2.67	-9.00	-9.00
4	2	419.64	-9.00	359.30	13.57	10.05	7.35	1.93	-9.00	-9.00
4	3	456.74	-9.00	366.16	15.66	7.58	7.41	1.98	-9.00	-9.00
4	4	419.64	-9.00	344.06	15.10	7.43	7.42	1.86	-9.00	-9.00
5	1	461.61	-9.00	365.67	9.95	7.46	7.45	1.93	-9.00	-9.00
5	2	406.31	-9.00	294.55	17.82	7.43	7.30	1.64	-9.00	-9.00
5	3	355.90	-9.00	437.50	20.00	10.00	7.31	2.38	-9.00	-9.00
5	4	379.63	-9.00	472.36	19.35	-9.00	7.35	2.88	-9.00	-9.00
6	1	390.53	-9.00	457.21	16.63	12.22	7.31	2.45	-9.00	-9.00
6	2	358.10	-9.00	420.15	17.20	19.66	7.40	2.29	-9.00	-9.00
6	3	241.38	-9.00	420.00	14.50	10.00	7.37	2.25	-9.00	-9.00
6	4	393.00	-9.00	278.61	15.42	14.93	7.36	1.56	-9.00	-9.00
7	1	277.01	-9.00	369.62	12.15	12.66	7.32	1.98	-9.00	-9.00
7	2	317.35	-9.00	396.55	19.70	9.85	7.05	2.17	-9.00	-9.00
7	3	319.73	-9.00	335.86	14.65	7.58	7.22	1.82	-9.00	-9.00
7	4	383.56	-9.00	322.74	12.96	9.78	7.30	1.75	-9.00	-9.00
8	1	465.59	-9.00	532.83	17.68	10.10	7.38	2.84	-9.00	-9.00
8	2	334.62	-9.00	443.61	15.04	10.02	7.35	2.37	-9.00	-9.00
8	3	322.07	-9.00	475.00	13.75	10.00	7.29	2.51	-9.00	-9.00
8	4	335.35	-9.00	415.84	19.55	12.38	7.39	2.27	-9.00	-9.00
9	1	359.10	-9.00	423.27	12.13	12.38	7.46	2.25	-9.00	-9.00
9	2	343.81	-9.00	390.00	15.50	10.00	7.40	2.10	-9.00	-9.00
9	3	296.26	-9.00	416.04	15.54	10.02	7.44	2.23	-9.00	-9.00
9	4	379.24	-9.00	341.71	14.82	10.05	7.32	1.86	-9.00	-9.00
10	1	585.25	21.07	354.27	12.81	97.99	6.73	2.13	23.20	9.17
10	2	467.65	19.51	296.48	13.32	85.43	6.68	1.81	21.33	8.49
10	3	421.21	21.11	235.49	13.48	73.53	6.73	1.43	22.54	6.33
10	4	587.77	21.03	381.42	16.87	97.80	6.59	2.30	23.32	9.85
11	1	287.65	-9.00	313.92	12.15	10.13	7.27	1.70	-9.00	-9.00
11	2	351.92	-9.00	460.20	16.42	9.95	7.31	2.46	-9.00	-9.00
11	3	295.77	-9.00	387.10	14.14	7.44	7.43	2.07	-9.00	-9.00
11	4	302.30	-9.00	355.89	13.28	10.02	7.44	1.91	-9.00	-9.00
12	1	401.34	-9.00	340.74	16.05	12.35	7.39	1.87	-9.00	-9.00
12	2	379.24	-9.00	355.16	13.85	10.08	7.11	1.92	-9.00	-9.00
12	3	328.71	-9.00	323.31	10.53	10.02	7.30	1.73	-9.00	-9.00
12	4	341.73	-9.00	332.51	10.17	9.93	7.36	1.77	-9.00	-9.00
13	1	337.00	-9.00	487.37	17.17	12.63	7.42	2.61	-9.00	-9.00
13	2	360.78	-9.00	481.30	17.21	9.98	7.41	2.57	-9.00	-9.00
13	3	347.32	-9.00	441.62	17.26	10.15	7.45	2.38	-9.00	-9.00
13	4	377.89	-9.00	452.02	17.68	10.10	7.50	2.43	-9.00	-9.00

ANALYSES DU PHOSPHORE, DE L'HYDROGÈNE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES;
DU PH, DE LA SOMME DES CATIONS ÉCHANGEABLES, DE LA CAPACITÉ
D'ÉCHANGE CATIONIQUE ET DE LA SATURATION EN BASES DES PROFILS SUFF-
RIEURS (suite)

14	1	312.62	-9.00	362.07	12.32	9.85	7.45	1.94	-9.00	-9.00
14	2	375.00	-9.00	373.13	16.17	9.95	7.46	2.02	-9.00	-9.00
14	3	312.13	-9.00	358.72	14.74	9.83	7.35	1.94	-9.00	-9.00
14	4	343.69	-9.00	411.91	13.40	9.93	7.47	2.20	-9.00	-9.00
15	1	430.10	-9.00	356.44	10.40	12.38	7.30	1.90	-9.00	-9.00
15	2	330.29	-9.00	401.00	12.53	12.53	7.22	2.14	-9.00	-9.00
15	3	388.10	-9.00	473.55	11.08	15.11	7.43	2.50	-9.00	-9.00
15	4	349.41	-9.00	465.99	12.09	12.59	7.42	2.46	-9.00	-9.00
16	1	687.03	36.67	1230.20	64.60	37.13	6.04	6.78	43.45	15.60
16	2	689.04	39.33	1219.45	64.84	27.43	5.95	6.70	46.03	14.56
16	3	731.90	38.31	1250.62	71.71	29.78	5.42	6.92	45.23	15.30
16	4	693.07	36.77	1204.94	62.96	29.63	5.25	6.62	43.39	15.26
17	1	706.93	36.67	1312.50	72.75	40.00	5.77	7.27	43.94	16.54
17	2	812.25	36.74	1286.76	79.17	31.86	5.83	7.17	43.91	16.33
17	3	685.77	39.98	1252.48	83.17	34.65	5.77	7.04	47.02	14.97
17	4	599.81	36.82	1270.20	75.25	32.83	5.80	7.06	43.87	16.08
18	1	520.64	20.10	395.94	15.99	53.30	6.69	2.25	22.35	10.06
18	2	431.69	18.55	339.24	17.47	45.57	6.73	1.96	20.51	9.54
18	3	433.40	20.87	391.96	16.33	52.76	6.75	2.23	23.10	9.65
18	4	584.48	19.71	394.94	12.91	70.89	6.60	2.26	21.98	10.30
19	1	409.26	-9.00	502.51	15.33	10.05	7.16	2.66	-9.00	-9.00
19	2	518.97	-9.00	447.50	20.75	7.50	7.31	2.43	-9.00	-9.00
19	3	432.03	-9.00	490.00	14.50	10.00	7.31	2.60	-9.00	-9.00
19	4	404.48	-9.00	398.99	16.16	10.10	7.31	2.15	-9.00	-9.00
20	1	412.28	-9.00	431.37	13.24	9.80	7.16	2.29	-9.00	-9.00
20	2	457.55	-9.00	448.88	18.45	9.98	7.19	2.42	-9.00	-9.00
20	3	446.47	-9.00	552.24	16.92	9.95	7.27	2.93	-9.00	-9.00
20	4	469.84	-9.00	478.70	16.79	7.52	7.25	2.55	-9.00	-9.00

Notes:

T=Somme de Ca, Mg et K

CEC=Capacité d'échange cationique

ZSR=Pourcentage de saturation en bases

-9.00=Valeur manquante

D.8 ANALYSES DU PHOSPHORE, DE L'HYDROGÈNE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES;
DU pH, DE LA SOMME DES CATIONS ÉCHANGEABLES, DE LA CAPACITÉ
D'ÉCHANGE CATIONIQUE ET DE LA SATURATION EN BASES DES PROFILS INFÉ-
RIEURS (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Nos de répétition	P	H	Ca	Mg	K	pH	T	CEC	ZSB
1	1	336.63	18.55	511.11	6.17	9.88	6.39	2.63	21.18	12.43
1	2	339.00	-9.00	454.77	5.78	10.05	7.09	2.35	-9.00	-9.00
1	3	289.67	-9.00	451.85	6.42	7.41	7.18	2.33	-9.00	-9.00
1	4	434.54	-9.00	423.65	9.36	9.85	7.23	2.22	-9.00	-9.00
2	1	480.16	-9.00	490.20	6.86	9.80	7.25	2.53	-9.00	-9.00
2	2	388.66	-9.00	470.30	7.18	9.90	7.33	2.44	-9.00	-9.00
2	3	364.94	-9.00	496.24	7.27	7.52	7.46	2.56	-9.00	-9.00
2	4	350.98	-9.00	454.55	4.80	10.10	7.47	2.34	-9.00	-9.00
3	1	333.02	-9.00	495.07	7.88	9.85	7.48	2.57	-9.00	-9.00
3	2	473.59	-9.00	483.71	7.27	10.02	7.51	2.50	-9.00	-9.00
3	3	360.08	-9.00	545.45	7.62	9.83	7.42	2.82	-9.00	-9.00
3	4	358.70	-9.00	518.70	7.48	9.98	7.54	2.68	-9.00	-9.00
4	1	359.49	-9.00	483.79	9.73	9.98	7.52	2.52	-9.00	-9.00
4	2	347.61	-9.00	482.50	7.25	10.00	7.19	2.50	-9.00	-9.00
4	3	429.54	-9.00	496.30	7.41	9.88	7.35	2.57	-9.00	-9.00
4	4	438.58	-9.00	465.00	7.50	10.00	7.39	2.41	-9.00	-9.00
5	1	416.99	-9.00	397.98	6.05	10.08	7.46	2.07	-9.00	-9.00
5	2	375.75	-9.00	350.75	6.47	9.95	7.43	1.83	-9.00	-9.00
5	3	361.06	-9.00	504.90	7.60	9.80	7.46	2.61	-9.00	-9.00
5	4	416.67	-9.00	485.37	7.80	12.20	7.50	2.52	-9.00	-9.00
6	1	393.51	-9.00	487.56	12.19	9.95	7.51	2.56	-9.00	-9.00
6	2	320.79	-9.00	470.00	10.00	7.50	7.47	2.45	-9.00	-9.00
6	3	292.28	-9.00	441.92	13.89	10.10	7.49	2.35	-9.00	-9.00
6	4	441.82	-9.00	394.09	7.39	14.78	7.51	2.07	-9.00	-9.00
7	1	365.31	-9.00	485.07	11.19	14.93	7.54	2.56	-9.00	-9.00
7	2	299.03	-9.00	381.55	10.47	9.98	7.53	2.02	-9.00	-9.00
7	3	254.96	-9.00	420.40	9.95	14.93	7.50	2.22	-9.00	-9.00
7	4	346.86	-9.00	447.17	11.79	12.28	7.50	2.36	-9.00	-9.00
8	1	348.60	-9.00	627.50	8.50	10.00	7.55	3.23	-9.00	-9.00
8	2	336.81	-9.00	506.30	8.06	10.08	7.52	2.62	-9.00	-9.00
8	3	314.40	-9.00	542.29	6.97	9.95	7.52	2.79	-9.00	-9.00
8	4	418.97	-9.00	555.28	12.31	12.56	7.51	2.91	-9.00	-9.00
9	1	393.33	-9.00	491.23	10.03	15.04	7.48	2.58	-9.00	-9.00
9	2	381.82	-9.00	469.70	12.88	10.10	7.50	2.48	-9.00	-9.00
9	3	359.73	-9.00	534.35	17.81	12.72	7.31	2.85	-9.00	-9.00
9	4	325.29	-9.00	424.62	8.29	10.05	7.46	2.22	-9.00	-9.00
10	1	416.97	-9.00	429.28	10.67	42.18	7.27	2.34	-9.00	-9.00
10	2	299.64	-9.00	426.07	12.53	37.59	7.17	2.33	-9.00	-9.00
10	3	329.00	-9.00	427.52	14.74	36.85	7.21	2.35	-9.00	-9.00
10	4	402.44	20.06	451.85	11.11	34.57	6.88	2.44	22.50	10.84
11	1	313.67	-9.00	469.29	10.32	12.28	7.36	2.46	-9.00	-9.00
11	2	381.24	-9.00	444.72	10.05	10.05	7.38	2.33	-9.00	-9.00
11	3	312.73	-9.00	460.98	11.71	9.76	7.51	2.43	-9.00	-9.00
11	4	365.42	-9.00	401.52	12.88	10.10	7.49	2.14	-9.00	-9.00
12	1	365.66	-9.00	448.62	15.04	10.02	7.38	2.39	-9.00	-9.00
12	2	366.79	-9.00	424.62	11.81	10.05	7.39	2.25	-9.00	-9.00
12	3	472.84	-9.00	386.86	9.98	9.73	7.45	2.04	-9.00	-9.00
12	4	393.91	-9.00	380.35	8.56	10.08	7.45	2.00	-9.00	-9.00
13	1	321.71	-9.00	457.29	8.79	10.05	7.42	2.38	-9.00	-9.00
13	2	373.79	-9.00	486.08	10.63	10.13	7.41	2.54	-9.00	-9.00
13	3	286.78	-9.00	449.63	7.86	9.83	7.44	2.34	-9.00	-9.00
13	4	413.50	-9.00	480.10	7.71	9.95	7.47	2.49	-9.00	-9.00

ANALYSES DU PHOSPHORE, DE L'HYDROGÈNE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES;
DU PH, DE LA SOMME DES CATIONS ÉCHANGEABLES, DE LA CAPACITÉ
D'ÉCHANGE CATIONIQUE ET DE LA SATURATION EN BASES DES PROFILS INFÉ-
RIEURS (suite)

14	1	300.38	-9.00	440.81	7.81	10.08	7.46	2.29	-9.00	-9.00
14	2	351.59	-9.00	434.57	11.85	9.88	7.48	2.30	-9.00	-9.00
14	3	321.22	-9.00	435.77	9.57	7.56	7.46	2.28	-9.00	-9.00
14	4	350.88	-9.00	435.64	10.40	9.90	7.43	2.29	-9.00	-9.00
15	1	451.48	-9.00	578.28	11.87	10.10	7.20	3.02	-9.00	-9.00
15	2	419.10	-9.00	438.60	12.03	10.02	7.37	2.32	-9.00	-9.00
15	3	322.15	-9.00	490.20	8.09	14.71	7.35	2.56	-9.00	-9.00
15	4	302.14	-9.00	531.65	10.13	25.32	7.37	2.81	-9.00	-9.00
16	1	747.68	33.96	1411.47	78.55	62.34	5.95	7.87	41.83	18.80
16	2	758.59	38.39	1314.72	72.33	53.30	5.89	7.31	45.70	15.99
16	3	804.56	37.65	1332.49	74.62	55.84	5.88	7.42	45.07	16.47
16	4	705.37	33.72	1309.41	77.48	56.93	5.81	7.33	41.05	17.86
17	1	648.89	37.93	1343.43	84.09	68.18	5.97	7.59	45.51	16.67
17	2	711.20	34.03	1355.33	82.49	55.84	5.90	7.60	41.63	18.26
17	3	580.46	34.15	1229.01	77.35	55.98	5.85	6.93	41.08	16.86
17	4	720.12	34.03	1267.00	70.03	52.90	5.83	7.05	41.07	17.16
18	1	336.43	-9.00	502.53	8.33	25.25	7.37	2.65	-9.00	-9.00
18	2	375.69	-9.00	394.47	9.55	22.61	7.30	2.11	-9.00	-9.00
18	3	337.00	-9.00	441.62	7.61	20.30	7.29	2.32	-9.00	-9.00
18	4	417.16	-9.00	428.92	7.60	22.06	7.33	2.26	-9.00	-9.00
19	1	435.61	-9.00	495.02	13.18	9.95	7.60	2.61	-9.00	-9.00
19	2	370.55	-9.00	478.48	11.39	10.13	7.60	2.51	-9.00	-9.00
19	3	380.43	-9.00	521.20	17.46	9.98	7.58	2.78	-9.00	-9.00
19	4	390.98	-9.00	409.43	8.68	9.93	7.56	2.14	-9.00	-9.00
20	1	371.18	-9.00	536.90	12.98	12.72	7.60	2.82	-9.00	-9.00
20	2	412.50	-9.00	473.55	9.57	10.08	7.56	2.47	-9.00	-9.00
20	3	337.46	-9.00	539.04	12.34	10.08	7.55	2.82	-9.00	-9.00
20	4	327.65	-9.00	506.27	11.78	10.02	7.55	2.65	-9.00	-9.00

Notes:

T=Somme de Ca, Mg et K

CEC=Capacité d'échange cationique

XSR=Pourcentage de saturation en bases

-9.00=Valeur manquante

D.9 ANALYSES DU PHOSPHORE, DE L'HYDROGÈNE ET DES CATIONS ÉCHANGÉABLES;
 DU PH, DE LA SOMME DES CATIONS ÉCHANGÉABLES, DE LA CAPACITÉ
 D'ÉCHANGE CATIONIQUE ET DE LA SATURATION EN BASES DE L'ESSAI DE
 PERCOLATION EN SERRES. (en mg.kg⁻¹)

Nos de traitement	Profil	P	H	Ca	Mg	K	PH	T	CEC	%SR
21	S	414.34	20.25	148.99	13.38	10.10	7.04	0.88	21.14	4.17
22	S	333.65	22.05	141.41	11.87	10.10	6.79	0.83	22.88	3.63
23	S	318.09	21.70	142.50	9.50	7.50	6.66	0.81	22.51	3.60
24	S	392.72	18.68	138.96	8.68	9.93	6.78	0.79	19.47	4.07
25	S	385.77	21.83	117.21	11.97	47.38	6.47	0.81	22.64	3.56
21	I	344.36	21.15	119.29	7.61	10.15	6.35	0.69	21.84	3.14
22	I	338.61	21.19	141.41	6.82	10.10	6.65	0.79	21.98	3.59
23	I	358.70	18.75	122.81	8.52	10.02	6.31	0.71	19.46	3.65
24	I	353.88	20.14	146.40	8.93	9.93	6.42	0.83	20.97	3.96
25	I	307.98	18.52	141.06	7.56	35.26	6.48	0.86	19.37	4.43

Notes:
 S=supérieur
 I=inférieur
 0.00=traces

ANNEXE E

ANALYSES DES PERCOLATS

E.1 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 8

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	N	Ms	Al	Cu	Fe	Mn	F	NO ₃
1	7 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25 Jan	200	144	4.6	3.9	.18	tr	.04	.02	.19	21
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	144	4.6	3.9	.18	tr	.04	.02	.19	21

E.2 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 9

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	N	Ms	Al	Cu	Fe	Mn	F	NO ₃
2	7 Jan	600	158	7.3	13.0	.20	.04	.03	.01	tr	-
	25 Jan	500	84	4.6	11.0	.25	tr	.02	.01	.15	21
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	7 Jan	600	126	6.8	7.3	.17	.03	.02	.01	tr	-
	25 Jan	325	90	4.6	2.7	.20	tr	.03	.01	.13	14
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	115	5.8	8.5	.21	.02	.03	.01	.07	18

E.3 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 11

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Mg	Al (mg/l)	Cu	Fe	Mn	F	NO ₃
1	7 Jan	600	170	9.0	11.5	.20	.05	.04	.01	tr	-
	25 Jan	600	199	6.8	12.3	.19	tr	.05	.03	.18	3"
	8 fév	325	175	6.0	10.9	.18	tr	.04	.01	.13	2:
4	7 Jan	550	224	8.5	24.4	.22	.05	.05	tr	tr	-
	25 Jan	250	261	6.1	26.8	.25	tr	.06	.04	.22	3"
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	206	7.3	17.2	.21	.02	.05	.02	.11	3"

E.4 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 12

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Mg	Al (mg/l)	Cu	Fe	Mn	F	NO ₃
1	7 Jan	600	215	9.6	21.8	.27	.11	.05	.04	tr	-
	25 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7 Jan	600	209	8.1	14.2	.21	.02	.03	.01	tr	-
	25 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	212	8.9	18.0	.24	.06	.04	.02	tr	-

E.5 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 13

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Mg	Al (mg/l)	Cu	Fe	Mn	P	NO ₃
1	7 Jan	225	156	7.4	7.2	.21	.05	.08	.02	tr	-
	25 Jan	475	239	6.8	9.9	.21	tr	.05	.03	.19	57
	8 fév	300	248	6.9	9.6	.27	tr	.07	.01	.21	54
3	7 Jan	250	114	7.1	5.3	.15	.04	.03	.01	tr	-
	25 Jan	600	116	4.9	5.0	.16	tr	.03	.01	.17	21
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	181	6.6	7.4	.20	.02	.03	.02	.11	45

E.6 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 14

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Mg	Al (mg/l)	Cu	Fe	Mn	P	NO ₃
2	7 Jan	600	100	6.4	10.7	.09	.04	.03	.01	tr	-
	25 Jan	600	105	4.0	9.5	.13	tr	.02	.02	.17	18
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7 Jan	600	124	7.0	7.1	.18	.05	.03	.02	tr	-
	25 Jan	375	161	5.8	11.3	.18	tr	.03	.02	.19	34
	8 fév	100	71	7.9	20.9	.13	.02	.03	.02	.14	tr
Moyenne		-	112	6.2	11.9	.14	.02	.03	.02	.10	25

E.7 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 15

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Mg	Al	Cu	Fe	Mn	P	NO ₃
2	7 Jan	500	257	11.0	26.2	.28	.04	.04	tr	tr	-
	25 Jan	300	277	8.6	26.5	.25	tr	.06	.03	.28	74
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	7 Jan	200	306	13.4	13.3	.35	.05	.08	.02	tr	-
	25 Jan	375	388	8.3	16.4	.31	tr	.08	.03	.28	11
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	307	10.3	20.6	.30	.02	.07	.02	.18	93

E.8 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 17

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Mg	Al	Cu	Fe	Mn	P	NO ₃
2	7 Jan	600	50	19.1	11.4	.36	.10	-	-	tr	-
	25 Jan	225	85	17.8	14.8	.25	.02	.68	.04	.20	13
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7 Jan	25	85	28.3	19.8	.43	.10	.42	.22	tr	-
	25 Jan	125	193	26.3	32.4	.33	.02	.07	.02	.27	33
	8 fév	25	189	22.3	53.4	.31	.13	.07	.03	.30	tr
Moyenne		-	120	22.8	26.4	.30	.07	.31	.08	.15	28

E.9 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 18

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Na	Al	Cu	Fe	Mn	P	NO ₃
1	7 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25 Jan	600	189	12.0	6.4	.23	.11	.24	.03	.33	-
	8 fév	600	222	18.7	8.5	.22	.20	.15	.03	.21	45
2	7 Jan	600	63	12.2	3.5	.15	.04	.04	tr	tr	-
	25 Jan	600	84	14.3	2.7	.14	.05	.03	tr	.33	17
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	140	14.3	5.3	.19	.10	.12	.03	.30	27

E.10 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 20

No de répétition	Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments								
			Ca	K	Na	Al	Cu	Fe	Mn	P	NO ₃
3	7 Jan	600	82	3.2	6.8	.14	.04	.02	.14	tr	-
	25 Jan	350	108	4.8	9.6	.15	tr	.03	.03	.15	12
	8 fév	150	109	4.9	10.0	.19	tr	.03	.01	.14	13
4	7 Jan	600	96	6.4	6.9	.17	.06	.02	.04	tr	-
	25 Jan	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8 fév	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne		-	99	5.3	8.3	.16	.03	.04	.06	.08	13

E.11 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 21

Date de cueillette	Volume récolté (ml)	NO ₃	Éléments												
			Al	Ca	Cu	Fe	F	Mg	Mn	P	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni
28 Jan	750	tr	.21	23	0	.17	2.7	2.8	.06	.06	.01	<.003	<.002	<.015	<.01
4 fév	1350	tr	.12	27	0	.07	3.8	3.7	.05	.10	.02	.003	<.002	.032	<.01
11 fév	600	tr	-	29	0	-	3.3	4.4	.17	.23	.05	.004	<.002	.019	<.01
18 fév	1075	tr	.11	31	0	.06	3.0	4.3	.05	.08	.07	.011	<.002	.016	<.01
25 fév	1400	tr	.10	27	0	.02	2.8	3.6	.02	.09	.06	.004	<.002	<.015	<.01
Moyenne	-	tr	.14	27	0	.08	3.7	3.8	.07	.11	.04	.006	<.002	.018	<.01

E.12 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 22

Date de cueillette	Volume récolté (ml)	NO ₃	Éléments												
			Al	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni
28 Jan	1300	78	.21	115	0	.10	12.5	10.8	.03	.19	.07	<.003	<.002	<.015	<.01
4 fév	1100	-	.16	144	0	.04	13.1	13.5	.04	.21	.05	<.003	<.002	<.015	<.01
11 fév	1100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<.003	<.002	<.015	<.01
18 fév	1200	33	.16	136	0	.03	8.3	12.5	.05	.17	.05	.004	<.002	<.015	<.01
25 fév	1400	26	.15	115	0	.03	6.4	10.8	.04	.13	.07	<.003	<.002	<.015	<.01
Moyenne	-	46	.17	128	0	.05	10.1	11.9	.04	.18	.06	<.003	<.002	<.015	<.01

E.13 ANALYSES DES PERCOLATS DU TRAITEMENT 23

Date de cueillette	Volume récolté (ml)	NO ₃	Éléments												
			Al	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni
26 Jan	850	tr	.14	42	0	.06	4.0	5.9	.04	.15	.13	<.003	<.002	<.015	<.01
4 fév	700	tr	.11	44	0	.03	6.0	7.2	.03	.15	.13	<.003	<.002	<.015	<.01
11 fév	950	76	.17	70	0	.02	8.2	10.1	.02	.14	.12	<.003	<.002	<.015	<.01
18 fév	1100	32	.11	66	0	.02	6.9	9.3	.03	.14	.09	.005	<.002	<.015	<.01
25 fév	1600	11	.11	57	0	.02	4.5	7.5	.04	.10	.11	<.003	<.002	<.015	<.01
Moyenne	-	12	.12	56	0	.03	5.8	8.0	.03	.14	.12	<.003	<.002	<.015	<.01

E.14 ANALYSES DES PERCOLATS DU TROITEMENT 24

Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments													
		NO ₃	Al	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn (mg/l)	F	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni
28 Jan	750	tr	.13	30	0	.06	3.3	4.0	.04	-	.11	<.003	<.002	<.015	<.01
4 fév	925	tr	.08	38	0	.01	3.1	4.7	.03	.15	.05	<.003	<.002	<.015	<.01
11 fév	1300	24	.13	88	0	.02	5.2	9.5	.05	.15	.05	<.003	<.002	<.015	<.01
18 fév	1300	22	.15	92	0	.02	5.1	10.0	.03	.15	.03	.006	<.002	<.015	<.01
25 fév	1400	15	.14	86	0	.02	4.9	9.8	.02	.15	.07	<.003	<.002	<.015	<.01
Moyenne	-	12	.13	67	0	.03	4.3	7.6	.03	.15	.06	<.003	<.002	<.015	<.01

E.15 ANALYSES DES PERCOLATS DU TROITEMENT 25

Date de cueillette	Volume récolté (ml)	Éléments													
		NO ₃	Al	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn (mg/l)	F	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni
28 Jan	1000	12	.37	70	.11	.46	4.4	5.7	.04	.20	.09	.005	<.002	<.015	<.01
4 fév	900	14	.20	74	.07	.19	5.8	6.5	.03	.17	.10	<.003	<.002	<.015	<.01
11 fév	1650	33	.15	103	.14	.25	12.8	8.9	.06	.19	.09	.004	<.002	<.015	<.01
18 fév	800	41	.15	102	.20	.14	26.9	8.8	.06	.20	.14	.006	<.002	.016	<.01
25 fév	1400	45	.15	103	.25	.21	41.6	9.3	.10	.23	.10	.007	<.002	<.015	<.01
Moyenne	-	29	.20	90	.16	.25	18.3	7.8	.06	.20	.10	.005	<.002	<.015	<.01

ANNEXE F

MESURES DES HAUTEURS, DIAMÈTRES
ET DES MASSES FOLIAIRES ET RACINAIRES DES SEMIS
AU COURS DE L'EXPÉRIENCE

F.1 MESURES DES HAUTEURS APRÈS 69 (71)⁴ JOURS DE CROISSANCE (en mm)

Nos de traitement	Nos de répétition	
1	1	32 31 31 38 30 30 30 35 35 35 39 26 26 27 36 40 33 28
1	2	35 35 35 27 27 34 34 33 33 32 30 30 30 26 26 26 29
1	3	35 35 35 34 34 33 30 30 30 28 28 28 22 37 31 24 29
1	4	27 27 25 25 25 30 30 30 26 26 26 26 35 35 38 38 28 34
2	1	33 33 33 30 35 35 35 29 36 34 34 38 37 37 24 28 27
2	2	24 40 40 30 30 33 33 32 32 32 32 25 43 34 35 35 38
2	3	34 41 38 33 33 33 33 33 33 42 40 40 31 25 36 22 35 34
2	4	38 38 35 30 30 37 37 40 40 40 44 44 32 32 32 34 45 42
3	1	37 41 41 28 27 30 30 30 36 36 40 29
3	2	44 38 38 38 37 37 35 39 39 40 34 34
3	3	33 33 40 40 36 28 25 19 35 38 32 29
3	4	31 28 28 28 27 25 25 25 34 30 30 33
4	1	40 47 47 41 41 44 45 35 46 46 38 38 33 33 50 25 56
4	2	40 38 38 38 38 38 38 44 50 39 48 48 31 45 33 42 30 35
4	3	37 40 40 40 40 40 42 42 42 34 35 35 50 38 38 30 44 39
4	4	37 26 48 38 38 38 35 40 40 25 34 34 29 29 27 44
5	1	30 30 39 39 38 38 38 43 43 26 40 42 35 35 34 37 37
5	2	42 42 38 38 38 40 40 40 29 29 29 28 30 34 27 41 33
5	3	39 47 35 34 38 38 38 42 42 42 37 37 31 36 36 30 40 44
5	4	40 37 32 32 38 33 27 35 35 35 22 25 25 31 34 26 30
6	1	34 36 36 44 37 41 40 40 46 38 39 49 37
6	2	38 37 32 32 32 26 35 29 36 27 30 40 34
6	3	55 32 30 30 28 35 35 36 31 24 24 45 33 38
6	4	35 35 34 34 28 26 37 42 43
7	1	38 38 38 38 40 40 40 46 47 49 45 36 39 48 30
7	2	40 45 45 35 35 35 42 47 38 38 53 43 55 42
7	3	38 48 45 45 45 35 42 42 40 40 40 30 32 31 28 51
7	4	40 40 40 40 40 40 39 32 32 21 25 38 35 30 45
8	1	45 42 38 20 20 30 25 27 27 27 56 38 38 42 35 46 47
8	2	35 35 48 40 38 38 39 41 44 44 36 42 42 30 45 32 37 47
8	3	35 35 35 40 40 40 40 37 37 37 48 45 38 38 43 26 42 32
8	4	34 38 35 35 35 35 42 25 30 33 32 32 32 27 37 43 39
9	1	58 22 45 45 45 44 44 33 56 48 46 35 42 57 39 30
9	2	50 60 49 49 51 51 48 47 32 45 45 55 53 30 47 54 52
9	3	44 47 47 46 49 43 39 39 45 45 45 45 45 42 42 42 25 48
9	4	43 34 29 45 45 45 35 35 35 28 42 32 32 46 38 30 33 40
10	1	70 70 78 66 66 40 42 56 45 55 60 60 50 58 67 52
10	2	60 60 60 52 65 62 42 73 73 50 61 61 57 57 54 55
10	3	74 56 56 64 60 60 48 45 45 63 43 34 50 50 35 52 58
10	4	70 71 66 66 85 55 55 55 56 68 69 60 62 62 54
11	1	61 43 43 50 44 44 40 40 37 47 48 46 30 55 56 52 53 38
11	2	50 50 50 49 57 57 57 53 45 40 47 47 52 60 54
11	3	49 52 56 53 53 45 51 40 55 48 38 42 43 39 46 46 58 50
11	4	40 40 40 40 40 40 35 35 35 52 52 55 50 50 53 51 42 45
12	1	45 37 48 48 48 21 46 57 51 47 45 31 50
12	2	55 50 50 48 46 49 51 65 44 40 62 37 52 45
12	3	59 48 47 45 45 52 50 42 39 39 28 32 40 54 16
12	4	45 45 45 45 45 45 45 45 18 22 44 35 48 49
13	1	60 60 44 44 46 46 46 46 50 50 45 53 48 54 39 40 40 55 42
13	2	48 30 41 41 52 54 54 55 42 42 60 39 39 40 40 38 45
13	3	44 54 53 45 45 55 55 38 37 41 40 47 47 46 56 48 45 39
13	4	57 59 55 55 41 43 35 35 35 40 40 40 40 40 45 45 47 39

MESURES DES HAUTEURS APRÈS 69 (71)⁴ JOURS DE CROISSANCE (suite)

14	1	43	43	43	51	51	51	45	45	41	40	62	55	55	50	56	68	47	
14	2	39	66	30	43	45	50	50	36	42	41	65	46	48	33	48			
14	3	32	56	56	45	45	45	45	54	54	52	50	74	48	47	42	44	40	
14	4	41	41	45	45	45	57	31	50	48	47	32	32	46	35	52	38		
15	1	47	53	59	62	58	45	38	70	43									
15	2	57	45	45	55	55	55	53	67	52	48								
15	3	50	44	44	38	40	43	22	45	37									
15	4	58	52	52	15	43	42	45	35	30	40	20							
16	1	58	50	50	50	35	47	30	48	52									
16	2	38	39	39	34	40	40	28	46	42	45								
16	3	40	40	38	45	45	55	37	35										
16	4	45	45	40	34	25	35	43	47										
17	1	44	50	50	50	50	36	59	43	43	33	41	60	45	47	47	47	38	
17	2	33	35	35	43	43	20	50	50	49	45	52	47	40	40	40	46	46	55
17	3	40	40	40	40	48	46	38	44	57	42	30	43	51	35	33	29	14	
17	4	45	45	45	42	42	34	43	53	50	44	58	38	30	37	32	36		
18	1	50	50	62	72	73	68	68	55	55	58	70	65	57	57	60	60	60	
18	2	55	50	50	50	45	45	47	47	39	39	54	42	40	40	52	48	44	42
18	3	75	75	65	65	65	65	65	55	81	81	60	78	80	58	62	70	76	
18	4	50	50	50	50	75	75	77	40	56	58	80	72	65	70	63	60		
19	1	38	38	45	35	35	36	36	34	34	43	31	31	39	39	40	40	40	30
19	2	42	36	35	35	35	35	27	24	24	38	32	30	28	28	31	33	26	34
19	3	34	34	31	31	31	31	38	38	38	33	33	33	28	44	37	35	40	32
19	4	39	36	45	37	37	40	40	31	34	43	35	35	35	35	30	41	33	32
20	1	35	35	35	35	35	38	44	39	26	37	37	37	45	45	45	45	41	
20	2	44	47	42	42	51	46	46	46	36	50	41	41	45	45	40	38	37	43
20	3	36	45	35	42	42	37	31	41	33	33	34	34	43	32	50	50	50	49
20	4	43	43	34	36	36	36	40	40	31	42	42	30	35	55	50	32		

1: pour les traitements 19 et 20

F.2 MESURES DES HAUTEURS APRES 105 (95)¹ JOURS DE CROISSANCE (en mm)

Nos de traitement	Nos de répétition	
1	1	40 40 42 33 33 33 33 31 35 35 35 43 28 38 30 32 41 41
1	2	40 37 37 37 37 32 32 33 33 35 31 31 31 31 30 36 34
1	3	41 30 30 30 30 28 32 35 35 35 39 39 37 34 27 36 38 40
1	4	37 30 30 30 34 35 29 29 29 28 40 25 24 26 26
2	1	45 45 45 45 44 44 44 54 47 47 58 38 48 50 53 49 40
2	2	36 50 50 37 40 40 58 43 39 45 35 47 47 42 41 55 54
2	3	43 45 45 62 47 52 40 40 40 40 55 34 50 50 30 42 42
2	4	53 70 45 45 50 50 50 50 40 40 42 43 52 60 59 44 38 46
3	1	42 47 47 45 45 34 41 35 35 36 48 30
3	2	51 47 47 39 48 48 48 45 43 55 50 50
3	3	50 50 50 50 40 40 48 54 55 41 41 29
3	4	48 48 48 47 44 44 45 45 45 38 42 40
4	1	75 72 72 70 54 54 74 74 81 49 56 57 58 48 91 53 76
4	2	54 54 54 45 45 56 51 38 41 41 55 55 55 49 57 40 62 50
4	3	53 53 55 55 47 45 35 50 50 50 50 50 50 51 48 48 48 75
4	4	49 56 65 50 50 50 45 45 60 60 60 60 44 55 71 52
5	1	45 45 45 45 45 38 42 46 46 43 43 61 61 54 44 52 50
5	2	47 47 47 50 50 57 57 53 37 38 62 62 65 67 63 42 56
5	3	75 75 75 60 60 60 65 65 55 55 55 62 62 63 70 58 52 70
5	4	50 50 45 45 45 45 45 55 55 55 55 55 56 56 49 49
6	1	68 75 81 62 62 56 85 85 77 65 81 55 55 66
6	2	50 50 55 55 55 55 67 65 47 53 45 60 56
6	3	50 50 48 48 65 42 60 45 44 30 32 38 57
6	4	50 45 43 37 35 55 52 52 53
7	1	49 55 78 65 65 65 54 45 60 57 86 62 77 68 81
7	2	115 97 91 102 112 92 92 74 89 88 90 65 73 80
7	3	52 65 65 68 68 63 35 60 60 60 80 45 45 62 90 75
7	4	60 60 60 60 65 65 65 53 53 50 50 50 50 48 40
8	1	50 50 50 53 92 65 65 39 44 35 68 38 62 75 67 52 43
8	2	55 65 92 88 63 62 58 74 74 74 73 73 45 57 64 90 80 72
8	3	58 62 62 75 75 66 65 51 67 53 85 55 50 95 70 70 88 60
8	4	66 65 65 65 65 75 75 50 50 80 80 80 56 70 70 70 60 93
9	1	69 100 60 75 75 101 55 99 117 117 81 80 120 115 91 102
9	2	100 100 97 97 107 92 60 120 95 95 95 110 110 105 93 70 90
9	3	82 100 100 90 75 75 75 55 77 91 83 92 70 70 89 72 105 95
9	4	91 91 95 90 82 60 60 72 75 100 70 83 65 65 65 69 55 55
10	1	125 125 155 140 140 140 128 128 150 165 172 115 105 120 96 110
10	2	147 132 132 132 132 122 118 115 145 96 152 140 140 140 90 155
10	3	85 85 85 105 105 75 110 110 80 115 115 125 145 130 90 95 135
10	4	190 140 148 142 105 165 115 115 115 130 130 130 135 135 145
11	1	74 74 67 73 73 92 88 104 84 84 72 72 80 83 85 54 66
11	2	90 112 112 112 112 95 105 115 115 117 120 130 110 135 128
11	3	115 115 112 112 85 84 100 100 82 82 90 80 80 83 70 110 110 130
11	4	75 88 85 85 90 90 90 80 80 80 80 100 100 74 76 60 94 68
12	1	115 60 88 88 91 93 52 67 75 110 92 120 95
12	2	130 130 129 92 90 90 117 145 145 134 105 120 115
12	3	55 55 55 98 80 75 85 85 85 85 115 135 95 110 90
12	4	90 95 80 80 80 80 75 65 50 50 85 45 70 70 40
13	1	80 80 80 80 78 86 105 105 74 97 97 70 70 103 69 98 95 95 65 90
13	2	108 98 75 75 75 86 65 95 80 104 100 76 78 74 73 70 93
13	3	80 80 80 95 95 95 95 85 85 92 103 78 100 70 86 112 75 75
13	4	69 76 76 64 60 60 90 80 78 91 75 70 65 65 58 95 95 85

MESURES DES HAUTEURS APRES 105 (95)¹ JOURS DE CROISSANCE (suite)

14	1	90 90 90 84 86 85 98 92 92 75 80 80 73 97 76 71 81
14	2	130 71 145 75 92 95 97 65 103 105 85 112 80 97 103
14	3	107 107 95 95 156 85 85 113 100 103 103 105 105 90 102 110 65 97
14	4	93 85 135 110 110 110 120 130 130 65 95 80 80 100 105 105
15	1	94 130 88 87 165 145 150 125 105
15	2	70 106 100 120 145 95 105 110 96 127
15	3	83 83 80 110 95 100 90 90 55
15	4	77 75 108 85 85 65 45 80 125 50 90
16	1	98 98 102 105 91 70 86 96 67
16	2	80 80 87 84 65 72 60 60 57 70
16	3	100 85 85 68 63 75 88 78
16	4	70 70 90 85 60
17	1	70 72 80 68 77 125 85 102 92 92 120 65 100 105 90 93 108
17	2	93 85 100 100 100 100 130 84 95 105 105 115 50 125 120 118 110 87
17	3	110 110 110 137 115 115 80 100 100 95 83 75 90 96 60 125 122
17	4	115 130 90 90 110 110 88 82 62 74 83 100 100 75 120 95
18	1	115 115 118 118 112 145 145 110 110 130 130 128 122 108 105 125 92
18	2	106 101 97 57 80 80 65 65 65 95 75 85 85 88 91 82 81
18	3	135 135 135 160 105 130 130 175 175 155 155 155 150 120 180 173 170
18	4	125 145 145 135 122 170 165 120 155 140 180 115 130 180 110
19	1	40 40 33 33 38 38 38 47 44 46 46 48 36 36 45 45 45 50
19	2	50 44 52 45 45 45 38 38 33 33 39 35 40 34 34 32 32 38 25
19	3	40 40 40 40 50 50 50 33 37 37 35 35 42 49 46 38 38 41
19	4	37 40 40 40 40 40 46 45 45 44 36 36 42 42 42 42 50 50
20	1	47 50 48 48 53 53 45 45 45 49 42 42 46 43 34 51 40
20	2	50 50 50 50 42 45 62 62 62 60 60 60 65 65 55 44 63 48
20	3	40 40 40 57 60 55 55 55 62 45 45 45 57 42 42 50 50 53
20	4	58 58 56 40 60 67 67 70 65 65 75 87 53 55 42

1: pour les traitements 19 et 20

F.3 MESURES DES HAUTEURS APRES 119 JOURS DE CROISSANCE (en mm)

Nos de traite- ment	Nos de répé- tition	
1	1	27 31 33 27 35 32 23 38 38 32 27 27 33 30 32
1	2	30 27 33 27 33 30 33 31 30 35 30 30 34 31 24
1	3	35 32 27 29 27 28 28 23 28 34 23 27 27 23 32
1	4	35 35 35 22 17 18 15 23 15 13 17 17 20 20 23
2	1	53 55 50 48 40 67 52 45 43 45 48 45 43 42 45
2	2	55 34 54 46 43 41 41 42 41 43 35 34 48 38 38
2	3	48 43 43 63 47 53 42 55 48 47 32 42 43 48 42
2	4	63 77 48 53 58 36 42 47 52 37 43 37 38 43 43
3	1	43 35 45 40 47 52 44 38 37 45 32 30
3	2	53 48 48 55 45 51 46 52 52 42 37 43
3	3	27 46 52 49 58 40 45 29 49 38 49 51
3	4	48 31 52 53 43 48 43 43 33 35 33 40
4	1	115 95 90 90 85 97 85 95 60 80 55 65 57 55 53
4	2	53 47 55 57 65 58 47 55 53 53 50 63 43 48 46
4	3	72 43 43 43 47 53 52 45 52 53 48 48 48 43 52
4	4	78 53 60 55 50 48 45 48 60 57 57 70 48 45 50
5	1	53 67 63 55 52 38 41 38 45 47 43 50 35 44 43
5	2	57 85 65 65 65 70 57 68 65 63 53 57 47 55 55
5	3	82 78 82 68 65 67 72 78 55 84 72 65 67 68 58
5	4	60 62 65 70 48 55 63 50 65 70 57 60 53 40 45
6	1	97 93 80 60 65 78 90 114 60 70 63 73 95 68
6	2	83 73 75 67 52 58 70 70 78 63 67 57 55
6	3	90 70 80 52 67 55 55 52 57 47 37 42 52 37
6	4	47 55 43 40 57 38 53 33 28
7	1	83 108 112 82 107 90 90 67 77 95 75 65 74 57
7	2	138 137 130 107 115 105 113 115 107 122 117 97 85 105
7	3	113 108 83 73 82 80 87 79 63 85 67 76 65 69 58
7	4	65 57 51 50 69 33 55 80 50 49 53 42 63 53 50
8	1	95 70 83 90 65 93 102 57 67 62 63 45 45 45 47
8	2	105 115 100 95 90 100 85 90 90 75 80 90 75 75 85
8	3	102 97 100 70 75 88 67 72 85 89 83 63 70 82 74
8	4	87 73 80 75 93 73 77 80 115 85 52 103 80 85 98
9	1	117 133 142 140 143 120 130 120 93 103 103 110 77 85 85
9	2	135 125 125 135 150 145 135 135 125 118 120 110 105 115 120
9	3	125 114 123 110 110 102 123 107 115 105 73 92 87 85 95
9	4	110 120 135 130 127 95 120 95 95 85 100 80 85 80 100
10	1	225 205 180 205 185 205 165 175 160 132 152 154 165 155 135
10	2	180 170 190 170 170 160 185 200 190 195 175 155 160 125 140
10	3	172 185 175 145 185 149 170 117 115 122 145 135 135 110 117
10	4	220 135 125 155 165 170 203 160 165 160 160 165 155 118 165
11	1	105 120 95 97 135 115 110 88 95 99 110 97 95 90 87
11	2	170 140 145 125 145 125 160 155 125 160 165 185 185 135 155
11	3	145 133 122 162 145 133 152 118 88 145 120 129 108 110 105
11	4	115 115 77 125 115 80 105 110 105 100 120 123 113 115 105
12	1	155 123 115 118 115 90 120 105 95 105 115 75 45
12	2	185 180 195 180 150 170 165 135 170 140 130 175 100 95
12	3	140 145 132 124 120 110 132 114 115 115 105 115 75 68 60
12	4	110 65 75 113 60 98 100 98 93 95 90 75 85 48
13	1	101 110 135 105 125 105 125 135 115 85 125 125 85 100 90
13	2	110 150 135 115 98 90 100 125 145 95 105 135 115 95 95
13	3	122 110 110 125 137 112 98 107 95 110 120 115 120 130 113
13	4	95 115 115 118 105 100 123 90 85 90 110 95 102 82 82

MESURES DES HAUTEURS APRÈS 119 JOURS DE CROISSANCE (suite)

14	1	125 90 110 120 120 100 120 100 120 100 100 115 120 125 125
14	2	132 125 105 130 75 175 135 150 180 135 150 150 105 110 95
14	3	132 146 123 118 183 122 117 98 117 112 102 136 132 117 95
14	4	115 130 175 145 110 110 180 140 158 145 155 125 125 105 105
15	1	215 130 150 165 180 110 130 160 115
15	2	165 180 145 130 165 140 100 125 120 140
15	3	143 105 102 127 117 112 73 123 108
15	4	118 130 170 130 105 95 60 90 53 55 90
16	1	132 125 115 127 130 130 120 80 90
16	2	95 130 110 120 95 90 70 98 80 85
16	3	105 120 97 135 100 120 105 80
16	4	93 115 98 70 90
17	1	140 125 155 115 115 125 115 95 108 118 97 125 110 75 103
17	2	150 115 125 115 125 77 125 160 145 105 145 105 150 135 145
17	3	141 153 177 133 132 156 105 137 127 117 85 125 115 121 105
17	4	130 130 150 140 145 135 160 105 115 120 130 115 115 100 90
18	1	135 151 155 150 170 155 145 170 140 135 150 185 140 140 150
18	2	127 142 112 93 130 117 137 104 120 108 97 96 93 80 74
18	3	205 200 195 203 175 185 168 215 185 175 185 155 166 132 160
18	4	215 160 210 165 210 178 190 155 180 185 180 135 145 150 160
19	1	42 30 41 43 42 33 42 35 37 32 35 30 40 32 38
19	2	42 33 45 40 53 43 37 55 47 35 42 45 42 35 38
19	3	45 43 37 48 65 63 42 45 43 42 35 35 36 36 33
19	4	52 48 40 43 55 47 50 48 47 50 45 45 40 48 43
20	1	47 43 42 40 40 42 37 40 43 37 43 46 35 33 37
20	2	82 83 77 60 66 85 83 77 85 60 80 60 53 90 43
20	3	65 60 70 65 75 70 65 65 50 43 55 50 50 62 48
20	4	135 120 105 95 70 85 95 95 70 70 65 55 47 55 42

F.4 MESURES DES DIAMÈTRES APRÈS 119 JOURS DE CROISSANCE (en 10⁻² mm)

Nos de traitement	Nos de répétition	
1	1	55 60 60 52 65 71 62 62 61 61 60 52 62 72 61
1	2	63 59 61 57 66 58 60 57 56 52 63 74 58 51 56
1	3	66 62 59 53 58 58 63 60 59 53 51 55 63 60 52
1	4	59 52 62 49 49 60 67 54 56 43 55 56 57 45 54
2	1	85 83 67 66 62 84 79 92 90 77 65 69 75 69 72
2	2	75 73 86 75 85 83 70 85 69 79 82 85 71 69 61
2	3	79 74 98 92 72 79 71 97 91 75 63 62 50 68 72
2	4	83 94 79 74 86 71 74 76 77 71 70 90 73 77 74
3	1	73 62 70 76 82 69 76 85 65 69 57 55
3	2	82 71 73 75 68 85 83 78 81 67 55 63
3	3	55 69 82 73 80 86 91 63 81 91 92 73
3	4	69 69 70 77 77 77 78 73 65 68 73 72
4	1	165 121 131 130 113 137 114 141 100 96 96 96 82 97 109
4	2	88 123 79 92 82 76 81 90 80 83 71 78 79 99 71
4	3	117 78 91 70 74 76 84 77 71 72 81 76 70 67 78
4	4	106 79 78 94 79 65 71 77 100 96 84 102 76 73 78
5	1	76 96 100 98 76 79 63 73 75 79 69 72 71 76 73
5	2	76 110 87 94 104 92 76 80 82 77 65 81 89 92 75
5	3	113 111 105 95 98 94 105 92 72 105 87 90 106 87 82
5	4	81 90 84 76 68 79 82 77 86 101 62 86 56 62 84
6	1	130 130 102 90 92 94 124 123 91 101 81 99 116 86
6	2	128 103 103 103 86 93 105 100 97 92 98 87 72
6	3	152 96 114 80 89 86 83 86 78 81 90 79 69 74
6	4	132 104 78 70 94 85 82 37 74
7	1	120 140 165 120 129 125 114 113 90 98 99 98 94 95
7	2	167 178 168 131 132 130 146 151 116 134 149 111 102 118
7	3	177 151 120 110 105 103 131 127 107 96 109 101 91 111 92
7	4	98 111 95 90 96 72 87 120 92 92 96 69 108 79 76
8	1	112 102 113 141 118 112 130 94 90 82 81 100 82 85 74
8	2	129 146 110 118 121 132 114 116 117 116 100 110 90 112 106
8	3	129 127 147 96 109 123 103 106 116 97 95 95 81 87 117
8	4	125 105 125 105 98 106 88 111 135 137 119 122 112 94 135
9	1	142 163 200 173 172 170 160 168 126 117 144 125 112 98 117
9	2	175 143 178 176 180 173 164 168 181 150 160 132 149 136 169
9	3	172 148 162 177 144 148 156 148 150 183 172 122 133 95 128
9	4	161 160 152 178 150 128 148 142 110 110 128 117 100 100 117
10	1	290 239 215 281 247 288 211 263 181 193 237 220 258 237 191
10	2	259 217 336 208 270 248 259 255 260 250 238 275 231 186 184
10	3	239 269 223 214 234 195 197 206 216 192 192 180 182 157 161
10	4	277 214 161 227 246 228 274 201 220 229 183 213 202 193 215
11	1	159 163 125 139 211 170 136 119 138 138 138 164 126 122 137
11	2	218 162 180 157 173 155 259 183 166 191 181 220 189 173 190
11	3	209 172 141 192 184 165 169 145 144 186 143 150 138 147 139
11	4	163 173 113 184 170 120 147 157 156 127 177 174 158 152 152
12	1	209 200 145 166 181 135 165 138 116 142 140 111 95
12	2	273 223 219 213 209 232 212 169 250 164 203 227 166 114
12	3	193 233 180 179 155 184 188 165 122 152 145 155 93 107 102
12	4	166 104 121 163 102 123 139 114 148 101 134 130 144 80
13	1	143 141 189 142 148 146 161 169 154 138 144 158 135 145 116
13	2	132 168 193 162 136 129 129 162 183 135 122 158 139 140 114
13	3	135 150 135 153 174 138 140 136 115 137 164 131 137 157 147
13	4	133 147 164 151 131 139 161 112 117 113 132 124 129 109 109

MESURES DES DIAMÈTRES APRÈS 119 JOURS DE CROISSANCE (suite)

14	1	181	139	164	193	196	154	152	135	163	138	148	150	172	151	158
14	2	164	154	138	169	118	227	174	175	241	154	174	180	127	123	130
14	3	175	167	164	170	217	151	167	154	161	152	171	164	159	150	156
14	4	152	204	217	180	133	245	177	198	180	172	187	157	154	128	132
15	1	249	190	207	235	222	191	165	215	151						
15	2	212	245	192	185	243	190	119	159	169	234					
15	3	238	158	166	224	177	190	136	202	180						
15	4	190	150	249	201	156	125	119	92	72	96	136				
16	1	179	147	150	151	150	177	171	117	111						
16	2	145	157	162	136	139	106	135	144	100	106					
16	3	159	170	150	183	130	164	148	131							
16	4	149	200	133	115	155										
17	1	224	147	218	188	191	190	181	155	144	151	157	176	151	130	149
17	2	199	146	147	143	152	99	158	178	177	147	221	119	216	160	168
17	3	178	197	198	168	182	196	141	197	166	154	130	196	170	166	134
17	4	150	144	167	214	186	156	196	141	145	143	151	144	144	128	92
18	1	204	192	221	205	226	220	204	229	179	200	205	237	200	205	200
18	2	200	169	194	160	205	206	189	160	177	146	157	163	150	129	131
18	3	243	273	281	308	263	265	277	293	243	231	222	206	198	146	203
18	4	288	236	276	230	267	194	207	196	268	280	237	195	214	184	223
19	1	66	55	85	89	74	71	76	92	64	68	79	63	78	58	68
19	2	103	81	95	93	108	100	85	78	94	95	89	78	86	84	86
19	3	70	75	75	80	119	91	69	79	82	72	67	66	69	57	55
19	4	56	75	73	58	81	67	78	64	73	73	76	64	54	81	74
20	1	78	84	71	68	82	79	72	76	94	73	84	72	57	71	75
20	2	135	116	117	106	114	121	132	136	124	96	115	94	84	127	79
20	3	88	131	113	102	99	115	104	115	88	91	96	74	73	106	83
20	4	208	180	135	147	186	160	163	135	134	148	133	104	77	106	94

F.5a MESURES DE LA BIOMASSE DES RACINES (en mg)

260	274	293	229	550	523	618	605	338	448	473	361	1233	733	698	700	555	748
1130	776	1010	932	798	435	1054	1991	1525	744	890	1674	1456	1413	2139	2908		
2217	2034	5550	6131	4968	5250	1946	3676	3428	2390	1959	3922	2620	1391	2159			
2263	2625	1910	2183	3215	3235	3390	2210	2868	1685	1700	1611	1453	1427	795			
2716	3328	3725	3043	4135	2884	7254	6010	441	740	578	478	487	1554	1100	2116		

F.5b MESURES DE LA BIOMASSE DES TIGES (en mg)

131	101	111	50	183	283	176	160	87	131	150	102	224	232	225	149	183	154	289
205	183	152	167	109	119	329	323	140	137	340	290	287	296	515	292	328	811	
1035	745	898	237	523	540	353	339	493	410	150	325	413	505	323	310	515	603	
457	324	449	225	189	212	276	223	101	359	502	548	499	625	605	1212	833	136	
240	127	128	188	328	337	255												

1: traitement 1, répétition 1
2: traitement 1, répétition 2
etc.

ANNEXE G

PHOTOGRAPHIES DE TOUS LES POTS,
REGROUPÉS PAR TRAITEMENT,
APRÈS 119 JOURS DE CROISSANCE

Notes: À la différence de tout ce qui précède,
le premier chiffre sur chaque pot correspond
à la révétition et le second au traitement.

Excepté pour la révétition 2
du traitement 17, toutes les photos ont été prises
après 119 Jours de croissance
(107 Jours pour cette exception)

Traitement 1



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 2



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 3



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 4



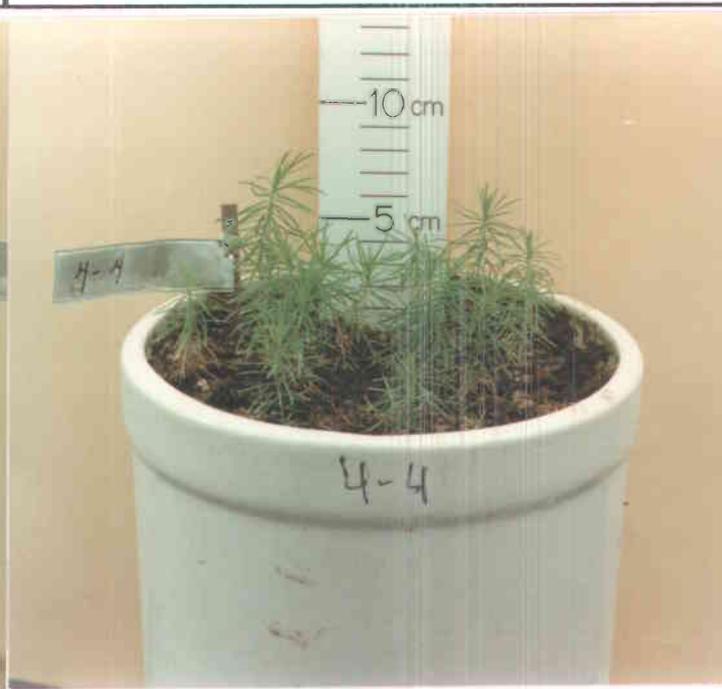
Répétition 1



Répétition 2

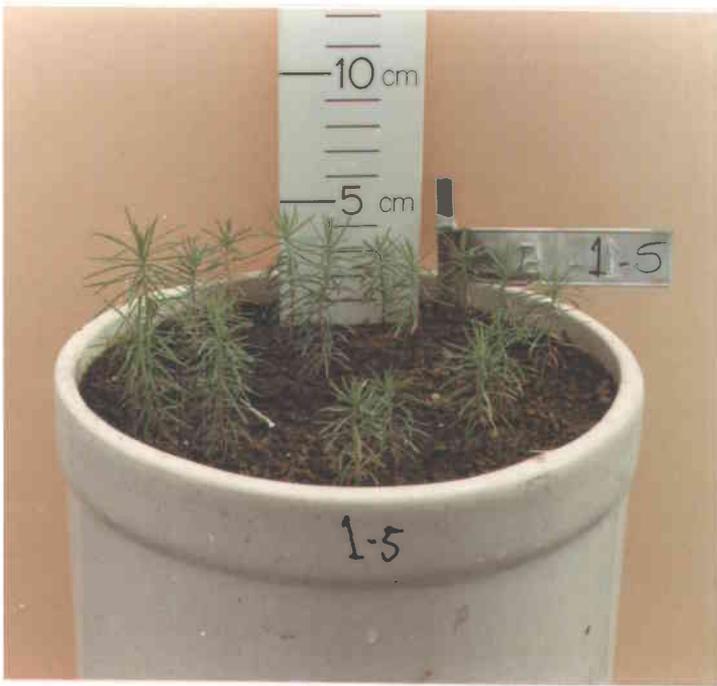


Répétition 3



Répétition 4

Traitement 5



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 6



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 7



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 8



Répétition 1

Répétition 2



Répétition 3

Répétition 4

Traitement 9



Répétition 1



Répétition 2

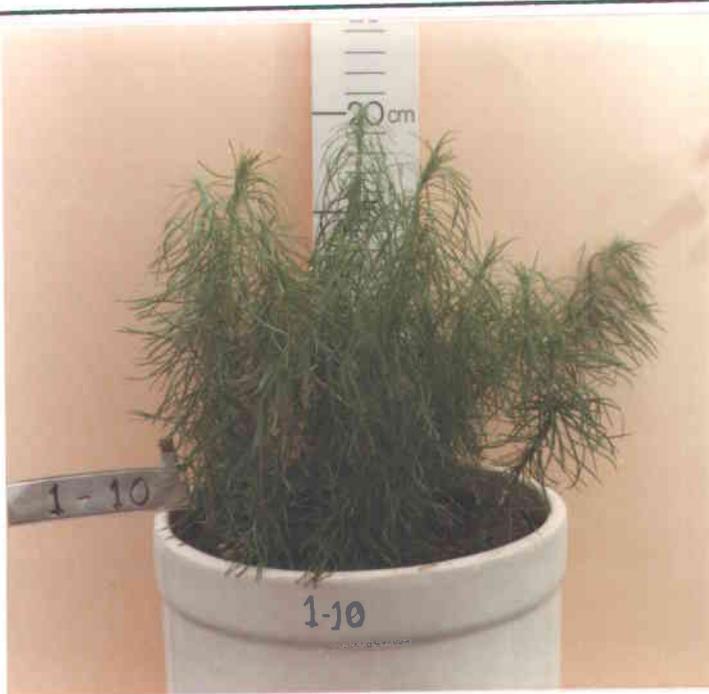


Répétition 3



Répétition 4

Traitement 10



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Photos G.37 à G.40: Les quatre répétitions du traitement 10

Traitement 11



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 12



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 13



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 14



Répétition 1

Répétition 2



Répétition 3

Répétition 4

Traitement 15



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 16



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 17



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 18



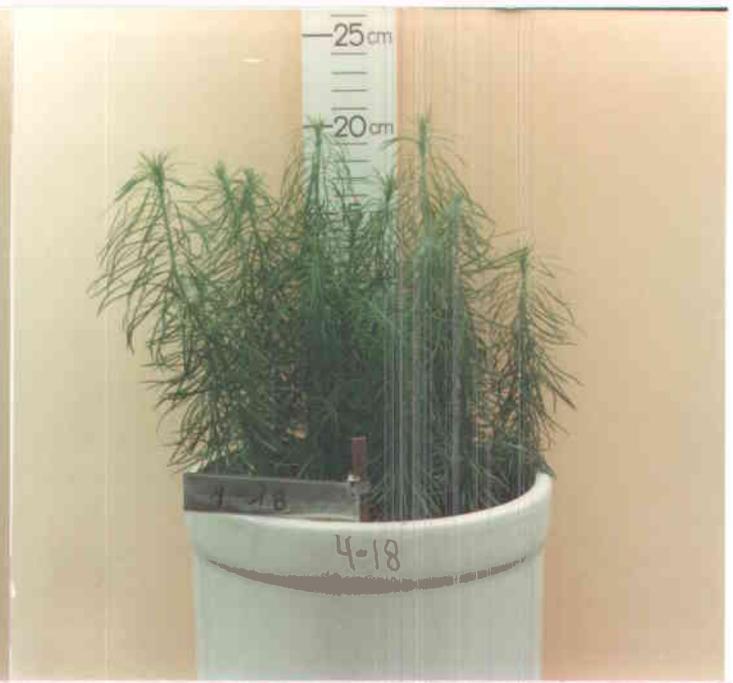
Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

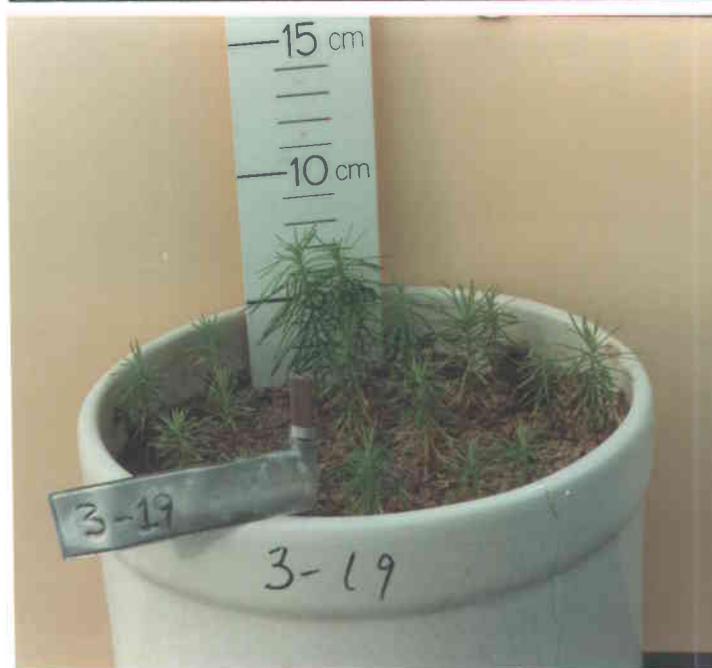
Traitement 19



Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

Traitement 20



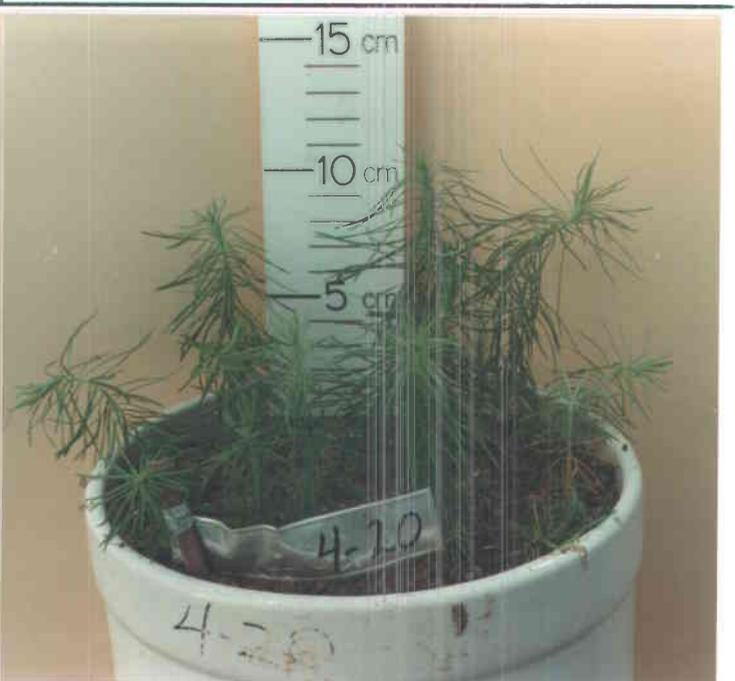
Répétition 1



Répétition 2



Répétition 3



Répétition 4

ANNEXE H

RÉGRESSIONS MULTIPLES DE CROISSANCE

H.1 RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA CROISSANCE EN HAUTEUR FINALE

ETAPE : 1

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-50.495930				
11	98.938944	7.000104	199.768	1, 57	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 77.80
 Coefficient de corrélation = 0.882
 Ecart-type de la régression = 16.974434
 Valeur de "F" avec 1, 57 dl = 199.768 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 23
 Valeur de "F" avec 2, 56 dl = 17.859 Pr[Fa<F] = 1.0000
 Pourcentage de variation expliquée par la variable = 5.37
 "O"ui ou "N"on: O

ETAPE : 2

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-39.686792				
11	57.835972	11.507197	25.261	2, 56	1.0000
23	0.019589	0.004635	17.859	2, 56	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 83.17
 Coefficient de corrélation = 0.912
 Ecart-type de la régression = 14.911825
 Valeur de "F" avec 2, 56 dl = 138.356 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 9
 Valeur de "F" avec 3, 55 dl = 8.228 Pr[Fa<F] = 0.9997
 Pourcentage de variation expliquée par la variable = 2.19
 "O"ui ou "N"on: N

+++++ ANALYSE DE VARIANCE +++++

Source de variation	dl	Somme des carrés	Variance	"F"	Pr[Fa<F]
Totale	58	73982.8722			
Régression	2	61530.5716	30765.2858	138.356	1.000
Résidus	56	12452.3006	222.3625		

Matrice de covariance des coefficients

78.300059		
-75.583421	132.415586	
0.011856	-0.045083	0.000021

a: pour la signification du numéro de la variable, référer à l'annexe 1

H.2 RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA CROISSANCE EN DIAMÈTRE

ETAPE : 1

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-30.789144				
11	111.082789	8.387207	175.412	1 , 57	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 75.47
 Coefficient de corrélation = 0.869
 Ecart-type de la régression = 20.337997
 Valeur de "F" avec 1 , 57 dl = 175.412 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 23
 Valeur de "F" avec 2 , 56 dl = 17.644 Pr[Fa<F] = 1.0000
 Pourcentage de variation expliquée par la variable = 5.88
 "O"ui ou "N"on: 0

ETAPE : 2

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-17.897495				
11	62.060838	13.807498	20.203	2 , 56	1.0000
23	0.023363	0.005562	17.644	2 , 56	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 81.35
 Coefficient de corrélation = 0.902
 Ecart-type de la régression = 17.892714
 Valeur de "F" avec 2 , 56 dl = 122.139 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 9
 Valeur de "F" avec 3 , 55 dl = 26.139 Pr[Fa<F] = 1.0000
 Pourcentage de variation expliquée par la variable = 6.01
 "O"ui ou "N"on: 0

ETAPE : 3

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	8.565366				
9	0.354440	0.069326	26.139	3 , 55	1.0000
11	27.095069	13.354822	4.116	3 , 55	0.9894
23	0.024221	0.004624	27.442	3 , 55	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 87.36
 Coefficient de corrélation = 0.935
 Ecart-type de la régression = 14.864635
 Valeur de "F" avec 3 , 55 dl = 126.692 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 7
 Valeur de "F" avec 4 , 54 dl = 15.970 Pr[Fa<F] = 1.0000
 Pourcentage de variation expliquée par la variable = 2.89
 "O"ui ou "N"on: N

RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA CROISSANCE EN DIAMÈTRE (suite)

+++++ ANALYSE DE VARIANCE +++++

Source de variation	dl	Somme des carrés	Variance	"F"	Pr[F < F]
Totale	58	96133.4454			
Régression	3	83980.7897	27993.5966	126.692	1.000
Résidus	55	12152.6557	220.9574		

Matrice de covariance des coefficients

104.595566				
0.358825	0.004806			
-110.504210	-0.474121	178.351276		
0.012650	0.000012	-0.045947	0.000021	

H.3 RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA MASSE RACINAIRE

ETAPE : 1

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[F<F]
Constante	-32.355977				
23	0.133789	0.013879	92.919	1, 57	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 61.98
 Coefficient de corrélation = 0.787
 Ecart-type de la régression = 83.552107
 Valeur de "F" avec 1, 57 dl = 92.919 Pr[F<F] = 1.0000

Variable choisie = 13

Valeur de "F" avec 2, 56 dl = 12.622 Pr[F<F] = 0.9999

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 6.99
 "O"ui ou "N"on: 0

ETAPE : 2

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[F<F]
Constante	37.532706				
13	-0.541477	0.152414	12.622	2, 56	0.9999
23	0.145053	0.013041	123.720	2, 56	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 68.97
 Coefficient de corrélation = 0.830
 Ecart-type de la régression = 76.149080
 Valeur de "F" avec 2, 56 dl = 62.243 Pr[F<F] = 1.0000

Variable choisie = 39

Valeur de "F" avec 3, 55 dl = 7.741 Pr[F<F] = 0.9996

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 3.83

"O"ui ou "N"on: 0

ETAPE : 3

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[F<F]
Constante	-153.345473				
13	-0.512420	0.144372	12.598	3, 55	1.0000
23	0.122931	0.014663	70.285	3, 55	1.0000
39	0.557780	0.200477	7.741	3, 55	0.9996

Pourcentage de variation expliquée = 72.80
 Coefficient de corrélation = 0.853
 Ecart-type de la régression = 71.942051
 Valeur de "F" avec 3, 55 dl = 49.070 Pr[F<F] = 1.0000

Variable choisie = 24

Valeur de "F" avec 4, 54 dl = 9.754 Pr[F<F] = 1.0000

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 4.16

"O"ui ou "N"on: 0

RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA MASSE RACINAIRE (suite)

ETAPE : 4

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-207.196235				
13	-0.501687	0.134138	13.988	4 , 54	1.0000
23	0.094300	0.016417	32.992	4 , 54	1.0000
24	0.048484	0.015524	9.754	4 , 54	1.0000
39	0.665941	0.189398	12.363	4 , 54	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 76.96

Coefficient de corrélation = 0.877

Ecart-type de la régression = 66.820585

Valeur de "F" avec 4 , 54 dl = 45.099 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 31

Valeur de "F" avec 5 , 53 dl = 4.827 Pr[Fa<F] = 0.9987

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 1.92

*O*ui ou *N*on: N

+++++ ANALYSE DE VARIANCE +++++

Source de variation	dl	Somme des carrés	Variance	"F"	Pr[Fa<F]
------------------------	----	---------------------	----------	-----	----------

Totale	58	1046576.6780			
Régression	4	805467.1844	201366.7961	45.099	1.000
Résidus	54	241109.4935	4464.9906		

+++++

Matrice de covariance des coefficients

5361.619121

-2.986059

0.398013

-0.267673

-12.462343

0.017993

-0.000475

0.000053

0.001925

0.000270

-0.000142

-0.001693

0.000241

0.000538

0.035872

H.4 RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA MASSE FOIAIRE

ETAPE : 1

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-997.953407				
23	1.112254	0.080750	189.726	1, 57	1.0000

Pourcentage de variation expliquée = 76.90

Coefficient de corrélation = 0.877

Ecart-type de la régression = 486.101846

Valeur de "F" avec 1, 57 dl = 189.726 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 39

Valeur de "F" avec 2, 56 dl = 7.989 Pr[Fa<F] = 0.9988

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 2.88

"O"ui ou "N"on: 0

ETAPE : 2

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-2207.081407				
23	0.973219	0.090708	115.113	2, 56	1.0000
39	3.604104	1.275128	7.989	2, 56	0.9988

Pourcentage de variation expliquée = 79.78

Coefficient de corrélation = 0.893

Ecart-type de la régression = 458.788349

Valeur de "F" avec 2, 56 dl = 110.489 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 34

Valeur de "F" avec 3, 55 dl = 8.895 Pr[Fa<F] = 0.9998

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 2.81

"O"ui ou "N"on: 0

ETAPE : 3

Variables	Coefficients	Ecart-type du coefficient	Valeur de "F"	dl	Pr[Fa<F]
Constante	-2047.100011				
23	0.791111	0.104593	57.210	3, 55	1.0000
34	21.010632	7.044763	8.895	3, 55	0.9998
39	3.693197	1.194127	9.565	3, 55	0.9999

Pourcentage de variation expliquée = 82.60

Coefficient de corrélation = 0.909

Ecart-type de la régression = 429.509713

Valeur de "F" avec 3, 55 dl = 87.009 Pr[Fa<F] = 1.0000

Variable choisie = 13

Valeur de "F" avec 4, 54 dl = 9.116 Pr[Fa<F] = 0.9999

Pourcentage de variation expliquée par la variable = 2.51

"O"ui ou "N"on: N

RÉGRESSION MULTIPLE POUR LA MASSE FOLIATRE (suite)

+++++ ANALYSE DE VARIANCE +++++

Source de variation	dl	Somme des carrés	Variance	"F"	Pr[F<F]
Totale	58	58300227.5254			
Régression	3	48153904.8567	16051301.6189	87.009	1.000
Résidus	55	10146322.6687	184478.5940		

+++++

Matrice de covariance des coefficients

192434.985214				
3.654148	0.010940			
377.888015	-0.430151	49.628682		
-476.481252	-0.056798	0.210444	1.425938	

ANNEXE I

ANALYSES DES MÉTAUX LOURDS
DANS LES TISSUS ET LES SOLS

I.1 ANALYSES DES MÉTAUX LOURDS DANS LES TISSUS VÉGÉTAUX

No de traitement	No de répétition	Tissus	CONCENTRATION DU MÉTAL (en $\mu\text{g/g}$)			
			Cd	Cr	Ni	Pb
1	1	tiges	0.096	1.251	2.501	sd
1	2	tiges	0.100	1.102	4.008	sd
1	3	tiges	0.101	1.010	5.555	sd
1	4	tiges	0.143	0.916	5.090	sd
15	1	tiges	0.081	0.806	2.117	sd
15	2	tiges	0.117	1.076	1.565	sd
15	3	tiges	0.101	1.210	1.512	sd
15	4	tiges	0.080	0.996	1.195	sd
2	4	racines	0.120	2.510	2.988	sd
15	1	racines	0.355	2.169	5.423	sd
15	2	racines	0.279	5.489	5.589	0.499
15	3	racines	0.364	2.020	6.262	0.202
15	4	racines	0.476	3.010	4.264	sd

I.2 ANALYSES DES MÉTAUX LOURDS DANS LES SOLS

No de traitement	No de répétition	Profil	CONCENTRATION DES MÉTAUX ADSORBÉS (en mg/g)			
			Cd	Cr	Ni	Pb
1	1	S	0.010	sd	sd	0.26
1	2	S	0.012	35	1.3	0.40
1	3	S	0.009	23	1.4	0.31
1	4	S	0.010	22	1.5	0.39
15	1	S	0.014	16	1.4	0.28
15	2	S	0.012	23	2.0	0.26
15	3	S	0.012	28	1.9	0.35
15	4	S	0.010	23	2.2	0.29
1	1	I	0.009	15	1.3	0.33
1	2	I	0.010	21	1.6	0.33
1	3	I	0.009	31	sd	0.33
1	4	I	0.009	20	sd	0.35
15	1	I	0.008	26	1.0	0.45
15	2	I	0.008	13	sd	0.35
15	3	I	0.008	27	1.7	0.32
15	4	I	0.009	26	1.0	0.39
21	-	S	0.010	42	2.2	0.10
22	-	S	0.010	36	1.9	0.16
23	-	S	0.009	35	2.8	0.10
24	-	S	0.009	34	2.0	0.09
25	-	S	0.009	24	1.8	0.09
21	-	I	0.008	28	2.1	0.09
22	-	I	0.008	28	2.4	0.09
23	-	I	0.008	19	1.4	0.09
24	-	I	0.009	23	2.2	0.10
25	-	I	0.009	17	sd	0.10

S: profil supérieur
 I: profil inférieur
 sd: sous le seuil de detection de l'appareil